

Actualités-Documents

L'énergie nucléaire

données techniques
économiques
écologiques

DELEGATION GENERALE A L'INFORMATION
AVRIL 1975

NOTE AU LECTEUR

Ce dossier d'information a pour objet de présenter dans leur ensemble les différents aspects de l'énergie nucléaire et les données économiques, industrielles, écologiques qui ont conduit à l'élaboration du programme français d'énergie nucléaire, au choix des techniques et aux modes de sélection des sites d'implantation.

Réalisé avec la collaboration des experts des différents services publics intéressés, ce document s'efforce de faire l'inventaire des questions soulevées et de leur apporter des réponses.

N.B. Certaines notions et certains termes utilisés dans ce dossier ont inévitablement un caractère technique avec lequel tous les lecteurs peuvent ne pas être familiarisés. Pour une meilleure compréhension du sujet, ces données sont précisées dans un lexique final et dans des annexes techniques auxquels le lecteur peut se référer facilement dès maintenant et pendant la lecture du dossier.

SOMMAIRE

| | |
|---|----|
| INTRODUCTION | 7 |
| LE DEVELOPPEMENT DE L'ELECTRICITE NUCLEAIRE : UN EFFORT MONDIAL | 9 |
| <i>LE DEVELOPPEMENT DES PROGRAMMES A L'ETRANGER</i> | 11 |
| L'expérience des Etats-Unis | 11 |
| Les efforts de l'Europe Occidentale | 12 |
| — Les nouveaux choix britanniques | 12 |
| — L'accélération du programme allemand | 13 |
| — Les efforts des autres pays européens | 14 |
| Les progrès dans le reste du monde | 15 |
| — La filière canadienne de l'eau lourde | 15 |
| — Le programme japonais | 16 |
| — Les progrès de l'URSS | 17 |
| — Les pays en voie de développement | 18 |
| L'essor des échanges internationaux en matière nucléaire | 18 |
| <i>LE PROGRAMME FRANÇAIS, NOUVELLE ETAPE D'UNE LONGUE EXPERIENCE</i> | 20 |
| L'acquis français | 20 |
| — La France, pays prospecteur et producteur d'uranium | 20 |
| — Des centres d'études et de recherches nucléaires avancées | 22 |
| — Un potentiel de production électro-nucléaire en développement régulier | 23 |
| Le choix des filières | 24 |
| — La filière à uranium naturel-graphite-gaz | 24 |
| — L'adoption des filières à eau ordinaire | 25 |
| Le programme électro-nucléaire français | 26 |

| | |
|---|----|
| LE PROGRAMME ELECTRO-NUCLEAIRE FRANÇAIS : UN CHOIX RAISONNE | 29 |
| UNE DEPENDANCE EXCESSIVE A L'EGARD DU PETROLE | 31 |
| Le poids du pétrole dans le bilan énergétique français | 31 |
| La croissance prévisible des besoins énergétiques | 32 |
| — L'importance des besoins | 32 |
| — L'incidence des économies d'énergie | 33 |
| La recherche systématique d'une diversification des approvisionnements | 34 |
| — La diversification des importations | 34 |
| — Le développement des ressources du territoire | 34 |
| — Les possibilités des nouvelles sources d'énergie | 36 |
| Le développement de l'énergie nucléaire | 38 |
| — Le secteur domestique | 38 |
| — Le secteur industriel | 39 |
| — Les nouvelles techniques | 40 |
| LES ATOUTS DE L'ENERGIE NUCLEAIRE | 42 |
| Des avantages économiques | 42 |
| — La compétitivité de l'électricité nucléaire | 43 |
| — L'ouverture de nouveaux débouchés à l'exportation | 44 |
| — Un approvisionnement relativement sûr et bon marché | 44 |
| Un approvisionnement diversifié | 45 |
| Les perspectives d'avenir | 46 |
| — L'utilisation possible de la chaleur nucléaire | 46 |
| — La surrégénération | 46 |
| — Les réacteurs à haute température | 47 |
| — Les réacteurs à sels fondus | 48 |
| — Les recherches sur la fusion thermonucléaire | 49 |
| — L'hydrogène | 49 |
| LA REALISATION DU PROGRAMME FRANÇAIS | 50 |
| LES PROBLEMES D'ENVIRONNEMENT ET DE LOCALISATION | 52 |
| La sûreté des installations nucléaires | 52 |
| — Les centrales nucléaires | 53 |
| — La sûreté des réacteurs en exploitation | 53 |
| — La sûreté contre les risques d'origines extérieures | 54 |
| — Le déclassement futur des centrales nucléaires périmées | 55 |
| — Le traitement des déchets radio-actifs | 56 |
| — Le transport des matières radio-actives | 58 |
| — Le contrôle de la sûreté : | |
| ● une réglementation précise et complète | 59 |
| ● les responsabilités du constructeur et et de l'exploitant | 60 |
| ● le rôle de la protection civile | 60 |

| | |
|--|--------|
| Les conséquences pour la santé publique et la radio-protection | 61 |
| — Les effluents radio-actifs | 61 |
| — Les effets biologiques | 62 |
| ● Cancers et leucémies | 63 |
| ● Mortalité infantile | 63 |
| ● Concentration biologique de la radio-activité | 64 |
| — L'organisation de la radio-protection | 64 |
| Les risques de pollutions et les nuisances | 66 |
| — Les rejets de chaleur | 66 |
| — La récupération de la chaleur perdue | 68 |
| — Les autres pollutions et nuisances | 69 |
| La sélection des sites des centrales | 70 |
| — Les critères de choix des sites | 70 |
| — Les incidences locales des centrales nucléaires | 72 |
| — Les modalités du choix des sites | 73 |
| — Le choix des sites | 74 |
| <i>L'ORGANISATION DE L'INDUSTRIE NUCLEAIRE</i> | 76 |
| L'industrie du combustible nucléaire | 76 |
| — L'industrie minière française de l'uranium | 76 |
| — La fabrication des éléments combustibles | 78 |
| — Le retraitement des combustibles irradiés | 79 |
| L'enrichissement de l'uranium | 80 |
| — La situation du marché | 80 |
| — La diversification des sources d'approvisionnement | 81 |
| — La création d'une industrie européenne | 82 |
| L'industrie des réacteurs | 84 |
| — La construction des réacteurs à eau légère | 85 |
| — L'organisation industrielle des filières de l'avenir | 86 |
| Le financement du programme électro-nucléaire | 88 |
| Le développement de la coopération européenne | 89 |
| — Les organisations nucléaires européennes | 89 |
| — L'élaboration de règles communes de développement | 90 |
| ANNEXE N° 1 Données générales sur l'énergie nucléaire | 93 |
| ANNEXE N° 2 Le fonctionnement d'une centrale nucléaire et les différents types de réacteurs (filières) | 98 |
| ANNEXE N° 3 L'uranium | 105 |
| ANNEXE N° 4 Evolution du bilan de l'énergie primaire en France | 107 |
| LEXIQUE | 109 |
| BIBLIOGRAPHIE | 115 |

INTRODUCTION

DANS les principaux pays du monde, à l'Est comme à l'Ouest, une impulsion est apportée aux programmes de développement électro-nucléaire, lancés pour la plupart au cours de la précédente décennie. Les objectifs se précisent, les industries s'organisent, la recherche scientifique et technique s'intensifie, tandis que s'accélèrent les étapes des calendriers.

Des pays en voie de développement, eux-mêmes, commencent à se doter d'une infrastructure nucléaire, soit par l'implantation d'une activité industrielle propre, soit en passant des contrats d'importation.

L'avènement de l'énergie nucléaire dans la vie économique s'inscrit dans un contexte international, psychologique et social fondamentalement différent de celui qui avait marqué les précédentes étapes de l'histoire énergétique.

Ce contexte résulte de la rencontre de trois phénomènes majeurs, aujourd'hui étroitement liés, qui conditionnent l'orientation et la mise en œuvre de l'ensemble des programmes nucléaires : la crise mondiale de l'énergie ; l'ampleur croissante des préoccupations écologiques ; par une prise de conscience de l'opinion publique.

La crise mondiale de l'énergie

La relève du pétrole par l'énergie nucléaire dont la technologie arrivait à maturité était prévisible depuis longtemps. Cependant, ce sont les décisions prises par les pays exportateurs de pétrole en octobre et décembre 1973 à Koweït et Téhéran, aboutissant au quadruplement des prix qui, en modifiant radicalement les données économiques des Etats importateurs, tributaires des hydrocarbures pour la plus grande part de leur approvisionnement en énergie, ont précipité l'évolution.

Le déficit des balances commerciales, la perspective d'une dépendance énergétique croissante, les nouveaux avantages de l'électricité nucléaire résultant de cette situation, expliquent le regain d'intérêt pour les programmes atomiques civils.

Les préoccupations écologiques

Déjà, le développement de l'utilisation du pétrole a engendré de nombreuses préoccupations relatives à la protection de l'environnement. Parallèlement la nouvelle industrie nucléaire a recherché un ensemble de mesures de sécurité et de protection du milieu, sans précédent dans l'histoire industrielle.

La sécurité et la protection de l'environnement sont aujourd'hui des critères majeurs pour le choix des sites des centrales nucléaires, et pour la définition de grands programmes, aux Etats-Unis comme en Europe.

Ce souci, sans équivalent dans les autres industries est bien antérieur à la récente prise de conscience collective des dangers de la pollution et de ses conséquences éventuelles pour la santé et la qualité de la vie.

Une prise de conscience collective

Le développement industriel accéléré, depuis la dernière guerre mondiale, et les progrès de l'éducation et de l'information du public, se sont conjugués pour modifier le contexte des décisions industrielles. La crise énergétique mondiale et son ampleur actuelle, viennent ajouter une dimension nouvelle aux préoccupations de l'opinion. Le public tend aujourd'hui à appréhender le problème global de l'énergie aussi bien sous l'angle de l'indépendance économique et de la garantie du niveau de vie, que du point de vue de la protection de l'environnement.

En France, au terme d'un sondage réalisé du 7 au 14 août 1974, les personnes interrogées se sont dans leur grande majorité déclarées favorables au développement de l'industrie nucléaire dont elles pressentent les « conséquences bénéfiques pour le confort des Français et le prix de l'énergie en général ».

Toutefois, cette prise de conscience de la nécessité du choix électro-nucléaire s'accompagne d'une crainte quant à ses effets éventuels sur l'environnement.

L'opinion publique est sensibilisée au problème mondial de l'énergie. Elle en perçoit les impératifs et les risques. Elle croit dans l'ensemble, à l'avenir de l'électricité nucléaire et à la nécessité de sa substitution au pétrole. Mais elle s'estime encore insuffisamment informée des aspects humains, écologiques et techniques du développement électro-nucléaire. C'est pour tenir compte de ces données que les pouvoirs publics, en France comme dans les autres pays du monde, ont décidé d'ouvrir très largement ce dossier.

**LE DEVELOPPEMENT
DE L'ELECTRICITE NUCLEAIRE :
UN EFFORT MONDIAL**

Le programme électro-nucléaire français n'est pas le seul dans le monde. Afin de mieux en éclairer les raisons et les conditions de réalisation, il est utile, au préalable, de le replacer dans son contexte international et historique, en le situant par rapport aux principaux projets étrangers.

Au cours du dernier quart de siècle, la primauté du pétrole dans le bilan énergétique mondial n'a pas empêché l'ensemble des pays industrialisés de préparer l'avènement de l'industrie nucléaire.

La production électro-nucléaire nette du monde occidental, inférieure à 3 milliards de kWh en 1960, atteignait déjà près de 70 milliards de kWh en 1970 et s'est élevée à plus de 200 milliards de kWh en 1974. Elle atteindra 1 000 milliards de kWh en 1978.

Multipliée par trente-cinq en une douzaine d'années, elle ne représente pourtant encore que moins de 2 % de la production mondiale d'électricité, mais elle va connaître maintenant une progression qui lui assurera rapidement une part importante de la couverture des besoins énergétiques.

Alors que la crise énergétique actuelle frappe les économies occidentales, les infrastructures déjà mises en place dans les principaux pays du monde doivent, en effet, leur permettre, à moyen terme, d'ouvrir la voie au relais nucléaire.

Les données nouvelles du marché de l'énergie expliquent le phénomène mondial auquel on assiste aujourd'hui : l'intensification, de la part de nombreux pays, de leurs efforts pour développer d'importants programmes électro-nucléaires, la multiplication des accords de coopération et la croissance sensible d'échanges internationaux dans le domaine nucléaire.

Même s'il ne peut être exhaustif, le rappel de la situation à l'étranger qui est fait ci-après montre le sens de l'évolution générale.

LE DEVELOPPEMENT DES PROGRAMMES A L'ETRANGER

L'EXPERIENCE DES ETATS-UNIS

Le programme américain occupe sans conteste la première place dans le monde, du point de vue du potentiel de production d'électricité nucléaire, comme sur le plan général de l'avance technologique.

Selon le dernier rapport au Congrès — rapport annuel 1974 — de l'U.S. Atomic Energy Commission (Commission Américaine de l'Energie Atomique), les Etats-Unis disposaient à la fin de 1974, de 219 réacteurs nucléaires (1) à eau ou à gaz — en commande (93), en construction (73) ou en état de marche (53) — représentant une puissance totale nette installée de 215 000 MWe (2). La quasi-totalité de ces réacteurs est à eau ordinaire, dont deux tiers à eau sous pression (Pressurized Water Reactors ou PWR), et les autres à eau bouillante (Boiling Water Reactors ou BWR) (3). La production d'électricité d'origine nucléaire a été en 1974 de 124 TWh soit les deux tiers de la production française cette même année. Vers 1985, la puissance électro-nucléaire installée des Etats-Unis pourrait être de l'ordre de 260 000 MWe selon l'hypothèse moyenne retenue par l'U.S. Atomic Energy Commission.

C'est, de loin, le programme le plus avancé du monde. Le rôle de l'atome dans la défense nationale pendant la dernière guerre, l'importance du budget militaire américain, le poids économique du pays, son avance scientifique et technologique, expliquent largement cette situation. A ces facteurs, s'est ajoutée, jusqu'à présent, une position de quasi-monopole dans le domaine de l'enrichissement de l'uranium nécessaire au fonctionnement des réacteurs à eau ordinaire, filière choisie par la majorité des pays.

La structure fédérale et décentralisée de l'Etat et le nombre élevé de sociétés privées de production électrique, rendent parfois difficiles les décisions à prendre. La pression de certains groupes d'intérêt, le souci de protéger l'environnement et, récemment, les problèmes de crédit et la diminution du taux de croissance des besoins en électricité, ont contribué à allonger les délais de construction des centrales nucléaires qui sont passés de cinq à huit ans en moyenne.

Les procédures d'attribution de permis sont parallèlement devenues plus précises afin d'évaluer aussi complètement que possible l'impact sur l'environnement des centrales envisagées.

(1) Voir l'Annexe 1, pour les données techniques générales sur l'énergie nucléaire, et l'Annexe 3 sur les différents types de réacteurs.

(2) Les puissances installées sont exprimées en kilo-watt électriques (kWe), ou en mega-watts électriques (MWe) (1 kWe = 1000 watts; 1 MWe = 1000 kWe).

(3) A la même date, en France, la puissance électro-nucléaire représentait 3000 MWe et la puissance totale électrique installée 40 000 MWe (tous types d'équipements confondus), approximativement.

Ce contexte explique le retard relatif actuellement pris par les Etats-Unis dans le domaine de la filière à neutrons rapides (1), pour laquelle un programme considérable avait pourtant été mené à bien en vingt cinq ans avec la réalisation de plus de réacteurs et d'installations d'essais que dans n'importe quel autre pays. L'US-AEC n'en est pas moins décidée à accélérer le développement des réacteurs surrégénérateurs rapides à sodium ou LMFBFR (Liquid Metal-Cooled Fast Breeder Reactors), dont la pénétration commerciale sur le marché devrait, selon les prévisions actuelles, s'effectuer vers 1986.

En même temps, la recherche américaine accorde une importance accrue aux réacteurs rapides à gaz et aux surrégénérateurs thermiques à sels fondus.

Les réacteurs à gaz à haute température font également l'objet d'un programme de développement. Les résultats du fonctionnement du prototype de 300 MWe de Fort-Saint-Vrain dans le Colorado, contribueront à déterminer le rythme futur de leur progression.

Le programme électro-nucléaire américain est donc à la fois globalement important et technologiquement diversifié. Il doit permettre à l'électricité nucléaire de jouer un rôle massif dans l'économie du pays à partir des années 80.

Une telle progression explique les prévisions corrélatives d'accroissement des besoins dans le domaine de l'enrichissement de l'uranium(2), qui seraient au moins multipliés par cinq entre 1980 et l'an 2000.

Essentiellement couverts jusqu'à présent par les trois usines de Paducah, Portsmouth et Oakridge, qui ont approvisionné le monde entier en uranium enrichi, ces besoins réclament de nouveaux investissements pour l'avenir : le développement nucléaire américain entre 1980 et l'an 2000 exigerait une capacité supplémentaire d'enrichissement évaluée à environ 130 millions d'unités de travail de séparation isotopique (UTS). Pour une valeur moyenne — correspondant à une prévision raisonnable — de 120 dollars par UTS installée, les investissements requis sur vingt ans s'élèveraient donc à près de 16 milliards de dollars actuels (compte non tenu de la construction des centrales électriques nécessaires à l'alimentation en énergie de ces usines).

LES EFFORTS DE L'EUROPE OCCIDENTALE

Confrontés à la crise pétrolière mondiale, la plupart des pays européens ont décidé, eux aussi, d'accélérer leurs plans de développement nucléaire dont certains, lancés de longue date, ont largement atteint le stade des réalisations industrielles.

Outre la Suède, qui développe un programme particulier, ce sont les pays de l'Europe des Neuf qui ont engagé les investissements les plus importants.

L'année 1974 aura vu, pour la plupart d'entre eux, sonner l'heure des choix. Des prévisions de production sont établies à échéances précises, des options concernant les filières sont arrêtées, des contrats internationaux sont passés. Mais les projets diffèrent parfois sensiblement d'un pays à l'autre.

Les nouveaux choix britanniques

La Grande-Bretagne est, avec la France, le pays d'Europe dont l'expérience nucléaire est la plus ancienne. Elle est aussi celui dont les programmes ont connu le plus de changements et de soubresauts.

Après avoir opté, tout au début, pour la filière dite « Magnox » à uranium naturel-graphite-gaz, le Royaume-Uni a mis au point, en 1956, le réacteur AGR (Advanced

(1) Voir l'Annexe 2 pour la description des divers types de réacteurs (filières).

(2) Voir l'Annexe 3 concernant l'uranium, pour des détails sur les techniques d'enrichissement de l'uranium.

Gas-Cooled Reactor). Un potentiel de l'ordre de 6 000 MWe est aujourd'hui en cours de réalisation dans cette filière, dont la mise au point technique a soulevé beaucoup de difficultés et dont les résultats commerciaux à l'exportation ne semblent pas encore avoir répondu aux espoirs de l'industrie britannique.

C'est pourquoi, en septembre 1974, compte tenu du contexte énergétique mondial, le « Nuclear Power Advisory Board » (NPAB) rendait public un rapport préconisant, pour le futur programme d'équipement du pays, la filière à eau lourde SGHWR (Steam Generating Heavy Water Reactor). Sans exclure un recours ultérieur à l'eau ordinaire, filière éprouvée aux Etats-Unis et dans la plupart des pays du monde, le gouvernement britannique a donné pour l'immédiat la préférence à ce type de réacteur.

Ce choix suppose l'abandon définitif de la filière Magnox, et celui du programme AGR dont les réalisations en cours doivent toutefois être menées à leur terme.

Il implique une coopération étroite avec l'industrie canadienne dont la technologie des filières à eau lourde est la plus avancée du monde. Le Canada fournira l'eau lourde à la Grande-Bretagne en attendant le jour où celle-ci construira sa propre usine lui permettant d'assurer son approvisionnement.

Le gouvernement anglais justifie cette décision par les avantages économiques, la réussite commerciale et la fiabilité technique (1) de la filière canadienne, considérée Outre-Manche comme plus rapide à mettre en œuvre tout en présentant de bonnes garanties de sécurité.

Le programme SGHWR demeure toutefois limité à l'échelle réduite des prévisions de production. Deux réacteurs, d'une puissance relativement modeste, de l'ordre de 600 à 660 MWe sont prévus et l'industrie britannique n'envisage pas d'installer plus de 4 000 MWe au cours des quatre prochaines années.

Les résultats de la prospection sous-marine de pétrole dans la Mer du Nord, et l'importance des réserves de charbon dont dispose le pays ne sont pas étrangers à cette décision.

Les Anglais n'en poursuivent pas moins leurs efforts dans le domaine de filières qui pourraient se révéler intéressantes dans l'avenir (réacteurs à haute température et surtout réacteurs à neutrons rapides pour lesquels le prototype PFR (Prototype Fast Reactor) poursuit ses essais de montée en puissance).

L'accélération du programme allemand

Moins ancien qu'au Royaume-Uni, le développement électro-nucléaire en République Fédérale Allemande n'en est que plus spectaculaire.

Les recherches atomiques, Outre-Rhin, n'ont pratiquement débuté qu'en 1956.

Le premier réacteur, à eau bouillante, de 16 MWe seulement, démarrait en 1961 à Kahl. Aujourd'hui sont en construction des réacteurs de 1 200 MWe parmi les plus grands du monde (un étant déjà en service à Biblis).

Dès les années soixante, la République Fédérale a orienté ses efforts vers la mise au point de prototypes de construction allemande. Aujourd'hui, la Société KWU (Kraftwerk Union Aktiengesellschaft) qui offre des centrales nucléaires dans le monde entier, est un des premiers constructeurs européens. Cette société résulte de la fusion, le 1^{er} avril 1969, des départements de Siemens et de AEG Telefunken, spécialisés dans la fabrication des centrales, turbines et générateurs (2). L'objet de KWU est de proposer notamment sur le marché les filières PWR et BWR.

(1) A Winfrith, un prototype de 100 MWe fonctionnant dans les mêmes conditions qu'une unité commerciale, avait fourni aux Anglais, au cours des six dernières années, une preuve de la bonne marche de cette filière.

(2) Depuis, la Société AEG a annoncé son intention de se retirer du groupement.

Face à la crise actuelle de l'énergie et malgré ses ressources en charbon, le gouvernement allemand a décidé d'accélérer son programme. La puissance installée sous forme d'électricité nucléaire devra atteindre, selon les projets actuels, 50 000 MWe en 1985, capacité comparable à celle envisagée dans le programme français.

Ceci correspondrait ainsi à 45 % de la production allemande d'électricité et 15 % de la consommation nationale d'énergie.

Outre les cinq centrales atomiques actuellement en service et les dix en construction, vingt cinq nouvelles unités seraient donc mises en service d'ici dix ans.

L'effort allemand concerne également le domaine des réacteurs à neutrons rapides pour lesquels de nombreuses études ont été menées, en coopération avec la Belgique et les Pays-Bas, depuis 1960, notamment au Centre de recherches de Karlsruhe.

L'Allemagne a d'ailleurs pris une participation de 16 % dans le projet de surrégénérateur Super-Phénix de 1 300 MWe qui sera construit en France, (France 51 % - Italie 33 %). Elle a entrepris des études pour la construction, sur son territoire, d'un surrégénérateur de cette importance dans lequel elle aurait cette fois 51 %, l'Italie 33 % et la France 16 %.

L'Allemagne poursuit également un important effort dans le domaine des réacteurs à haute température, avec en vue en particulier, l'application directe à certains processus industriels. Un petit réacteur de démonstration (AVR) est en service, un prototype de 300 MWe (THTR) est en construction.

Les efforts des autres pays européens

La plupart des autres pays européens se sont lancés également dans des programmes de développement nucléaire.

La Suède

Parmi eux, la Suède a atteint le stade de l'autonomie industrielle dans la technique à eau bouillante : la Société ASEA-ATOM est aujourd'hui l'un des grands constructeurs européens de centrales nucléaires de ce type. En revanche, les usines à eau pressurisée ont été réalisées sous licence Westinghouse.

Trois tranches sont déjà en exploitation et six en construction (à Ringhals, Oskarshamn, Barseback, Forsmark). Le Gouvernement propose actuellement une relance du programme électro-nucléaire.

La Suède étudie en particulier très attentivement l'intérêt de centrales mixtes électricité-chauffage urbain.

L'Italie

Après avoir pris un bon départ au début des années soixante, qui l'avait presque placée en tête des nations européennes pour les centrales à eau ordinaire, son programme a marqué le pas. A la fin de l'année 1972, ce pays ne disposait encore que de deux réacteurs à eau légère, celui de Trino Vercellese (240 MWe) construit sous licence Westinghouse, et celui de Garigliano (160 MWe), sous licence General Electric et de son unité à uranium naturel-graphite-gaz (filiale Magnox) de Latina. La centrale de Caorso (800 MWe) réalisée sous licence General Electric sera prochainement en service. La construction d'autres unités vient d'être décidée.

Par ailleurs, le pays a remporté des succès non négligeables pour l'exportation de composants nucléaires fabriqués par la société BREDA.

Parallèlement, les Italiens ont engagés, dès 1962, au CNEN (Comitato Nazionale per l'Energia Nucleare), des études sur les réacteurs surrégénérateurs. Ils ont opté, dans ce domaine, pour la construction d'un réacteur rapide expérimental à sodium (réacteur PEC : Prova Elementi Combustibili). Une collaboration Franco-Italienne s'est établie en ce domaine.

L'Italie participe, d'autre part, à concurrence de 33 %, à la réalisation française du surrégénérateur Super-Phénix, et devrait également prendre part au lancement du second réacteur rapide commercial européen, le SNR 2 000, de plus de 1 000 MWe.

Le Bénélux

Le programme belge est important par rapport aux dimensions du pays. En 1967 et 1974, deux centrales PWR ont été réalisées en coopération avec la France, à Chooz (280 MWe) et Tihange (970 MWe).

La Belgique a aussi son propre programme : actuellement Doel (800 MWe) et des projets totalisant 4 000 MWe dont deux unités PWR de 900 MWe, viennent d'être commandées à la Société Framatome.

En outre, le Bénélux, a passé une série d'accords, en 1968 et 1971, avec la République Fédérale Allemande, pour une coordination étroite des travaux de recherches et une intégration industrielle dans le domaine des réacteurs à neutrons rapides.

Enfin, les Pays-Bas participent, avec l'Allemagne et la Grande-Bretagne au projet URENCO pour une usine d'enrichissement de l'uranium, selon le procédé de l'ultracentrifugation, tandis que la Belgique est membre d'EURODIF, la future unité européenne de séparation isotopique par diffusion gazeuse en construction au Tricastin.

L'Espagne.

Le programme espagnol, lancé par trois réalisations, un PWR, un BWR et une centrale graphite-gaz, prend aujourd'hui une ampleur significative par rapport au poids économique du pays.

Dès la fin de 1972, les projets prévoyaient la mise en service, entre 1976 et 1978, d'un potentiel de 4 500 MWe grâce à la construction à Almaraz, Lasco et Lemoniz de cinq unités de 900 MWe chacune, dans la technique PWR (licence Westinghouse).

L'Espagne a donc opté pour la filière à eau ordinaire tout en ayant construit, il y a quelques années, en participation avec la France, la centrale à uranium naturel-graphite-gaz de Vandellós, d'une puissance de 500 MWe.

La Suisse

Le développement nucléaire de la Suisse est relativement récent. Entre 1969 et 1971, trois centrales ont été mises en service dans la technique de l'eau ordinaire : deux à Beznau (canton d'Argovie) d'une puissance de 350 MWe chacune avec réacteurs PWR (licence Westinghouse) et une à Mühleberg, de 306 MWe, fonctionnant à l'eau bouillante sous licence General Electric.

Les projets actuels de développement nucléaire dans la Confédération prévoient notamment la construction de sept centrales (à Kaiseraugst (1), Leibstadt, Gösgen, Graben, Rüthi, Verbois et Inwil), d'une puissance totale installée de l'ordre de 6 700 MWe.

LES PROGRES DANS LE RESTE DU MONDE

La plupart des autres puissances industrielles du monde et même certains grands pays en voie de développement ont d'ores et déjà jeté les bases de leur industrie électro-nucléaire.

La filière canadienne de l'eau lourde

Etroitement associé pendant la seconde guerre mondiale à l'effort atomique des alliés, le Canada, dès 1950, a orienté ses efforts vers les utilisations pacifiques de l'atome.

La richesse de ses ressources en uranium naturel — dont il est le deuxième producteur mondial derrière les Etats-Unis — et le coût élevé de la mise au point des techniques

(1) Avec une participation d'EDF de 20 % et une importante contribution industrielle française.

d'enrichissement, l'ont amené, dès le départ, à développer la filière dite CANDU (Canadian Deuterium Uranium) utilisant l'uranium naturel comme combustible et l'eau lourde comme modérateur et aussi comme fluide caloporteur.

Cette filière est à présent considérée par le Canada comme éprouvée, c'est-à-dire industriellement fiable et donc utilisable dans tout projet de production d'électricité nucléaire. Six réacteurs de ce type sont aujourd'hui en service au Canada, représentant au total une puissance électrique installée de 2500 MWe. Quatre nouvelles unités, de 750 MWe chacune, soit 3000 MWe supplémentaires, doivent entrer en service sur le site de Bruce (Bruce A), dans l'Ontario. La Compagnie d'Electricité de cette province — l'Ontario-Hydro —, qui travaille en liaison étroite avec la Commission Atomique Fédérale, l'AECL, prévoit le doublement de capacité (Bruce B) pour l'horizon 1982. La même année, la centrale de Bowmanville, dont la puissance représentera 3000 MWe, assurés par quatre réacteurs de 750 MWe, sera également mise en service.

D'ici dix ans, l'application du programme canadien permettra ainsi à l'ensemble du pays de disposer d'une capacité électro-nucléaire installée de 13 000 MWe.

Depuis vingt ans, les Canadiens se sont constamment efforcés d'améliorer le rendement économique de leur filière, en cherchant à diminuer notamment le coût de l'eau lourde (qui peut représenter en investissement jusqu'à 20 % du prix de revient de la centrale).

Un des problèmes, à moyen terme, du programme canadien, réside dans les besoins croissants en eau lourde (fournie notamment par Deuterium of Canada et la Canadian General Electric) et dans le coût relativement élevé des nouvelles usines nécessaires à sa production. La conjonction de ces facteurs risque de peser sur le rythme d'expansion futur du programme canadien.

Le programme japonais

Malgré les séquelles de Hiroshima et Nagasaki, le Japon, dont le développement nucléaire est récent, vient à son tour de lancer l'un des programmes les plus ambitieux du monde, à la mesure de la dimension et de l'expansion économiques de ce pays, et de sa dépendance vis-à-vis de l'étranger pour son approvisionnement en énergie.

Selon la Commission Japonaise de l'énergie atomique, la puissance électro-nucléaire devrait atteindre 60 000 MWe en 1985 et contribuer ainsi pour 25 % au bilan énergétique. De nombreuses difficultés locales liées à la sélection des sites conduiront sans doute à des réalisations d'un volume inférieur.

Il n'y avait pourtant encore, en 1973, que six centrales nucléaires en service, représentant une puissance installée de 1835 MWe. Entre 1973 et 1977, dix-huit réacteurs, représentant 13 818 MWe ont été et seront mis en service.

Le Japon a choisi, tout au moins pour la première phase de son développement nucléaire, la filière américaine à eau ordinaire tout en ayant construit une centrale à uranium naturel de type « Magnox » à Tokai Mura.

Les Japonais prévoient la construction de centrales de plus en plus grandes. La puissance moyenne des tranches devrait passer d'environ 1200 MWe en 1977 à 1500 MWe voire 2000 MWe vers 1990. Les constructeurs nippons visent aussi le marché international où Toshiba, notamment, a déjà vendu avec succès des cuves sous pression sur les marchés américains et suédois.

L'industrie japonaise poursuit en même temps ses efforts pour la mise au point des surrégénérateurs à sodium (Fast Breeder Reactors) qui devraient atteindre le stade industriel vers 1986 et pourraient satisfaire à la quasi totalité de l'accroissement des besoins du pays en l'an 2 000.

De nombreux accords de coopération avec la plupart des pays intéressés par la filière rapide, notamment avec la France et le CEA, ont été passés. Des travaux sont

également entrepris en vue du développement éventuel de la filière dite « intermédiaire » ATR (Advanced Thermal Reactor), réacteur à eau lourde refroidi par de l'eau légère bouillante (comme le SGHWR britannique), dont la construction a débuté en décembre 1970 sur le site de Tsuruga (1).

La stratégie électro-nucléaire japonaise doit cependant tenir compte de conditions géographiques et psychologiques particulières.

Des études très poussées, visant à protéger l'environnement, et à assurer la sûreté des installations industrielles, notamment en cas de séismes, sont exigées pour répondre à une opinion publique très sensibilisée. En raison des difficultés spécifiques du Japon, dans le domaine du choix des sites, l'industrie nipponne, en particulier la Tokyo Electric Power Company, s'oriente vers la formule des « parcs d'énergie » abritant un grand nombre de réacteurs.

Sur le plan économique, l'un des problèmes les plus aigus du programme japonais, qui devrait s'aggraver au cours des prochaines années, réside dans la croissance très rapide des besoins en uranium naturel dont le territoire national est faiblement pourvu (7 à 8 000 tonnes d'oxyde d'uranium U_3O_8 recensées dans les mines de Ningyo-Toge et de Tohno).

La réalisation de la filière ATR présenterait précisément l'avantage de réduire les besoins dans la proportion d'un quart environ : c'est une des raisons de l'intérêt japonais pour cette voie.

Dans l'immédiat, pour pallier sa pénurie actuelle, le Japon multiplie ses efforts de prospection d'uranium à l'étranger. Il s'est ainsi associé avec le Commissariat à l'Energie Atomique français et le gouvernement du Niger pour l'exploitation minière dans ce pays, et a signé des contrats d'approvisionnement avec les principaux producteurs occidentaux, notamment, à très long terme, avec les canadiens.

Dans le domaine de l'enrichissement de l'uranium, les Etats-Unis sont encore le fournisseur exclusif de l'industrie japonaise qui a étudié, pour diversifier ses ressources, la possibilité de créer une usine d'enrichissement dans la région du Pacifique.

Les progrès de l'URSS

Depuis longtemps producteur d'uranium enrichi, comme les Etats-Unis, pour ses besoins militaires, l'URSS n'a pas encore développé un programme électro-nucléaire civil correspondant à son poids industriel.

Après avoir été, en 1954, l'un des premiers pays du monde à construire une centrale atomique, ses projets dans ce domaine sont demeurés limités.

Au cours de la dernière Conférence Mondiale de l'Energie réunie à Détroit en septembre 1974, la délégation soviétique rappelait que l'URSS dispose actuellement de douze unités de production électro-nucléaire correspondant à environ 2600 MWe, la puissance unitaire des réacteurs russes variant entre 440 et 1000 MWe.

La richesse des réserves de l'Union Soviétique en combustibles fossiles explique en partie le développement relativement modeste de son programme nucléaire. Ses réalisations civiles actuelles portent essentiellement sur des réacteurs à eau pressurisée : l'URSS a envisagé la possibilité d'acheter à l'étranger notamment à l'industrie française un certain nombre de réacteurs de ce type.

Toutefois l'URSS fait actuellement partie du peloton de tête, aux côtés de la Grande-Bretagne et de la France, dans le domaine des réacteurs à neutrons rapides : dès 1959, elle mettait au point le BR-5, suivi, en 1969, du BOR-60 à Melekeess. Les Russes ont réalisé le premier réacteur rapide commercial à Shevchenko, sur les bords de la Caspienne : le BN-350 (350 MWe), couplé au réseau en juillet 1973 et destiné à la production de puissance électrique et au dessalement de l'eau de mer.

(1) Ce prototype, FUGEN, développera une puissance de l'ordre de 200 MWe.

Un nouveau réacteur d'une puissance électrique de 600 MWe, le BN-600, en cours de construction, devrait être mis en service en 1976.

Les pays en voie de développement

Parmi les pays du tiers-monde, l'Inde est, à coup sûr, celui qui a fourni les plus grands efforts dans le domaine atomique. L'importance de ses réalisations et l'ampleur de son programme actuel témoignent des progrès accomplis depuis un quart de siècle par la recherche nucléaire indienne.

Ses premiers pas remontent à 1949, avec la création de l'Indian Atomic Energy Commission, sur les conseils du grand savant indien Homi Bhabha.

Vers 1955 a été créé à Trombay, près de Bombay, le BARC, (Bhabha Atomic Research Center), principal centre de recherches nucléaires, dont les effectifs, en 1972, dépassaient 2 000 chercheurs. Plus récemment, la République Indienne décidait de réaliser un second centre, à Kalpakkam, près de Madras, plus particulièrement chargé d'étudier les réacteurs à neutrons rapides.

La première centrale indienne de Tarapur comprenant deux réacteurs de type BWR d'une puissance unitaire de 200 MWe, mise en service en avril 1969, était à l'époque la plus importante usine atomique d'Asie du Sud-Est.

Le grand tournant nucléaire de l'Inde se situe en 1963, lorsque le pays opta pour la technique canadienne CANDU à eau lourde.

Le programme actuel, basé sur les réacteurs à eau lourde, prévoit l'installation de 2700 MWe en 1980, de 12 000 MWe en 1990, et d'environ 43 000 MWe en l'an 2000. Un tel objectif, s'il était atteint, correspondrait alors à la fourniture, sous forme d'électricité nucléaire, de 30 % de la puissance électrique totale installée en Inde.

Dans le domaine des surrégénérateurs, d'autre part, l'Inde a signé avec la France en 1969 un accord prévoyant la réplique, à Kalpakkam, du réacteur Rapsodie de Cadarache.

L'originalité et l'intérêt du programme indien résident dans le fait que ce pays, en voie de développement, vise le contrôle de l'ensemble du cycle du combustible nucléaire, depuis l'approvisionnement en minerai — assuré notamment par l'Uranium Corporation of India Ltd et l'Indian Rare Earth Ltd — jusqu'au retraitement des éléments irradiés.

En particulier, l'accroissement des besoins prévisibles en eau lourde, a conduit les Indiens à développer un programme de production nationale d'oxyde de deutérium. Une usine fonctionne depuis 1961, deux sont prévues, à Kota dans le Rajasthan et à Baroda, dans le Gujarat. Une autre usine est envisagée à Tuticorin, dans le Tamil Nadu, Baroda et Tuticorin sont réalisées en collaboration avec l'industrie française.

La dimension de ce programme, unique dans le Tiers-Monde, devrait permettre à l'Inde de jouer plus tard un rôle important dans l'équipement électro-nucléaire de l'Asie du Sud-Est.

De son côté, le Pakistan s'est également équipé d'une centrale de la filière canadienne.

Tout récemment enfin, les pays producteurs de pétrole et au premier rang d'entre eux l'Iran, ont décidé de s'engager dans un programme électro-nucléaire pour ménager leurs ressources d'hydrocarbures. Ils consultent actuellement les gouvernements des principaux pays industriels et notamment la France qui mène à cet égard une politique d'exportation particulièrement dynamique.

L'ESSOR DES ECHANGES INTERNATIONAUX EN MATIERE NUCLEAIRE

Nombreux sont, par conséquent, les pays qui s'orientent actuellement vers l'industrie nucléaire. Beaucoup, toutefois, ne sont pas en mesure, compte tenu des difficultés technologiques et de l'ampleur des investissements, de se constituer par eux-mêmes

une infrastructure nationale. Le concours technique et commercial des pays disposant d'une expérience industrielle éprouvée leur est donc nécessaire.

La plupart des nations industrialisées disposant maintenant d'une capacité de production électro-nucléaire effective, les conditions de l'essor d'un marché nucléaire à l'échelle internationale paraissent réunies. Déjà, au cours de la dernière décennie, les échanges atomiques entre pays développés s'étaient multipliés, marquant la fin d'une longue période de secret liée à l'adoption par les Etats-Unis en juin 1946 de la loi Mac-Mahon régissant l'énergie nucléaire en temps de paix.

La crise de l'énergie et les nouvelles données de l'économie mondiale ont accéléré ce processus et l'année 1974 peut être considérée comme le point de départ d'une ère nouvelle dans les relations nucléaires internationales.

Sans prétendre passer en revue tous les accords commerciaux signés dans le monde au cours des derniers mois, il est utile, à titre d'illustration, de rappeler l'importance de certains projets actuels de développement nucléaire pour les échanges internationaux.

Parmi eux le programme iranien, particulièrement intéressant par son ampleur, prévoit d'ores et déjà l'installation, dans les délais les plus rapides, d'une vingtaine de milliers de MWe.

Parallèlement aux contrats passés à la France et dont il sera question ultérieurement, le gouvernement iranien a signé un accord avec la République Fédérale Allemande, aux termes duquel la Société KWU réalisera deux réacteurs à eau légère d'une puissance de 1 200 MWe. Des négociations ont également lieu avec des firmes américaines et d'autres sociétés étrangères telles que le groupe suédois ASEA.

Le Canada, les Etats-Unis et l'URSS, en particulier, bénéficient de ce nouveau courant commercial et développent leurs exportations aux quatre coins du monde. C'est ainsi que quatorze réacteurs de 440 MWe, de technique soviétique, sont actuellement en construction ou en commande dans différents pays de l'Europe de l'Est : deux réacteurs de ce type ont été commandés par la Finlande ; l'Egypte elle-même a signé, en octobre 1974, un contrat avec l'URSS pour la construction d'un réacteur de 460 MWe.

Les échanges nucléaires n'ont pas seulement trait à la livraison d'unités de production électrique « clés en mains », ils concernent aussi la vente des composants lourds (cuves sous pression, générateurs de vapeur, turbo-alternateurs, etc...) largement pratiquée parmi les pays occidentaux, les besoins en combustibles, notamment en uranium enrichi — dont les Américains ont été longtemps les uniques fournisseurs dans le monde —, et la technologie sous la forme de ventes de brevets ou de licences, ou encore de contrats de coopération technique.

La France, pour sa part, participe de plus en plus activement à ce marché international en pleine expansion.

LE PROGRAMME FRANÇAIS, NOUVELLE ETAPE D'UNE LONGUE EXPERIENCE

Dans le concert nucléaire international, la France occupe une place de choix et se trouve concernée depuis longtemps par le développement de l'énergie atomique.

Dès la fin du siècle dernier, Henri Becquerel découvrait la radio-activité naturelle et c'est en 1898 que Pierre et Marie Curie isolaient le radium de la Pechblende du Joachimsthal. En 1934, Frédéric Joliot et Irène Joliot-Curie découvraient la radio-activité artificielle.

Depuis, la France a constamment occupé — si l'on fait exception de la période couverte par la deuxième guerre mondiale — une position d'avant-garde : d'abord comme pionnier en matière scientifique et technique ; puis comme organisateur des recherches et découvreur de ressources à travers le Commissariat à l'Energie Atomique (CEA) ; enfin, depuis quelques années, comme l'une des nations les plus directement intéressées aux programmes civils de développement électro-nucléaire.

L'ACQUIS FRANÇAIS

Le premier acte décisif du développement nucléaire de la France remonte à l'ordonnance du 18 octobre 1945, portant création du Commissariat à l'Energie Atomique.

Cet organisme public, placé aujourd'hui sous l'autorité du Ministre de l'Industrie et de la Recherche, s'est révélé dès le départ comme le centre d'impulsion national de l'industrie atomique française.

Etablissement à caractère scientifique, technique et industriel, il est dirigé par un Administrateur général délégué assisté d'un Haut-Commissaire conseiller scientifique et technique.

Le CEA a poursuivi, depuis trente ans, des efforts visant à l'accomplissement de sa mission dans le domaine de la science, de l'installation des bases du développement électro-nucléaire français et dans le domaine de la défense nationale.

La France, pays prospecteur et producteur d'uranium

L'un des premiers objectifs, celui d'assurer l'approvisionnement de la France en uranium naturel et en matières fissiles, s'est traduit par un effort de prospection intensif, tant sur le territoire national qu'à l'étranger, en particulier dans les pays d'Afrique Noire francophone.

Les recherches sur le territoire national ont été entreprises à l'initiative du CEA, depuis 1946, et ont conduit à la création de trois divisions minières : celle de La Crouzille (dans le Limousin), de Vendée et du Forez. Puis, à partir de 1954, des sociétés privées se sont intéressées à cette activité et ont apporté un complément qui peut être évalué à environ 8 % de la production française.

LES INSTALLATIONS NUCLEAIRES FRANCAISES CIVILES



Ces importants travaux de prospection ont été prolongés en Afrique francophone et à Madagascar à partir des années 1947 par le CEA, dont les actions ont donné des résultats substantiels. Ils ont été ensuite étendus à d'autres pays étrangers, surtout depuis ces dernières années, dans le cadre d'une diversification géographique de l'exploration (Australie, Etats-Unis, Canada, Indonésie, etc...).

Cette politique a été suivie par les sociétés minières françaises, et, plus récemment, par les principales compagnies pétrolières.

Les résultats de ces efforts sont consistants : les réserves d'uranium auxquelles les intérêts français, publics et privés ont accès atteignent environ 177 000 tonnes de métal contenu (somme des réserves dénombrées et des perspectives), dont 60 000 tonnes en France, 70 000 tonnes au Niger, 30 000 tonnes au Gabon et 17 000 tonnes au Canada. Ces réserves représentent à peu près 10 % de celles du monde occidental. Elles sont évaluées sur la base d'un coût voisin de 125 F le kg d'uranium contenu dans les concentrés marchands, soit environ 10 dollars la livre d'oxyde d'uranium U_3O_8 (1). Dans la mesure où les cours s'élèveraient, ce potentiel serait, du même coup, sensiblement augmenté car des minerais à plus basse teneur seraient alors exploités.

La production de concentrés et les achats effectués par le CEA, dans l'année 1974, ont atteint un total de l'ordre de 3 300 tonnes de métal dont :

- en France 1 600 tonnes provenant pour plus de 90 % des divisions minières du CEA ;
- au Niger 1 250 tonnes, par la « Sociétés des Mines de l'Aïr » (SOMAIR), créée dans le cadre d'un accord associant l'Etat Nigérien, des industriels français, allemands et italiens, et le CEA ;
- au Gabon 460 tonnes, par la « Compagnie des Mines d'Uranium de Franceville » (COMUF), où l'industrie française est associée au gouvernement du Gabon et au CEA qui en fut l'initiateur.

Ces 3 300 tonnes représentent environ 12 % de la production du monde occidental. Il faut noter, d'ailleurs, que le CEA vient de proposer l'ouverture d'une nouvelle division minière dans l'Hérault, où la somme des réserves dénombrées et des perspectives atteint environ 20 000 tonnes d'uranium contenu. Cette nouvelle division minière porterait ainsi à plus de 3 000 tonnes, dès le début de la prochaine décennie, la capacité annuelle de production du seul territoire français.

Les concentrés, obtenus à partir du minerai, sont produits notamment dans les usines de l'Ecarpière en Vendée, de Bessines en Haute-Vienne et de Saint-Priest dans la Loire. L'usine de Gueugnon, en Saône-et-Loire, traite les pré-concentrés d'outre-mer.

La France dispose, d'autre part, d'une usine de raffinage, spécialisée dans la purification de l'uranium et sa métallurgie à Malvesi dans l'Aude, exploitée par l'industrie privée.

Des centres d'études et de recherches nucléaires avancés

Parallèlement à ses efforts dans le domaine de l'approvisionnement en matières premières, le CEA mettait en place des structures scientifiques et techniques nécessaires au futur développement nucléaire français.

Quatre principaux centres d'études et de recherches ont été successivement construits, à Saclay (1949) et Fontenay-aux-Roses (1955) dans la région parisienne, à Grenoble (1959) et à Cadarache dans les Bouches-du-Rhône (1959).

Ces « Centres d'Etudes Nucléaires » se distinguent des centres de production, à destination spécifiquement industrielle.

Ils représentent un potentiel considérable en hommes et en matériel : leurs effectifs globaux sont de l'ordre d'une douzaine de milliers de personnes.

(1) Au taux de 4,80 F pour 1 dollar.

Saclay

A **Saclay**, les recherches concernent essentiellement les techniques des réacteurs électro-nucléaires, les matériaux et les combustibles atomiques, la protection contre les radiations, l'utilisation des radio-éléments. La recherche fondamentale représente environ 40 % des activités de ce centre, dont la vocation scientifique et technique devrait s'accroître avec l'installation, à proximité, de grandes écoles et de laboratoires.

Fontenay-aux-Roses

La raison d'être essentielle du centre de **Fontenay-aux-Roses** est au contraire la recherche appliquée, qui représente environ les deux tiers de son activité. Ce centre a été bâti sur l'emplacement de l'ancien fort de Châtillon, où fut mise en service, en 1948, la première pile atomique française : Zoé.

Les recherches portent plus particulièrement sur le traitement des combustibles irradiés, la métallurgie du plutonium, les transuraniens, la minéralogie, le contrôle des radiations et l'hygiène atomique.

Grenoble

La création du centre de **Grenoble** répondait à une double volonté de décentralisation des activités de recherche et de collaboration avec l'Université et l'industrie. Un grand nombre d'activités industrielles liées au génie atomique, à la production de matériaux nucléaires, à l'électronique, ont pu se développer parallèlement. Quant à la collaboration avec l'Université, elle est assurée au niveau des laboratoires de recherches et s'étend à l'enseignement.

Cadarache

De réalisation plus récente, le centre d'études nucléaires de **Cadarache** est essentiellement chargé du développement des applications industrielles nucléaires et des questions relatives à la sûreté des installations industrielles atomiques. Parmi les nombreuses réalisations de ce centre, se trouve Rapsodie, réacteur expérimental à neutrons rapides qui a divergé en 1967 ; le Prototype A Terre (PAT), installation de propulsion sous-marine nucléaire ; Pégase, pile d'essais de combustibles et Cabri, servant aux études de sûreté.

Un potentiel de production électro-nucléaire en développement régulier

Dès la fin des années cinquante, la France lançait son second plan de développement de l'énergie atomique, fondé sur la pénétration progressive de l'électricité nucléaire dans l'économie nationale.

Désormais, d'autres organismes, à côté du CEA, notamment Electricité de France et l'industrie française privée, se trouvaient associés à l'effort national de développement électro-nucléaire.

Le premier centre industriel atomique avait été implanté en 1952, dans le Gard, à **Marcoule**, au nord d'Avignon.

Cet établissement est affecté à la production de plutonium. Son premier réacteur plutonigène, G 1, a cessé son activité en 1968, après douze ans de fonctionnement. Deux autres réacteurs, G 2 et G 3, d'une puissance unitaire de 40 MWe, furent mis en service en 1959 et 1960. Construits suivant des techniques originales, ils ont servi de prototypes aux centrales ultérieurement réalisées dans la filière à uranium naturel-graphite-gaz.

Les installations de Marcoule comprennent également les réacteurs d'irradiation industrielle Celestin I et II, au plutonium ou à uranium enrichi, modérés à l'eau lourde, servant à fabriquer du tritium et à produire des radio-éléments, des transplutoniens et des transuraniens.

Enfin, c'est à Marcoule qu'a été construit le réacteur surrégénérateur Phénix de 250 MWe entré en fonctionnement en 1973, et dont la réalisation place la France au plus haut niveau dans la compétition internationale pour la filière à neutrons rapides, aux côtés de la Grande-Bretagne et de l'URSS.

C'est au cours des années soixante que s'est réellement ouverte la phase industrielle du développement nucléaire français. A partir de cette époque, les programmes électro-nucléaires s'inscrivent dans le cadre des plans de modernisation et d'équipement. Entre 1963 et 1972, huit unités de production électro-nucléaire représentant une puissance totale installée supérieure à 2600 MWe ont été réalisées.

Six d'entre elles sont à uranium naturel-graphite-gaz : Chinon I (70 MWe), Chinon II (210 MWe), Chinon III (480 MWe), respectivement mises en services en 1963, 1965 et 1966 ; Saint-Laurent-des-Eaux I (480 MWe) et II (515 MWe) en 1969 et 1971 ; Bugey I (540 MWe) en 1972. Une autre a été mise en service en 1967 dans la filière à eau pressurisée, en coopération avec les Belges, à Chooz dans les Ardennes (280 MWe). Enfin, le réacteur EL 4 des Monts d'Arrée (70 MWe), est une petite unité prototype de la filière eau lourde/gaz.

Actuellement, la puissance électro-nucléaire en service en France s'élève à 2 608 MWe, pour une puissance maximale nette thermique de 21 017 MWe.

LE CHOIX DES FILIERES

De 1945 à nos jours, le développement nucléaire français, aujourd'hui l'un des plus avancés du monde, a franchi plusieurs étapes, marquées tout particulièrement par les décisions fondamentales concernant le choix des filières (1). Les changements historiques, économiques et politiques, la modification du contexte international et l'accélération de l'expansion industrielle du pays à partir des années soixante, sont à l'origine des nouvelles orientations nationales suivies aujourd'hui.

La filière à uranium naturel-graphite-gaz

Les considérations financières, liées à la situation économique de l'après-guerre dans laquelle se trouvait la France, ont joué un grand rôle dans le choix initial de cette filière. Les filières à eau légère étaient, à cette époque, jugées incompatibles avec les moyens financiers et techniques dont disposait le pays. Seuls les Etats-Unis et l'Union Soviétique possédaient alors des usines d'enrichissement de l'uranium, dont la capacité de production était essentiellement affectée à des fins militaires.

Dans ces conditions, dès 1952, le gouvernement français optait pour les réacteurs alimentés à l'uranium naturel, dont l'ampleur des ressources nationales était déjà reconnue.

Le modérateur était le graphite, seul matériau disponible à l'époque, et le gaz carbonique sous pression servait de fluide caloporteur selon une technique mise au point sur le réacteur de recherches EL 2 à Saclay.

Enfin, les caissons renfermant les cœurs des réacteurs étaient non en acier (2), mais en béton précontraint, résistant à des pressions élevées, impliquant des dimensions plus importantes, mais dont la réalisation était moins onéreuse.

L'adoption de cette filière à uranium naturel-graphite-gaz permettait de développer la production du plutonium, ce dernier pouvant servir de combustible pour les futurs

(1) Voir l'Annexe 2 pour la définition des différents types de réacteurs (filières).

(2) Les caissons de Chinon I et II ont cependant été réalisés en acier.

réacteurs surrégénérateurs, qui devaient constituer, à long terme, une assurance contre une pénurie éventuelle d'uranium, en même temps qu'il était utilisé pour la mise au point de l'arme atomique.

Il faut noter que la Grande-Bretagne, quelques années auparavant, confrontée à des problèmes comparables, avait opté pour la même voie, avec sa filière « Magnox ».

De fait, ce choix a permis à la France de lancer très vite son programme de développement électro-nucléaire, sans avoir recours à la fourniture d'uranium enrichi par l'étranger, et de constituer sa force de frappe atomique.

Parallèlement, dès 1960, le complexe de séparation isotopique (1) de Pierrelatte était mis en chantier et entré en service en 1967. Exclusivement orienté au départ vers les utilisations militaires, ce centre de production d'uranium enrichi, comprenant quatre usines d'enrichissement (la « basse », la « moyenne », la « haute » et la « très haute ») a permis à la France d'acquérir la maîtrise de la technique de diffusion gazeuse, ouvrant la voie aux futures unités de séparation isotopique destinées aux usages civils.

La filière à uranium naturel-graphite-gaz pouvait être considérée en 1969 comme éprouvée. Les faits l'ont confirmé puisque les 8 réacteurs de ce type, aujourd'hui en fonctionnement, ont produit jusqu'ici plus de 60 milliards de kWh.

L'adoption des filières à eau ordinaire

Malgré les succès obtenus au cours de la première phase du développement électro-nucléaire et le volume des réalisations industrielles menées à leur terme, le gouvernement a été conduit à se prononcer, en 1969, pour la suspension du programme de la filière graphite-gaz, en faveur des techniques à eau ordinaire, et cela en raison de considérations à la fois économiques et techniques.

La filière à uranium naturel-graphite-gaz, qui présente des sujétions quant à la surveillance et au renouvellement du combustible, n'avait été pratiquement adoptée qu'en France et en Grande-Bretagne ; la plupart des pays industriels avaient choisi ou s'apprêtaient à opter pour la technologie américaine (2). De ce fait l'industrie électro-nucléaire française risquait donc de rester technologiquement isolée et de voir se fermer ses futurs débouchés à l'exportation.

De plus, la France avait acquis entre-temps les connaissances suffisantes sur l'enrichissement de l'uranium pour escompter son autonomie future d'approvisionnement en combustible enrichi sur le plan national.

Les considérations économiques ont en outre exercé une influence déterminante, l'adoption de la filière à uranium enrichi aboutissant à un prix de revient du kWh inférieur et compétitif avec celui des tranches thermiques classiques utilisant un combustible à 0,9 centimes la thermie.

Et puis la France disposait déjà d'une certaine expérience dans l'utilisation nucléaire de l'eau ordinaire puisque, dans le cadre du programme français, le CEA avait eu l'occasion de mettre au point des réacteurs à uranium enrichi et à eau légère sous pression. La version réalisée pour le prototype à terre (PAT) de Cadarache et les appareils propulsifs des sous-marins n'était certes pas directement transposable, notamment pour des raisons de dimensions, dans une centrale terrestre, mais les connaissances acquises — calcul du cœur du réacteur, comportement du combustible, circuits hydrauliques, échangeurs, etc... — représentaient un tronc commun susceptible d'être utilisé.

D'autre part, Electricité de France avait déjà participé ou allait prendre part à la réalisation de trois projets de centrales à eau légère, à Chooz et Tihange (Belgique) en

(1) Voir l'Annexe 3, pour des détails sur les procédés d'enrichissement de l'uranium.

(2) La Grande-Bretagne, de son côté, abandonnait, la filière « Magnox » pour les réacteurs AGR (à gaz-uranium enrichi).

coopération avec les Belges, sous licence Westinghouse, et à Kaiseraugst près de Bâle, en association avec les Allemands et les Suisses, sous licence General Electric.

Aussi bien, dès 1970, le VI^e Plan avait-il retenu dans ses priorités approuvées par le Parlement l'engagement d'un programme nucléaire sur la base de 8000 MWe pour la période de 1971/1975 (qui pourrait être accéléré si les capacités de construction de l'industrie française le permettaient).

Dès cette époque, la France s'était donc engagée dans un programme nucléaire important. Les décisions prises orientaient le développement à long terme et facilitaient les adaptations ultérieures.

De fait, début 1973, la Commission PEON (1) constatait qu'une accélération des programmes nucléaires était devenue souhaitable et préconisait une première accélération, le programme devant passer de 8 000 MW à 13 000 MW en cinq ans.

LE PROGRAMME ELECTRO-NUCLEAIRE FRANÇAIS

Au moment où éclatait, à la fin de l'année 1973, la crise pétrolière mondiale, les bases de l'infrastructure nucléaire française étaient déjà constituées. Un programme de production électro-nucléaire était poursuivi depuis une décennie, en dépit de l'avantage de prix dont avait bénéficié le pétrole.

Au début de l'année 1974, il devenait indispensable d'accélérer encore le développement nucléaire français. Devant un déficit, nouveau et sans précédent de la balance commerciale résultant de la hausse des prix pétroliers, et compte tenu de la dépendance de la France vis-à-vis de l'étranger pour son approvisionnement en énergie, une décision visant à rétablir un nouvel équilibre ne pouvait plus attendre.

C'est dans ces conditions que le gouvernement lançait, le 5 mars 1974, le nouveau programme électro-nucléaire.

Ce programme prévoit la mise en chantier de six tranches dans la gamme de 900 MWe en 1974, et de sept autres tranches de même puissance en 1975 : cet effort pourrait être poursuivi au même rythme les années suivantes. Le 1^{er} février 1975, le gouvernement a autorisé EDF à engager un programme analogue pour les deux années suivantes (1976-1977) soit l'équivalent de 12 000 MW nucléaires.

Dans ces conditions, le pays pourrait disposer en 1985, dans la technique de l'eau ordinaire, d'une quarantaine de tranches, dont les puissances devront être progressivement portées de 900 MWe en moyenne à 1 200 et 1 300 MWe.

Parallèlement à ce programme fondé sur les réacteurs à eau ordinaire, les efforts se poursuivront dans le domaine des réacteurs à neutrons rapides, l'installation d'une nouvelle unité, d'une puissance de 1 200 MWe, étant dès maintenant prévue à Creys-Malville (Isère).

L'application de ce plan devrait permettre à l'horizon 1985 de porter les disponibilités françaises à un niveau de l'ordre de 45 000 à 55 000 MWe installés, ce

(1) Créée en 1955, la Commission PEON (Commission consultative pour la production d'électricité nucléaire), réunit une trentaine de membres sous la présidence du Délégué général à l'énergie, des représentants l'Administration, le CEA, EDF et l'industrie privée. Cette Commission est chargée par le gouvernement d'élaborer périodiquement un rapport sur les activités électro-nucléaires de la France.

qui représenterait le quart des besoins énergétiques globaux. La dépendance énergétique totale de notre pays serait amenée de 75 % en 1975 à 55 % ou 60 % en 1985.

Les sites envisagés pour les mises en service s'échelonnant entre 1976 et 1980, sont ceux de Fessenheim, du Bugey, de Saint-Laurent-des-Eaux, de Gravelines dans le Nord, de Dampierre sur la Loire, de Le Blayais sur la Gironde et du Tricastin sur le Rhône. Ce dernier site verra s'édifier quatre tranches destinées à alimenter la future usine européenne de séparation isotopique par diffusion gazeuse (EURODIF).

A partir de 1985, l'avance acquise par la France dans le domaine des réacteurs surrégénérateurs doit lui permettre de préparer, pour les années suivantes, le développement industriel sur une plus grande échelle de cette filière, dite de la troisième génération.

Les recherches relatives aux réacteurs à haute température seront également poursuivies en collaboration avec l'étranger, mais leur application industrielle éventuelle devrait concerner une période plus lointaine.

LE PROGRAMME FRANÇAIS

1 — Centrales nucléaires en service

| | Puissance nette | Date de mise en service |
|---|---------------------|----------------------------|
| Marcoule (Gard) | 85 MWe | 1959-1960 |
| Chinon II et III (I. et L.) | 700 MWe | 1965-1966 |
| Chooz (Ardennes) | 270 MWe | 1967 |
| Brennilis (Finistère) | 70 MWe | 1967 |
| Saint-Laurent-des-Eaux I et II (L. et Ch.) | 1 000 MWe | 1969-1971 |
| Bugey I (Ain) | 540 MWe | 1972 |
| Marcoule (Gard) | 233 MWe (Phénix) | 1973 |

2 — Centrales nucléaires qui doivent entrer en service entre 1975 et 1980

| | |
|---|-----------|
| Fessenheim I et II (Haut-Rhin) | 1 800 MWe |
| Bugey II, III, IV, V, (Ain) | 3 650 MWe |
| Saint-Laurent-des-Eaux III et IV (L et Ch.) | 2 000 MWe |
| Gravelines I, II, III, IV, (Nord) | 3 600 MWe |
| Tricastin I, II, III, IV, (Drôme) | 3 600 MWe |
| Dampierre-en-Burly I et II, (Loiret) | 1 800 MWe |
| Creys-Malville (Isère) | 1 200 MWe |
| Le Blayais I (Gironde) | 900 MWe |

3 —Centrales nucléaires qui devront entrer en service entre 1980 et 1988

Outre l'extension de centrales existantes (Chinon, Fessenheim...), il est prévu une douzaine de centrales nouvelles nécessitant l'utilisation d'autant de sites supplémentaires.



C'est bien une orientation d'ensemble de la politique énergétique de la France qui est proposée, parallèle à celle qui a été retenue par beaucoup d'autres pays.

Il convient donc de s'interroger sur tous les aspects de ce plan énergétique, car il va conditionner et accompagner le développement futur du pays en même temps qu'il va réclamer de sa part un effort important.

LE PROGRAMME ELECTRO-NUCLEAIRE FRANÇAIS : UN CHOIX RAISONNE

Le 16 octobre 1973, l'O.P.A.E.P. (1) rompait unilatéralement les accords de Téhéran et de Tripoli de février et d'avril 1971 et relevait de 70 % les prix affichés (2) du pétrole.

Deux mois plus tard, le 22 décembre, l'O.P.E.P. (3) annonçait à Téhéran, une nouvelle hausse, sans précédent, des prix du pétrole, le baril brut léger d'Arabie Saoudite passant de 5, 12 à 11, 65 dollars.

Le 17 mars 1974, l'O.P.E.P. décidait, à Vienne, « que les prix du pétrole seraient maintenus à leur niveau actuel au cours des trois prochains mois », disposition qui fut à nouveau prorogée au mois de juin par la Conférence de Quito.

Les prix affichés, qui étaient demeurés stables, en dollars courants, de 1968 à 1971, subissaient donc, en quelques mois, une augmentation de l'ordre du quadruplement.

De telles décisions intervenaient dans un contexte économique mondial caractérisé par une hausse généralisée des prix des matières premières (4), une détérioration croissante du système monétaire international et une aggravation de l'inflation dans l'ensemble des pays industrialisés.

Frappée comme la majorité des nations occidentales et même plus que d'autres, en raison de la structure de son bilan énergétique, la France décidait de tenir compte des avantages économiques et stratégiques à long terme présentés par l'énergie nucléaire de fission.

(1) L'OPAEP, Organisation des Pays Arabes Exportateurs de Pétrole, comprend dix pays membres : l'Arabie Saoudite, le Koweït, la Libye, l'Irak, l'Algérie, Abou-Dhabi, l'Égypte, Qatar, la Syrie, Bahreïn.

(2) Le prix affiché (en anglais « posted price »), est un prix servant de référence au calcul des redevances et des impôts, versés aux États producteurs par les compagnies disposant de concessions pétrolières.

(3) L'OPEP, Organisation des Pays Exportateurs de Pétrole, dont le siège est à Vienne, a été créée en septembre 1960, sur l'initiative du Venezuela. Elle groupe actuellement douze pays : cinq depuis l'origine, le Venezuela, l'Iran, l'Irak, le Koweït, l'Arabie Saoudite ; Qatar depuis janvier 1961 ; la Libye et l'Indonésie depuis juin 1962 ; Abou-Dhabi depuis novembre 1967 ; l'Algérie depuis juillet 1969 ; le Nigéria depuis juillet 1971 et l'Équateur depuis 1973.

(4) L'indice INSEE des matières premières industrielles importées (base 100 en 1962), qui s'élevait à 140 en mai 1972, atteignait 189,2 en juin 1973 et 234 en décembre 1973.

UNE DEPENDANCE EXCESSIVE A L'EGARD DU PETROLE

Après avoir été fondées sur le charbon jusqu'au milieu du XX^e siècle, les économies occidentales ont, depuis, basé leur développement sur les hydrocarbures, en particulier le pétrole. Au cours des vingt dernières années, celui-ci s'est progressivement assuré une place prépondérante parmi les sources d'énergie dans la quasi-totalité des pays industrialisés.

Liée à un contexte de civilisation — notamment le développement accéléré du transport automobile — cette pénétration tient également aux qualités spécifiques de ces combustibles, plus faciles à extraire, à transporter et à utiliser que le charbon.

Toutefois, une telle percée n'aurait jamais eu cette ampleur dans l'ensemble des pays du monde si les prix internationaux du pétrole brut n'étaient pratiquement restés stables, en dollars courants, tout au long des années soixante. Le prix affiché du baril de brut léger d'Arabie Saoudite, fixé à 1,90 dollar en janvier 1959, n'atteignait, en effet, douze ans plus tard que 1,89 dollar, en monnaie courante.

Cette stabilité est à l'origine d'une modification profonde de l'approvisionnement en énergie des grands pays consommateurs de 1960 à 1970 : pendant cette période, 90 % des nouveaux besoins ont été couverts par les hydrocarbures. Nul doute que cette stabilité ait retardé le développement de l'énergie nucléaire par rapport aux prévisions qui avaient été établies auparavant, notamment en France.

Or, le pétrole, à la différence de l'uranium, étant une source d'énergie très inégalement répartie, l'approvisionnement énergétique des pays développés, notamment de l'Europe Occidentale et du Japon, est devenu de plus en plus dépendant d'une région déterminée : celle du Proche-Orient et du Golfe Persique.

La France, comme les autres nations occidentales, ayant axé sa croissance sur l'économie pétrolière et ne disposant pas de ressources propres en ce domaine, subit cette évolution, et même plus durement que d'autres.

LE POIDS DU PETROLE DANS LE BILAN ENERGETIQUE FRANÇAIS (1)

Alors que plus de 70 % des besoins énergétiques du pays étaient encore couverts en 1952 par le charbon, cette proportion s'est inversée en vingt ans au profit du pétrole qui a assuré la croissance de nos besoins en énergie : sa part dans la couverture de nos besoins est passée d'environ 31 % en 1960 à plus de 66 % en 1973.

Dans le même temps, la consommation française d'énergie primaire passait de 128 millions à 262 millions de tonnes d'équivalent charbon (tec).

Cette évolution s'est accompagnée d'une dépendance croissante vis-à-vis de l'étranger qui a fourni 75 % de son énergie primaire à la France en 1972, contre seulement 41 % en 1960.

(1) Voir l'Annexe 4 sur l'évolution de la production et de la consommation française d'énergie.

Parallèlement, la part du Moyen-Orient dans les importations pétrolières françaises, qui s'élevait à près de 44 % en 1970, était supérieure à 69 % en 1973.

La répartition actuelle du bilan énergétique français illustre cette évolution. Le charbon ne couvre plus à présent que 19 % de nos besoins, le gaz naturel, l'électricité hydraulique et l'énergie nucléaire en assurant respectivement 7 %, 6 % et moins de 2 %.

Cet état de déséquilibre et de dépendance à l'égard de l'étranger ne pourrait aller qu'en croissant avec l'augmentation de nos besoins énergétiques si un effort notable n'était fait pour diversifier nos ressources. Que peuvent apporter les nouvelles zones de prospection pétrolière ? Les recherches actuellement entreprises en mer d'Iroise entre la Bretagne et les Cornouailles, n'en sont encore qu'au premier stade exploratoire. La fraction française du bassin sédimentaire intéressé n'est pas encore délimitée (1) et les premiers forages d'exploration ne seront pas effectués avant le printemps 1975.

Quant aux importantes ressources en hydrocarbures de la Mer du Nord, auxquelles les sociétés françaises Elf-Aquitaine et C.F.P. sont intéressées, elles ne seront pas en mesure de prendre un relais sérieux avant les années quatre-vingt.

Les réserves de la Mer du Nord, fourniront un apport important de pétrole et de gaz : on avance, pour 1985, des chiffres qui varient entre 300 et 500 millions de tonnes équivalent pétrole (Tep) par an. Mais la consommation de la Communauté Européenne, telle qu'elle résulte des récents travaux de la Commission de Bruxelles, dépassera vraisemblablement à cette date 1 milliard de Tep.

La dépendance dans le domaine de l'approvisionnement pétrolier ne saurait donc cesser de ce fait.

Enfin, dans l'ensemble du secteur énergétique, le temps nécessaire à la mise en valeur d'un gisement constitue un facteur supplémentaire d'inertie : les délais séparant la prospection de l'exploitation s'étagent entre cinq et dix ans dans l'industrie pétrolière ; pour le gaz naturel il faut six à sept ans entre le début d'une négociation et les premières livraisons ; le forage d'un puits charbonnier exige au moins six ans ; des délais comparables sont également nécessaires à la réalisation d'une centrale nucléaire.

Au niveau économique et financier, la hausse des prix pétroliers entraîne, de façon générale, une série de conséquences redoutables : l'accélération du processus inflationniste ; le bouleversement des flux de capitaux ; l'aggravation du dérèglement du système monétaire international.

Le déficit des échanges énergétiques, qui atteignait 17 milliards de francs en 1973, sera de l'ordre de 48 milliards de francs en 1974. Quant à la balance commerciale, après avoir connu un excédent au cours de ces dernières années, elle enregistre un déficit de l'ordre de 10 milliards de francs en 1974.

La situation de la France est à cet égard comparable à celle de l'ensemble des pays de l'OCDE, dont les transferts de revenus supplémentaires vers les pays producteurs de pétrole sont évalués pour la seule année 1974 à environ 55 milliards de dollars.

LA CROISSANCE PREVISIBLE DES BESOINS ENERGETIQUES

L'importance des besoins

Les conséquences économiques et financières des nouvelles données pétrolières sont d'autant plus sérieuses qu'elles s'inscrivent dans une perspective à long terme de forte croissance des besoins en énergie.

(1) Cette délimitation est en cours de négociation avec la Grande-Bretagne.

De 1952 à 1972, la consommation énergétique mondiale est passée de 2 800 à 7 600 millions de tonnes d'équivalent charbon (tec). La plus grande part de cet accroissement a été couverte par le pétrole, dont la production est passée, au cours de cette période de 800 à 3 350 millions de tonnes d'équivalent charbon

A l'échelle du Marché Commun, selon les estimations effectuées par la Commission européenne avant la crise du pétrole, les besoins des pays membres, évalués à 1,3 milliard de tec en 1972, pourraient atteindre 2,4 milliards en 1985. Une étude plus récente, tenant compte de la réalisation d'économies dans l'emploi de l'énergie, prévoit malgré tout une consommation probable, à la même date, de 2,15 milliards de tec.

Un tel accroissement exigera, de toute manière, une politique énergétique et une stratégie d'approvisionnement très différentes de celles de ces dernières années.

En France, le VI^e Plan, prévoyait pour la consommation les chiffres respectifs de 280, 360 et 450 millions de tec en 1975, 1980 et 1985.

Pour tenir compte des effets immédiats des hausses de prix, les estimations du Commissariat Général du Plan ont été ramenées à 335 millions de tec pour 1980 et 395 millions de tec pour 1985.

Etant donné les possibilités d'économies, le Gouvernement a fixé pour 1985 un objectif de 360 Mtec, ce qui est cohérent avec une stabilisation entre 1973 et 1975, suivie d'une croissance de 3 % par an au-delà.

A l'horizon 2000, les estimations doivent tenir compte de la poursuite d'un développement industriel de la consommation par habitant qui pourrait ainsi passer de 5 à 10 tec par an (contre 12 tec par habitant et par an aux Etats-Unis en 1972) mais aussi des efforts d'économie et de la saturation de certains besoins.

L'incidence des économies d'énergie

Le niveau auquel ont été portés les prix de l'énergie modifient les choix économiques relatifs à son utilisation, et justifient un effort pour diminuer la quantité d'énergie consommée pour rendre les mêmes services. Les résultats dans ce domaine peuvent être atteints plus rapidement que dans celui de la production d'énergie, et le gouvernement français a mis en œuvre une politique destinée à promouvoir un tel effort. Pour renforcer son action dans ce domaine, a été créée une Agence pour les Economies d'Energie, établissement public placé sous la tutelle du Ministère de l'Industrie et de la Recherche. Des campagnes d'information ont été engagées dans le même sens dès la fin de 1973. Elles ont été développées en 1974 et 1975 et seront poursuivies dans l'avenir.

L'effort doit être entrepris à la fois dans les trois secteurs qui se partagent le marché : les usages domestiques, l'industrie et les transports, représentant respectivement 40 %, 40 % et 20 % de la consommation nationale d'énergie primaire.

Par rapport à un logement actuel, une meilleure isolation des parois dans les locaux de toute nature et l'installation systématique de mécanismes de régulation du chauffage permettraient théoriquement, selon certains experts, de diminuer de 40 % la consommation de chauffage des locaux.

A elle seule, l'acceptation d'une température inférieure de 2 degrés en moyenne dans les immeubles d'habitation, conduirait à une économie de l'ordre de 10 à 15 % du combustible de chauffage (1).

Dans l'industrie, l'amélioration du fonctionnement des appareils consommant l'énergie, la mise en œuvre de nouveaux procédés, la recherche de nouveaux produits nécessitant un moindre apport d'énergie doivent permettre progressivement des économies notables sans compromettre l'activité du pays.

(1) Rapport du Conseil Economique et Social sur les problèmes de l'énergie - juillet 1974.

Enfin, une politique tendant à une meilleure utilisation des modes de transport en commun est susceptible, à condition d'être largement appliquée, de conduire à des économies substantielles.

L'application d'une politique d'économie de l'énergie permettra, certes, de diminuer l'impact de la crise actuelle. (L'économie d'un million de tonnes de pétrole brut revient en effet à réduire d'environ 400 millions de francs le déficit de la balance française des transactions courantes). Toutefois, la longueur des délais nécessaires aux nouvelles adaptations, dans le domaine industriel comme sur le plan des habitudes de consommation individuelle dans une société de liberté, ne permettra pas de résoudre à elle seule le problème actuel de l'énergie.

LA RECHERCHE SYSTEMATIQUE D'UNE DIVERSIFICATION DES APPROVISIONNEMENTS

Echapper au poids du pétrole, c'est donc essentiellement étudier les voies d'une diversification des approvisionnements énergétiques.

Un tel objectif suppose un effort dans trois directions : la recherche d'un meilleur équilibre géographique des importations, le réexamen des ressources traditionnelles du territoire, l'étude systématique des nouvelles sources d'énergie.

La diversification des importations

Le pétrole étant destiné à demeurer longtemps encore le combustible le plus utilisé et sa répartition étant très concentrée dans certaines régions du monde, la France dispose d'une marge de manœuvre restreinte à moyen terme.

Le prix du pétrole fixé par les exportateurs du Golfe Persique tend à prendre le caractère d'un prix mondial. Certains des pays producteurs, notamment les Etats-Unis, sont en outre également consommateurs, ce qui réduit leurs capacités d'exportation.

En conséquence, la France s'efforce de mettre en œuvre une politique tendant à diversifier l'origine de ses importations en énergie. C'est ainsi que des contrats importants d'approvisionnement à long terme ont été négociés ou réexaminés récemment avec l'URSS pour la fourniture de gaz naturel, avec la Pologne pour la livraison de charbon.

Le développement des ressources du territoire

Les nouveaux prix du pétrole importé ont bouleversé les anciens rapports de concurrence qui s'étaient établis entre les diverses sources d'énergie classiques.

Le charbon

La production française de charbon — dont le prix de revient était devenu supérieur à celui du pétrole — a subi une régression à partir de 1960.

En raison des nouvelles données de l'économie pétrolière, les charbonnages ont réexaminé leur programme de production afin de maintenir les exploitations conduisant à un coût inférieur à 3 centimes par thermie (valeur au 1^{er} janvier 1974).

Les réserves françaises sont faibles. Les réserves totales ne dépassent pas 1,4 milliard de tonnes, et les réserves exploitables à ce niveau de 3 centimes par thermie sont peu supérieures à 500 millions de tonnes. Un nouveau programme de recherches est engagé par les charbonnages de France.

Ceci à comparer à 170, 280 et 1 500 milliards de tonnes en Grande-Bretagne, en République Fédérale Allemande et aux Etats-Unis. Par ailleurs, en l'état actuel des techniques, la sidérurgie française doit importer la quasi-totalité du charbon à coke dont elle a besoin. Il apparaît souhaitable de poursuivre une politique permettant à la France de prendre des intérêts dans des mines étrangères, tout en développant, dans toute la mesure du possible, ses importations de charbon.

Le gaz naturel

Le gaz naturel a connu et continuera de connaître une expansion notable.

Ses atouts sont importants : mieux distribué dans le monde que le pétrole, il est exceptionnellement propre et présente l'avantage d'être immédiatement utilisable par le consommateur, sans stockage préalable (bien que son acheminement sur les marchés de consommation soit beaucoup plus onéreux que celui du pétrole).

Les réserves mondiales connues représentent la moitié de celles du pétrole. La production française, celle du complexe de Lacq, décroîtra pour sa part inéluctablement à partir de 1983, en raison de l'épuisement du gisement.

C'est pourquoi un recours important à l'importation est recherché : Algérie, Pays-Bas, URSS notamment.

Sa part dans le bilan énergétique, de 8 % environ actuellement, pourrait passer à plus de 15 % en 1985.

L'énergie hydraulique

Elle représente une grande richesse nationale dont les avantages sont certains à plusieurs égards : ressource indéfiniment renouvelable, faible coût d'exploitation, absence de pollution. La production annuelle, en hydraulité normale est de l'ordre de 58 milliards de KWh, c'est-à-dire le tiers de notre consommation d'électricité.

Toutefois les sites les plus intéressants sont d'ores et déjà exploités et il convient de rechercher, à l'intérieur du gisement français, de nouvelles possibilités, compte tenu des données économiques actuelles. D'une manière générale, l'investissement hydraulique coûte trois à quatre fois plus que l'investissement nucléaire et exige de longs délais de procédures et de réalisation.

Une nouvelle réflexion sur les possibilités est nécessaire et le Gouvernement a mis en place une Commission d'études sur l'électricité d'origine hydraulique, chargée de recenser toutes les possibilités dans ce domaine, tant pour EDF que pour d'autres producteurs.

L'énergie marémotrice

De même, on invoque quelquefois les applications visant à tirer parti des marées, sur le modèle de la réussite technique de l'usine de la Rance, première unité mondiale d'exploitation de l'énergie marémotrice.

Le projet, grandiose et très coûteux, des îles Chausey, permettrait en effet, par exemple, d'installer environ 5 600 MWe, soit l'équivalent d'une centrale nucléaire de 5 à 6 tranches.

Mais la lourdeur de l'investissement dans ce type d'installations, les délais de réalisation, la complexité de la technologie, les conséquences pour l'environnement et le nombre très restreint des sites envisageables obèrent considérablement l'intérêt de tels projets.

Les possibilités des nouvelles sources d'énergie

Le développement suffisant des sources classiques d'énergie apparaissant hypothétique, il devient d'autant plus nécessaire d'étudier les possibilités réservées par d'autres ressources potentielles, demeurées jusqu'à présent quasiment inexploitées pour des raisons économiques autant que techniques. Le problème dépasse ici, évidemment, le cadre français.

Les schistes bitumineux et les sables asphaltiques

On sait depuis longtemps qu'ils renferment d'immenses réserves de pétrole, mais ils n'avaient fait l'objet d'aucune exploitation sérieuse en raison de leur coût d'extraction très élevé. Les nouveaux prix du pétrole ont modifié cette situation et permettent aujourd'hui d'envisager leur utilisation industrielle dans des conditions compétitives.

Or les réserves mondiales d'huile en provenance de ces schistes seraient actuellement estimées à 200 milliards de tonnes. Une part importante de ces gisements est située dans des régions telles que le Canada et les Etats-Unis (Colorado).

C'est pourquoi en France la Délégation Générale à la Recherche Scientifique et Technique (DGRST) a récemment entrepris, avec la collaboration du Bureau de Recherches Géologiques et Minières, des Charbonnages de France, de l'Institut Français du Pétrole et de sociétés pétrolières privées, de dresser l'inventaire du potentiel énergétique de ces schistes.

La complexité des techniques à mettre en œuvre et le poids des investissements nécessaires ne permettent pas d'espérer le démarrage d'une exploitation éventuelle avant une dizaine d'années, en outre les problèmes d'environnement liés à l'exploitation des gisements paraissent aujourd'hui difficilement surmontables.

Le charbon et les hydrocarbures de synthèse

Les réserves mondiales de charbon sont considérables et seraient suffisantes quantitativement pour couvrir à elles seules les besoins énergétiques mondiaux pendant très longtemps.

Le contexte nouveau incite divers pays à développer d'importants programmes de recherche en vue de transformer le charbon en **hydrocarbures de synthèse**, plus facilement utilisables.

C'est en particulier le cas des Etats-Unis, dans le cadre du projet « Indépendance » qui a pour objectif d'assurer rapidement l'autonomie énergétique de ce pays. C'est aussi celui de l'Allemagne. Ces deux pays qui disposent de gisements charbonniers facilement exploitables ont annoncé leur intention de développer de tels programmes.

La transformation du charbon en essence et en gaz remonte à la mise au point, en 1915, du procédé Bergius.

Aujourd'hui, les recherches s'organisent autour d'une série de projets très nombreux qui visent, selon le cas, à produire un bon substitut au gaz naturel, le SNG (substitute of natural gas), ou un gaz à faible pouvoir calorifique, ou encore des hydrocarbures liquides ; dans tous les cas, le coût de la production restera élevé.

D'autres projets sont encore plus révolutionnaires, tel les procédés magnéto-hydrodynamiques (MHD), qui s'appliquent à la transformation directe du charbon en électricité, sans passer par les étapes classiques : chaudière - turbine - alternateur.

Les résultats de ces recherches sont encore incertains, et la date de leur application industrielle à large échelle ne peut se concevoir qu'après 1990.

En tout état de cause, on peut dire, dès maintenant, qu'il existera, aux Etats-Unis, probablement plus d'une dizaine d'usines de SNG vers 1985, et environ une quarantaine vers 1990.

La géothermie

Plus immédiates sont les possibilités d'exploitation de la **géothermie** qui utilise la vapeur ou l'eau chaude provenant de la terre, pour produire de l'électricité.

Quelques sites naturels, notamment aux Etats-Unis (Californie), en Nouvelle-Zélande (Wairakei), en Italie (Larderello et le mont Amiata), au Japon, en Hongrie et en Islande, sont déjà exploités. En Californie, les sociétés d'électricité construisent ou prévoient de nouvelles centrales géothermiques.

La mise en valeur de l'énergie géothermique à faible profondeur peut se traduire soit par l'exploitation industrielle de gisements de vapeur pour la production d'électricité (géothermie de haute énergie, dont les températures sont supérieures à 150° C), soit par l'utilisation directe de l'eau chaude (géothermie de basse énergie, les températures variant entre 60 et 150° C), en particulier pour le chauffage urbain.

En France, une certaine expérience a déjà été acquise par l'exploitation, depuis 1970, de la nappe du Dogger, qui assure le chauffage et l'alimentation en eau chaude de deux mille logements à Melun-l'Almont.

Sur le territoire métropolitain (1), certaines régions, telles que les bassins parisien et aquitain, recèlent d'importantes disponibilités en nappes d'eau chaude, mais à faible température (de l'ordre de 70° C), ce qui en limite les possibilités d'utilisation dans des conditions économiquement acceptables.

Relativement peu polluante, l'énergie géothermique pourrait donc être promise à un certain avenir dans notre pays. Mais des délais importants n'en resteront pas moins nécessaires pour son développement.

L'énergie solaire

Source de chaleur théoriquement inépuisable, l'énergie solaire doit être développée, compte tenu de l'état actuel de la technologie, dans tous les secteurs spécifiques d'emploi d'une énergie calorifique de faible densité, notamment pour le chauffage domestique et la production d'eau chaude. Il existe d'ailleurs un certain nombre de réalisations prototypes de maisons solaires en France, ainsi que quelques fabrications en petite série de chauffe-eau destinées principalement à l'exportation.

Les pompes solaires utilisent le principe de la conversion de l'énergie solaire en énergie mécanique par un cycle thermodynamique à faible différence de température (30° C), avec un rendement limité actuellement à 8 % environ. Elles sont actuellement opérationnelles et fabriquées avec succès par l'industrie française essentiellement pour les pays étrangers à fort ensoleillement.

En matière de production d'électricité, il convient d'associer un générateur photovoltaïque et un stockage « tampon » pour tenir compte des variations journalières et saisonnières. Les recherches jusqu'ici limitées vont être très sensiblement accrues et développées dans le cadre d'actions communautaires. Un développement industriel ne sera concevable que lorsque tous les aspects notamment économiques (le coût d'investissement est actuellement prohibitif quel que soit le critère d'utilisation) et écologique (les surfaces nécessaires sont considérables) seront correctement pris en compte.

(1) Hors du territoire métropolitain, dans le département d'outre-mer de la Guadeloupe, la Société Eurafrep a découvert, en 1970, l'important gisement de vapeur de Bouillante.

L'énergie éolienne

Cette énergie, mise à l'écart avec le développement industriel, peut être reconsidérée pour les usages très ponctuels dans les régions les plus favorisées. Elle permet une économie de combustible dans le cas de villages isolés en milieu hostile (par exemple arctique canadien) ou éloignés d'un centre industriel, ou encore pour l'alimentation de phares éloignées du continent.

En dehors de l'utilisation directe sous forme d'énergie mécanique, la conversion en électricité a été expérimentée dans plusieurs pays, et notamment en France où EDF a réalisé des aérogénérateurs d'une puissance de 800 à 1 000 kW et a démontré les possibilités techniques de petites centrales de quelques kW utilisables localement lorsqu'on ne dispose pas de réseau interconnecté. Cette énergie se prête facilement à l'initiative privée et c'est pour cela que le Gouvernement a récemment encouragé une telle recherche par un concours d'idées dont les plus intéressantes feront l'objet de suites favorables.

Une production massive d'électricité se heurte aujourd'hui à des difficultés majeures de caractère technique et économique et également à des problèmes d'environnement (notamment de bruit) qui la rend aléatoire et de toutes façons envisageable à long terme.

Afin de préparer le futur, d'importants programmes de Recherche et Développement sont organisés en France comme dans d'autres pays, en vue de développer les possibilités des énergies dites nouvelles.

Bien que l'on ne puisse en attendre une solution suffisante, il apparaît qu'il y a là un domaine important à explorer.

LE DEVELOPPEMENT DE L'ENERGIE NUCLEAIRE

Le nouveau rapport des prix établi entre l'énergie atomique et l'énergie tirée du pétrole ne peut que favoriser une pénétration de l'électricité d'origine nucléaire.

En même temps, la recherche d'une moindre dépendance à l'égard des importations pétrolières conduit à moyen terme à essayer de satisfaire par l'énergie nucléaire une part croissante de la consommation énergétique couverte par les hydrocarbures.

Une telle évolution, volontairement appuyée, ne peut néanmoins avoir des effets que progressivement, et à horizon assez éloigné.

Le développement de l'énergie nucléaire sera en réalité lié au développement des usages thermiques de l'électricité dans le domaine domestique, au réaménagement des processus de fabrication dans certaines activités industrielles, mais aussi à la mise au point de techniques nouvelles.

Le secteur domestique

Les applications domestiques de l'électricité continuent à faire l'objet de recherches systématiques dans les domaines du chauffage et de la climatisation des locaux, comme dans le secteur ménager, particulièrement perméable à l'électricité.

De nouvelles techniques électriques sont ainsi en cours de développement pour étendre les usages électroménagers et concurrencer les utilisations des combustibles pétroliers. C'est le cas des foyers à induction électromagnétique, qui chauffent direc-

tement le fond des récipients sans support thermique et des fours à micro-ondes, employés pour la décongélation rapide des produits surgelés.

Le développement des usages électriques pour le simple chauffage des locaux, bureaux ou logements, est étroitement lié à la construction de nouveaux bâtiments. La recherche simultanée du confort et de l'économie d'énergie a conduit en France, comme dans beaucoup d'autres pays industrialisés, à accompagner le chauffage électrique d'un dispositif de régulation associé à une isolation thermique et à une ventilation mécanique.

Pour les bureaux et les locaux à usages collectifs (écoles, hôpitaux, surfaces commerciales, etc...) des recherches sont entreprises également en vue d'intégrer des techniques d'éclairage et de climatisation dans un ensemble cohérent.

Les effets de ces divers efforts ne pourront évidemment se faire sentir que progressivement, car ils concerneront surtout les nouvelles constructions.

Le secteur industriel

Sans vouloir passer en revue tous les domaines industriels susceptibles d'une utilisation croissante de l'électricité, il semble intéressant de citer quelques exemples d'activités se prêtant à l'emploi de nouvelles techniques favorisant la pénétration de l'énergie électrique.

On envisage, ainsi, pour certaines industries agro-alimentaires, différents procédés sur membranes pour des opérations de concentration, de fractionnement, de purification ou de déminéralisation de produits liquides.

D'importants débouchés s'ouvrent aussi aux applications industrielles de l'électricité dans les secteurs de la sidérurgie et de la métallurgie dont les usages thermiques représentent près de 90 % de leur consommation totale d'énergie. L'emploi de fours électriques ou de fusion à arc pour l'élaboration de l'acier semble notamment promis à certains développements.

Dans le secteur mécanique, dont les usages thermiques de l'énergie occupent environ 50 % de la consommation globale, des travaux sont entrepris pour améliorer la connaissance des techniques de dissolution électrolytique et développer les procédés d'usinage électro-chimique.

Dans les industries de transformation, deux procédés électriques pourraient donner lieu à des applications importantes dans les opérations de séchage et de traitement thermique du papier et des textiles : le chauffage di-électrique par rayonnements haute fréquence ou hyper-fréquence, et le chauffage par rayonnements infra-rouge.

L'industrie chimique, de son côté, se prête à l'extension des usages de l'électricité. Cette pénétration sera liée surtout à l'apparition de nouveaux procédés de préparations, notamment dans le domaine de la chimie lourde. Bien que pratiquement inexistante pour l'instant, l'électro-chimie organique est appelée, selon les professionnels, à d'importantes applications industrielles dans un avenir plus lointain. Des études sont aussi entreprises pour développer les applications de la photochimie.

Autre exemple : il faut s'attendre à une progression considérable des techniques électriques employées dans les installations d'épuration des eaux usées ou de traitement des eaux potables. De nouvelles méthodes utilisant l'électricité sont d'ores et déjà en vigueur pour le traitement des effluents (oxydation anodique, électro-floculation, électro-flottation, électrolyse de l'eau de mer et des eaux potables, ozonation).

Enfin, le secteur des transports, qui absorbe à lui seul 20 % de la consommation énergétique nationale, représente un large domaine potentiel pour le développement des usages de l'électricité, mais où le pétrole est particulièrement difficile à concurrencer. L'utilisation du véhicule électrique pourrait toutefois, à moyen terme, trouver des applications notables, dans les transports urbains et collectifs.

Les nouvelles techniques

La substitution partielle de l'atome au pétrole passe, aussi, par la mise au point industrielle de nouvelles techniques.

Dans cet ordre d'idée, les pompes à chaleur pourraient par exemple donner lieu, à l'avenir, à des applications intéressantes. Leur principe, analogue à celui du réfrigérateur, est bien connu : elles permettent, par un apport de travail qui peut être fourni par un moteur électrique, de prélever des calories à une source dite « froide » pour les restituer, à une température supérieure, au milieu que l'on cherche à chauffer.

Ce procédé, qui accède aujourd'hui au stade industriel, mais dont la rentabilité et surtout la fiabilité restent à améliorer, peut présenter un réel intérêt économique pour le chauffage des locaux ou les traitements thermiques de certaines fabrications (industries alimentaires notamment). Il rendrait possible la récupération d'énormes quantités de calories qui sont perdues ou inexploitées actuellement, uniquement parce que leur température est trop basse : c'est le cas de certaines nappes phréatiques qui pourraient ainsi être utilisées pour le chauffage domestique, et des eaux de refroidissement des centrales nucléaires elles-mêmes, qui pourraient alors servir à alimenter des systèmes de chauffage urbain, des serres, etc...

Il va de soi, pourtant, que la substitution de l'énergie électrique au pétrole, qui pose un vaste ensemble de problèmes techniques très diversifiés, ne peut se concevoir que comme un travail progressif et de longue haleine.

La politique à mener en la matière sera soigneusement préparée car il convient évidemment d'éviter qu'elle puisse se traduire globalement par une demande accrue d'énergie, ce qui irait à l'encontre d'un des objectifs fondamentaux poursuivis par ailleurs.

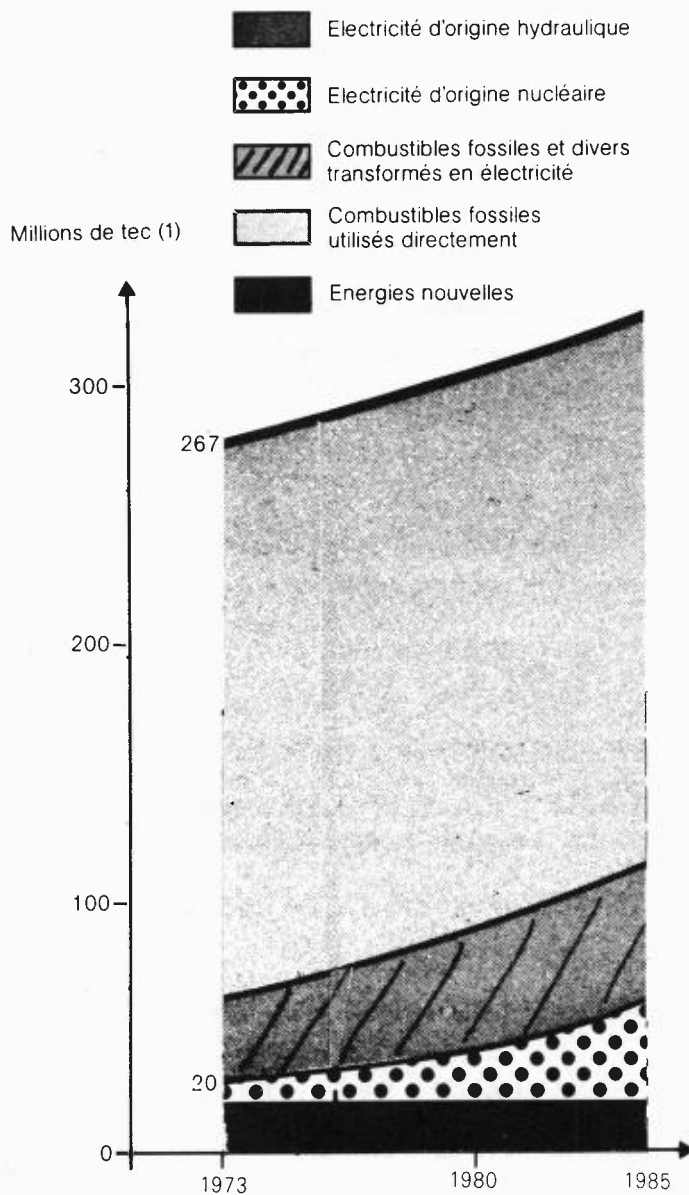


Malgré son ampleur, le programme électro-nucléaire français est réaliste et tient compte des nécessités imposées par le développement énergétique du pays.

A l'horizon 1985, la production électro-nucléaire ne couvrira qu'une part encore modeste, de l'ordre de 25 %.

Le choix nucléaire français, conforme à une évolution mondiale, présente aussi des avantages économiques renforcés par les atouts dont dispose l'énergie électro-nucléaire, dans le nouveau contexte énergétique.

Evolution de la consommation d'énergie



Bilan en millions de tec (1)

| Années | Hydraulique + nucléaire | Charbon | Hydrocarbure | | Energies nouvelles | Total |
|--------|-------------------------|---------|--------------|---------|--------------------|-------|
| | | | Gaz | Pétrole | | |
| 1973 | 20 | 45 | 23 | 178 | — | 267 |
| 1985 | 110 | 45 | 56 | 144 | 5 | 360 |

(1) Pour comparer et additionner entre elles des énergies de différentes natures on les évalue en « tonnes d'équivalent charbon »: 1 tonne de pétrole = 1,5 tec. 3 000 kWh = 1 tec.

LES ATOUTS DE L'ENERGIE NUCLEAIRE

DES AVANTAGES ECONOMIQUES EVIDENTS

La compétitivité de l'électricité nucléaire

Retardé au cours des années soixante par la concurrence pétrolière, le développement de l'énergie électro-nucléaire est aujourd'hui économiquement justifié, sa position vis-à-vis du pétrole étant devenue très compétitive.

Selon la Commission PEON, le coût du kilowatt-heure à base de fuel s'élevait, au lendemain de la hausse des prix pétroliers, à 8,19 centimes dont 5,93 centimes pour le seul combustible, alors que le kWh nucléaire revenait à 4,48 centimes.

Aujourd'hui, aux conditions économiques du 1^{er} janvier 1975, l'énergie nucléaire est donc pleinement compétitive pour la production d'électricité à partir de nouvelles centrales thermiques.

Certes, l'investissement nécessaire à la réalisation d'une centrale nucléaire demeure supérieur d'environ 65 % à celui d'une unité à combustible fossile de même puissance.

Les frais d'exploitation des centrales nucléaires (personnel, entretien, charges fiscales, etc...) sont pour l'instant très légèrement plus élevés par kilowatt installé et par an — 45 à 46 francs contre 44 francs — quoique cette faible différence soit normalement appelée à disparaître avec l'accélération du programme d'investissements.

Mais le coût de l'ensemble de la chaîne de production depuis la mine jusqu'au traitement, y compris les amortissements des équipements et des usines, est aujourd'hui moins lourd que dans l'industrie des hydrocarbures.

Comme le montre le tableau ci-joint, la part du combustible dans le coût total du kWh est d'autre part sensiblement plus faible dans le cas de l'énergie nucléaire.

COUTS MOYENS ACTUALISES DE PRODUCTION DU KWH

Les valeurs ci-dessous sont exprimées en c/kWh aux conditions économiques du 1^{er} janvier 1975 : elles sont relatives à un fonctionnement en base (54 100 h actualisées sur 20 ans).

| | Centrale nucléaire PWR c/kWh | % | CENTRALE THERMIQUE AU FUEL c/kWh | % |
|----------------|---------------------------------|-----|-------------------------------------|-----|
| Investissement | 3,15 | 52 | 1,83 | 17 |
| Exploitation | 1,18 | 20 | 1,11 | 10 |
| Combustible | 1,67 | 28 | 7,90 (1) | 73 |
| TOTAL | 6,00 | 100 | 10,84 | 100 |

(1) Correspond à une consommation spécifique de 2,36 th/kWh et un prix de la thermie de 3,35 centimes.

Cet avantage doit même être considérablement accentué avec la mise en service des réacteurs surrégénérateurs, dont l'intérêt majeur réside précisément dans leur faible consommation d'uranium naturel.

Pour cette raison, le coût de production de l'électricité nucléaire est beaucoup moins sensible aux variations de prix pouvant ultérieurement affecter le combustible, ce qui réduit les risques de pression des producteurs d'énergie primaire : un doublement du prix de l'uranium naturel n'aurait pas plus d'effet, sur le coût final, qu'une hausse de 7 % du prix du pétrole et ne correspondrait qu'à une augmentation de l'ordre de 10 % du coût de production du kilowatt-heure nucléaire.

L'énergie nucléaire électrique peut être véritablement qualifiée d'industrielle, le combustible ayant une faible incidence financière, alors que l'électricité thermique au fuel, au charbon ou au gaz, est une énergie de ressources naturelles, son prix étant largement fonction de celui de la matière première utilisée.

L'ouverture de nouveaux débouchés à l'exportation

Pour pouvoir se développer rapidement et harmonieusement, l'industrie nucléaire, comme les autres secteurs de l'activité économique, doit être en mesure de bénéficier d'un courant d'exportation régulier et en expansion. C'est une condition essentielle de ses progrès dans l'avenir, sur laquelle la Commission PEON a mis l'accent dans son dernier rapport. C'est aussi une contribution nécessaire au rééquilibrage de la balance commerciale, affectée par la crise du pétrole.

Dans ce domaine, les perspectives qui s'ouvrent à la France apparaissent favorables, en raison de l'expérience industrielle acquise comme de l'extension actuelle des débouchés sur le plan international.

Dès les années soixante, l'industrie atomique française, bénéficiant de l'avance technique du CEA, obtenait des résultats appréciables à l'exportation, tant sur le plan de l'assistance et des services fournis que pour la réalisation d'unités de production électro-nucléaires à l'étranger.

Brevatome, société française pour la gestion des brevets d'application nucléaire, recherchait et obtenait ses premières licences, fondant même, dans ce but, une filiale aux Etats-Unis.

La vente des radio-éléments, notamment en association avec le centre d'études nucléaires belge et la société italienne Sorin, progressait sur tous les marchés.

Plusieurs contrats, assurant la pénétration des techniques françaises à l'étranger, étaient conclus : grandes chambres à bulles pour le CERN (Centre Européen de Recherche Nucléaire), commande d'une usine de retraitement de combustibles irradiés au Japon (Saint-Gobain Techniques Nouvelles), accords franco-allemands pour le réacteur à haut-flux à Grenoble et franco-japonais pour la chimie sous radiation...

De nombreuses techniques, telles que l'instrumentation et l'électronique nucléaires, les machines de soudure par bombardement électronique, les dispositifs d'expérimentation en pile, développées sous licence CEA, étaient exportées.

En même temps, l'industrie française s'efforçait de vendre ses premières centrales, à uranium naturel-graphite-gaz, à l'étranger, réalisant notamment, en Espagne, la centrale atomique de Vandellòs.

Les impératifs liés à la nécessité d'exporter ayant précisément largement contribué au choix des filières à eau ordinaire, et l'ensemble des pays du monde accentuant ses efforts pour se doter d'une infrastructure nucléaire, des perspectives, nouvelles et durables, s'ouvrent aujourd'hui à l'industrie atomique française.

Un approvisionnement relativement sûr et bon marché

L'avenir de l'industrie nucléaire est également lié, dans une très large mesure, aux conditions d'approvisionnement en uranium naturel, matière première soumise, comme toutes les autres, aux fluctuations de l'offre et de la demande.

Le marché de l'uranium, caractérisé au cours des dix dernières années par une stagnation relative de la demande, en raison du développement limité de la production électro-nucléaire, devrait connaître une évolution sensiblement différente au cours des prochaines années.

Essentiellement orientée au départ vers la constitution de stocks gouvernementaux pour les besoins militaires, la production mondiale avait atteint son niveau record en 1959 avec 34 000 tonnes de minerai. Elle fut ensuite progressivement réduite jusqu'à moins de 16 000 tonnes en 1965, pour n'atteindre, en 1973, qu'un peu plus de 20 000 tonnes. Or, la même année, la consommation des pays occidentaux n'a pas dépassé 17 000 tonnes.

Cette distorsion est à l'origine d'une baisse très sensible des prix mondiaux de l'uranium naturel, dont la livre d'oxyde (U_3O_8) est tombée de 10 dollars (1) en 1960 à 8,5 dollars en 1965 et à 6,2 dollars en 1970 ; à partir de cette date, un redressement s'amorçait, les prix ayant atteint respectivement 6,8 et 7,2 dollars la livre en 1972 et 1973.

Aujourd'hui, les prix de l'uranium naturel, stimulés par l'accélération des programmes électro-nucléaires, sont orientés à la hausse.

Selon les prévisions de l'Agence de l'OCDE pour l'Energie Nucléaire (AEN) (2), la capacité mondiale annuelle de production devrait atteindre 30 000 tonnes vers 1975 et pourrait être portée à environ 50 000 tonnes en 1978.

Mais la demande devrait progresser plus vite encore, pour se situer aux environs de 60 000 tonnes d'uranium vers 1980 et l'on prévoit qu'elle aura presque doublé en 1985.

La rapide expansion de la demande, escomptée au cours de la prochaine décennie, exige dès maintenant une reprise et une accélération des travaux de prospection, qui avaient connu, au cours des dernières années, un certain ralentissement, dû à un niveau d'activité insuffisant de l'industrie nucléaire.

Un effort accru dans ce domaine apparaît d'autant plus urgent qu'il s'écoule un délai de sept à huit ans entre la découverte d'un gisement et sa mise en exploitation.

Depuis la crise pétrolière de l'automne 1973 et l'accélération consécutive des programmes électro-nucléaires, le marché de l'uranium naturel connaît une tension qui risque de durer jusque vers la fin de la présente décennie, pour faire place ensuite à une expansion soutenue à partir des années quatre-vingt.

Les ressources mondiales raisonnablement assurées sont actuellement estimées par l'AEN à 866 000 tonnes d' U_3O_8 pour un prix d'extraction inférieur à dix dollars la livre d'oxyde ; les « réserves supplémentaires estimées » seraient de l'ordre de 916 000 tonnes. Pour un prix d'extraction oscillant entre 10 et 15 dollars la livre d'oxyde, on obtiendrait respectivement 670 000 tonnes et 627 000 tonnes de ressources complémentaires. Or, les besoins annuels du monde occidental en uranium naturel pourraient s'élever, selon l'AEN à 65 000 tonnes dès 1980, pour atteindre 130 000 à 150 000 tonnes en 1985, 200 à 240 000 tonnes en 1990 et 300 à 400 000 tonnes en l'an 2000.

(1) Avec 1 dollar = 4,50 FF, 10 dollars par livre d'oxyde U_3O_8 sont équivalents à 155 FF par kilo d'uranium.

(2) L'Agence de l'OCDE pour l'Energie Nucléaire, AEN, est la nouvelle dénomination officielle de l'ancienne ENEA, Agence Européenne pour l'Energie Nucléaire, dont elle a remplacé le sigle, à la suite de l'adhésion du Japon comme membre à part entière en avril 1972.

De tels chiffres ne doivent toutefois pas induire en erreur. Ils sont en effet le résultat d'efforts de prospection qui n'en sont encore qu'à leurs débuts. Les réserves du globe sont, en toute hypothèse, très supérieures à leur évaluation actuelle. Un large domaine inexploré subsiste, non seulement sur les continents, mais encore dans les fonds sous-marins, dont on sait qu'ils recèlent d'immenses richesses en matières fissiles. Ces ressources, certes, seront plus coûteuses à mettre en valeur, mais leur existence élimine à long terme la crainte d'une pénurie physique d'uranium naturel.

A la limite extrême, en acceptant de décupler le prix actuel de l'uranium, il serait possible d'obtenir celui-ci à volonté, les réserves exploitables économiquement devenant alors pratiquement illimitées.

Mais, sans aller jusque là, il est certain que l'élévation du prix de l'uranium sur le marché et les résultats de la recrudescence des campagnes de prospection permettront de satisfaire les besoins.

Au demeurant, les réacteurs surrégénérateurs dont la France a entrepris spécialement le développement, permettront, à terme, de réduire considérablement les besoins en uranium naturel, comme on le verra plus loin.

UN APPROVISIONNEMENT DIVERSIFIÉ

L'uranium naturel présente l'avantage d'être géographiquement et politiquement beaucoup mieux réparti dans le monde que le pétrole (1), et de façon assez favorable à la France.

Quatre grands pays occidentaux, les Etats-Unis (260 000 tonnes), le Canada (185 000 tonnes), l'Australie (71 000 tonnes) et la France (60 000 tonnes) en sont les principaux détenteurs. La République Sud-Africaine dispose également de réserves considérables, évaluées à plus de 200 000 tonnes.

En Afrique Noire francophone, le Gabon et surtout le Niger (40 000 tonnes de ressources raisonnablement assurées, auxquelles s'ajoutent 30 000 tonnes de ressources supplémentaires estimées) sont parmi les pays les mieux pourvus.

La République Indienne n'a pas d'uranium naturel mais elle possède les principales réserves mondiales de thorium, autre matière première de l'industrie nucléaire.

Les facilités de stockage sont un autre atout de cette matière première. Le stock de deux années de consommation représenterait, en 1985, 20 000 tonnes, soit quelques milliers de m³ seulement, ne posant ni problème d'espace, ni difficulté financière.

Or les capacités de stockage de la matière première sont un facteur essentiel de la sécurité de l'approvisionnement énergétique, notamment en période de crise ou de simple soudure du cycle de la production et de la consommation. Au 1^{er} janvier 1974, les stocks français atteignaient 8 400 tonnes. Leur niveau est encore suffisant pour quelques années, mais, compte tenu de l'accroissement prévisible des besoins, il apparaît nécessaire de poursuivre activement les efforts dans les domaines de la prospection et de la production minières.

Il va de soi que la production des mines françaises actuellement en exploitation, en particulier dans le Limousin et en Vendée sera accrue, alors qu'une nouvelle division minière sera ouverte dans l'Hérault. Par ailleurs, le CEA et des sociétés privées continuent à prospecter diverses régions de France (Massif Central, Var, Vosges, etc...) et déploient des activités analogues à l'étranger (Niger, Mauritanie, Gabon, Canada, Etats-Unis, Indonésie, Australie, etc...).

La détermination des gouvernements qui ont décidé d'accélérer leurs programmes électro-nucléaires, et l'écart actuel entre les prix du pétrole et ceux de l'énergie atomique, pourraient même à terme contribuer à détendre les prix pétroliers.

(1) Voir l'Annexe 4 pour des détails concernant les réserves d'uranium naturel dans le monde.

Dans tous les cas, les réserves d'hydrocarbures actuellement connues ne semblent pas suffisantes — quelles que soient les possibilités ouvertes par certains grands fonds sous-marins — pour imposer une concurrence réelle, au-delà de quelques décennies, à l'énergie nucléaire dont la position de force est, de ce fait, appelée à s'affirmer.

LES PERSPECTIVES D'AVENIR

Pour apprécier la valeur du choix nucléaire, il faut d'abord définir son domaine d'application (chaleur) puis développer les nouvelles technologies dont la mise en œuvre est susceptible de multiplier la capacité énergétique actuelle et d'apporter un progrès considérable dans beaucoup de domaines.

Parmi ces technologies, la surrégénération et la filière à haute température sont industriellement envisageables avant 1985 ou légèrement au-delà et peuvent se révéler particulièrement intéressantes.

D'autres, telles que la fusion nucléaire, ne sont pas encore maîtrisées, mais constituent, à plus lointaine échéance, un potentiel d'une portée immense.

L'utilisation possible de la chaleur nucléaire

L'exploitation de la chaleur à partir de la vapeur par les chaudières nucléaires apparaît aujourd'hui, après de longues années de recherche, susceptible de concourir de façon non négligeable au développement du rôle de l'énergie atomique dans l'économie nationale.

L'emploi de la vapeur nucléaire pourrait concerner aussi bien le chauffage urbain que le chauffage industriel à divers niveaux de températures.

Plusieurs pays industrialisés, notamment l'Allemagne Fédérale, les Etats-Unis (à partir des réacteurs HTGR), la Suède et le Japon envisagent des programmes importants dans ce domaine.

L'utilisation de la chaleur nucléaire semble possible à partir de centrales mixtes, productrices simultanément d'électricité et de vapeur industrielle, dont il existe déjà un certain nombre d'exemplaires dans le monde.

Aux Etats-Unis, un projet de centrale mixte, comprenant deux tranches de 855 MWe, doit être réalisé à Midland, dans le Michigan, par la Consumers Powers Co, qui vendra de la vapeur à la Dow Chemical, l'un des premiers consommateurs américains de chaleur industrielle.

L'exploitation de la chaleur nucléaire est également envisagée à partir de réacteurs autonomes de faible puissance, producteurs uniquement de vapeur. Une étude sur ce point a été récemment entreprise aux Etats-Unis dans le cadre d'un groupement de huit sociétés industrielles représentant les secteurs chimique, pétrolier (raffinage) et papetier. Cette étude concerne un petit réacteur à eau légère d'environ 300 MW thermiques, mis au point par Babcock and Wilcox.

En France, le CEA s'intéresse également aux petites unités productrices de vapeur, en axant notamment ses recherches autour du réacteur CAP (Chaudière Avancée Prototype).

De son côté, la République Fédérale Allemande oriente ses efforts vers différentes formes d'applications industrielles de la chaleur nucléaire : gazéification du charbon, réformage du méthane, production d'hydrogène.

La surrégénération

La place occupée par les réacteurs à neutrons rapides dans l'ensemble des programmes de développement nucléaire ne cesse de grandir.

Elle est particulièrement importante en France, où le CEA, dont l'expérience technologique dans ce domaine est l'une des plus avancées du monde, étudie depuis plus de quinze ans les centrales à neutrons rapides. Celles-ci sont aujourd'hui partout considérées comme une filière d'avenir. Selon le rapport PEON, 20 à 30 % de la production électro-nucléaire française pourrait provenir, en l'an 2000, des réacteurs à neutrons rapides surrégénérateurs, dont la pénétration commerciale commencera à se développer à partir des années quatre-vingt.

L'intérêt principal de ce type de réacteurs est l'utilisation qu'ils font de leur combustible. Celui-ci se compose à la fois de plutonium provenant des centrales actuelles (à eau ordinaire ou graphite-gaz), et d'uranium naturel, ou appauvri provenant des usines d'enrichissement ou de traitement. En même temps qu'ils brûlent du plutonium, les réacteurs à neutrons rapides en fabriquent à nouveau à partir de l'uranium présent, et l'on peut obtenir qu'ils en produisent plus qu'ils n'en consomment. Cette propriété de surrégénération, qui leur est spécifique, permet d'utiliser la quasi totalité de l'énergie de fission contenue dans l'uranium et d'économiser ainsi considérablement cette matière première : ils multiplient par un facteur nettement supérieur à 50 - estimé à 80 - le potentiel énergétique des ressources en uranium, par rapport aux filières à eau ordinaire.

Ils présentent, en même temps, bien entendu, l'avantage de réduire considérablement les besoins en installations d'enrichissement d'uranium.

De plus, en raison des températures atteintes, le rendement des réacteurs à neutrons rapides est relativement élevé (environ 40 %).

Enfin, sur le plan technique, il faut souligner que leur sûreté n'est pas d'une nature fondamentalement différente de celle des autres types de réacteurs : certaines de leurs caractéristiques propres sont particulièrement favorables, d'autres posent des problèmes spécifiques qui ont fait et font l'objet d'études et d'essais approfondis.

Avec la réalisation, à Marcoule, de la centrale de démonstration Phénix, qui a divergé — c'est-à-dire été mise en fonctionnement — le 31 août 1973 et atteint sa pleine puissance de 250 MWe le 14 mars 1974, la France a montré qu'il est possible de construire et de faire fonctionner dans d'excellentes conditions une centrale à neutrons rapides de puissance significative.

Super-Phénix, dont il est prévu de commencer la construction en 1975, sur le site de Creys-Malville, dans l'Isère et dont la puissance atteindra 1 200 MWe, sera le prototype des grandes centrales commerciales de la filière.

Du fait, précisément, de son caractère de prototype, Super-Phénix ne pourra encore prétendre à la compétitivité par rapport aux centrales à eau ordinaire. Celle-ci devrait, par la réalisation d'un petit nombre d'unités, être atteinte au milieu de la prochaine décennie, peut-être même avant si les prix de l'uranium naturel et de l'enrichissement augmentent sensiblement d'ici cette date.

A partir des années quatre-vingt, l'existence de réserves de plutonium provenant du fonctionnement des centrales à graphite-gaz et à eau ordinaire, constituera en outre une incitation supplémentaire à l'utilisation de la filière surrégénératrice.

Les réacteurs à haute température

Déjà parvenue dans certains pays au seuil du développement industriel et commercial, la filière HTGR (High Temperature Gas-Cooled Reactor) où le fluide réfrigérant est porté à des températures élevées (allant de 700 à 800° C contre 300° C seulement dans les centrales à eau ordinaire), suscite un effort de recherche justifié par les possibilités qu'elle laisse entrevoir.

Son niveau élevé de température, tout d'abord, ouvre à la filière HTGR de nouveaux champs d'application tels que la gazéification du charbon, la production de chaleur pour certains besoins industriels, ou d'hydrogène par dissociation catalytique de l'eau.

L'entrée en scène de ces réacteurs pourrait ouvrir également la voie aux centrales à turbine à gaz en circuit fermé, les températures élevées de l'hélium — à plus de 800° C — permettant le couplage de ces deux techniques.

L'utilisation des hautes températures permet d'autre part d'obtenir des rendements supérieurs à ceux des centrales à eau ordinaire (mais du même ordre que ceux des réacteurs à neutrons rapides qui fonctionnent aussi à haute température).

A production d'électricité égale, cela entraîne une économie de combustible et une réduction des rejets de chaleur perdue, ce qui n'est pas sans intérêt du point de vue de l'environnement.

Les premiers programmes de développement des réacteurs à haute température, refroidis à l'hélium et modérés au graphite, ont été lancés dès les années cinquante en Grande-Bretagne et aux Etats-Unis. Un peu plus tard, la République Fédérale Allemande explorait à son tour cette voie, avec la mise au point d'un prototype à « boulets » de 20 MWe (ainsi nommé à cause de la forme sphérique des éléments combustibles enrobés de graphite).

Ces premiers efforts aboutirent à la réalisation de trois unités expérimentales dont le combustible est un mélange d'uranium hautement enrichi et de thorium : Dragon, construit en 1965 à Winfrith en Angleterre, auquel la France participe en association avec plusieurs pays dans le cadre de l'OCDE ; la centrale de Peach Bottom (40 MWe) exploitée depuis 1967 par la Philadelphia Electric Company (USA) ; et l'AVR (15 MWe) qui fonctionne depuis 1968 au Centre de Recherches de Julich en Allemagne Fédérale.

La première centrale prototype HTGR, d'une puissance installée de 330 MWe, a été construite à Fort-Saint-Vrain, aux Etats-Unis et devrait entrer en service en 1975.

Une autre unité prototype, de puissance presque équivalente (300 MWe), la centrale THTR (Thorium-Hoch-temperaturreaktor), est en construction à Schemhausen, en Allemagne Fédérale. Sa mise en service est prévue pour 1977.

Les réacteurs à haute température entament aujourd'hui leur tentative de percée commerciale aux Etats-Unis où la General Atomic (GA), filiale commune des groupes Gulf et Royal Dutch-Shell, propose actuellement ses centrales HTGR aux compagnies d'électricité. Au début de l'année 1974, cette société avait ainsi reçu commande, sous forme de contrats fermes, d'options et d'intentions d'achat, de plus d'une dizaine d'unités dans les gammes de puissance installée de 770 MWe et 1160 MWe.

L'ensemble du programme américain concernant la filière à haute température, représente aujourd'hui une puissance installée ou en projet de l'ordre de 20 000 MWe.

Il est cependant encore trop tôt pour savoir si cette voie, parsemée de difficultés techniques, connaîtra le succès.

Les réacteurs à sels fondus

Etudiés depuis près de trente ans, les réacteurs à sels fondus ne sont pas encore parvenus au stade industriel, pour des raisons économiques autant que technologiques.

Ces réacteurs ont pour principale propriété d'être alimentés par un combustible fluide, formé de sels fondus d'uranium ou de plutonium. Ils se distinguent par là des autres filières, caractérisées par des combustibles solides à oxydes ou alliages métalliques gainés.

Certains avantages que l'on peut en espérer justifient les recherches dont ils font l'objet, notamment les suivants : ils peuvent fonctionner en surrégénérateurs : ils économisent les investissements nécessaires à la fabrication des assemblages combustibles et évitent les arrêts pour rechargement, puisqu'ils fonctionnent en continu.

Leur technologie est étudiée depuis 1947 au laboratoire américain d'Oak Ridge dans le Tennessee. En 1960, la Commission Américaine de l'Energie Atomique lançait le projet MSRE (Molten Salt Reactor Experiment) qui aboutit, en 1965, à la mise au point d'un réacteur dont le fonctionnement se poursuivait jusqu'en 1969.

La fusion thermonucléaire

A beaucoup plus long terme, la fusion thermonucléaire est susceptible d'apporter une solution fondamentale au problème de l'énergie, grâce à ces immenses réserves potentielles.

Alors que l'énergie de fission consiste en la rupture, sous un intense bombardement de neutrons, de noyaux lourds comme l'uranium et le plutonium, la fusion est le processus — qui se développe dans le soleil et les étoiles — à partir duquel des atomes légers, tels que l'hydrogène et ses isotopes deuterium et tritium portés à des températures extrêmement élevées, de l'ordre de la centaine de millions de degrés, se rassemblent les uns aux autres, pour en former de plus lourds. Cette énergie ne sera véritablement disponible que lorsque la réaction nucléaire sera parfaitement contrôlée en laboratoire et pourra être entretenue au cours du temps. Les recherches se poursuivent activement en France, et dans d'autres pays, le plus souvent dans le cadre de coopérations internationales. C'est ainsi qu'un projet européen de dispositif expérimental de grande dimension, le JET (Joint European Torus) pourrait être décidé en 1975.

L'utilisation industrielle de l'énergie de fusion reste un objectif à long terme, qui ne saurait être envisagée avant le début du siècle prochain, en dépit des efforts de recherche qui lui sont consacrées depuis plusieurs années.

L'hydrogène

Le choix industriel nucléaire ouvre ainsi la voie à l'introduction dans l'économie d'un nouveau combustible, l'hydrogène.

La production d'hydrogène par électrolyse de l'eau à partir de centrales électro-nucléaires ou par sa décomposition catalytique qui exige alors des températures obtenues par les réacteurs à haute température, suscite un intérêt particulier en raison des multiples applications auxquelles elle pourrait donner lieu.

L'hydrogène peut être en effet employé dans de nombreux procédés industriels, tels que la synthèse de l'ammoniac, le raffinage du pétrole brut ou la gazéification du charbon. Dans l'industrie minière, l'hydrogène pourrait être utilisé pour la réduction des minerais. Son emploi comme éventuel carburant des véhicules automobiles ou des avions commerciaux ou supersoniques est également à l'étude.

On envisage aussi l'utilisation de ce gaz pour alimenter des piles à combustible, éventuellement réalisables en zone urbaine en raison de l'absence de nuisances.

Selon certains experts, l'étape décisive de l'utilisation de l'hydrogène dans l'économie résultera de la mise au point, actuellement recherchée, d'un procédé rentable de production industrielle de ce gaz, plus économique que la simple électrolyse : l'énergie nucléaire fournira peut-être la solution.



Ainsi, les raisons qui président du choix nucléaire français ne sont pas seulement inhérentes à la crise énergétique mondiale ; elles sont —et cela est essentiel— étroitement liées aux qualités spécifiques de l'énergie atomique et aux immenses possibilités auxquelles peuvent mener les recherches actuelles.

LA REALISATION DU PROGRAMME FRANÇAIS

Pour obtenir de l'énergie à un meilleur marché et pour diversifier ses sources d'approvisionnement tout en réduisant sa dépendance vis-à-vis de l'extérieur, la France a donc décidé d'accélérer son programme électro-nucléaire.

La mise en œuvre d'un tel programme implique de résoudre un ensemble de problèmes techniques, humains et financiers, dont la maîtrise exige des années de travail et de patience et un savoir-faire sanctionné par l'expérience : la France en a les moyens car elle a acquis, au cours du dernier quart de siècle, dans le domaine de la recherche dans celui de l'expérience industrielle, une connaissance approfondie et sans cesse améliorée des problèmes posés par l'utilisation pacifique de l'énergie atomique.

LES PROBLEMES D'ENVIRONNEMENT ET DE LOCALISATION

Aucune forme d'énergie, dès ses premières applications industrielles, n'a donné lieu à une littérature aussi abondante que celle de l'atome. Aucune néanmoins, n'est méconnue à ce point dans ses principes comme dans les conséquences de son utilisation, sans doute à cause du caractère scientifique du sujet.

La bombe atomique à la fin de la deuxième guerre mondiale et l'impact sur l'opinion publique des expériences effectuées à des fins militaires, ont contribué à lier l'idée de l'atome à celle de danger voire de désastre, même lorsqu'il s'agit d'utilisation pacifique.

L'exploitation industrielle de l'énergie électro-nucléaire et ses conséquences pour l'environnement n'ont pourtant rien à voir avec les applications militaires de la science atomique. Les problèmes d'ordre technologique, humain, géographique ou de l'implantation industrielle nucléaire sont comparables à ceux qui se posent dans toute nouvelle industrie. Ils sont même parfois moindres que dans bien d'autres secteurs de la vie économique.

Bien rares sont les autres activités qui en pratique, font l'objet d'autant de recherches et d'efforts visant à assurer la qualité et la sécurité de leur fonctionnement, à réduire leurs effets négatifs sur l'environnement, à évaluer leur impact économique, social et régional.

L'opinion publique exige légitimement d'être informée dans un domaine dont l'évolution peut avoir des conséquences sur la vie quotidienne. Sa sensibilité aux problèmes de sécurité et d'environnement est tout à fait explicable. La meilleure réponse à toutes les questions posées en ce domaine est sans nul doute l'analyse des réalités dans tous leurs aspects.

LA SURETE DES INSTALLATIONS NUCLEAIRES

Comme toute industrie, l'activité nucléaire comporte, à chaque étape de son fonctionnement, un certain nombre de risques qu'il est essentiel d'inventorier et d'estimer, afin de définir les mécanismes de contrôle, de surveillance et de protection capable de les éliminer, de les prévenir ou, à tout le moins de les limiter à un niveau acceptable.

C'est le domaine et l'objet de la sûreté, qui recouvre l'ensemble des activités liées au développement électro-nucléaire, qu'il s'agisse du fonctionnement normal des centrales atomiques, des risques externes d'accident, du traitement des déchets radioactifs ou de leur transport.

La nature exacte des mesures de sûreté dans l'industrie atomique est mal perçue par une opinion publique qui doit être plus largement informée des mécanismes complexes d'une activité naissante.

Les centrales nucléaires

La sûreté des installations tend à prévenir les accidents et à protéger, à tous les stades de la vie de la centrale nucléaire, les travailleurs et le public contre les dangers de la radio-activité.

La sûreté des réacteurs en exploitation

La sûreté des installations nucléaires a fait l'objet, dès les premières réalisations, d'une attention particulière, en raison notamment des craintes inspirées par l'énergie atomique, initialement utilisée à des fins militaires.

Les résultats sont parlants. Plus de quinze années se sont écoulées depuis la mise en service des premières centrales de production d'électricité, et leur fonctionnement n'a entraîné aucun accident de personne du fait de la radio-activité, ni en France, ni à l'étranger.

Aux Etats-Unis, où s'est écoulé l'équivalent de plus de 2 000 années d'exploitation de réacteurs, cette activité n'a causé à l'entourage aucun dommage ni aucune blessure liés à l'émission de substances radio-actives.

Selon l'American Nuclear Society (1) (ANS), la probabilité d'un accident sérieux, susceptible de provoquer une détérioration de la centrale et de dégager une certaine quantité de radio-activité, n'ayant pas forcément de conséquences pour le public, est de l'ordre de un par million d'années d'exploitation de réacteur.

Un événement grave est donc infiniment peu probable. Un réacteur nucléaire n'a, en effet, **rien à voir avec une bombe atomique**. Il ne saurait exploser. Alors qu'une bombe exige l'emploi d'uranium enrichi à 95 %, l'enrichissement du combustible destiné à une centrale nucléaire ne dépasse pas 4 %, et en outre, les bombes dispersent la radio-activité tandis que les réacteurs nucléaires sont conçus pour confiner les produits radio-actifs de fission.

La sécurité de leur fonctionnement est, de plus, assurée par leur autostabilité, tous les réacteurs étant conçus de façon à obtenir un ralentissement automatique de la réaction en chaîne lorsque la température augmente.

Leur fiabilité et leur sûreté actuelles sont liées aux multiples précautions prises au stade de leur construction et de leur exploitation.

De nombreuses barrières successives confinent et isolent de l'extérieur les produits de fission fortement radio-actifs qui sont créés au sein du combustible, celui-ci retenant d'ailleurs par lui-même la plus grande partie des produits de fission ; les tubes métalliques étanches constituant les gaines autour du combustible, puis le caisson du réacteur en acier de 20 à 25 cm d'épaisseur et les tuyauteries qui confinent l'eau de refroidissement du réacteur ensuite, une épaisseur de béton de 200 à 300 cm qui protège le personnel exploitant des rayonnements ; enfin, une enceinte de confinement destinée à empêcher le dégagement de radio-activité en cas de fuite ou de rupture d'une canalisation d'eau de refroidissement du réacteur.

La perte totale du réfrigérant, qui constitue un des plus graves accidents que l'on puisse envisager, a-t-elle quelque chance de se produire ? Cela ne s'est, bien entendu, jamais produit depuis qu'existent les centrales nucléaires. Pour cela, il faudrait une rupture de la cuve ou de l'une des principales canalisations d'amenée d'eau. Compte tenu des spécifications techniques et des multiples précautions prises, les experts sont d'accord pour considérer la première éventualité comme pratiquement exclue et la seconde comme hautement improbable.

(1) L'American Nuclear Society est la plus importante des associations scientifiques américaines consacrées à l'avancement des sciences et des techniques nucléaires. Association professionnelle sans but lucratif, elle a pour objet « d'aider le profane à comprendre les efforts entrepris pour utiliser l'énergie nucléaire au bénéfice de l'humanité ».

Ces estimations se fondent sur l'expérience fournie par les circuits de canalisation à haute pression dans les usines non nucléaires. Des défaillances ont pu certes se produire, mais au taux, extrêmement faible, d'une par dix mille années d'exploitation. Les soins accrus avec lesquels les installations nucléaires sont réalisées abaissent encore ces probabilités. De plus, les contraintes thermiques d'exploitation dans les centrales nucléaires sont plus faibles que dans les centrales à combustibles fossiles.

Le risque réel est d'autant moins élevé que les réacteurs à eau ordinaire, bouillante ou sous pression, disposent d'un circuit spécial de refroidissement du cœur prévu pour les cas d'urgence (Emergency Core Cooling System, ECCS) destiné à constituer une protection supplémentaire. Ces circuits qui font l'objet d'études théoriques et expérimentales approfondies dans tous les pays, sont conçus pour fonctionner automatiquement dès que surviendrait un accident sur le circuit de refroidissement normal.

Selon les experts, la probabilité d'une défaillance de ces mécanismes de secours est extrêmement faible, ceux-ci étant multiples et fonctionnant indépendamment l'un de l'autre.

Le degré de sûreté des réacteurs nucléaires est donc aujourd'hui tel que les craintes émises par certains, dès les premiers pas de l'industrie atomique sont considérées comme excessives.

Dans un rapport récent (août 1974) le Professeur N.C. Rasmussen du Massachusetts Institute of Technology, a procédé à une évaluation scientifique des risques dus aux accidents éventuels des réacteurs. De cette évaluation, qui fait l'objet actuellement des plus sérieuses réflexions dans tous les pays, il ressort que la probabilité d'un accident grave, pour un ensemble de 100 réacteurs en fonctionnement, peut être chiffrée à un accident tous les 170 ans. Celui-ci n'entraînerait d'ailleurs, sauf exception, que peu ou pas de contamination et provoquerait seulement des dégâts matériels. Un seul sur dix parmi ces rares accidents pourrait entraîner des conséquences pour la santé publique.

Ce niveau de risque doit être situé objectivement par rapport à ceux que nous acceptons couramment dans la vie moderne et par rapport à ceux qui sont attachés aux diverses activités humaines et industrielles : il est singulièrement faible.

Ce même rapport Rasmussen compare les probabilités et les effets d'accidents graves, tant d'origine nucléaire que résultant d'une grande variété d'événements non nucléaires (incendies, explosions, chutes d'avions, tremblements de terre, ruptures de barrages etc...) et montre que les mêmes effets ont une probabilité environ 10 000 fois plus grande d'être produits par ces derniers événements que par cent réacteurs en fonctionnement.

La sûreté contre les risques d'origines extérieures

Les études de sûreté s'étendent également aux risques pouvant découler pour les installations nucléaires des autres activités humaines ou de certains facteurs naturels. Tous les cas, vraisemblables même les plus improbables, sont envisagés systématiquement et l'on en tient compte pour la construction des réacteurs.

Un risque souvent avancé est celui d'une tentative de chantage ou de sabotage d'une centrale nucléaire, comparable, dans ses principes, à ce qui se passe depuis quelques années dans le domaine des transports aériens.

S'il est théoriquement possible de procéder à un sabotage, celui-ci aurait pour conséquence la plus vraisemblable un arrêt de la production d'électricité, mais n'affecterait pas directement la sécurité du public.

Pour entraîner volontairement un dégagement de radio-activité, il faudrait posséder une connaissance technique approfondie de l'installation. Les spécialistes considèrent que la complexité des dispositifs déjouerait la plupart des tentatives, même les mieux préparées.

Par ailleurs, les risques de chute d'avion sont pris en considération. Ainsi, des études prenant notamment pour exemple un Boeing 707, ont été réalisées sur ce point et ont montré, que sous le choc, seule l'enceinte extérieure serait atteinte et perdrait son étanchéité. Les autres barrières de protection resteraient donc intactes.

Les accidents liés à des catastrophes naturelles sont également prévus. Parmi ceux-ci, figurent notamment les risques de tremblements de terre. Des études approfondies visant à éviter les zones de failles actives sont effectuées préalablement à toute construction d'usine, et les centrales nucléaires sont conçues pour résister aux plus grands tremblements de terre prévisibles sur le lieu de leur implantation. Il s'agit là de précautions, sur le plan de la sécurité, qui n'ont aucun équivalent : des routes, des aqueducs, sont construits à l'emplacement de failles connues.

Dans tous les cas, les installations doivent pouvoir continuer à fonctionner après avoir subi un séisme d'une intensité supérieure à celle que l'on a pu observer dans la région, et en tout état de cause, rester sûre pour un séisme d'une intensité encore supérieure. Ainsi l'usine de Bugey peut poursuivre sa marche normale après un tremblement de terre d'intensité VI. A l'intensité VII, le réacteur et son enceinte de sécurité demeureront parfaitement étanches. Pour Fessenheim, ce sont les intensités VII et VIII qui ont été prises en compte. (1)

Aux Etats-Unis, en février 1971, la centrale de San Onofre a, de même, été secouée par un séisme d'assez forte amplitude : sans être ni arrêtée, ni endommagée.

Le déclassement futur des centrales nucléaires périmées

La durée de vie prévue des centrales nucléaires, comparable à celle des usines thermiques classiques, est de l'ordre de 30 ans. Dès maintenant, compte tenu de l'ampleur du programme de développement électro-nucléaire, les modalités de leur future démolition sont envisagées.

En principe, les solutions techniques envisageables peuvent aller depuis le maintien en place des installations, après déchargement du combustible et évacuation des fluides et éventuellement de certains composants radioactifs ou contaminés, jusqu'à un démantèlement complet de toute l'installation. La première solution implique évidemment que des dispositions soient prises pour rendre impossible tout accès aux parties radioactives des installations restantes et pour interdire tout risque de dispersion de la contamination. Elle implique également une surveillance appropriée. En fait, il n'y a pas de difficultés à assurer un haut niveau de sûreté puisque le confinement des matières radioactives est assuré par une protection qui devient surabondante en l'absence de combustible nucléaire. La dernière solution demande des travaux importants et ayant fait l'objet d'une préparation très soignée en raison de la radioactivité présentée par certains composants du réacteur. Ces composants, devront être découpés (si leurs dimensions sont grandes) et placés dans des conteneurs de plomb spécialement conçus pour le transport des déchets radioactifs.

Aux Etats-Unis, le démontage d'un petit réacteur a déjà été réalisé et le terrain a pu être affecté à de nouveaux usages.

En France, le premier réacteur de Marcoule et la première tranche de Chinon ont été définitivement arrêtés en 1968 et 1973. Après le retrait du combustible, il a été décidé, dans un premier temps, de ne pas démonter les bâtiments et de les laisser sous contrôle. Le CEA et EDF entreprennent actuellement une étude des différentes solutions envisageables pour la désaffectation de la première tranche de Chinon.

Pour les centrales en construction, des dispositions sont prises pour faciliter le démontage ultérieur (assemblages démontables ; outils d'intervention ; accès pour le matériel et le personnel, etc...).

(1) Ces intensités sont mesurées dans l'échelle Macro sismique internationale MSK fondé sur les effets des divers séismes.

Le traitement des déchets radioactifs

Les centrales nucléaires et plus généralement toutes les installations nucléaires produisent des déchets radioactifs, de même que toutes les installations industrielles produisent des déchets. Il ne faut pas croire que les déchets radioactifs constituent un problème entièrement nouveau ni insoluble : la nuisance potentielle de beaucoup de déchets de l'industrie chimique est tout à fait comparable à celle des déchets radioactifs. Et pour ces derniers l'ampleur des études faites depuis une quinzaine d'années a permis de maîtriser les problèmes en mettant en particulier au point des techniques de traitement et de conditionnement particulièrement sûres.

D'ailleurs, la majeure partie de déchets en volume, sera constituée par des déchets de très faible radioactivité. Ce seront en particulier des équipements remplacés, matériaux usagés, vêtements de protection utilisés pendant les périodes d'entretien, petits accessoires de laboratoires, filtres etc... Ce seront aussi les résidus de traitement des effluents liquides. Ces résidus seront d'ailleurs conditionnés avant stockage : par exemple ceux provenant des traitements des effluents liquides seront enrobés dans le bitume ce qui assure un confinement pratiquement total de la radioactivité pendant toute la durée nécessaire à la décroissance radioactive. Les déchets solides seront enrobés dans du béton et ensuite placés dans des blocs également en béton.

Ces catégories de déchets pourront être stockées dans des tunnels et mines désaffectées ou enterrées à faible profondeur dans certaines conditions (tranchées bétonnées etc...). Ils ne sont pas susceptibles de poser un problème pour l'environnement ni aucun problème sérieux de volume : une centrale du type de Fessenheim n'en produit, en moyenne qu'une centaine de m³ par an. Les sites de stockage, qui seront centralisés de façon en particulier à permettre une surveillance efficace sans qu'elle se traduise par une contrainte excessive, seront de superficie très réduite. Bien que, compte tenu de l'efficacité des confinements utilisés, aucune contamination du sol, de l'eau ou de l'air ne sont à craindre, un contrôle sera, par surcroît de précaution, exercé de façon permanente.

Mais les produits de fission, engendrés dans les éléments combustibles lors du fonctionnement du réacteur, constitueront aussi des déchets. Ces produits de fission restent dans les assemblages combustibles pendant toute la durée de leur séjour dans le réacteur ainsi que pendant leur séjour dans les piscines de stockage du réacteur et de l'usine de retraitement, séjour pendant lequel la radioactivité se trouve réduite à 2 % environ de ce qu'elle était à la sortie du réacteur.

Au cours du retraitement, effectué en France dans des ateliers spéciaux à La Hague et Marcoule, on sépare les matières fissiles résiduelles, pour utilisation ultérieure, des produits de fission dont certains ont des applications industrielles (irradiations, générateurs isotopiques) mais dont les autres constituent des déchets inutilisables.

Ces déchets renferment la presque totalité de la radioactivité contenue dans l'ensemble des déchets. En plus des produits de fission ils contiennent une très faible fraction d'éléments trans-uraniens qui ont des durées de vie radioactive longue. C'est pour eux qu'ont été mises au point les méthodes de traitement et de conditionnement les plus élaborées. A la sortie de l'usine de retraitement ils sont stockés, sous forme de solution acide, dans des réservoirs en acier inoxydable de forte épaisseur comportant une double enveloppe et placés dans des casemates en béton. Des réservoirs de secours permettraient le transfert d'un réservoir si une fuite commençait à se produire. Ces techniques, en usage depuis 20 ans, se sont révélées extrêmement sûres : aucune fuite n'a jamais été constatée (1).

Ces déchets seront conditionnés avant leur stockage définitif. Plusieurs procédés ont été mis au point dans le monde. En particulier la France a développé une technique

(1) Des fuites ont eu lieu aux Etats-Unis dans des réservoirs en acier ordinaire ne comportant pas de double enveloppe.

permettant d'incorporer, après calcination, ces produits de fission dans un verre dont ils deviendront un des constituants. Une installation pilote a été mise en service à Marcoule en 1968 et une installation industrielle est en construction sur ce site et sera mise en service en 1977. Un des intérêts de cette méthode est la concentration dans un faible volume de tous ces produits de fission. Les combustibles irradiés dans un réacteur du type Fessenheim correspondront à la production chaque année d'environ 2 m³ de verre. Cette méthode assure un très haut niveau de confinement puisque même si les verres étaient stockés dans une eau courante seulement 1/1 000 de la radioactivité qu'ils contiennent serait susceptible de s'échapper du bloc de verre en 100 ans.

Mais il n'est aucunement question de les stocker ainsi, ni même dans les fosses profondes des océans (les seules immersions depuis une dizaine d'années dans de telles fosses ne concernent que des déchets de faible activité comme lors des opérations effectuées, à plusieurs centaines de kilomètres à l'ouest des côtes irlandaises sous le contrôle de l'OCDE).

Ces blocs de verre, eu égard à leur très forte radioactivité et au fait qu'ils contiennent une très faible fraction d'éléments transuraniens tel que le Plutonium 239, devront être stockés pendant de très longues périodes.

On prévoit actuellement de stocker ces blocs dans des formations géologiques adéquates. Certaines couches salines constituent une excellente structure d'accueil en raison de la garantie d'absence d'eau et de leur stabilité géologique. Mais on peut aussi utiliser d'autres structures géologiques, certains basaltes, des schistes ou certaines argiles dans lesquelles la garantie de confinement est assurée par les propriétés physico-chimiques des terrains comme l'a démontré en particulier l'exemple du réacteur fossile naturel d'Oklo au Gabon où tout le plutonium formé est resté confiné à l'endroit même de sa formation. Il existe en France de nombreuses structures géologiques de ce type et des études préliminaires sont engagées pour définir les emplacements possibles ; une action commune est également entreprise au plan européen.

La réalisation de tels stockages sera facilitée par le fait que les volumes à stocker seront limités : la production cumulée jusqu'à l'an 2 000 de verres radioactifs correspondant à l'ensemble des programmes électronucléaires d'E.D.F. ne sera que d'environ 4 000 m³, ce qui représente un volume inférieur à celui d'un cube de 16 m de côté.

Ces méthodes de stockage seront valables pour certains déchets qui proviendront de la fabrication des éléments combustibles des réacteurs surrégénérateurs utilisant le plutonium comme combustible et dont les constituants radioactifs seront de très longue durée de vie. Mais ces déchets ne seront produits en quantité significative que vers la fin de la prochaine décennie. On pourrait dans l'avenir utiliser d'autres méthodes d'élimination définitive comme la transformation d'isotopes à période radioactive longue en isotopes à période radioactive courte dans les réacteurs surrégénérateurs ou mieux dans les réacteurs à fusion ou éventuellement l'envoi dans les espaces interplanétaires.

Mais les méthodes actuellement prévues sont entièrement sûres, car après tout la nature ne confine pas mieux le radium, 1 km³ de granit en renferme environ de 5 000 à 10 000 curies, ni beaucoup de composés naturels du mercure ou du cadmium dont la toxicité est assez comparable.

La très haute qualité du conditionnement assurant à elle seule un confinement entièrement suffisant associé à un stockage géologique adéquat diminuant les sujétions de surveillance et assurant une garantie supplémentaire contre tout retour de radioactivité dans la biosphère, permettent de garantir un degré très élevé de sûreté, ne risquant d'hypothéquer en aucune façon l'avenir de nos enfants ni celui de nos descendants les plus lointains.

LE TRANSPORT DES MATIERES RADIOACTIVES

La prévention des risques liés au transport des matières radioactives constitue un autre aspect essentiel de la sûreté nucléaire. Des recommandations précises et détaillées ont été émises à l'intention de tous les pays par l'Agence Internationale de l'Energie Atomique (AIEA), et ont été reprises par tous les pays.

En France, elles ont été introduites dans le cadre de la réglementation de transport des matières dangereuses édictées par le secrétariat d'Etat aux Transports qui contrôle dans notre pays le transport des matières radioactives avec le concours du Ministère de la Santé Publique (SCPRI), du Ministère de l'Intérieur (SNPC) du Ministère de l'Industrie (SCSUIN) et des services spécialisés du C.E.A.

La réglementation est conçue de façon à permettre que les transports de matières radioactives ne puissent entraîner de risque nucléaire ni pour le public, ni pour le personnel chargé d'exécuter ces transports et cela aussi bien dans les conditions normales que dans les cas d'accident possible.

Le degré de sûreté apporté par l'emballage est bien entendu adapté à la matière transportée : des radioéléments destinés à des usages médicaux ne demandent pas les mêmes garanties de confinement que des matières hautement radioactives. La réglementation répartit ces matières en 4 catégories (comme elle le fait également pour les transports de matières explosives, de matières toxiques, etc...), les caractéristiques de l'emballage étant de plus en plus rigoureuses. En particulier, dès que la quantité de matière à transporter dépasse un certain seuil l'emballage est conçu pour résister à tous les accidents susceptibles de se produire pendant le transport.

Les conteneurs destinés au transport de ces matières, tels que les combustibles irradiés, sont probablement les récipients les plus étudiés que l'homme ait jamais construits. Ils satisfont à une série d'épreuves très sévères, définies par les experts de l'A.I.E.A., garantissant leur résistance aux chocs les plus violents ou à l'incendie le plus sévère susceptible de se produire pendant le transport.

Ce sont de vrais « châteaux forts » ambulants comportant un épais blindage de plomb entre des tôles épaisses d'acier inoxydable. Toutes les parties mécaniques sont protégées par des capots de protection susceptibles d'amortir les chocs les plus violents et des protections anti-feu sont également incorporées.

L'expérience acquise donne toute assurance : à ce jour, aucun transport de matières radioactives, dans le monde, provoqué de contamination ou d'irradiation de personnes.

Les seuls incidents qui se sont produits ont concerné des matières de très faible radioactivité tels que les concentrés de minerais d'uranium naturel qui sont en fait des sels d'uranium dont la toxicité radioactive, analogue à celle des sels de plomb, de cadmium etc... est inférieure à la toxicité chimique. Les mesures prises à la suite de ces incidents ont d'ailleurs montré qu'il était tout à fait possible de récupérer totalement la matière dispersée et donc d'éviter tout risque même si l'accident s'est produit avec des niveaux de radioactivité plus élevée (ce qui est en fait pratiquement impossible). Ici aussi les activités nucléaires peuvent être considérées comme infiniment moins dangereuses que d'autres en matière de transport (transports de gaz liquéfiés, d'explosifs, de produits chimiques, etc...).

Le volume des transports de produits nucléaires augmentera évidemment, à mesure que croîtra le nombre de centrales nucléaires en service. Ce trafic restera cependant limité : on estime que le fonctionnement des 50 000 MWe nucléaires prévus vers 1985 demandera le transport vers les usines de retraitement de 1 500 tonnes par an seulement de combustible irradié, soit environ 300 transports à raison de 5 à 6 tonnes par château. Et en l'an 2 000, le nombre de transports s'élèvera à environ 1 000 par an. A titre de comparaison, en 1974, environ 150 châteaux ont été transportés.

Enfin, afin de réduire le plus possible le seul inconvénient réel pour le public (encombrement des routes par des remorques lourdes et volumineuses), on envisage d'utiliser au maximum le rail et l'eau pour ce type de trafic.

Le contrôle de la sûreté

Les mesures de sécurité prises à tous les stades de l'industrie atomique s'accompagnent de la mise en place d'organismes responsables, chargés de la surveillance et de l'application des dispositions législatives et réglementaires prévues pour la sûreté des installations nucléaires.

Dans ce domaine, trois acteurs conjuguent leurs actions : la puissance publique, le constructeur et l'exploitant. Chacun dispose de ses propres moyens de contrôle, scientifiques, techniques ou administratifs, qui s'exercent à chaque étape de l'activité industrielle et font l'objet d'une coordination très étroite.

Une réglementation précise et complète

En France, comme à l'étranger, les installations nucléaires sont soumises à une réglementation précise et détaillée concernant tous les stades de leur conception, de leur construction, de leur mise en service et de leur exploitation.

Un décret du 13 mars 1973 a créé, dans le cadre du Ministère du Développement Industriel et Scientifique - actuel Ministère de l'Industrie et de la Recherche - un « Service Central de Sûreté des Installations Nucléaires » (SCSIN), chargé de regrouper et de coordonner les moyens et les responsabilités dans ce domaine.

Ce service agit en liaison étroite avec les autres administrations intéressées, notamment la Direction de la Technologie, de l'Environnement Industriel et des Mines, la Délégation Générale à l'Energie, la Direction du Gaz et de l'Electricité, la Direction de la Prévention des Pollutions et Nuisances. Son action s'appuie sur la compétence technique du CEA dont le Département de la Sûreté Nucléaire (DSN) dispose, de plusieurs centaines de chercheurs et de techniciens spécialisés dans chaque catégorie d'installation industrielle, dans les différentes disciplines concernées.

Le SCSIN élabore la réglementation technique relative à la sûreté et en suit l'application ; il organise et anime l'inspection des installations et mène, au nom du Ministère de l'Industrie, les procédures d'autorisation de leur création.

En même temps était fondé un organisme consultatif de haut niveau, le Conseil Supérieur de Sûreté Nucléaire, chargé d'émettre toute recommandation utile dans ce domaine et d'établir un rapport annuel à l'intention du Ministre.

Ce Conseil comprend des personnalités scientifiques, des représentants de l'administration, des parlementaires et des spécialistes dans les domaines technique, économique et social.

Les « installations nucléaires de base » (INB), c'est-à-dire toutes les installations de quelque importance, où sont stockées, transformées ou mises en œuvre des substances radio-actives, ont été définies par un décret du 11 décembre 1963, modifié le 27 mars 1973. Ce sont : les réacteurs nucléaires ; les accélérateurs de particules dont l'énergie est supérieure à 300 Mev (mégaélectronvolts) ; les usines de préparation, de fabrication ou de transformation de substances radio-actives ; les installations destinées au stockage, au dépôt ou à l'utilisation de ces substances y compris les déchets.

Ces équipements ne peuvent être créés qu'après autorisation donnée par décret pris sur le rapport du Ministre de l'Industrie et de la Recherche, après avis de la Commission Interministérielle des Installations Nucléaires de Base (CIINB) et avis conforme du Ministre de la Santé Publique. Le décret d'autorisation de création fixe le périmètre et les caractéristiques de l'installation, ainsi que les prescriptions techniques auxquelles doit se conformer l'exploitant.

L'application de la réglementation technique générale découlant de ce cadre législatif est contrôlée par les inspecteurs des installations nucléaires de base, choisis parmi les personnes chargées de la surveillance des établissements classés. Ces dernières sont désignées conjointement par les départements ministériels responsables de l'environnement et de l'industrie.

Les INB sont soumises à une procédure d'autorisation, précisée par une instruction du Ministre du Développement Industriel et Scientifique en date du 27 mars 1973.

Toute demande d'autorisation de création d'une installation nucléaire de base doit être accompagnée d'un dossier préliminaire de sûreté, dont l'examen est confié à un organisme appelé « Groupe Permanent », composé d'experts nommés par le ministre et de représentants de l'administration. Trois groupes de ce genre sont prévus : le premier pour les réacteurs nucléaires, un autre pour les accélérateurs de particules, un dernier pour les autres INB. Le Groupe Permanent transmet le dossier préliminaire au Département de la Sûreté Nucléaire du CEA, qui procède à une évaluation technique des dispositions prévues par l'exploitant pour assurer la sécurité de son installation.

Dans le cas particulier des réacteurs nucléaires, deux étapes ultérieures sont prévues : un rapport provisoire de sûreté accompagné de règles générales provisoires d'exploitation, déposé six mois environ avant le chargement du combustible, et un rapport définitif de sûreté, accompagné de règles générales définitives d'exploitation, requis pour la mise en service de la centrale. A chacune de ces étapes, le groupe permanent fait évaluer la sûreté par le département de sûreté nucléaire du CEA et l'approbation ministérielle est exigée.

Toute modification ultérieure de l'installation, pouvant affecter la sûreté, doit faire l'objet d'une demande d'autorisation, qui ne sera accordée que par un nouveau décret ou, si le texte autorisant la création en dispose ainsi, par une décision du Ministre de l'Industrie.

Les responsabilités du constructeur et de l'exploitant

C'est aussi du constructeur et de l'exploitant qui procèdent notamment aux études de sûreté imposées par la législation, que dépend la fiabilité et la sûreté de fonctionnement des installations atomiques.

La recherche d'une meilleure fiabilité de fonctionnement et celle d'un haut degré de sécurité vont de pair. En cette matière, le constructeur et l'exploitant ont un intérêt commun.

La maîtrise d'œuvre unique, assurée par Electricité de France, quant aux centrales nucléaires, facilite d'autre part les mécanismes de contrôle et de surveillance des fournisseurs, tant au stade de la conception des ouvrages et des matériels, qu'au niveau de leur construction et de leur mise en service.

La Direction de l'Équipement d'EDF dispose notamment d'un Service de Contrôle des Fabrications SCF) qui définit en liaison avec le Service Etudes et Projets Thermiques et Nucléaires (SEPTEN), la doctrine de l'établissement en matière de sûreté et de fiabilité des installations.

Le SCF contrôle l'action des constructeurs dans la fabrication en ateliers de certains matériels, et est amené, en association avec eux, à formuler des règles de sûreté que ceux-ci devront respecter et qui figurent dans un document appelé Cahier des Prescriptions de Fabrication et de Contrôle (CPFC).

Des spécifications techniques sont ainsi établies, dont l'application est régulièrement contrôlée par des agents d'Electricité de France qui assurent une présence quasi-permanente de l'établissement dans les ateliers de construction.

C'est donc en définitive sur une coopération étroite et sur la concordance des buts entre les différents acteurs de l'industrie nucléaire — exploitants, constructeurs, organismes de sûreté et pouvoirs publics — que repose la sécurité du développement électro-nucléaire national.

Le rôle de la protection civile

Enfin, dans une hypothèse extrême, le Service National de la Protection Civile (SNPC), qui dépend du Ministère de l'Intérieur, est chargé de la protection des populations contre les risques nucléaires du temps de paix comme du temps de guerre.

En temps de guerre, il évalue les effets d'éventuelles retombées radio-actives et il donne les instructions nécessaires à la population.

En temps de paix, il est à même d'intervenir en cas d'accident lié au transport ou à l'utilisation de radio-éléments, ou à l'emploi de matériaux fissiles dans les centrales électro-nucléaires. Dans cette éventualité 500 équipes opérationnelles de détection sont en place dans les Centres de Secours de tous les départements. Dans la mesure où un accident nucléaire interviendrait, un plan de secours préparé à l'avance serait immédiatement déclenché sous l'autorité des Préfets, conseillés par le Service Central de Protection contre les Rayonnements Ionisants (SCPRI).

De façon générale, le SNPC est responsable de l'alerte au plan national, et assure le fonctionnement d'un système de détection et d'alarme comprenant un réseau de sirènes télécommandées et d'appareils de mesure de la radio-activité répartis sur 2 500 points du territoire et régulièrement surveillés.

LES CONSEQUENCES POUR LA SANTE PUBLIQUE ET LA RADIOPROTECTION (1)

Les dommages qui pourraient être causés à la vie et à l'environnement, du fait du fonctionnement des centrales nucléaires, ont donné lieu aux interprétations les plus diverses, parfois erronées, et à des analyses souvent fantaisistes.

Après plus de quinze années d'expérience, l'industrie nucléaire peut pourtant, aujourd'hui, être considérée comme l'une des activités les moins nocives et les moins polluantes, malgré l'existence du risque spécifique lié à la production de matières radio-actives.

Dans ce domaine, beaucoup de points méritent donc d'être éclairés, à commencer par celui qui a trait aux risques biologiques résultant de la production, par les installations nucléaires, de rayonnements et d'effluents radio-actifs.

Les effluents radio-actifs

Le fonctionnement des centrales nucléaires entraîne la formation de déchets radio-actifs qui font l'objet de traitements hautement efficaces destinés à extraire et à concentrer la radio-activité ; celle-ci se retrouve alors sous forme de déchets solides faciles à conditionner et à stocker avec une très grande sécurité. Ces traitements ne peuvent cependant avoir une efficacité absolue, et des traces de certains radio-éléments se retrouvent dans les effluents gazeux ou liquides. Ce sont là les effluents de faible activité qui sont rejetés dans le milieu.

Les effluents gazeux

Les rejets gazeux et d'iode sont rigoureusement contrôlés et limités à des niveaux négligeables. A titre d'exemple, la radio-activité des rejets gazeux occasionnés par la centrale de Chinon ne dépasse pas, depuis 1963, 2 % de la valeur autorisée par le Ministère de la Santé Publique. Quant aux centrales à eau ordinaire, dont la construction débute en France, les résultats déjà obtenus aux Etats-Unis montrent que les rejets gazeux atteignent le plus souvent 1 % seulement de la valeur autorisée.

Les effluents liquides

Les effluents liquides rejetés dans l'environnement par les centrales au cours de leur exploitation sont également strictement contrôlés. Ces effluents peuvent contenir des

(1) Voir l'Annexe 1 pour les données techniques concernant la radio-activité.

radio-éléments tels que le tritium qui sont rejetés à la rivière ou à la mer. Cette évacuation se fait sous une forme très diluée : à titre d'exemple, sa concentration dans le Rhin, en aval de Fessenheim, sera en moyenne 100 000 fois plus faible que celle qui est actuellement admise pour les eaux de boisson. Quant à l'incidence des autres produits radio-actifs dans les effluents liquides elle est pratiquement nulle.

Sur le plan technique, les évacuations d'effluents gazeux ou liquides ne sont même pas détectables au voisinage immédiat des points de rejet, malgré la très grande sensibilité des appareils de mesure utilisés.

Les niveaux d'irradiation qui pourraient résulter de ces rejets aussi bien gazeux que liquides doivent respecter les normes qui sont fixées de façon très détaillée.

Les normes actuellement en vigueur ont été fixées par les décrets du 20 juin 1966 relatif aux principes généraux de protection contre les rayonnements ionisants et du 15 mars 1967 relatif à la protection des travailleurs contre les rayonnements ionisants. Les doses⁽¹⁾ maximales admissibles fixées par ces textes sont fondées sur les recommandations établies par la Commission Internationale de Protection contre les Radiations (voir plus loin). Elles diffèrent selon les catégories de personnes intéressées et selon qu'il s'agit d'irradiation partielle ou d'irradiation globale. Elles correspondent à des niveaux d'irradiation qui n'entraînent aucun effet décelable, ni individuel, ni collectif.

A titre de comparaison, il faut préciser que toute personne est en moyenne exposée forcément à une dose de rayonnement naturel comprise, selon le cas, entre 100 et 150 mrem par an et que l'irradiation supplémentaire des pratiques médicales est en moyenne de l'ordre de 60 mrem pour l'ensemble de la population française.

Les conditions d'exploitation des centrales nucléaires se traduiront en fait par des doses supplémentaires très faibles. Au point où elle est la plus élevée autour d'une centrale à eau ordinaire, la dose atteint à peine quelques pour cent de la radio-activité naturelle ambiante.

Ceci est à rapprocher des données suivantes : le parisien qui se rend en Bretagne ou en Auvergne subit, de ce seul fait, un accroissement de la radio-activité naturelle de 20 à 30 % ; le porteur d'une montre à cadran lumineux subit une irradiation moyenne de quelques mrem par an ; il en est de même des téléspectateurs qui passent plusieurs heures par jour devant leur poste de télévision ; dans ces conditions, on peut considérer comme absolument négligeable la part du rayonnement total due aux centrales nucléaires en exploitation, ou à celles qui seront mises en service dans l'avenir.

Les effets biologiques

Les dangers que les rayonnements ionisants font courir à l'homme à la suite d'expositions importantes sont à l'origine de certaines préoccupations qui ont été mises en avant à l'occasion du développement de l'industrie électro-nucléaire.

Des déclarations retentissantes ont été faites, des rapports ont été publiés mettant l'accent sur la multiplication des atteintes à la santé publique devant résulter, selon leurs auteurs, du fonctionnement des centrales nucléaires. Les professeurs John Gofman et Arthur Tamplin, par exemple, parfois cités, ont affirmé que cette nouvelle industrie entraînerait chaque année 32 000 cas supplémentaires de cancers et de leucémies aux Etats-Unis.

(1) Les doses absorbées par l'organisme humain sont exprimées en rem ou millirems (mrem), millième de rem.

Un autre auteur, Mrs Weik, a été jusqu'à déclarer que l'activité des centrales nucléaires entraînerait, dans leur voisinage, une augmentation de plus de 100 % de ces maladies, ainsi que des fausses-couches et des naissances d'enfants difformes.

Le professeur Sternglass, pour sa part, a affirmé en 1970, que l'exploitation des centrales nucléaires et des installations de retraitement avait provoqué l'augmentation de la mortalité infantile dans les zones avoisinantes.

Toutes ces affirmations ont été, point par point, réfutées, dans chaque discipline, par les savants et les organismes médicaux et scientifiques les plus sérieux et les plus réputés.

Qu'il s'agisse des risques de cancers, de la mortalité infantile ou du phénomène parfois évoqué de la concentration biologique de la radioactivité par le processus de la chaîne alimentaire, les dangers réels ont fait l'objet, dans tous les cas, d'études appropriées résultant de la confrontation des spécialistes de chaque discipline.

Quelques exemples peuvent être donnés :

Cancers et leucémies

Selon MM. Gofman et Tamplin, qui ont accusé l'industrie nucléaire d'augmenter sensiblement (de 10 %) les cas de cancers et de leucémies, l'absorption d'un rad (1) augmente toutes les formes de cancer de 2 %.

Cette affirmation présente comme une certitude l'hypothèse que les faibles doses entraînent des cancers, ce qui n'a jamais été confirmé par l'expérience. De plus, ces auteurs admettent que toutes les formes de cancer sont augmentées dans les mêmes proportions, ce qui est en contradiction avec les observations sur l'homme et avec les expérimentations sur l'animal qui montrent qu'à dose élevée seules certaines formes de cancer sont induites par les rayonnements. Enfin, ils admettent qu'il y a proportionnalité entre les doses reçues et l'effet cancérigène même aux faibles doses, ce qui est peu probable comme l'a souligné le Comité Scientifique des Nations Unies en 1972. Il en résulte que, même dans l'hypothèse où les faibles doses pourraient entraîner des cancers, les estimations de ces auteurs seraient très fortement surestimées.

MM. Gofman et Tamplin, ont en outre fondé leurs estimations sur une utilisation abusive des données existantes et sur la supposition que toutes les personnes aux Etats-Unis recevraient 170 mrem par an du fait des centrales nucléaires, et ce pendant 30 ans, ce qui est une impossibilité matérielle.

Cette dose de 170 mrem par an provient des Recommandations de la Commission Internationale de Protection Radiologique (CIPR) qui a proposé que la dose individuelle moyenne provenant de toutes les sources artificielles autres que médicales ne dépasse pas 5 rems en une génération (c'est-à-dire 30 ans) en rappelant que les doses devaient, en tout état de cause, être toujours maintenues aussi basses que possible. C'est d'ailleurs la raison pour laquelle les autorités sanitaires françaises prennent les mesures nécessaires pour limiter ces doses à quelques millirems par an.

La mortalité infantile

Les observations du professeur Sternglass, relatives à l'augmentation de la mortalité infantile du fait de l'activité nucléaire, ont été notamment réfutées par la Health Physics Society (société de radio-protection) dans une déclaration signée par ses 14

(1) Le rad est une unité de mesure de l'énergie d'irradiation absorbée par une masse donnée de matière irradiée (1 rad = 100 ergs/g).

L'action sur les organismes vivants dépend aussi de la nature des rayonnements, et de celle des tissus irradiés. On utilise alors pour mesurer ces effets une autre unité de dose, de définition plus complexe : le rem.

présidents successifs, par l'Académie Américaine de Pédiatrie, par les Services de la Santé Publique de la Californie, de l'Etat de New-York, du Michigan, de la Pennsylvanie et de l'Illinois, ainsi que par l'Agence des Etats-Unis pour la Protection de l'Environnement.

Les méthodes d'analyse et de traitement des informations utilisées par M. Sternglass ont été étudiées pendant plus de quatre ans par un grand nombre de statisticiens, d'épidémiologistes et de membres des services publics de la santé, qui les ont rejetées comme entièrement tendancieuses.

Ces travaux ont abouti à la conclusion que la présence d'une centrale nucléaire ne peut avoir aucun rapport avec une augmentation quelconque de la mortalité infantile.

La concentration biologique de la radioactivité

Le phénomène de la « reconcentration » de la radioactivité dans certains maillons de la chaîne alimentaire, constitue une autre préoccupation parfois évoquée.

Il est exact qu'un certain nombre de radioéléments peuvent se retrouver à l'intérieur ou à la surface de certaines espèces vivantes sous une forme plus concentrée qu'ils ne le sont dans le milieu. Ce sont des phénomènes actuellement bien connus après les travaux considérables qui ont été effectués dans le monde par les spécialistes de la radioécologie marine et continentale. Ces phénomènes, quand ils existent, ont une importance variable : la concentration est généralement modérée mais peut atteindre dans certains cas particuliers des valeurs relativement élevées comme c'est le cas pour certains radioéléments dans certaines espèces aquatiques.

Cependant le phénomène inverse existe, mais on en parle beaucoup plus rarement. Les plantes et les animaux n'absorbent pratiquement pas certains éléments chimiques : ils font une discrimination entre les différents éléments mis à leur disposition et négligent certains d'entre eux. Citons, par exemple, le cas du plutonium qui ne passe du sol dans les plantes que dans la proportion de 1 pour 10 000 et qui, à l'étape suivante, ne passe de la plante ingérée à l'organisme des mammifères que dans la proportion de 3 pour 100 000.

En réalité « concentration » et « discrimination » peuvent se succéder à travers les multiples maillons des chaînes alimentaires. Selon la nature du radioélément, l'un ou l'autre de ces deux phénomènes sera prépondérant. Ce qui importe, du point de vue biologique, ce sont les quantités d'éléments radioactifs finalement présentes dans les plantes, dans les animaux et, tout au bout des chaînes alimentaires, les quantités qui vont parvenir à l'homme. Ce sont en effet, ces quantités qui doivent être maintenues au dessous de certaines limites pour que la radioactivité provenant des rejets ne soit préjudiciable ni à l'homme ni aux équilibres écologiques.

Les phénomènes de concentration ou de discrimination ne sont nullement ignorés et on en tient compte lorsqu'on veut évaluer les limites des rejets admissibles avant d'autoriser le fonctionnement d'une installation nucléaire.

De plus, lorsque l'installation fonctionne, la surveillance attentive de l'environnement qui permet de suivre les niveaux de radioactivité de l'air, des eaux, du sol, de la flore, de la faune, etc... s'exerce sur toutes les étapes du processus des chaînes alimentaires et contrôle par là-même tous les phénomènes de concentration.

L'organisation de la radio-protection

Quel que soit le degré de sûreté et de fiabilité des installations nucléaires, des mécanismes de surveillance et de contrôle permanent de la radio-activité n'en sont pas moins nécessaires pour assurer la protection à long terme de l'environnement et de l'homme.

C'est le domaine de la radio-protection qui concerne des organismes responsables au niveau national et international, et définit une réglementation précise qui fixe les limites admises pour toute émission radio-active.

L'organisation la plus ancienne est la Commission Internationale de Protection Radiologique (CIPR) dont l'origine remonte au premier congrès international de radiologie, qui s'est tenu en 1925. Composée de personnalités choisies en raison de leur compétence dans le domaine des rayonnements radio-actifs, subventionnée par l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS) et la Société Internationale de Radiologie, la CIPR émet des recommandations en toute indépendance. Les normes de sécurité fixées par elles sont respectées par l'ensemble des pays, notamment par la France.

Ces normes, représentées par les « doses maximales admissibles » (DMA) de rayonnements pour l'organisme humain, exprimées en rems, et les « concentrations maximales admissibles » (CMA) de chaque radio-élément dans l'air ou dans l'eau absorbées par l'homme, exprimées en picocuries (1) par m³, sont d'une extrême sévérité. Aucune autre nuisance n'est soumise à des normes comparables.

De son côté, l'Agence Internationale pour l'Energie Atomique (AIEA) a publié en 1967 des « normes fondamentales de radio-protection », et un règlement de transport des matières radio-actives, obligatoire pour les opérations de l'Agence et qui constitue un modèle pour d'autres organismes.

L'Agence de l'OCDE pour l'énergie et l'Euratom ont également adopté, en 1968, des normes de base, obligatoires dans le cadre de leurs activités.

En France, l'organisme désigné par la réglementation pour assurer la responsabilité de la radio-protection est le Service Central de Protection contre les Rayonnements Ionisants (SCPRI) qui relève du Ministère de la Santé par l'intermédiaire de l'INSERM, Institut National de la Santé et de la Recherche Médicale.

Le SCPRI, doté d'attributions très étendues lui permettant d'assurer la coordination des efforts dans le domaine de la radio-protection, développe les recherches, élabore les méthodes de contrôle et exerce une surveillance permanente sur l'ensemble du territoire en cette matière.

Il exerce une tutelle sur tous les organismes privés agréés. Son rôle est particulièrement important dans le domaine des recherches à long terme ayant pour objet de vérifier, sous tous leurs aspects, les conséquences pour l'homme des faibles doses de rayonnements et d'une contamination radio-active répétées du milieu.

Il constitue ainsi l'instrument de base qui doit permettre de poursuivre des recherches de longue haleine et de perfectionner les connaissances et les méthodes grâce à l'utilisation des moyens techniques les plus modernes.

Le SCPRI gère, depuis 1959, un réseau de 30 stations de prélèvement, utilisant un matériel et des techniques identiques, pour la mesure et la surveillance continue de la radio-activité.

Les poussières atmosphériques et les précipitations sont ainsi recueillies quotidiennement, des échantillons d'herbe, de lait, d'eau, etc... sont prélevés périodiquement autour de chaque installation nucléaire aux fins d'analyses qui sont faites notamment aux laboratoires de l'INSERM au Vésinet.

De même, des informations sur la contamination de l'atmosphère en altitude sont recueillies par des avions long-courrier équipés par le SCPRI de dispositifs de prélèvement et d'enregistreurs.

Les résultats de l'ensemble de ces mesures sont régulièrement publiés dans un rapport mensuel au Comité Scientifique pour l'étude des effets des rayonnements ionisants des Nations-Unies.

Le SCPRI a d'ailleurs été désigné par l'Organisation Mondiale de la Santé (OMS)

(1) Le picocurie est le millième de milliardième de curie.

comme centre international de référence pour les mesures de radio-activité de l'environnement, ce qui constitue une confirmation de son efficacité au niveau international.

En ce qui concerne la procédure de création des centrales nucléaires, les éléments relatifs à la radio-protection sont examinés par le SCPRI qui vérifie que le fonctionnement de la centrale est sans conséquences pour la santé de l'homme et la sauvegarde du milieu.

Les conclusions du SCPRI constituent, à côté des données de sûreté, le second élément important du projet de décret.

Ce projet est soumis à la Commission Interministérielle des Installations Nucléaires de Base, qui regroupe tous les ministères intéressés dont ceux de la Santé, de la Qualité de la Vie (Environnement), de l'Intérieur (Direction Générale des Collectivités Locales — Direction du Service National de la Protection Civile) et du Travail.

De toute façon, l'autorisation ne peut être accordée sans l'accord du Ministère de la Santé qui doit donner son avis « conforme » et dispose ainsi d'un véritable droit de veto en la matière, ce qui lui laisse en fait le dernier mot en ce qui concerne le développement de l'énergie nucléaire.

De même, les rejets radio-actifs de l'industrie nucléaire sont subordonnés à une autorisation préalable et explicite, avec une interdiction a priori pour les rejets dans les eaux souterraines, et notification des limites autorisées, fixées par arrêté interministériel.

Le contrôle de ces obligations incombent au SCPRI, qui l'exerce en fait déjà depuis 15 ans.

C'est cette vocation sanitaire qui différencie la radio-protection de la sûreté nucléaire.

LES POLLUTIONS ET LES NUISANCES

A côté des préoccupations concernant les risques d'accident et les conséquences de la radio-activité sur la santé, d'autres soucis se manifestent à propos des pollutions et des nuisances que pourrait subir, du fait des centrales nucléaires, le milieu naturel et humain.

Un des motifs principaux de l'inquiétude manifestée par les défenseurs de l'environnement provient des effets écologiques pouvant être entraînés par les énormes quantités de chaleur que les centrales nucléaires en fonctionnement rejettent dans le milieu.

Les rejets de chaleur

La production d'électricité à partir d'un cycle thermodynamique faisant travailler un fluide entre une source chaude et une source froide, implique inévitablement le rejet à cette source froide d'une partie de la chaleur produite par la source chaude.

On a coutume de citer le rendement d'un tel processus, c'est-à-dire la proportion de chaleur effectivement transformée en électricité, l'autre partie étant supposée inutilisée. Il est de l'ordre de 33 % pour les filières nucléaires de la technologie actuelle. Il représentera 40 % du rendement des centrales thermiques classiques, avec la filière à neutrons rapides du type de Phénix. Il pourra peut-être même dépasser un peu cette valeur pour les réacteurs à haute température.

De tels rendements sont souvent ressentis comme étant assez médiocres. Il faut leur rapprocher ceux qu'on ne pourrait dépasser avec l'utilisation de l'énergie thermique des océans, 5 à 6 %, ou avec l'énergie solaire (filière thermodynamique) à moins de 10 %. Il faut également leur comparer le rendement des moteurs des automobiles : 15 à 18 %, et 20 à 25 % pour les moteurs diesels.

Quoi qu'il en soit, ces différentes valeurs ne changent en rien les ordres de grandeur des rejets thermiques qui ne caractérisent pas spécialement l'électricité d'origine nucléaire, mais qui reflètent simplement notre consommation d'énergie.

Globalement, toute l'énergie produite se retrouvant finalement en chaleur, il est intéressant de situer l'échelle de cet apport de chaleur à la biosphère, compte tenu du bilan thermique global de notre planète. Même en imaginant 6 millions de MW installés en fin de siècle, il n'y a aucune chance d'être à l'échelle des 180 000 millions de MW qui représentent la puissance équivalente à l'énergie solaire moyenne reçue sur notre planète.

Le problème des rejets thermiques n'est donc qu'un problème local de dispersion de la chaleur émise.

Dans les centrales classiques, 15 % de cette chaleur non utilisée repart à l'atmosphère par la cheminée avec les produits de combustion, le reste va au condenseur.

Avec les centrales nucléaires, la chaleur rejetée à la source froide provient intégralement de la condensation de la vapeur issue de la turbine. Cette « chaleur de condensation » peut être transférée aux eaux de surface par un circuit de réfrigération dit « ouvert », ou elle peut être transférée directement à l'atmosphère sous forme d'air saturé de vapeur par un circuit « fermé ». Dans ce dernier cas, des tours de réfrigération sont nécessaires pour permettre le transfert de chaleur de l'eau venant du condenseur à l'air aspiré au bas des tours par « effet de cheminée » — c'est le tirage naturel — ou par l'action de ventilateurs — c'est le tirage forcé — (les tours sont alors beaucoup moins hautes).

Pour les puissances des tranches actuelles, le transfert de chaleur « à sec » entre l'eau et l'air par simple conduction, conduirait à des surfaces d'échange considérables et soulève encore des difficultés techniques et économiques inacceptables. Par contre, avec les réfrigérants atmosphériques « humides » utilisés déjà dans le nord-est de la France, et beaucoup plus systématiquement en Grande-Bretagne, la chaleur de l'eau de condensation sert à évaporer une partie de cette eau et se trouve emportée dans l'atmosphère sous forme d'un mélange d'air et de vapeur.

Le processus d'évaporation « à sec » permet d'ailleurs aussi à l'eau échauffée — lac, rivière ou mer — de se refroidir en renvoyant la chaleur à l'atmosphère dans le cas d'un circuit ouvert. Le débit d'eau évaporée est cependant moitié moindre dans ce cas que pour les réfrigérants atmosphériques humides. Pour ces derniers, il faut compter en moyenne sur toute l'année, avec un débit de vapeur de 0,5 m³/s pour une tranche de 1 000 MW. Il faut rapprocher ce débit des milliers ou millions de m³ par seconde qui alimentent les petits nuages du type « cumulus ». On constate facilement que les flux d'air chaud et humide ainsi créés ne sont pas à l'échelle des phénomènes météorologiques même locaux. Certes, un panache se formera dans la direction du vent, mais la hauteur suffisante des tours à tirage naturel évitera toute éventualité de brouillard au niveau du sol imputable aux rejets des réfrigérants.

La réfrigération rend possible l'implantation de centrales à l'intérieur du territoire dans presque toutes les régions de France, du fait du réseau hydrographique très ramifié.

Certains fleuves à fort débit, tels le Rhône et le Rhin, les estuaires et le littoral, permettent par contre la réfrigération en circuit ouvert.

L'échauffement local qui en résulte pour le milieu aquatique peut élever de quelques degrés la température elle-même fluctuante au gré des phénomènes météorologiques.

En rivière, une longue expérience acquise grâce aux centrales thermiques et grâce aux études spécifiques en laboratoire — E.D.F. a réalisé spécialement il y a dix ans un laboratoire d'hydrobiologie près de la centrale de Montereau — montre que des échauffements modérés produits dans le cours des rivières, n'ont pas d'effet important sur la faune ou sur la flore. Les températures critiques pour les poissons de ces zones sont en effet au-dessus de 30° C et ne sont que rarement atteintes durant la période chaude, période pendant laquelle la charge des centrales peut être réduite.

Les effets de l'échauffement, sur les petits organismes et sur les phénomènes d'autoépuration, sont peu sensibles pour des élévations de température, de quelques degrés. Ils se traduisent toujours par une tendance à l'accélération des processus biochimiques. Le bilan dépend de l'état de pollution de la rivière. Tout en étant favorable globalement puisqu'il y a accélération de l'épuration, il peut localement aggraver le déficit en oxygène dissous si la rivière est très polluée. A titre d'exemple, la simulation sur modèle mathématique d'aménagement du Rhône a permis de se rendre compte des effets sur les températures de l'implantation de plusieurs centrales en circuit ouvert. Ainsi, à Lyon, les centrales de Creys-Malville et du Bugey ont pour effet de modifier très légèrement les périodes durant lesquelles les températures sont les plus fortes : en moyenne, le nombre de jours pendant lesquels la température de 25° C est dépassée passe à 10 ou 15 ; les 30° C n'ont jamais été atteints sur la période des 14 années (1958-1972) qui ont servi à la simulation. De plus, s'agissant d'un fleuve dont l'étiage se produit à la période froide pour son cours amont, les échauffements les plus importants ne sont jamais en phase avec les températures naturelles les plus fortes.

L'implantation sur le littoral conduit au problème de la dispersion des rejets thermiques. Pour la Manche et pour l'Atlantique, les courants réguliers des marées créent une situation exceptionnelle et très favorable. Ainsi, pour une centrale de 5 000 MW, les études sur modèles conduisent à prévoir une zone échauffée de plus de 1° C variant selon le site de 2 km² à 5 km² et pouvant atteindre parfois 10 km². L'échauffement dépasse 3 °C sur moins d'une centaine d'hectares. En Méditerranée, la forme des « panaches thermiques » diffère et les eaux tièdes restent en surface. La surface des zones échauffées est cependant du même ordre grâce aux effets de mélange du vent et des courants généraux. Les flux thermiques sont donc rapidement dilués et demeurent infimes par rapport aux flux naturels transportés par les courants marins.

Néanmoins, des effets locaux peuvent influencer le milieu vivant. Certaines espèces sont attirées par la température et se cantonnent dans les zones de rejet. Des mollusques ont été élevés dans le « micro-climat » aquatique produit par les rejets de certaines centrales américaines ou anglaises. L'arrêt éventuel de la centrale peut alors constituer un risque de choc froid pour ces espèces. Cependant, ce risque s'estompe avec la multiplication des tranches sur un même site.

La crainte de modification même locale dans les équilibres écologiques doit conduire actuellement à une grande prudence. Le choix des sites revêt pour cette raison une importance particulière pour garantir les meilleures conditions de dispersion des effluents thermiques et pour éviter les zones a priori plus sensibles aux modifications de la température, que ce soit les nurseries ou les frayères.

Toutefois, on retiendra que les zones côtières sont plus particulièrement soumises à des cycles naturels de température de grande amplitude : ainsi, la température varie de 10 à 12° C entre l'été et l'hiver en Manche, et de 1 à 2° C en moins de quelques heures ou en moins de quelques centaines de mètres de distance ! Ces fluctuations peuvent même atteindre 4 à 5° C en Méditerranée lors d'un coup de vent et sont finalement supérieures aux échauffements très locaux que produiront les rejets.

La récupération de la chaleur perdue

Il n'en reste pas moins que le rejet en pure perte de quantités de chaleur considérables, présente un caractère quelque peu choquant à l'heure où s'imposent à tous des économies d'énergie.

Ceci, joint au souci de réduire au minimum l'impact des rejets thermiques sur l'environnement, doit évidemment inciter à rechercher les voies d'une récupération aussi complète que possible des calories évacuées par les centrales nucléaires.

Cette récupération, qui intéresse l'ensemble des installations industrielles susceptibles de produire de tels rejets thermiques, se heurte à une difficulté fondamentale, la

mauvaise qualité de calories fournies à température relativement basse de l'ordre de 30° C.

Toutefois des applications concernent dès à présent le secteur agricole (chauffage de serres, irrigation et chauffage de sols), et l'aquaculture (élevage de certaines espèces de poissons et de crustacés) pour lesquelles EDF et le CEA organisent méthodiquement des expériences pilotes (centrales de Saint-Laurent des Eaux, Dampierre, Fessenheim, centres nucléaires de Grenoble et de Cadarache...). Mais en tout état de cause, malgré leur intérêt certain, ces applications ne sauraient absorber qu'une faible part des calories perdues : à titre d'exemple, une seule tranche de 900 à 1 000 MWe pourrait assurer le chauffage de plus de 2 000 hectares de serres, suffisant pour couvrir la production maraîchère de la France entière.

Une récupération à large échelle n'est concevable que si on dispose d'une température nettement supérieure à celle obtenue normalement dans les circuits de condenseur des centrales. Pour cela deux voies sont possibles :

- modification du schéma de fonctionnement des centrales en prélevant de l'eau ou de la vapeur au niveau de la turbine et des circuits associés (ceci au détriment du rendement électrique)

- utilisation des pompes à chaleur dont il a été question plus haut et qui disposent d'un caractère de polyvalence indiscutable. Leur développement, au stade industriel, reste encore à faire, ainsi que leurs preuves au niveau de la fiabilité et de la rentabilité.

Les études visant à récupérer la chaleur rejetée par les centrales nucléaires pour le chauffage industriel ou urbain sont poursuivies par EDF et le CEA, sous la responsabilité d'ensemble du Ministère de l'Industrie et de la Recherche. Elles prennent en compte non seulement les problèmes liés à la centrale proprement dite, mais également ceux relatifs au transport et à la distribution, ainsi que les aspects économiques des emplois de ces rejets compte tenu des durées d'utilisation.

Les autres pollutions et nuisances

Les centrales électronucléaires, à l'inverse des usines thermiques classiques, ne provoquent aucune pollution atmosphérique, ni aucune pollution chimique des eaux.

Mis à part les rejets d'effluents radioactifs dont il a été question plus haut, elles ne rejettent aucun produit nocif, à l'exception de chlore à faible teneur destiné, dans le cas des centrales en bord de mer, à éviter l'envahissement des circuits de condenseur par les mollusques (cet emploi peut d'ailleurs être sensiblement réduit en augmentant la vitesse de l'eau dans les circuits, ou en effectuant, de temps à autre, des échaudages).

Lorsqu'elles sont munies de tours de réfrigération atmosphérique, les centrales peuvent émettre des panaches de vapeur pendant des durées limitées en saison d'hiver. Les effets climatiques (brouillards, verglas) ne doivent pas être redoutés, compte tenu des progrès enregistrés dans la technique de réfrigération comme le montre l'expérience en provenance de l'étranger.

Du point de vue de l'esthétique, des efforts doivent être poursuivis pour obtenir une bonne insertion dans le paysage et des directives sont données dans ce sens aux ingénieurs et aux architectes pour harmoniser ces préoccupations de préservation de l'environnement et les impératifs techniques.

Il en est de même pour les couloirs de lignes nécessaires au transport du courant électrique, mais il convient de signaler là encore, que le problème n'est pas spécifique des installations nucléaires. En toute hypothèse, l'accroissement prévisible de la consommation électrique exige un réaménagement du réseau d'interconnexion et de transport et plusieurs milliers de kilomètres de lignes haute tension doivent être créées d'ici 1985.

Enfin, en matière de bruit, les principaux équipements générateurs de telles nuisances sont étudiés au stade des projets et des mesures sont faites en comparant les niveaux sonores dans la région avant et après la mise en service des centrales. L'objectif assigné est de ne pas dépasser le seuil de 40 décibels dans le voisinage des habitations les plus proches. Si un tel dépassement est constaté, une isolation phonique complémentaire est apportée au niveau des matériels en cause.

LA SELECTION DES SITES DES CENTRALES

Le dernier aspect qui peut préoccuper le public est celui du choix des sites et des conséquences que l'installation d'une centrale nucléaire entraînera pour la vie socio-économique locale.

Il convient donc de préciser les critères qui président aux choix des sites, la nature et l'étendue de l'impact sur les activités locales de l'implantation d'une unité, et les modalités selon lesquelles, dans le cadre des options de l'Aménagement du Territoire, la sélection des sites devra être organisée pour l'établissement d'un schéma national.

Les critères de choix des sites

La construction d'une centrale nucléaire suppose la solution d'une multitude de problèmes techniques, économiques et humains. Cela explique l'importance des études et des procédures préliminaires ainsi que la longueur des délais : si l'on estime, en effet, qu'il faut cinq ans pour bâtir une tranche nucléaire à partir du début de sa construction, cinq autres années sont auparavant nécessaires pour aboutir au choix définitif d'un site.

L'impératif de la source froide

Le fonctionnement de toute centrale thermique, nucléaire, ou classique, exigeant l'apport d'une source externe considérable d'eau, le choix d'un site implique d'abord la prise en compte de cet impératif.

C'est pourquoi, les centrales électro-nucléaires sont toutes bâties soit en bordure d'un fleuve à grand débit, soit au bord de la mer.

Il pourrait paraître logique d'implanter les usines de production électrique, le plus près possible des régions industrialisées les plus consommatrices d'énergie. Mais celles-ci ne sont précisément pas toujours les plus riches en eau et en terrains disponibles.

En France, seuls le Rhône et le Rhin ont les débits de refroidissement suffisants pour permettre d'implanter sur leurs rives les centrales à circuit ouvert de grande puissance envisagées dans l'avenir (1).

C'est la raison pour laquelle est prévue, dès maintenant, la construction d'un certain nombre d'unités sur le littoral.

La France disposant d'une grande ligne de côtes, jouit sur ce point, d'une position favorable. Moins avantagée, la République Fédérale Allemande envisage la mise en œuvre de techniques nouvelles telles que la construction de centrales flottantes, dont la réalisation pose toutefois des problèmes non résolus, notamment du point de vue de la sûreté.

Lorsque le débit d'un fleuve est insuffisant pour assurer le fonctionnement en « circuit ouvert » d'une centrale électro-nucléaire, celle-ci peut être toutefois construite en

(1) Les débits nécessaires sont les suivants pour une centrale de 4 tranches de l'ordre de 1 000 MWe : environ 200 m³/seconde en circuit ouvert, 12 m³/seconde en circuit fermé (dont 2 m³/seconde évaporés).

« circuit fermé » et donc munie d'un système de refroidissement atmosphérique diminuant les besoins en eaux et réduisant l'échauffement des rivières. Les réfrigérants actuellement utilisés sont du type humide, à tirage naturel ou forcé. Mais l'utilisation des tours de réfrigération entraîne une augmentation de l'ordre de 5 à 7 % du prix de revient de l'électricité. Le coût de la réfrigération atmosphérique équivaut au prix de 150 km de lignes de transport de l'énergie en 380 kV (kilovolts). Au désavantage économique des tours de réfrigération, s'ajoute un inconvénient technique : elles évaporent en effet des quantités d'eau non négligeables.

Si la mer n'est pas trop éloignée du centre de consommation que l'on cherche à alimenter, il peut donc devenir plus intéressant, du seul point de vue économique, de construire la centrale sur le littoral. En bord de mer, celle-ci sera implantée de préférence dans des zones où la profondeur est suffisante et où les courants sont les plus intenses, afin de faciliter la dilution des eaux chaudes, et en évitant, dans tous les cas, toutes conséquences néfastes pour les frayères.

Ces contraintes techniques sévères incitent à des recherches actives, qui se poursuivent actuellement dans différents pays, pour mettre au point une technique de réfrigération sèche (1) : quelques prototypes ont déjà été réalisés. L'état actuel des connaissances dans ce domaine ne permet pas pour l'instant toutefois, d'envisager l'avènement de cette nouvelle technologie avant une dizaine d'années. Son application, d'ailleurs, majorera notablement les coûts de production.

Les autres critères de sélection

La source froide n'est pas la seule contrainte. De très nombreuses considérations entrent en ligne de compte pour le choix d'un site nucléaire.

Qu'il s'agisse des impératifs prioritaires de sûreté, ou de protection de l'environnement, dont les conditions varient forcément d'un site à l'autre, ou des contraintes économiques, financières et techniques, chacun de ces facteurs doit être étudié pour s'harmoniser avec les autres, si l'on veut réunir les conditions optimales de sélection.

Le nombre de sites acceptables est donc finalement assez restreint, mais suffisant pour offrir une certaine latitude de choix.

Deux solutions extrêmes peuvent être envisagées, à la limite, opposant la notion de « super-sites » à celles de « sites éparpillés ». Dans le premier cas, l'énergie électrique serait produite dans un petit nombre d'unités d'une puissance élevée, mais au prix de difficultés locales accrues, notamment en matière d'échauffement des eaux. L'autre option consiste à disperser sur l'ensemble du territoire de très nombreuses centrales de faible puissance, ce qui accroîtrait les problèmes d'entretien et de surveillance. C'est pourquoi l'on s'en tient à l'heure actuelle à une formule intermédiaire, plus adaptée aux données économiques et industrielles présentes.

En tout état de cause, il est nécessaire de tenir compte, non seulement de l'influence de la centrale sur son voisinage, mais également des agressions extérieures pouvant affecter son fonctionnement, qu'elles soient dues à des facteurs naturels (séismes, tempêtes, inondations, etc...) ou accidentels (rupture de barrage, chute d'avion, incendie, etc...). La proximité d'autres installations industrielles, dont certaines peuvent comporter des dangers pour la centrale, (ports pétroliers, raffineries, stockage de gaz liquéfiés, de fuels, de produits toxiques, etc...) est, dans cette optique, prise en compte, comme il se doit, et fait, dans chaque cas, l'objet d'études précises de la part des services de contrôle de la sûreté des installations nucléaires.

(1) Le principe de la réfrigération sèche est le suivant : au lieu d'être absorbées par l'évaporation de l'eau, comme c'est le cas pour les réfrigérants atmosphériques humides, les calories sont rejetées à l'atmosphère par l'intermédiaire d'un ensemble de tubes à ailettes comparable à un radiateur de voiture qui réchauffe l'air directement.

Le raccordement au réseau d'interconnection pose le problème des lignes de transport dont il convient de rechercher les conditions d'implantation à la fois les plus économiques et les plus compatibles avec les intérêts locaux et la protection de l'environnement. Bien entendu ce problème n'est pas propre aux centrales nucléaires et s'inscrit normalement dans le cadre des plans d'équipement et de modernisation du réseau de transport et de distribution. Quel que soit le type de centrale adopté, il est nécessaire de réduire les lignes supplémentaires en équilibrant les centres de production et de consommation.

Du point de vue de l'environnement même, ce sont les conditions spécifiques du site qui doivent être examinées : le délai s'écoulant entre les premières études et la décision définitive d'implantation est mis à profit pour mesurer les divers paramètres hydrologiques, climatologiques, écologiques..., afin de permettre un choix raisonné tenant compte de l'impact sur le milieu naturel.

Enfin, il importe que la répartition des centrales nucléaires entre les différentes régions respecte, au plan national, les impératifs de la politique de l'aménagement du territoire, et la vocation des diverses zones géographiques du pays.

Les incidences locales des centrales nucléaires

L'implantation de toute activité de quelque importance dans une région donnée contribue à modifier le contexte de la vie locale.

L'impact économique et social prévisible de l'implantation des centrales électro-nucléaires a pu être apprécié, notamment à travers les expériences passées.

Du point de vue de l'emploi, d'abord, la construction d'une centrale-type de quatre tranches de 900 à 1000MWe chacune requiert un effectif moyen, présent sur le site pendant la dizaine d'années que dure le chantier, de l'ordre de 800 travailleurs, avec un pointe de 2 000 personnes environ vers la cinquième année.

Ceci ne va pas, évidemment, sans poser des problèmes d'accueil et d'intégration des arrivants ni des perturbations sur le marché local du travail.

Mais, en contre-partie, l'économie environnante reçoit un coup de fouet considérable qui profite à de nombreuses catégories d'activités : commerces, services, entreprises du bâtiment et des travaux publics, etc...

Ces effets bénéfiques proviennent des dépenses faites sur place par la main-d'œuvre du chantier, ainsi que des achats locaux effectués par les diverses entreprises travaillant à la construction de la centrale. Même si cet apport financier ne constitue qu'une faible part de l'investissement global (qui s'élève approximativement à 5 milliards de francs actuels pour une centrale-type de quatre tranches), il est de nature à stimuler vivement l'économie locale, par ses conséquences directes et indirectes.

Après la fin du chantier, le fonctionnement de la centrale exige un personnel bien moindre : de l'ordre de 400 agents. (D'après l'expérience, un tiers de ces emplois, au moins, est cependant susceptible d'être occupé, à terme, par des personnes d'origine locale).

On pourrait craindre alors une certaine dépression, due à la disparition d'une partie de la main-d'œuvre et de ce fait à la diminution des échanges. Mais le relais est assuré par une nouvelle richesse, apportée par l'exploitation même de la centrale : il s'agit des taxes et impôts locaux qui permettent aux collectivités d'entreprendre des travaux d'équipement dont les entreprises locales et les populations profitent directement.

A titre d'exemple, en ce qui concerne Saint-Laurent-des-Eaux et Chinon, en 1974, le département et les communes intéressées ont perçu, au titre de la patente et de l'impôt foncier, respectivement 12 millions de francs et 7 millions de francs environ.

L'application de la réglementation actuelle, dans l'hypothèse de l'implantation d'une centrale n'est généralement pas susceptible, par elle-même, d'attirer de nombreuses activités industrielles nouvelles, quoiqu'elle facilite leur venue.

On sait cependant qu'une réforme du système des impôts locaux est en préparation. Elle permettra d'améliorer la répartition des ressources de sorte qu'aucune collectivité directement concernée par l'implantation de la centrale nucléaire ne puisse être exclue du bénéfice des recettes nouvelles. Un meilleur échelonnement dans le temps de ces taxes et impôts devrait également être recherché et mieux correspondre ainsi aux conditions de financement des équipements collectifs.

Les modalités du choix des sites

Des délais considérables sont inévitables pour la construction d'une centrale nucléaire : avant le début du chantier, qui durera 5 à 10 ans, 5 années d'études préparatoires s'écoulent.

C'est dire que la recherche urgente et impérative d'un équilibre énergétique convenable, exclut, pour notre pays, une attitude attentiste.

Les modalités prévues pour la sélection des sites et la définition d'un schéma général d'implantation, ont été arrêtées de façon à présenter les garanties nécessaires en associant les instances locales à cet effort et en les faisant participer aux décisions à prendre.

Les garanties sont apportées par les procédures prévues, la participation est organisée par une concertation au niveau régional.

Les procédures préalables

Le nombre et l'ampleur des études préliminaires à l'implantation des centrales nucléaires, la nécessité d'une concertation étroite avec les autorités régionales, et le respect des grandes options de l'aménagement du territoire, expliquent la longueur des procédures d'agrément.

Tout producteur d'énergie électrique, a fortiori l'exploitant national, est soumis à un grand nombre de procédures, préalables à la construction et à l'exploitation des usines, qu'elles soient nucléaires ou classiques.

D'une part, la « Déclaration d'Utilité Publique » (DUP) constitue, après enquête publique, la reconnaissance officielle par l'Etat de l'opportunité de l'opération envisagée. D'autre part, l'autorisation de création signifie que, par décret, l'Etat reconnaît officiellement, après examen approfondi des services de l'Administration, l'aptitude de la centrale à fonctionner dans des conditions sûres, ce qui ne décharge d'ailleurs pas l'exploitant de sa responsabilité en matière de sûreté.

Enfin, les arrêtés interministériels définissent les conditions de rejet d'effluents radioactifs et de contrôle de l'environnement.

Au cours des études préliminaires, les reconnaissances sommaires sur carte et sur le terrain et la consultation des documents locaux permettent à EDF de dresser un premier inventaire des sites envisageables et de prendre contact avec les administrations intéressées.

Si ce travail n'aboutit pas à une conclusion négative, les études d'avant-projet peuvent être engagées, ayant pour but de confirmer ou d'infirmer les analyses précédentes et notamment de démontrer la faisabilité de la centrale. Ces études portent en particulier sur les caractéristiques de site (géologie, reconnaissance du terrain, météorologie, courants marins, nappes phréatiques, etc...), les conséquences de l'installation nucléaire dans le domaine de l'environnement, la sûreté, la disposition des bâtiments, des ouvrages d'eau et des couloirs de lignes électriques, l'impact économique et social du chantier et de l'usine.

Les collectivités et les responsables locaux sont tenus informés des progrès de ces travaux et peuvent proposer d'autres sites donnant lieu à l'établissement d'avant-projets.

Ainsi seront constitués les « dossiers-projets » nécessaires aux instructions administratives finales. Lors de la demande d'autorisation de création, le rapport préliminaire de sûreté comprend une étude du site et une étude préliminaire relative aux rejets. De même le rapport provisoire de sûreté nécessaire pour l'autorisation de démarrage contient un dossier de prévision des rejets.

La concertation régionale

Dans un souci d'information sur les problèmes de l'énergie et pour tenir compte des préoccupations des collectivités régionales et locales, le Gouvernement a décidé de procéder, pour le choix des futurs sites des centrales nucléaires, à une large concertation avec les élus locaux au niveau des régions.

Avant même le dépôt des demandes de déclarations d'utilité publique, cette concertation a pour but de permettre aux responsables politiques de prendre conscience de l'enjeu, de s'informer sur l'ensemble des problèmes qui se posent et de participer aux décisions. Elle devrait aboutir, d'ici la fin de l'été 1975, à la détermination des sites nécessaires pour faire face à nos besoins d'énergie électrique des prochaines années, à l'horizon 1988.

En novembre 1974, le Ministre de l'Industrie et de la Recherche a demandé aux Préfets de région de saisir les bureaux des assemblées concernées et de s'assurer le conseil de tous les experts intéressés par l'implantation d'une centrale dans leur région. Outre les Comités de bassin, il peut être fait appel aux Services chargés de l'Équipement, de l'Aménagement du Territoire, de l'Environnement, de la Santé, de la Protection Civile, de la Sûreté etc... Cette concertation est actuellement largement engagée dans le pays et de nombreux Comités Economiques et Sociaux et Conseils Régionaux ont déjà fait connaître leur appréciation sur les sites soumis à leur examen.

Le choix des sites

Au delà des décisions déjà prises, le choix doit porter sur une douzaine de sites nouveaux, correspondant aux centrales à mettre en service entre 1980 et 1988.

Les décisions correspondantes devront tenir compte des appréciations qu'auront formulées les régions et les collectivités concernées. Elles devront aussi prendre en considération les études techniques d'avant-projets effectuées par EDF et les administrations intéressées, qui s'attachent à déterminer les conditions réelles de faisabilité. Elles devront enfin observer les orientations générales, adoptées au niveau national, qui établiront la nécessaire synthèse entre les différents objectifs : économie des moyens, protection de l'environnement, aménagement du territoire, respect des impératifs de sûreté et de santé publique.

**SITES DE CENTRALES NUCLEAIRES PROPOSES
A L'EXAMEN DES RESPONSABLES REGIONAUX**

| REGIONS | COMMUNES D'IMPLANTATION |
|----------------------|--|
| ALSACE | Marckolsheim - Sundhouse - Gerstheim - Lauterbourg |
| AQUITAINE | Zone du Verdon |
| BASSE NORMANDIE | Manvieux - Flamanville - Barfleur |
| BOURGOGNE | Barbey - Misy sur Yonne - aval de Pont sur Yonne |
| BRETAGNE | Beg-an-Fry - Erdeven - Baie d'Audierne (Plogoff ou Saint-Vio) |
| CHAMPAGNE-ARDENNES | Zones de Cuvrot - Omev (Vallée de la Marne), Mérvy sur Seine, Périgny la Rose, aval de Nogent-sur-Seine (vallée de la Seine) |
| HAUTE NORMANDIE | Vattetot - Val d'Ausson - Saint-Aubin - région de Penly - région d'Antifer |
| LANGUEDOC ROUSSILLON | Région Sète - Frontignan |
| LORRAINE | Région Sentzich - Cattenom |
| MIDI PYRENEES | Golfech |
| NORD PAS DE CALAIS | Oye Plage - Danne |
| PAYS DE LA LOIRE | Région de Corsept - Brétignolles - Saint Martin de Brem - Ingrandes - Varades |
| PROVENCE COTE D'AZUR | Martigues |
| REGION PARISIENNE | 2 sites en vallée de l'Yonne (voir région Bourgogne), 3 sites en vallée de la Seine (voir région Champagne Ardennes) |
| RHONE-ALPES | Saint-Maurice l'Exil - Soyons - Arras - Cruas |

L'ORGANISATION DE L'INDUSTRIE NUCLEAIRE

La réalisation, dans de bonnes conditions, du programme électro-nucléaire français ne dépend pas seulement des réponses apportées aux impératifs de sûreté, de protection de l'environnement ou de choix des sites auxquelles le public est plus particulièrement sensible.

Elle est également étroitement liée à l'organisation de l'industrie nucléaire, qui recouvre l'ensemble des activités liées au cycle du combustible.

Elle est fonction, enfin, des capacités financières du pays et de son aptitude à participer aux efforts de coopération internationale.

L'INDUSTRIE DU COMBUSTIBLE NUCLEAIRE

La production de l'énergie électrique d'origine nucléaire implique le développement d'un ensemble de structures industrielles qui assurent l'approvisionnement des centrales nucléaires en combustible et le retraitement des combustibles irradiés. Ces structures constituent ce qu'il est convenu d'appeler le cycle du combustible. L'industrie française, et notamment le CEA, développe ses activités à chaque étape de celui-ci.

L'industrie minière française de l'uranium

L'industrie de l'uranium couvre un large domaine qui comprend la prospection et l'exploitation minières, le traitement des minerais, la production de concentrés et leur conversion en métal ou en hexafluorure (UF 6).

Le CEA partage actuellement avec deux grands groupes industriels, Pechiney Ugine Kuhlmann (PUK) et le Nickel-Pennarroya-Mokta, la plus grande part des productions. A chaque étape, de nombreuses sociétés ayant, pour la plupart, un champ d'action international, ont été créées dans le cadre de ces groupes.

La recherche et l'exploitation minières

Les travaux entrepris depuis 1945 par le CEA dans le domaine de la prospection de l'uranium ont été complétés, à partir de 1954, par l'action de diverses sociétés privées, rejointes récemment par la Compagnie Française des Pétroles (CFP) et la Société Nationale des Pétroles d'Aquitaine (SNPA). En France, les trois divisions minières du CEA se partagent plus de 90 % de la production du territoire métropolitain. La Compagnie française des Minerais d'Uranium (CFMU) réalise directement, à partir de minerais lixivés, une certaine production de concentrés marchands d'uranium à Langogne (Lozère).

Le rôle des sociétés privées se manifeste plus particulièrement hors de l'hexagone, notamment en Afrique francophone où elles associent leurs efforts à ceux du CEA, des compagnies étrangères et des Etats producteurs.

Au Niger, était créée, en février 1968, la Société des Mines de l'Air (SOMAIR), à laquelle participe l'Etat nigérien aux côtés du CEA, de Pechiney-Mokta et de la

CFMU. A ces actionnaires, se sont joints, en 1970, les firmes allemande et italienne Urangesellschaft et Agip Nucleare. La SOMAIR a développé l'exploitation du gisement d'Arlit, dont la capacité de production devrait être portée, en 1975, à 1500 tonnes d'uranium sous forme de concentrés.

Au Gabon, une société privée de droit local, la Compagnie des Mines de Franceville (COMUF), à participation majoritaire française, exploite le gisement de Mounana.

En janvier 1974, le gouvernement du Niger, le consortium japonais (OURD) et le CEA fondaient la COMINAK, Société d'exploitation du gisement d'Akouta, dont on attend la production de 2 000 tonnes de métal avant la fin de la décennie.

Le 3 avril 1974, une convention générale précisant les conditions dans lesquelles seront effectuées les recherches d'uranium dans la région d'Imouraren — à 80 km au sud d'Arlit — a été signée conjointement par la société américaine Continental Oil Company, le CEA et l'Etat nigérien. Cette convention prévoit, dans le cas de la découverte d'un ou de plusieurs gisements économiquement exploitables, un système de mise en valeur et de commercialisation communes, permettant, au Niger comme à ses partenaires, de disposer directement de sa propre part de production.

Plus récemment encore, le 14 mai 1974, a été constituée à Niamey la Société des Mines du Djado, en application d'un protocole signé le 12 décembre 1973 entre la République du Niger, la société allemande Urangesellschaft et le CEA. A ces trois actionnaires, doit se joindre l'organisme japonais Power Nuclear Fuel Development Corporation (PNC).

Après plus d'un quart de siècle de prospection systématique et ininterrompue, mettant en œuvre des méthodes de plus en plus perfectionnées, l'inventaire des réserves en uranium dont peut disposer la France n'est pas encore terminé. Selon les experts, de nouvelles ressources, non négligeables, peuvent être découvertes, notamment dans le Limousin.

Le traitement des minerais et la vente des concentrés

Du fait de leur faible teneur en métal (0,3 % en moyenne) et en raison du coût des transports, les minerais doivent être concentrés au voisinage de leur lieu d'extraction. Aux installations d'extraction proprement dites est donc presque toujours associée une usine de traitement du minerai visant à transformer celui-ci en un sel d'uranium, concentré facile à transporter et présenté soit sous forme cristallisée et jaune (uranate ou « yellow cake »), soit en solution liquide (nitrate d'uranyle).

Tous les minerais produits en métropole — excepté ceux de Langogne — sont traités par les trois usines de l'Ecarpière, de Bessines et du Forez, construites et gérées par la Société Industrielle des Minerais de l'Ouest (SIMO), filiale de PUK, à laquelle participent également la Caisse des Dépôts et Consignations et le CEA.

La production des concentrés à partir des gisements français et africains, de l'ordre de 10 % de celle du monde occidental, a atteint 3 300 tonnes en 1974, dont 1 590 tonnes provenaient du Territoire français et 1 710 tonnes des gisements africains.

Les concentrés d'uranium sont offerts sur le marché mondial par URANEX, groupement d'intérêt économique fondé en 1969 à Paris par le CEA, Le Nickel-Penarroja-Mokta et Pechiney Ugine Kuhlmann.

La conversion de l'uranium

Les moyens de l'industrie française dans le domaine de la conversion chimique de l'uranium en tétrafluorure, puis en hexafluorure ou en métal, sont regroupés, depuis 1971, au sein de la Société COMURHEX (Société pour la Conversion de l'Uranium en Métal et en Hexafluorure), qui gère les usines de Malvesi et de Pierrelatte (zone conversion).

Son capital est détenu à concurrence de 51 % par la Société des Usines Chimiques de Pierrelatte (UCP), de 29 % par le CEA, de 10 % par la Société Saint-Gobain

Techniques Nouvelles (SGN) et de 10 % par la Société Azote et Produits Chimiques (APC).

La capacité des deux usines doit être portée respectivement à 6 000 tonnes et 10 000 tonnes par an à partir de 1980.

Elle dépasse les besoins français, ce qui a permis à COMURHEX de prendre position sur le marché mondial et lui permettra de fournir l'hexafluorure (UF₆) à Eurodif.

La fabrication des éléments combustibles

Après la conversion de l'uranium, l'étape suivante est l'enrichissement, étape clef qui sera examinée plus loin et qui précède la fabrication des éléments combustibles.

Les éléments combustibles constituent le dernier stade de transformation de la matière première avant son utilisation dans les réacteurs.

Ils se présentent sous des formes différentes variant selon les filières auxquelles ils sont destinés. Ils exigent donc le développement d'une technologie et d'une industrie diversifiées.

Le rôle du CEA

L'expérience du CEA dans le domaine des éléments combustibles porte sur la conception, les calculs de fonctionnement en réacteur, le contrôle et le suivi de l'exploitation auprès de la clientèle, notamment EDF, en France. Cette expérience s'applique à toutes les filières de réacteurs. Elle a rendu possible l'exploitation sans défaillance de centrales nucléaires graphite-gaz totalisant une puissance installée de 3 000 MWe, la réussite du programme naval français dont dérive une conception des éléments combustibles pour la filière à eau légère, le succès que représente Phénix, prototype français de la filière à neutrons rapides dont les éléments combustibles ont été fabriqués dans les ateliers du CEA à Cadarache.

En ce qui concerne la fabrication proprement dite, la politique adoptée par le CEA dès 1954 a consisté à étudier lui-même les procédés de base, puis à transférer à l'industrie privée le développement et l'exploitation de la plupart de ces procédés. C'est ainsi que l'on trouve des centres de recherche et des ateliers de fabrication à l'intérieur du CEA et, pour la plus grande partie des fabrications, des usines appartenant à deux sociétés dont les activités débordent largement les frontières nationales :

— La SICN « Société Industrielle des Combustibles Nucléaires » (Société Alsacienne de Participation Industrielle et Lille-Bonnière-Colombes : 75 %, Péchiney-Ugine-Kuhlmann : 25 %) ;

— et la CERCA « Compagnie pour l'Etude et la Réalisation de Combustibles Atomiques » (Creusot-Loire : 26 %, Saint-Gobain Techniques Nouvelles : 26 %, Péchiney : 26 %, Sylvania Electric Products : 22 %).

Les fabrications assurées par le CEA lui-même concernent les éléments combustibles au plutonium dans les ateliers de Cadarache.

Par ailleurs, la Société de fabrication des Eléments Catalytiques (SFEC) (Société d'Etudes et de Recherches d'Uranium 51 %, Groupe PUK 28 %, Comptoir Lyon-Allemand 10,5 %, Alsacienne de Participation 10,5 %) assure certaines fabrications des pastilles d'oxyde d'uranium.

La gestion et le contrôle de qualité des fabrications, pour le compte du CEA, d'EDF et d'autres clients, sont assurés par le Service de Fabrication Industrielle des Eléments Combustibles et Matériaux de Structure (SEFIC), qui coordonne les réalisations par l'industrie privée. Enfin, les relations techniques concernant l'utilisation de ces éléments combustibles en réacteur sont assurées directement entre les exploitants des réacteurs et les services d'études du CEA.

Les nouvelles sociétés industrielles

Le programme électro-nucléaire français fondant le développement électro-nucléaire sur la construction de centrales à eau légère, de nouvelles sociétés ont été récemment créées pour assurer la fabrication des éléments combustibles, à base d'oxyde d'uranium enrichi, nécessaires à cette filière.

A la fin de l'année 1972, était constituée la Société EUROFUEL « Compagnie Européenne de Fabrication de Combustible à base d'uranium pour réacteurs à eau légère » dont les actionnaires sont PUK (51 %), Westinghouse (35 %), Framatome (10 %) et Creusot-Loire (4 %). EUROFUEL contrôle la Société FBFC (Franco-Belge de fabrications de combustibles) qui possède une usine en Belgique. La conception et la commercialisation sont assurées par les Sociétés-mères. EUROFUEL a reçu à ce jour, toutes les commandes des premières charges des centrales construites par FRAMATOME.

En octobre 1972 fut créée la Société Industrielle de Combustibles pour Réacteurs Electrogènes (SICREL), dont le CEA (34 %), Saint-Gobain Pont-à-Mousson (22 %), ALSPI (22 %) et la société Le Nickel (22 %) se partagent le capital. La SICREL, qui ne dispose pas encore de moyens de production, s'intéresse essentiellement au marché de recharge des combustibles pour réacteurs à eau ordinaire, dont on prévoit un doublement tous les quatre ans et dont le chiffre d'affaires, mis à part l'hexafluorure d'uranium, a représenté dans le monde, en 1972, plus d'un milliard de francs. Cette firme, qui dispose des techniques développées par le CEA, a pour objectif d'assurer le service complet des éléments combustibles, concernant à la fois leur conception, leur calcul et leur fabrication.

En 1973, elle a poursuivi la mise en place de ses structures et a élargi son assise par la négociation d'un accord pour la fabrication des combustibles de réacteurs à eau bouillante avec la Compagnie Générale d'Electricité (CGE) et la General Electric américaine.

En prévision du développement éventuel des réacteurs à haute température, le CEA a signé, le 26 juin 1973, avec Gulf Energy and Environmental Systems, un accord portant sur l'échange des technologies et la constitution d'une société de combustibles pour les réacteurs à haute température, la CORHAT, dont le capital est partagé entre GULF, le CEA et l'industrie française. En l'absence actuelle d'un marché pour ce type de réacteurs, l'activité de la CORHAT ne sera guère perceptible avant plusieurs années.

Le retraitement des combustibles irradiés

Après avoir été utilisés dans le réacteur, les éléments combustibles irradiés sont retirés puis envoyés dans les usines spécialisées, où les matières fissiles sont séparées des produits de fission pour être récupérées. C'est la dernière phase du cycle du combustible, celle du retraitement de l'uranium ou du plutonium, qui concerne également le confinement et le stockage des déchets radio-actifs. Elle exige l'utilisation d'une technologie avancée et la mise en œuvre de procédés respectant des normes de sûreté très élevées.

Les opérations de retraitement présentent également l'intérêt particulier d'extraire le plutonium, combustible nécessaire au développement des réacteurs surrégénérateurs.

Les capacités françaises de retraitement

Grâce à ses deux usines de Marcoule (Gard) et de la Hague (Manche), réalisées par Saint-Gobain Techniques Nouvelles et gérées par le CEA, dont la capacité globale est de l'ordre de 2 000 tonnes par an de combustible métallique, la France dispose d'un potentiel de retraitement actuellement excédentaire qui lui permet de recevoir des commandes de l'étranger.

La France, est avec la Grande-Bretagne — qui possède une usine à Windscale — le seul pays de l'Europe des Neuf ayant une activité de production dans ce domaine, le

groupe allemand KEWA ne prévoyant la mise en service de sa première usine de retraitement que vers 1983.

Conçus à l'origine en vue de la satisfaction des besoins en plutonium du programme militaire et du développement de la filière à graphite-gaz, les usines françaises ont dû, à partir de 1969, adapter leurs installations au traitement des nouveaux combustibles oxydes, utilisés pour les réacteurs à eau ordinaire.

Ainsi fut décidée, en 1972, la construction d'un atelier spécialisé, dénommé HAO (Haute Activité Oxydes), dont l'achèvement est prévu pour 1975 et qui permettra de développer progressivement une capacité de traitement de 800 tonnes par an de combustibles irradiés provenant des centrales à eau ordinaire et du réacteur surrégénérateur Phénix.

Les accords européens

Alors que certains grands pays, tels que les Etats-Unis et le Japon, prévoient une capacité insuffisante en matière de retraitement jusqu'en 1985, la situation européenne se présente beaucoup plus favorablement.

Dès 1971, un effort de coopération était entrepris entre les industries allemande, britannique et française, aboutissant à la conclusion d'un accord entre le CEA, la British Nuclear Fuels Ltd et la KEWA (1).

Une nouvelle société, United Reprocessors (UNIREP), dont le siège est à Francfort, a été ainsi constituée à parts égales entre les trois groupes.

Elle a pour objectif de rationaliser les investissements, et l'utilisation optimale des capacités présentes et futures de retraitement, et de mettre en commun les connaissances dans ce domaine.

En 1973, cette société a déjà adressé de nombreuses propositions aux producteurs d'électricité européens et a enregistré des commandes.

L'ENRICHISSEMENT DE L'URANIUM

L'enrichissement de l'uranium constitue une phase indispensable du cycle du combustible pour les centrales à eau légère, comme pour les filières à haute température. Elle n'existait pas pour les réacteurs à graphite-gaz, alimentés à l'uranium naturel.

Bien avant de lancer un programme électro-nucléaire basé sur les réacteurs à eau ordinaire, la France avait déjà acquis l'expérience et la maîtrise du procédé d'enrichissement par diffusion gazeuse, grâce à la construction, dès les années soixante, des quatre usines de séparation isotopique de Pierrelatte, mises en service entre 1964 et 1967.

Destinées aux applications militaires, et produisant un uranium dont le taux d'enrichissement peut être très élevé — et dépasser 90 % — ces unités n'étaient pas adaptées aux besoins requis pour les usages civils.

Dès lors, compte tenu de l'importance des capitaux à investir, de la complexité des techniques à mettre en œuvre, les nouveaux problèmes d'approvisionnement ont fait prendre à l'enrichissement de l'uranium une place essentielle dans l'industrie nucléaire française et européenne.

La situation du marché

L'approvisionnement du monde occidental en uranium enrichi a été assuré exclusivement au cours des vingt dernières années par les Etats-Unis, dont les trois usines d'Oakridge, Paducah et Portsmouth disposaient, jusqu'à une date encore récente, de capacités nettement excédentaires.

(1) La KEWA regroupe plusieurs grandes sociétés industrielles allemandes, dont Bayer, Hoechst et Nukem.

L'accélération des programmes de développement nucléaire dans le monde a entraîné une rapide expansion des besoins qui dépasseront vers 1978, les capacités d'enrichissement disponibles dans les seules usines américaines.

Le marché occidental de l'uranium, appelé à croître jusqu'à la fin du siècle, représentera, dès 1980, un chiffre d'affaires annuel de l'ordre de 10 milliards de francs et qui excéderait 20 milliards de francs en 1985 pour atteindre environ 30 à 40 milliards de francs vers 1990.

Par ailleurs, le passage éventuel du marché de l'uranium naturel d'un état de pléthore à une situation de pénurie relative, entraînera une hausse des prix du métal qui favorisera l'abaissement des teneurs de rejet des usines d'enrichissement, exigeant par là-même un nombre d'unités de travail de séparation supérieur pour une même quantité d'uranium enrichi. Selon les estimations actuelles, les besoins annuels du monde libre en travail de séparation s'établiront à 33 millions d'UTS en 1980, 67 millions en 1985 et 116 millions en 1990, l'Europe et les Etats-Unis se partageant respectivement le tiers et la moitié de ce marché.

Le rythme de croissance dépassera 5 millions d'UTS par an, ce qui nécessitera, au cours des années 1980 la mise en service, tous les dix-huit mois, d'une nouvelle usine de séparation isotopique de grande dimension.

D'ici à l'an 2000 et malgré le développement prévisible des réacteurs surrégénérateurs, de quinze à vingt usines de ce type seront mises en service, d'après les experts américains.

La diversification des sources d'approvisionnement

Jusqu'en 1969, les prestations d'enrichissement fournies par les usines américaines ont été assurées dans des conditions libérales. Au fur et à mesure qu'étaient amorties les usines d'enrichissement, le prix de l'UTS se trouvait diminué, jusqu'à ne plus refléter que les seuls frais d'exploitation.

A partir de 1970, l'énergie consommée devenant plus chère et l'industrie privée américaine envisageant de construire les nouvelles usines de séparation isotopique, le prix des prestations d'enrichissement subissait plusieurs hausses consécutives. L'UTS américaine est ainsi passé de 26 dollars en 1970 à 42 dollars en 1973.

Au début de l'année 1973, l'US-AEC imposait de nouvelles conditions commerciales, particulièrement sévères : désormais, l'uranium enrichi doit être commandé huit ans avant la livraison de la première charge pour une période de fourniture d'au moins dix ans, sans garantie de prix ; un acompte de 33 % doit être versé par fraction au cours des trois années précédant la première livraison ; le prix pratiqué au jour de la livraison sera fixé unilatéralement par le vendeur et pourra être modifié par lui à tout moment, par publication au Federal Register ; la Commission américaine de l'énergie atomique aura le droit de refuser toute commande à partir du moment où sa capacité de production sera saturée.

Dès lors, la nécessité de diversifier les sources d'approvisionnement devient d'autant plus pressante que la capacité disponible des Etats-Unis risque d'être insuffisante à moyen terme. L'entrée de l'industrie privée américaine dans ce secteur du combustible, qui pourrait provoquer une expansion nouvelle, est subordonnée à un certain nombre de conditions préalables, telles que l'accès aux connaissances classées ou l'exploitation des usines existantes. Le relais ne sera pris que par un nombre restreint de grands groupes industriels et dès maintenant des problèmes se posent quant à la situation de l'industrie de l'enrichissement au regard des lois anti-trusts. La question des délais est également particulièrement préoccupante Outre-Atlantique, dans la mesure où l'échéancier est conditionné par celui de la construction des centrales électriques associées qui, aux Etats-Unis, s'étale sur sept à huit années.

Cette situation a incité les pays importateurs, notamment la France, à diversifier leurs sources d'approvisionnement en uranium enrichi.

Celles-ci demeurent toutefois restreintes. Le 15 mars 1971, le CEA passait un accord avec Technabexport (organisation du commerce extérieur de l'URSS) aux termes duquel celle-ci devait recevoir 450 tonnes d'uranium naturel au début de 1973 et fournir en retour 75 tonnes de combustible enrichi à 2,7 % en moyenne.

Depuis d'autres accords du même genre ont été conclus, notamment, en novembre 1974, toujours avec l'URSS, un contrat pour la fourniture, entre 1979 et 1983, de nouvelles unités de travail de séparation isotopique (UTS).

La création d'une industrie européenne

Ainsi s'est progressivement imposée la nécessité d'organiser une industrie de l'enrichissement à l'échelle européenne.

Deux groupements utilisant deux techniques différentes ont été constitués à cet effet.

En mars 1970, un accord tripartite, conclu entre les Pays-Bas, la Grande-Bretagne et la République Fédérale Allemande, donnait naissance à une organisation chargée de promouvoir, par l'intermédiaire des sociétés CENTEC (1) et URENCO (2), la technique de l'ultra-centrifugation. Deux usines de production sont prévues l'une à Capenhurst en Grande-Bretagne, l'autre à Almelo aux Pays-Bas. La capacité annuelle de production de chacune de ces installations serait de l'ordre de 200 000 UTS en 1977, au delà il s'agit de simples projets. D'après URENCO, elles pourraient atteindre 2 millions d'UTS en 1980 et 10 millions d'UTS en 1985. Cet effort d'investissement sera réalisé en deux sociétés distinctes.

Le procédé de l'ultra-centrifugation, utilisé par URENCO, fait encore l'objet de recherches visant à assurer définitivement sa crédibilité technique et économique. Les perspectives d'application de ce procédé dépendent notamment du coût unitaire et de l'endurance des centrifugeuses construites en grande série, dont l'estimation, en l'état actuel des connaissances, est encore difficile à faire. L'un des avantages de l'ultra-centrifugation est une consommation moindre d'électricité. Pour de multiples raisons techniques, ce procédé est lent à mettre au point.

En revanche, le procédé de diffusion gazeuse bénéficie, dès maintenant, d'une longue expérience industrielle.

En France, dès 1955, donc bien avant la création de l'usine de Pierrelatte, était créée la Société de Recherches Techniques et Industrielles (SRTI), destinée à grouper, en collaboration avec le CEA, les efforts de développement dans le domaine de la séparation isotopique. Trois autres sociétés furent créées en vue de la réalisation d'un projet européen : l'USSI assurant la tâche d'architecte industriel, la Société des Usines Chimiques de Pierrelatte produisant le fluorure d'uranium et la Société de Fabrication d'Éléments Catalytiques (SFEC), responsable de la production des « barrières de diffusion ».

L'ensemble des efforts de recherche, accomplis par la France au cours de la dernière décennie, par le truchement de ces sociétés et du CEA, a préparé la mise en œuvre actuelle du projet européen d'enrichissement de l'uranium par diffusion gazeuse.

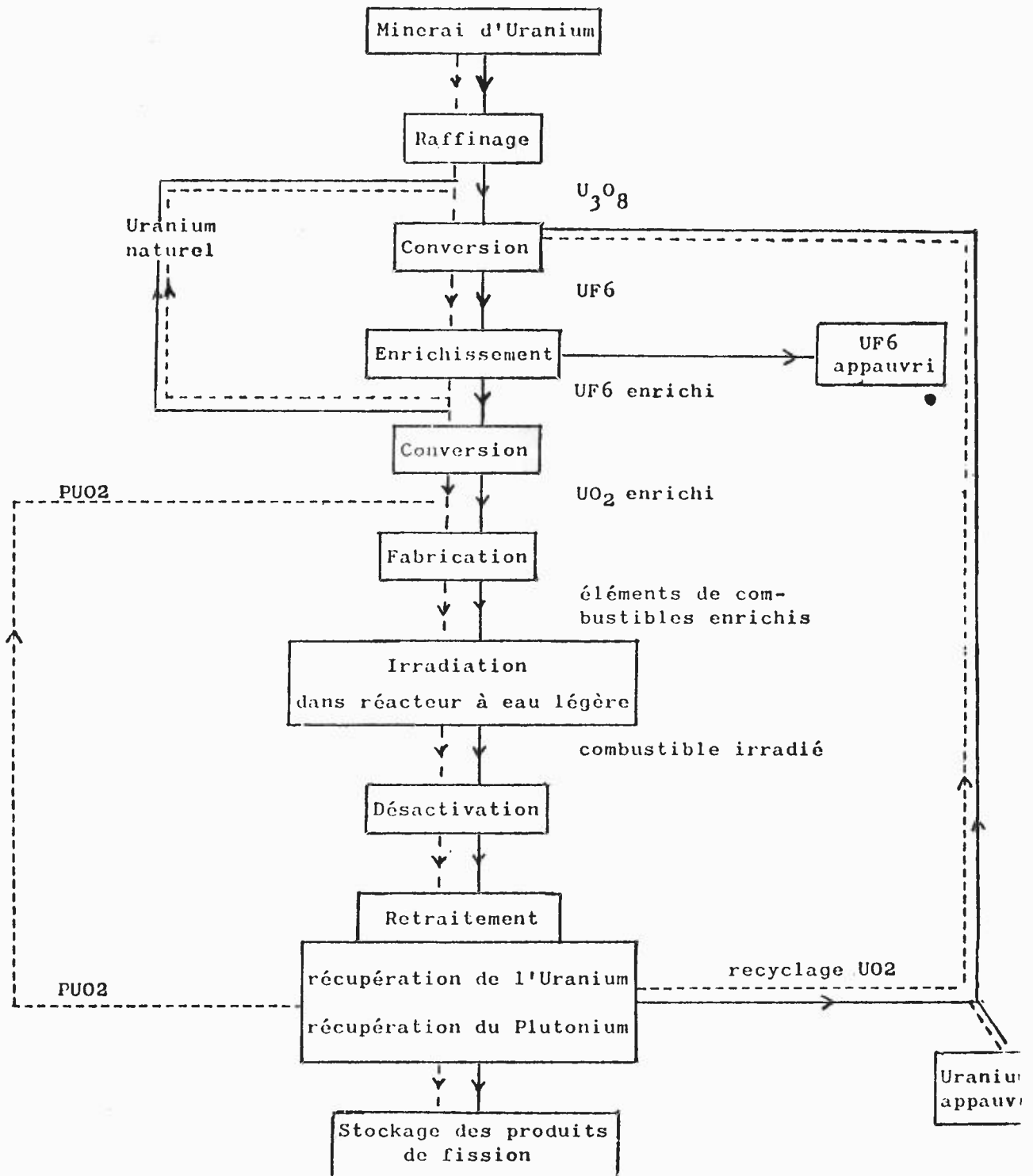
Le 25 février 1972, en effet, était signé le protocole créant EURODIF, Association pour la réalisation d'une usine de diffusion gazeuse en Europe (3), regroupant, autour du CEA, des partenaires anglais, allemands, belges, hollandais et Italiens, puis espagnols et suédois.

(1) CENTEC : Société internationale pour la technique de l'enrichissement par centrifugation.

(2) URENCO : Société internationale pour la commercialisation du procédé de l'ultra-centrifugation.

(3) EURODIF était alors un groupement d'intérêt économique, mis sur pied pour une période de 2 ans et regroupant les partenaires suivants : SYBESI (Syndicat Belge de Séparation Isotopique), le CEA, la British Nuclear Fuels Limited, la SIT (Filiale des sociétés allemandes Nukem, Hoechst, Gelsenberg et Steag), le CNEN italien, l'AGIP NUCLEARE (Italie), l'ULTRA-CENTRIFUGE-NEDERLAND (Pays-Bas), l'ENUSA (Empresa-Nacional Del Uranio, société espagnole), et l'ATOMENERGI suédoise. L'objet de ce GIE était d'étudier la valeur économique du procédé par diffusion gazeuse, développé par le CEA.

CYCLES DE COMBUSTIBLES NUCLEAIRES POUR LA PRODUCTION D'ELECTRICITE



Cycle à l'Uranium

----- Cycle avec recyclage du plutonium

- alimente les couvertures des surrégénérateurs

En juin 1973, l'Allemagne, l'Angleterre et les Pays-Bas décidaient de se retirer, tandis que les cinq autres membres marquaient leur volonté de poursuivre et d'accélérer les travaux.

Le 27 novembre 1973, l'Assemblée générale des actionnaires d'EURODIF, dont les statuts sont désormais ceux d'une société anonyme, décidait la construction d'une usine d'enrichissement par diffusion gazeuse.

Le 8 février 1974, elle choisissait pour cette usine le site du Tricastin, près de Pierrelatte, dans la vallée du Rhône. Les premiers travaux ont débuté en 1975 et la mise en service est prévue à partir de 1979. La capacité de production atteindra selon les prévisions, environ 10 millions d'UTS à partir de 1981.

Quatre tranches nucléaires à eau pressurisée, d'une puissance installée globale de 3600 MWe (900 MWe chacune) seront en même temps prévues à Saint-Paul-Trois-Châteaux, pour alimenter en électricité l'usine européenne de séparation isotopique. L'ensemble de l'investissement est évalué, en Francs de 1973, à environ 8 milliards pour l'unité d'enrichissement (hors centrales associées) et 5 milliards pour les centrales associées.

La Suède ayant à son tour décidé de se retirer en mars 1974, EURODIF ne réunit plus actuellement que des partenaires français, italiens, belges et espagnol, mais est susceptible de rallier de nombreux pays qui se lancent dans des programmes électro-nucléaires (1).

L'usine de Tricastin, avant même que sa construction ait débuté, avait ses capacités déjà pratiquement saturées. Le Japon lui-même, s'est porté acquéreur d'un million d'UTS pour la période allant de 1980 à 1990. Le reste de la production a été réservé aux partenaires.

L'INDUSTRIE DES REACTEURS

La construction des réacteurs nucléaires, assurée par un nombre restreint de groupes spécialisés, fait intervenir, en amont et en aval, un très large éventail d'activités, et, par suite, d'entreprises industrielles. Ainsi, l'industrie nucléaire ne s'est pas créée ex nihilo. Elle représente plutôt une somme d'industries classiques poussées à l'excellence de leurs performances.

Le CEA s'est adressé en premier lieu aux sociétés chimiques pour étudier et produire les matériaux et les corps spéciaux nécessaires à la réaction nucléaire et à sa modération : uranium, graphite, eau lourde, aciers spéciaux.

L'élaboration des métaux rares ou spéciaux utilisés pour le gainage des réacteurs et la fabrication de leurs équipements est l'affaire de la métallurgie. La chaudronnerie s'est vu confier la réalisation des cuves, des échangeurs de chaleur, des générateurs de vapeur. La construction mécanique est plus particulièrement chargée des ensembles internes et externes du réacteur nucléaire (structures de précision : grilles, supports des éléments combustibles, tuyauteries, etc... et pièces actives : barres de commande, dispositif de chargement et de manutention, systèmes de sécurité, pompes, vannes, robinetterie, etc...). Quant à la construction électrique et électronique, elle réalise les installations de contrôle-commande, de surveillance, de régulation, de traitement des informations, toutes indispensables à la bonne marche et à la sûreté des réacteurs.

Il faut souligner que pour de nombreux secteurs (fabricants de chaudières thermiques classiques ou de groupes hydrauliques), il s'agit en fait d'une reconversion, leurs moyens s'adaptant par nature à ces nouvelles fabrications au prix d'un renforcement des contrôles de qualité et des contraintes de précision, spécifiques du génie nucléaire. Bien que le programme nucléaire implique effectivement une mobilisation

(1) Début janvier 1975, l'Iran, à son tour, est devenu membre d'EURODIF, avec une participation de l'ordre de 10 % par l'intermédiaire d'une Société franco-iranienne.

industrielle sérieuse, le potentiel requis n'excède donc nullement les moyens français ni leur capacité d'adaptation. A ce redéploiement correspondent d'ailleurs des possibilités de prolongement vers des domaines exigeant des niveaux analogues de précision et de qualité.

La construction des réacteurs à eau légère

Les groupes industriels

La réalisation des réacteurs de production proprement dits est aujourd'hui subordonnée à la maîtrise technologique de la filière à eau ordinaire. Cette filière, sous les formes à eau pressurisée et à eau bouillante, développée respectivement par Westinghouse et General Electric, est mise en œuvre dans 250 centrales électro-nucléaires actuellement en exploitation, en construction ou en commande. Ces techniques sont développées en France :

- par FRAMATOME (Société Franco Américaine de Constructions Atomiques), du Groupe Creusot-Loire, qui détient la licence de Westinghouse pour le procédé à eau pressurisée (PWR) ;
- et par SOGERCA (Société Générale pour l'Entreprise de Réacteurs et de Centrales Atomiques), filiale de l'Alstom, Groupe Compagnie Générale d'Electricité (CGE), qui détient la licence de General Electric (Etats-Unis) pour le procédé à eau bouillante (BWR).

Les effectifs totaux des deux groupes industriels dont font partie Framatome et Sogerca atteignent quelque 230 000 personnes.

Electricité de France, qui assure l'exploitation des centrales électriques, agit en qualité de maître d'œuvre. Il ne commande pas de centrales, clés en main, mais assure l'ingénierie et répartit ses fournitures entre un certain nombre de constructeurs choisis en général après appels d'offres.

Pour les chaudières nucléaires, la politique des Pouvoirs Publics a été de ne conserver que deux constructeurs de taille suffisante pour rester compétitifs sur le plan international.

De son côté, le CEA en s'appuyant sur sa filiale TECHNICATOME (1). (Société Technique pour l'Energie Atomique) fondée en 1972 poursuit ses efforts en ce domaine notamment en ce qui concerne la propulsion navale civile.

Par ailleurs, le CEA répondant aux demandes d'EDF et de l'industrie privée, continue d'apporter son assistance technique pour la réalisation des centrales nucléaires.

Les réponses à l'accélération du programme nucléaire

L'ensemble des sociétés françaises concernées par la fabrication des réacteurs nucléaires, qu'il s'agisse des grands groupes de construction ou des firmes spécialisées dans la conception et la réalisation industrielle des composants, est aujourd'hui confronté à un programme de développement électro-nucléaire de grande ampleur.

Le 5 avril 1974, EDF annonçait pour le compte de Framatome (Groupe Creusot-Loire) une commande ferme de 12 chaudières nucléaires destinées à des tranches de 900 MWe et de quatre options pour des unités analogues. Compte tenu des ordres d'exécution, dix réacteurs seraient ainsi mis en service d'ici 1980. La cadence de réalisation par Framatome de chaudières nucléaires devrait être multipliée par quatre par rapport aux années 1970/1973. Chaque année, 6 cuves de réacteurs (de 320 ton-

(1) TECHNICATOME est une société anonyme (90 % CEA, 10 % EDF) essentiellement constituée autour des équipes de l'ancien département de construction des piles du CEA. Son but est d'être le vecteur de transmission à l'industrie française pour la mise en valeur industrielle et commerciale des techniques électro-nucléaires mises au point par le CEA.

nes, 12 mètres de long et 4,5 mètres de diamètre) devront être fabriquées dans les ateliers du groupe. Le coût total des investissements correspondants sera de l'ordre de 400 millions de francs, y compris la construction d'un nouvel atelier à Châlon-sur-Saône.

Dans la même période, Jeumont-Schneider, filiale du Groupe Empain-Schneider, verra sa capacité de fabrication de pompes primaires portée de 6 à 18 unités.

En amont des opérations effectuées par Framatome, Creusot-Loire devra étoffer ses équipements et augmenter ses capacités de production (installation d'une presse à forger de 9 000 tonnes, augmentation du parc des machines pour les opérations d'usinage). SPIE-BATIGNOLLES (tuyauteries) et Vallourec (tubes de générateurs de vapeur) devront de leur côté augmenter leur production destinée au nucléaire.

Pour sa part, SOGERCA (Groupe CGE) recevait au début de mars 1974, la commande de deux chaudières nucléaires à eau bouillante d'une puissance unitaire de 995 MWe assortie d'une option pour six autres unités du même type.

Le dispositif industriel nucléaire du groupe CGE qui réalise environ 80 % de la chaudière est articulé sur Alsthom et ses principales filiales. SOGERCA, titulaire de la licence et des commandes au sein du Groupe ne construit pas elle-même les réacteurs, mais s'appuie sur les moyens d'études et les moyens industriels rassemblés dans la branche nucléaire et mécanique de l'Alsthom, qui comprend : GAAA (1), responsable de l'ingénierie générale, NEYRPIIC qui fabriquera les composants lourds du réacteur, y compris la cuve, en coopération, pour les deux premières chaudières avec l'italien BRED A ; Stein-Industrie (Circuits extérieurs et échangeurs). Rateau réalisera les pompes, la robinetterie, et avec Delas, les vannes, CGEE Alsthom fabriquera les contrôles-commandes.

L'ensemble des investissements prévus par Alsthom est de l'ordre de 850 millions de francs, y compris les investissements portant sur les turbo-alternateurs.

L'organisation industrielle des filières de l'avenir

En même temps que se structure l'industrie des réacteurs à eau ordinaire, se dessine l'organisation industrielle des filières de l'avenir, dont la percée économique est prévue pour les années 1980.

Les efforts accomplis jusqu'à présent dans ce domaine ont été caractérisés par une étroite collaboration entre le CEA, EDF, et l'industrie, aux stades de la recherche et des réalisations, et par le développement de la coopération à l'échelle internationale.

L'industrie des réacteurs surrégénérateurs à neutrons rapides

L'année 1973 a été celle de la divergence, de la montée en puissance et du couplage au réseau, de la centrale de démonstration Phénix d'une puissance installée de 250 MWe. Sa réalisation a été le fruit d'une collaboration entre le CEA (80 %) et EDF (20 %), jouant le rôle de client maître d'œuvre.

Les travaux de recherche et de développement ont été principalement assurés par le CEA avec le concours d'EDF et des industries concernées dans leurs spécialités.

Les équipes d'ingénierie dirigées par Technicatome ont été fournies essentiellement par GAAA, avec l'appoint d'EDF.

La construction elle-même du réacteur a été due pour l'essentiel aux groupes CGE/Alsthom, Five-Cail-Babcock et Creusot-Loire.

(1) GAAA : Groupement des Activités Atomiques Avancées (65 % CGE ; 35 % Fives-Lille-Cail).

Le CEA a fourni le combustible en plutonium, fabriqué dans son atelier de Cadarache.

Les résultats très satisfaisants du prototype Phénix, qui a déjà fourni au réseau un milliard de Kwh, ont permis de passer à une nouvelle étape, celle de la mise en œuvre industrielle et commerciale des réacteurs à neutrons rapides, représentée par Super-Phénix, centrale de 1 200 MWe, dont la construction prévue à Creys-Malville doit débuter en 1975 pour aboutir à sa mise en service vers 1980.

Super-Phénix sera réalisé pour le compte de trois grands producteurs d'électricité français, italiens et allemand : EDF, l'ENEL (Ente Nazionale per l'Energia Elettrica) et RWE (Rheinisch Westfallische Electricitätswerk).

Ces trois partenaires, qui joueront le rôle de client, ont décidé de constituer à cet effet une société dénommée la NERSA, dans laquelle EDF, ENEL et RWE auront une part respective de 51 %, 33 % et 16 %.

Pour la construction du réacteur, la collaboration internationale s'est matérialisée par la création de deux groupements industriels : l'un en France, le GNR (Groupement Neutrons Rapides), formé à parts égales par Alsthom (Groupe CGE) et Five-Cail-Babcock ; l'autre en Italie, la NIRA (Nucleare Italiana Reattori Avanzati) constituée par Ansaldo, Agip Nucleare, et Fiat.

Chacun de ces groupements, détenteur de licences du CEA, opérera avec l'assistance de Technicatome.

Au niveau des travaux d'ingénierie, l'alliance Technicatome-GAAA sera consolidée par la création de la CIRNA (Compagnie d'ingénierie pour les Réacteurs à Sodium), filiale de ces deux sociétés.

L'atelier de Cadarache continuera d'assurer les fournitures de combustibles.

Un consortium regroupant le GNR, la NIRA, et Technicatome, proposera à la NERSA, société cliente, la fourniture de la chaudière de Super-Phénix.

La mise en place de ces structures qui permettront le développement de la filière à neutrons rapides, exigeait l'établissement de liens étroits avec les pays partenaires, matérialisés par la conclusion d'un certain nombre d'accords qui prévoient la coordination des programmes de recherche et de développement et l'organisation de la transmission des connaissances acquises, notamment avec l'Italie.

De même, la mise en commun des moyens d'étude relatifs à la sûreté des sur-régénérateurs, dont dispose le centre de Cadarache, a fait l'objet d'accords passés avec la Grande-Bretagne et la République Fédérale Allemande.

Divers accords d'échanges d'information ou d'assistance technique existent également avec d'autres pays (URSS, Inde...).

La mise au point des réacteurs à haute température

Les réacteurs à haute température, en raison de leurs applications potentielles intéressantes, ont fait l'objet, en France, d'un effort de recherche visant à assurer leur commercialisation éventuelle dans l'avenir.

En vue de cet objectif, était créé, il y a quelques années, un « Groupement Industriel Français pour les Réacteurs à Haute Température » : le GHTR. En 1974, les entreprises membres de ce Groupement : Creusot-Loire (40 %), la Compagnie Electromécanique (20 %), Pechiney Ugine Kuhlmann (20 %) et la CERCA (20 %), ont constitué une filiale commune, la SHTR, Société pour les Réacteurs Nucléaires à Haute Température.

L'avance technique et industrielle de la Gulf Oil Corporation, fondatrice avec Shell de la General Atomic Company, explique la collaboration étroite qui s'est établie, parallèlement, entre les équipes de cette société et celles du CEA. Au début d'octobre 1972, quatre accords étaient ainsi signés, pour une durée de quinze ans, entre le CEA — détenteur de la licence HTR en France — la société américaine Gulf Energy and Environmental System Co (division de la Gulf Oil Corporation) et le GHTR.

Deux de ces accords portent sur la conception d'ensemble des futures centrales, un échange d'informations techniques et un programme commun d'amélioration des réacteurs étant notamment prévus entre la Gulf Oil et le CEA. Ce dernier s'est engagé, par ailleurs, à mettre l'ensemble de ses connaissances à la disposition de l'industrie française.

Le troisième accord, relatif aux composants de la centrale, et passé directement entre la Gulf et le SHTR, prévoit que ce dernier fournira lui-même les éléments pour lesquels il est compétent, les autres équipements devant être réalisés sous licence.

Enfin, le dernier accord, qui prévoyait la création d'une société de fabrication des combustibles, a abouti, en 1973, à la constitution de la CORHAT (Société pour les Combustibles de Réacteurs à Haute Température) formée à concurrence de 70 % par des intérêts français et de 30 % par la Gulf.

Cette société a été chargée, en premier lieu, de prévoir l'offre de combustible pour le futur réacteur commercial dont le GHTR prépare le dossier en liaison avec Technicatome.

LE FINANCEMENT DU PROGRAMME ELECTRO-NUCLEAIRE

La construction des centrales électro-nucléaires — dont chaque tranche de 1 000 MWe représente, dans les conditions actuelles, un investissement de l'ordre de 1,3 milliards de francs⁽¹⁾ — exige un important effort financier reposant essentiellement sur EDF, exploitant responsable de la production d'électricité.

Quelle que soit l'ampleur des investissements à prévoir, le passage à l'électricité nucléaire sera toutefois beaucoup moins onéreux que la phase précédente d'équipement hydro-électrique du pays, qui s'était étendue sur quinze ans.

Par rapport à une usine thermique classique, une installation hydraulique représente, en effet, à service rendu égal, un investissement 3 à 4 fois plus élevé, alors qu'une centrale nucléaire ne coûte que 60 % plus cher.

D'après les études faites, on prévoit que la part d'EDF dans l'investissement national total, qui était de l'ordre de 5 % aux alentours de 1960 (à cause précisément du coût élevé de l'hydraulique), restera constamment inférieure à ce taux, le maximum étant de l'ordre de 3,8 % vers 1980.

Compte-tenu du rythme de développement envisagé pour la réalisation du nouveau programme électro-nucléaire, environ 10 milliards de francs devront pourtant être, en moyenne, investis chaque année.

L'accélération décidée en 1974 entraîne pour EDF une augmentation de 17 % des investissements initialement prévus, la note à payer, pour la période 1974-1980, devant être portée de 69 milliards à 81 milliards de francs.

Le financement de ce programme impose le recours à l'emprunt sur les marchés français et étrangers. C'est ainsi qu'en 1974, outre les dotations en capital de l'état français, son actionnaire unique EDF a réalisé les emprunts extérieurs suivants : 116 millions de francs au début de l'année auprès de la Banque Européenne d'Investissements pour aider au financement de Bugey II ;

(1) Aux conditions économiques de 1974.

100 millions de dollars à 12 ans contractés auprès de la Bank of America, à un taux fixe de 8,80 % ;

500 millions de dollars empruntés en mai 1974 — sous forme d'un crédit roll-over en euro-dollar — auprès de plusieurs banques européennes et américaines.

D'autres emprunts obligataires sur les marchés financiers français et international suivront nécessairement pour assurer, dans les délais requis, la réponse à l'accélération des programmes.

Afin de faciliter le financement des industries concourant à l'effort nucléaire français, de nouvelles structures financières sont d'autre part progressivement mises en place.

Dès 1972 était créée, dans cet esprit, la CIFEN, Compagnie Internationale de Financement de l'Energie Nucléaire, qui réunit notamment, aux côtés d'organismes étrangers, les plus grandes banques françaises, nationales et privées.

Plus récemment et dans le même sens était fondé, sur l'initiative de Lazard Frères, de la BNP et du Crédit Lyonnais, le Groupement pour l'Industrie Nucléaire, GIFATOME, dont Alsthom, la CEM, PUK, Thomson-Brandt et Framatome font notamment partie.

La possibilité d'un appel au marché international des capitaux, dans le cadre des dispositions du traité d'Euratom est enfin étudiée par la Commission de Bruxelles pour faciliter le financement des centrales nucléaires.

LE DEVELOPPEMENT DE LA COOPERATION EUROPEENNE

Les organisations nucléaires européennes

Au cours des deux dernières décennies, plusieurs organisations destinées à jeter les bases du futur développement nucléaire européen ont vu le jour.

Dès 1952, cinq ans après la signature du Traité de Rome, était créé le CERN (Organisation Européenne de Recherche Nucléaire) ayant pour objet de faciliter la réalisation de grands accélérateurs destinés aux expériences dans le domaine de la physique des particules élémentaires.

Onze pays ont participé depuis à la réalisation du Laboratoire II de cet organisme, qui disposera d'un synchrotron souterrain (SPS).

Le CEA participe activement, en liaison avec les autres laboratoires européens, aux diverses expériences poursuivies dans le cadre du CERN.

La mise en commun des efforts de recherche dans le domaine de l'énergie nucléaire est également réalisée au sein d'Euratom, (Communauté Européenne de l'Energie Atomique), institué le 25 mars 1957 par le Traité de Rome. Cette organisation a pour principale mission de contribuer au développement de l'énergie nucléaire dans les états membres. Un centre commun de recherche, dont le siège principal est à Ispra, en Italie, a été créé à cet effet. En mai 1974, le conseil d'Euratom a fondé un comité permanent pour l'enrichissement de l'uranium, qui réunira les éléments nécessaires à l'adoption d'une politique commune d'approvisionnement en uranium enrichi.

Dans un cadre plus large, dépassant celui du Marché Commun, a été créée, en 1957, l'Agence Européenne pour l'Energie Nucléaire (AEEN), devenue le 20 avril 1972 l'Agence de l'OCDE pour l'Energie Nucléaire (AEN) par suite de l'adhésion du Japon comme membre de plein exercice.

L'AEN groupe les dix-huit pays européens membres de l'OCDE, le Japon et l'Australie. Le Canada et les Etats-Unis, y participent en tant que membres associés. La commission des communautés européennes prend part à ses travaux.

Cette organisation, dont le principal objet est de promouvoir les utilisations pacifiques de l'énergie atomique, développe à cet effet son action dans les domaines de la coopération intergouvernementale, de l'harmonisation des pratiques réglementaires, de la définition des normes de sécurité et de l'information nucléaire.

Trois opérations de recherche et de développement, organisées par des pays membres, ont été mises en œuvre sous l'égide de l'OCDE : Eurochemic, pour le traitement des combustibles irradiés et les réacteurs Halden, à eau lourde, et Dragon, à haute température.

En août 1973, le « Groupe d'Etude sur l'Avenir à Long Terme de l'Energie Nucléaire » (NELT), formé dans le cadre de l'AEN, a publié son rapport sur les ressources, la production et la demande d'uranium.

Parallèlement, se développent les contacts entre les principaux producteurs européens d'électricité nucléaire, directement concernés par l'application des programmes électro-nucléaires. Ainsi était fondée, le 1^{er} décembre 1973, l'OPEN (Organisation des Producteurs d'Energie Nucléaire), groupement d'intérêt économique auquel participent, avec EDF, les producteurs de sept pays européens interconnectés. Son but est de faciliter l'approvisionnement en combustible des pays intéressés par la recherche en commun des moyens propres à assurer les meilleurs prix et la sécurité des fournitures.

L'élaboration de règles communes de développement

De son côté, la Commission des Communautés Européennes a formulé, au cours des dernières années, les grandes orientations du développement nucléaire commun des pays membres.

Préparé en 1970 et 1971, le deuxième programme indicatif nucléaire précise les stratégies industrielles à mettre en œuvre pour esquisser l'harmonisation des politiques dans ce domaine, dont les grandes lignes sont les suivantes :

- le décloisonnement des marchés doit permettre de faire jouer la concurrence entre constructeurs d'équipements électro-mécaniques et nucléaires, dont la concentration des entreprises à l'échelle industrielle européenne est souhaitée ;
- la mise en œuvre d'une procédure d'appels d'offres adressés par les producteurs d'électricité à l'ensemble des entreprises de la Communauté est préconisée ;
- l'accent est mis sur le rapprochement nécessaire des normes et des critères de sécurité dont dépend l'octroi des autorisations de construction et d'exploitation des installations nucléaires ;
- enfin, le souci d'un approvisionnement sûr et régulier en combustible, exigeant notamment la mise en œuvre d'une capacité européenne de production d'uranium enrichi, est considéré comme l'une des conditions essentielles du succès des programmes nucléaires de chaque pays membre.



Au lendemain de la dernière guerre mondiale, l'énergie atomique apparaissait à la fois prodigieuse et redoutable. Les décennies suivantes furent marquées par le règne du pétrole, dont les prix, extrêmement attractifs, ont différé l'avènement de l'énergie nucléaire.

Aujourd'hui, la crise énergétique mondiale et les nouvelles données économiques internationales favorisent, dans l'ensemble des pays industrialisés, l'accélération des programmes électro-nucléaires.

Une nouvelle phase s'ouvre ainsi dans l'histoire des techniques et dans celle des hommes. Elle révélera sans aucun doute des risques et des difficultés mais aussi des richesses nouvelles et des éléments de progrès.

ANNEXES

ANNEXE N° 1

DONNEES GENERALES SUR L'ENERGIE NUCLEAIRE

L'ATOME

L'énergie nucléaire est contenue dans le noyau de l'atome, constituant de base de tout corps simple, c'est-à-dire de tout élément ne pouvant être isolé que par voie chimique.

Tous les corps de la nature (air, eau, bois, pierre, métaux, etc) sont composés d'atomes infiniment petits : dans une goutte d'eau, un centième de gramme, il y a respectivement environ 300 milliards de milliards et 600 milliards de milliards d'atomes d'oxygène et d'hydrogène.

L'atome est formé d'un noyau composé de protons (particules ayant une charge d'électricité positive) et de neutrons (particules n'ayant aucune charge électrique), qui ont pratiquement la même masse.

Autour de ce noyau, gravitent des électrons, particules de masse environ 2000 fois moindre que les protons et les neutrons, qui portent une charge d'électricité négative, égale, en valeur absolue, à celle du proton.

Les électrons gravitent autour du noyau à des vitesses prodigieuses, de l'ordre de 7 millions de milliards de révolutions par seconde.

Il y a autant d'électrons dans un atome que de protons dans son noyau : l'atome est donc électriquement neutre.

C'est par l'intermédiaire de leurs électrons que les atomes sont assemblés en molécules.

Les noyaux des atomes diffèrent entre eux par le nombre de protons et de neutrons qu'ils contiennent.

Le nombre des neutrons, qui diffère généralement du nombre des protons, joue un rôle essentiel dans les propriétés nucléaires de l'atome.

ELEMENTS CHIMIQUES ET ISOTOPES

Les propriétés chimiques d'un atome dépendent du nombre et de la disposition des électrons qui gravitent à sa périphérie, donc du nombre de protons contenus dans son noyau : ce nombre est appelé nombre atomique.

Tous les noyaux dont le nombre atomique est supérieur à 83 sont radio-actifs mais de nombreux autres, dont le nombre atomique est inférieur à 83, le sont aussi.

Tous les atomes ayant le même nombre atomique ont les mêmes propriétés chimiques quel que soit le nombre de leurs neutrons et appartiennent donc au même élément chimique.

Il y a 92 éléments chimiques dans la nature. En outre, 13 éléments chimiques — dont le plutonium — ont été créés artificiellement.

Les atomes ayant le même nombre de protons et un nombre différent de neutrons sont appelés isotopes.

Le nombre des neutrons apparaît dans le nombre de masse (total des neutrons et des protons contenus dans le noyau).

Les propriétés physiques et nucléaires des isotopes d'un même élément sont différentes.

Il existe 325 isotopes naturels (toujours présents dans les mêmes proportions dans le même élément) et 1 200 isotopes ont été créés artificiellement.

Les isotopes existent en proportion constante dans chaque corps simple naturel. Ainsi, dans l'uranium naturel, il y a 0,7 % d'U 235 et 99,3 % d'U 238.

FISSION ET FUSION NUCLEAIRES

Les physiciens du XX^e siècle, notamment Einstein, ont démontré que la matière et l'énergie sont deux aspects d'une même réalité. L'apparition de l'énergie nucléaire résulte d'une disparition de matière ou, en d'autres termes, d'une augmentation du « défaut de masse » équivalent, d'après la théorie d'Einstein, à une certaine quantité d'énergie de liaison qui assure la cohésion du noyau. C'est le principe de l'équivalence de la masse et de l'énergie.

Pour libérer l'énergie nucléaire, il faut donc provoquer une transformation tendant à produire des noyaux de masse moyenne, subissant un défaut de masse maximum.

D'où, la conception de 2 types de réactions nucléaires énergétiques :

- la fission, ou rupture d'un noyau lourd (qui comporte un grand nombre de protons et de neutrons, cas de l'U 235, en deux noyaux plus légers) ;
- la fusion, ou agglomération de noyaux légers (deutérium ou tritium par exemple) produisant un noyau plus lourd. Ce phénomène ne peut se réaliser que dans des conditions de températures extrêmement élevées, de l'ordre de 100 millions de degrés. La fusion se produit naturellement dans le soleil et les étoiles, artificiellement dans l'explosion de la bombe à hydrogène.

L'utilisation, à l'échelle industrielle, de l'énergie atomique, s'obtient à partir de la fission nucléaire, rupture d'un noyau lourd, sous l'impact d'un neutron, s'accompagnant d'un dégagement d'énergie dû à la perte de masse. Simultanément, se produit la libération dans l'espace de deux ou trois neutrons, animés d'une vitesse de l'ordre de 20 000 km/s. La quantité d'énergie libérée apparaît sous forme de chaleur.

LA REACTION EN CHAINE

Les neutrons ainsi libérés peuvent provoquer, à leur tour, la fission d'autres noyaux et la libération d'autres neutrons, et ainsi de suite : c'est ce que l'on appelle la réaction en chaîne.

Pour que celle-ci s'établisse, il faut rassembler un volume suffisant de noyaux fissiles, appelé « masse critique », afin que le nombre de neutrons productifs (fission) soit supérieur au nombre de neutrons improductifs (absorption ou évaison).

La bombe atomique est constituée par une masse critique où la réaction en chaîne se propage si rapidement qu'elle conduit à une explosion, dégageant une énergie considérable.

La pile atomique (ou réacteur) est constituée par une masse critique où la réaction en chaîne est contrôlée de façon à obtenir un dégagement d'énergie continu et prédéterminé.

MATIERES FISSILES ET FERTILES

Certains isotopes, tel l'uranium 235, ont des noyaux lourds, peu stables, qui subissent la fission sous l'action des neutrons lents (environ 1 km/s) : ils sont dits « fissiles ».

D'autres isotopes, plus stables, comme l'uranium 238, ne sont fissiles que sous l'action de neutrons rapides, doués d'une grande énergie. Toutefois, ils peuvent capturer des neutrons lents : la capture, dans ces conditions, n'entraîne pas de rupture, mais peut, par une série de transformations, engendrer une nouvelle matière fissile.

Ces isotopes sont dits « fertiles » parce que leur transformation crée de nouvelles matières fissiles.

LA RADIO-ACTIVITE ET LES DIFFERENTS TYPES DE RAYONNEMENTS

Il existe dans la nature un certain nombre d'éléments comme le radium et l'uranium qui s'épuisent lentement en se désintégrant noyau par noyau ; ils donnent alors naissance à d'autres corps qui, à leur tour, peuvent avoir un destin analogue ; ces éléments instables sont les éléments radioactifs naturels.

Depuis la découverte, en 1934, de la radioactivité artificielle par Irène et Frédéric Joliot-Curie, on sait créer de nombreux radioéléments à partir d'atomes stables.

Il en existe actuellement plus de 1 500 dont la plupart sont des radio-isotopes d'éléments naturels.

Le mécanisme de désintégration dit radioactivité est le même pour les éléments radioactifs naturels ou artificiels.

Il se manifeste par l'émission d'énergie sous forme de particules électrisées alpha ou bêta, ou de rayonnements électromagnétiques gamma, analogues à la lumière.

Les rayons alpha, sont des noyaux d'hélium chargés d'électricité positive. Ils sont éjectés à grande vitesse mais il suffit de quelques centimètres d'air pour les stopper complètement.

Les rayons bêta sont constitués par une émission d'électrons positifs ou négatifs. L'énergie de rayonnement est moindre que pour les rayons alpha. Les rayons bêta ne peuvent franchir que quelques mètres dans l'air au maximum.

Les rayons gamma sont, comme les rayons lumineux, de nature électro-magnétique. Mais à la différence des rayons lumineux, ils possèdent un grand pouvoir de pénétration et pour s'en protéger, il faut créer des écrans protecteurs importants. Le béton surtout remplit ce rôle autour des réacteurs et l'eau dans les piscines de stockage des centrales nucléaires.

La radioactivité décroît toujours avec le temps, plus ou moins vite.

La quantité qui est le plus souvent utilisée pour représenter la décroissance d'une substance radioactive est la période ; c'est le temps nécessaire pour que la moitié des atomes de cette substance se désintègre ; ce temps est constant pour un rayonnement donné d'une substance donnée.

Certains radioéléments, comme l'uranium 238, ont des périodes très longues se chiffrant en milliards d'années ; pour d'autres, comme le polonium 215, la période se compte en millièmes de seconde.

Ceux des radioéléments naturels dont la période est inférieure à quelques milliers d'années auraient depuis longtemps disparu de la terre s'ils n'étaient pas produits à partir de radioéléments à vie plus longue.

Les rayonnements nucléaires ne sont pas perçus par les sens de l'homme. Ils ne peuvent être observés que par les effets qu'ils produisent dans le milieu qu'ils traversent. Les compteurs de Geiger Müller, comme la plupart des instruments de détection,

utilisent la propriété qu'ont les rayonnements de faire apparaître des charges électriques dans les gaz (ionisation).

La radioactivité d'un corps est caractérisée par le nombre de désintégrations qui s'y produisent en une seconde. On utilise comme unité de base le curie (1). La quantité d'énergie libérée par les rayonnements par gramme de matière irradiée, la dose absorbée, est mesurée en rad (2).

Toutefois, l'action des divers rayonnements sur les organismes vivants ne peut pas être évaluée en ne tenant compte que de la dose absorbée ; elle dépend aussi de leur nature et de celle des tissus irradiés. On utilise alors une unité d'équivalent de dose qui est le rem ou le millirem (1/1000 rem).

La radioactivité naturelle qui affecte les êtres vivants peut varier considérablement car le rayonnement terrestre et le rayonnement cosmique présentent l'un et l'autre des variations importantes. Il est cependant indispensable de connaître quelques valeurs moyennes et extrêmes dans ce domaine.

En France, la valeur moyenne de l'irradiation naturelle peut être estimée à 125 millirems par an au niveau de la mer. Cette valeur est atteinte de la façon suivante :

| Irradiation externe | | Millirems/an |
|---|--|---------------------|
| Rayonnement cosmique | | 50 |
| Rayonnement terrestre | | 50 |
| Irradiation interne de l'organisme : | | |
| Potassium 40 | | 20 |
| Radium, radon, plomb | | 5 |
| TOTAL | | 125 |

Mais la valeur des doses supplémentaires dues aux rayons cosmiques varie beaucoup en fonction, à la fois de la latitude et de l'altitude, comme le montre le tableau suivant :

| ALTITUDE (m) | DOSE : millirem/an | | |
|------------------------|---------------------------|-----------------|-----------------|
| | Equateur | 30° de latitude | 50° de latitude |
| 0 | 35 | 40 | 50 |
| 1 000 | 60 | 70 | 90 |
| 2 000 | 100 | 130 | 170 |
| 3 000 | 170 | 220 | 300 |
| 5 000 | 400 | 580 | 800 |
| 10 000 | 1 400 | 2 300 | 4 500 |
| 20 000 | 3 500 | 6 000 | 14 000 |

On retiendra de ce tableau que les doses de rayonnement cosmique s'accroissent rapidement avec l'altitude sous toutes les latitudes et pouvant très bien tripler de valeur quand on passe du niveau de la mer à une station de sports d'hiver située en haute montagne.

La nature du sol apporte, en outre, des variations encore plus fortes de la radioactivité naturelle qui peut atteindre des valeurs élevées dans certains terrains granitiques en particulier.

(1) Le curie est égal à 37 milliards de désintégrations par seconde, c'est-à-dire approximativement l'activité de 1 g de radium.

(2) Le rad vaut 100 ergs par gramme de matière irradiée.

Ainsi, dans la Forêt Noire, la radioactivité du sol peut atteindre jusqu'à 1 800 millirems par an.

En Inde, la moyenne est également très élevée. Dans l'Etat du Kerala, elle atteint 1 300 millirems avec des maxima de 2 600 millirems.

Au regard de ces chiffres le rayonnement terrestre moyen en France paraît faible puisque inférieur à 50 millirems. Mais il atteint néanmoins plusieurs centaines de millirems dans les régions granitiques.

Au total, on constate donc que les valeurs extrêmes de l'irradiation naturelle peuvent varier d'environ un à cent entre les diverses régions habitées du globe terrestre et, cependant, on n'a jamais pu déceler les conséquences dangereuses que pourrait avoir pour la santé des populations le fait d'être continuellement exposées à une radioactivité naturelle élevée.

ANNEXE N° 2

LE FONCTIONNEMENT D'UNE CENTRALE NUCLEAIRE ET LES DIFFERENTS TYPES DE REACTEURS (FILIERES)

LE FONCTIONNEMENT D'UNE CENTRALE NUCLEAIRE

Dans une tranche (1) nucléaire, comme dans une unité classique, on transforme l'énergie thermique libérée par un combustible en énergie mécanique, puis électrique. La chaleur produite vaporise de l'eau. La vapeur est ensuite détendue dans une turbine qui entraîne un alternateur produisant de l'énergie électrique. Ce schéma est le même dans une centrale thermique classique. Mais, dans cette dernière, la chaleur provient de la combustion dans la chaudière, avec l'oxygène de l'air, d'un combustible fossile (charbon, fuel-oil, gaz, lignite, etc.) alors que, dans une centrale nucléaire, la chaleur provient de la fission des noyaux d'uranium dans le « réacteur nucléaire ».

Cette chaleur, produite dans le réacteur, est prélevée par le passage, autour du combustible, d'un fluide dit « caloporteur ».

La vapeur qui alimente la turbine peut être produite, soit directement dans le réacteur, soit par l'intermédiaire d'un échangeur.

Dans tous les cas, cette vapeur, après détente dans la turbine, passe dans un condenseur où elle est refroidie au contact de tubes dans lesquels passe l'eau prélevée dans la rivière (2). Le circuit eau-vapeur est ainsi un circuit fermé complètement indépendant de la rivière (2).

La production de vapeur, à partir de l'énergie nucléaire, est assurée par un ensemble d'appareils que l'on appelle la « chaudière nucléaire » et qui comporte, outre le réacteur lui-même, le circuit de transmission de la chaleur (échangeurs, tuyauteries).

Le réacteur comporte :

- une partie active que l'on appelle le « cœur » et qui comprend essentiellement le combustible, le modérateur et le fluide caloporteur
- un dispositif de réglage et de sécurité,
- une enveloppe résistant à la pression dans laquelle ce matériel est installé.

Le cœur d'un réacteur est comparable au foyer d'une chaudière, c'est-à-dire qu'il assure la production de la chaleur.

Il est d'usage de définir les différents types de réacteurs par les trois principaux éléments qui caractérisent le cœur :

- le combustible,
- le modérateur,
- le fluide caloporteur.

Le combustible le plus fréquemment utilisé dans les centrales nucléaires est l'uranium. Il peut être employé soit sous sa forme naturelle qui contient 0,7 %

(1) On appelle tranche l'ensemble constitué par une chaudière, une turbine et un alternateur. Une centrale comprend une ou plusieurs tranches.

(2) Ou la mer, dans le cas d'une centrale littorale.

d'uranium 235 et 99,3 d'uranium 238, soit une forme créée artificiellement : l'uranium enrichi, dans laquelle on a augmenté la proportion de l'isotope fissile (uranium 235) (1).

Les *modérateurs* les plus employés sont : le graphite, l'eau ordinaire ou l'eau lourde. Ils sont nécessaires pour ralentir les neutrons et réunir les conditions d'une réaction en chaîne régulière.

La chaleur libérée au sein du combustible par la fission nucléaire et qui sert à produire la vapeur, est évacuée hors du cœur du réacteur par un fluide caloporteur, gaz ou liquide, mis en mouvement par une soufflante ou une pompe.

Le fluide caloporteur doit :

- être suffisamment stable chimiquement en présence des réactions nucléaires,
- capturer le moins possible les neutrons,
- avoir une capacité et une conductivité calorifiques élevées,
- ne corroder ni la gaine du combustible ni les autres constituants du réacteur.

Le fluide caloporteur peut être :

- du gaz carbonique dans le cas des réacteurs à uranium naturel,
- de l'eau dans le cas des réacteurs à uranium enrichi-eau ordinaire,
- du sodium dans le cas des réacteurs surrégénérateurs,
- de l'hélium, de l'eau lourde, des liquides organiques, pour d'autres types de réacteurs.

LES PRINCIPAUX TYPES DE REACTEURS (FILIERES)

Les réacteurs de production fournissent à la fois de l'énergie et du plutonium. On classe également dans cette catégorie les réacteurs destinés à la production, par irradiation du lithium, du tritium servant à l'étude des réactions de fusion.

Réacteurs à uranium naturel modérés au graphite et refroidis au gaz carbonique sous pression

Les réacteurs de ce type doivent être de grande taille car l'uranium naturel (0,7 % d'U 235) fournit relativement peu de neutrons et il faut que le nombre de neutrons perdus à la surface du cœur soit suffisamment faible par rapport au nombre de neutrons produits dans la masse. Le coût de la construction est donc assez élevé, mais leur combustible est le moins onéreux. La puissance thermique se situe entre 1 500 et 2 000 Mégawatts, la puissance électrique de la centrale associée entre 400 et 600 Mégawatts (2).

La pression du gaz est de l'ordre de 25 kg/cm². La température à la sortie du réacteur est de l'ordre de 400°.

Réacteurs à uranium enrichi, modérés et refroidis à l'eau ordinaire

Le combustible enrichi en uranium 2.35 (2 à 4 % au lieu de 0,7 %) fournissant beaucoup plus de neutrons que l'uranium naturel, ces réacteurs sont plus petits que les précédents.

L'eau ordinaire peut suffire comme modérateur malgré son pouvoir de capture relativement élevé puisque l'on dispose de beaucoup de neutrons et elle peut aussi être utilisée comme fluide caloporteur, soit sous pression, soit bouillante.

(1) Cette proportion est d'environ 2 à 4 % dans les réacteurs à eau ordinaire qui sont les réacteurs les plus couramment employés.

(2) 1 Mégawatt : 1 000 kilowatts.

On atteint des températures de l'ordre de 300° avec des pressions de l'ordre de 130 à 150 kg/cm² pour les réacteurs pressurisés (PWR), 70 kg/cm² pour les réacteurs bouillants (BWR). La puissance thermique est pour l'instant de l'ordre de 3 000 MW, la puissance électrique de 1 000 MW.

En raison de leur petite taille, ce sont des réacteurs à uranium enrichi que l'on utilise pour la propulsion des navires.

Réacteurs surrégénérateurs à neutrons rapides

Dans ces réacteurs, pas de modérateur, mais un cœur de petite dimension. Le combustible est du plutonium et de l'uranium enrichi. Pour entretenir la réaction, il n'est donc pas nécessaire de ralentir les neutrons, très abondants au sein d'une masse de noyaux presque tous fissiles.

Autour de ce cœur, des éléments d'uranium appauvri (1) sont disposés « en couverture ». Les neutrons émis par le cœur y sont capturés par les noyaux d'uranium 238 qui se transforment en plutonium. Le surrégénérateur fournit donc, en même temps que de l'énergie, plus de combustible qu'il n'en consomme.

Pour extraire le maximum de la puissance thermique dégagée dont la densité est très élevée, de l'ordre de 1 Mégawatt par litre de cœur, on a recours à un fluide caloporteur ayant de bonnes qualités neutroniques et thermiques, et qui n'a pas besoin d'être pressurisé : le sodium fondu.

Le rendement d'une centrale à neutrons rapides est élevé, de l'ordre de 40 %. De plus, elle permet de tirer beaucoup plus d'énergie de l'uranium que les autres types de centrales.

Réacteurs à haute température

Ce type de réacteur, développé récemment, est modéré au graphite et refroidi à l'hélium. Il utilise un combustible constitué par des particules d'uranium enrichi et de thorium, enrobées de pyrocarbone, qui résiste à des températures beaucoup plus élevées que les combustibles métalliques et peut rester longtemps en pile. On obtient des densités de puissance thermique très fortes, un bon rendement, de l'ordre de 40 %, et une bonne utilisation de l'uranium.

Les températures atteintes, de l'ordre de 900°, permettront d'utiliser ces réacteurs comme sources de chaleur industrielles pour des installations sidérurgiques et pour des usines chimiques, pour la production d'hydrogène par exemple.

On envisage, en outre, de se passer de la phase vapeur pour produire de l'électricité, en envoyant directement l'hélium dans des turbines à gaz.

Enfin, le thorium 232 se transforme en uranium 233 qui peut être utilisé comme combustible. Mais le cycle Th 232/U 233 est actuellement moins bien connu que le cycle uranium/plutonium.

Réacteurs à eau lourde

L'eau lourde est le meilleur des modérateurs : le graphite capture davantage de neutrons et les ralentit moins vite, l'eau légère les ralentit plus vite mais elle en capture beaucoup plus. Par contre, le prix de revient de l'eau lourde est très élevé.

On a développé plusieurs variantes. Si l'on veut utiliser l'uranium naturel, l'eau lourde est à la fois modérateur et caloporteur ; si l'on utilise l'uranium enrichi, elle est simplement modérateur, le transport de la chaleur étant assuré par un réfrigérant moins perméable aux neutrons mais moins onéreux. Ce peut être le gaz carbonique, l'eau légère bouillante, ou encore un liquide organique.

(1) Uranium appauvri en isotope 235 provenant des usines où l'on extrait le plutonium des combustibles ayant été utilisés dans les réacteurs ou des usines de séparation isotopique de l'uranium.

Réacteurs à sels fondus

Ce sont des réacteurs à combustibles fluides (par opposition aux combustibles solides à oxydes ou alliages métalliques gainés) qui sont encore au stade expérimental.

Les combustibles liquides, notamment les fluorures d'uranium - thorium, sont stables, inaltérables aux rayonnements et d'excellente qualité. Le circuit primaire du réacteur doit être fabriqué en un matériau résistant à l'attaque des fluorures fondus et aux effets des rayonnements.

Les réacteurs à fluorures fondus sont des réacteurs à neutrons lents.

Ils peuvent fonctionner en surrégénérateur si on les charge avec un mélange d'uranium 233 et de Thorium et si on utilise un modérateur peu homogène, avec beaucoup plus de graphite au centre qu'à la périphérie.

REPARTITION DES FILIERES DANS LE MONDE

Répartition de la production nucléaire par filière dans le monde (EN Twh) (1)

| FILIERES | en 1973 | cumulée au 31.12.73 |
|--------------|---------|------------------------|
| P.W.R. | 62 | 197 |
| B.W.R. | 60 | 182 |
| Gaz-Graphite | 44 | 330 |
| Eau lourde | 17 | 37 |
| Divers | 5 | 30 |

(Source : Nucleonics Week et EDF)

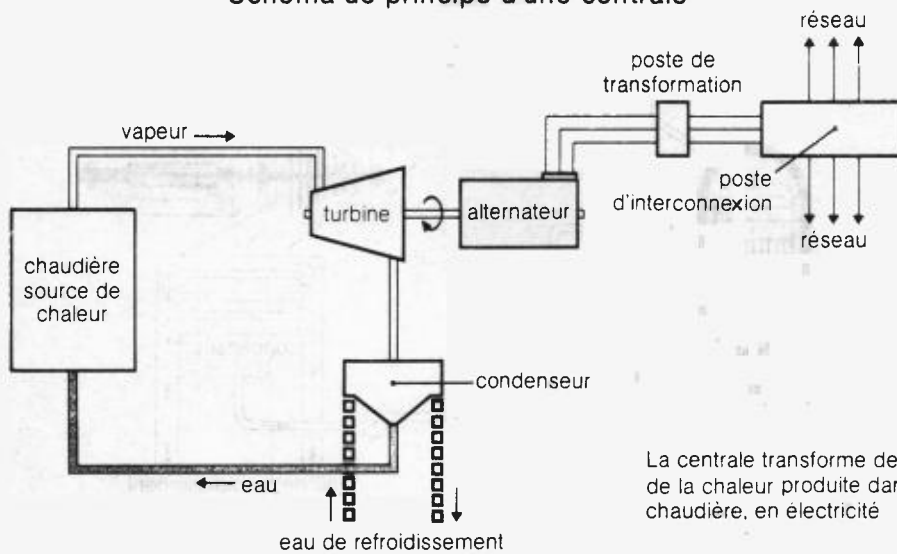
(1) 1 Tera-watt-heure étant équivalent à 1 milliard de kilowatts-heure.

REPARTITION DES FILIERES DANS LE MONDE

Répartition par filières des puissances installées
nettes dans le monde au 30/04/1974 (MWe)

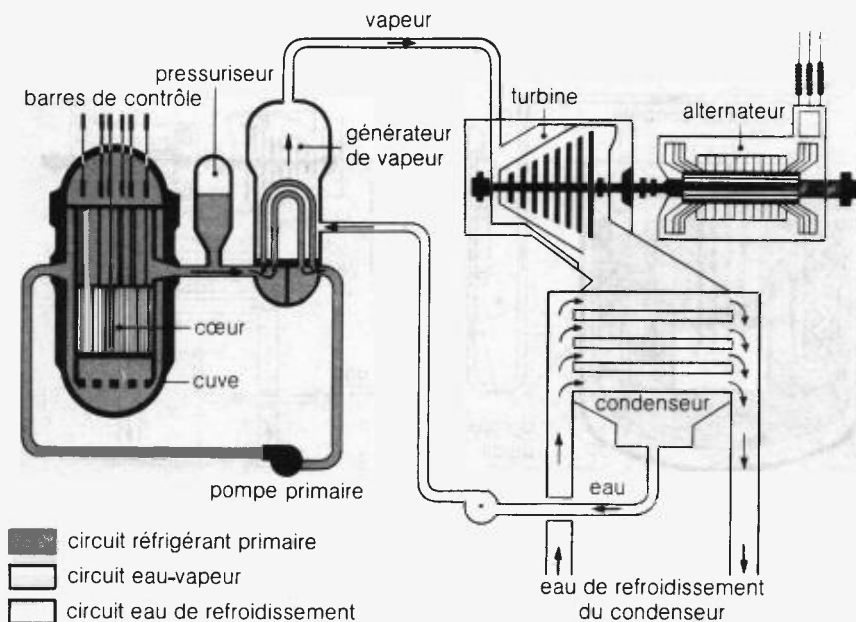
| | PWR | BWR | Graphite gaz | Eau lourde | HTR | Surré- généra- teur | Divers | Total |
|--------------------------------------|---------------|---------------|-----------------|---------------|------------|---------------------------|--------------|---------------|
| République Démocrat. Allemande | 480 | | | | | | | 480 |
| République Fédérale Allemande | 958 | 1 170 | | 151 | 13 | 18 | | 2 310 |
| Argentine | | | | 319 | | | | 10 |
| Belgique | 10 | | | | | | | 2 534 |
| Canada | | | | 2 534 | | | | 2 534 |
| Etats-Unis | 13 658 | 10 719 | | | 370 | 17 | 784 | 25 548 |
| Espagne | 153 | 440 | 480 | | | | | 1 073 |
| France | 283 | | 2 295 | 70 | | 233 | | 2 881 |
| Inde | | 380 | | 200 | | | | 580 |
| Italie | 242 | 150 | 200 | | | | | 592 |
| Japon | 1 571 | 1 990 | 154 | | | | | 3 715 |
| Pakistan | | | | 125 | | | | 125 |
| Pays-Bas | 450 | 52 | | | | | | 502 |
| Royaume- Uni | | | 5 290 | 92 | | 268 | | 5 650 |
| Suède | | 1 770 | | 10 | | | | 1 780 |
| Suisse | 700 | 306 | | | | | | 1 006 |
| Tchécos- lovaquie | | | | 110 | | | | 110 |
| U.R.S.S. | 1 835 | 50 | | | | 162 | 1 396 | 3 443 |
| Total | 20 340 | 17 027 | 8 419 | 3 611 | 383 | 698 | 2 180 | 52 658 |

Schéma de principe d'une centrale

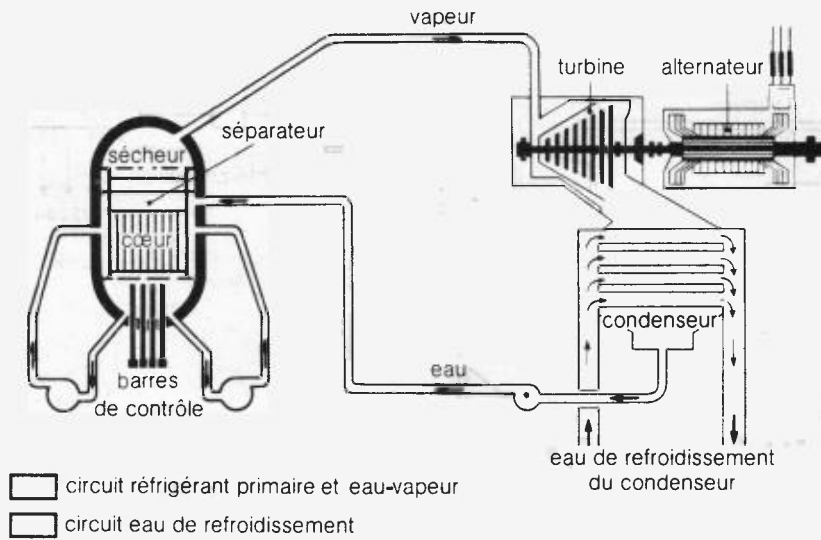


La centrale transforme de 30 à 45% de la chaleur produite dans la chaudière, en électricité

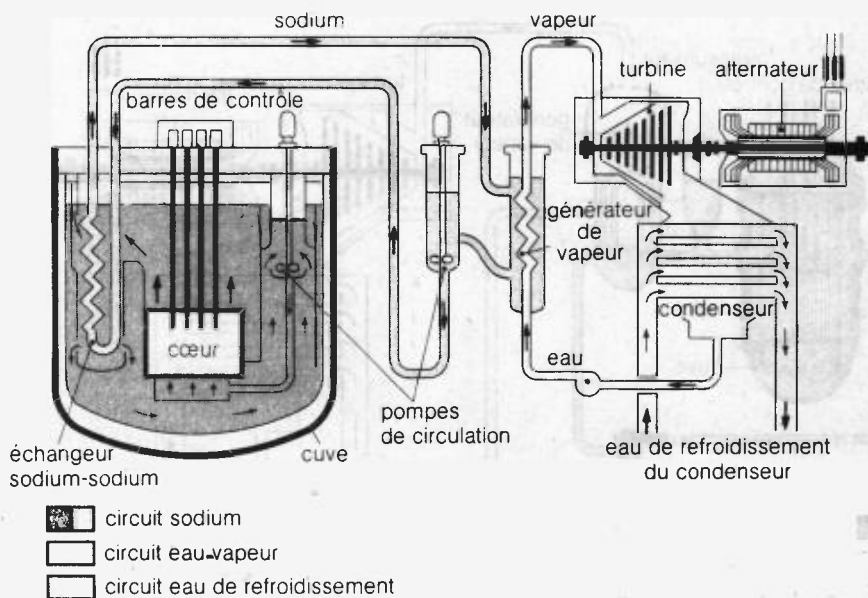
Tranche type PWR (eau pressurisée)



Tranche type BWR (eau bouillante)



Tranche type "RAPIDE"



ANNEXE N° 3

L'URANIUM

L'URANIUM NATUREL

Les ressources mondiales d'uranium naturel actuellement recensées, la production et les capacités de traitement du minerai des divers pays pendant ces dernières années sont indiquées dans les tableaux ci-après.

LES PRINCIPALES TECHNIQUES D'ENRICHISSEMENT DE L'URANIUM

Enrichir l'uranium naturel, c'est modifier le pourcentage de ses deux principaux composants : l'uranium 235 et l'uranium 238. L'uranium naturel ne contient que 0,7 % d'uranium 235 (matière fissile) et l'opération d'enrichissement consiste à élever le taux aux environs de 2,5 % à 3,5 % pour obtenir le combustible destiné aux centrales à eau légère. Pour faire le tri entre les atomes d'uranium 238 et ceux d'uranium 235, il faut porter en général le métal à l'état de composé non solide, sous forme d'hexafluorure.

La séparation isotopique de l'uranium peut s'obtenir par le déclenchement de nombreux processus physiques ou chimiques.

Dans le cadre du Manhattan Project, les Américains avaient étudié l'ultracentrifugation et mis en œuvre, au cours de la dernière guerre, des procédés aussi divers que la séparation électromagnétique, la diffusion thermique ou la diffusion gazeuse.

Depuis cette époque, de nombreux laboratoires se sont penchés sur les applications éventuelles d'autres méthodes, telles que le procédé par tuyères, les échanges chimiques ou ioniques, la chromatographie gazeuse ou liquide, et, plus récemment, le procédé par laser.

La seule méthode aujourd'hui largement utilisée à l'échelle industrielle est celle de la diffusion gazeuse. La technique de l'ultracentrifugation fait l'objet de programmes de développement notamment aux Etats-Unis, en Europe et au Japon, visant à permettre son utilisation dans des conditions compétitives.

La diffusion gazeuse

Ce procédé consiste à comprimer de l'hexafluorure d'uranium gazeux pour l'obliger à diffuser à travers une paroi poreuse, appelée « barrière », dont les pores ont un diamètre inférieur à 400/1000 de millimètre.

Dans ces conditions, l'hexafluorure d'uranium 235, plus léger, diffuse un peu plus vite que celui d'uranium 238 ; l'enrichissement, à chaque passage, est de l'ordre de 2 pour 1 000 seulement, de sorte qu'il est nécessaire de disposer d'un grand nombre d'appareils en cascade : plusieurs milliers pour arriver à une concentration de l'ordre de 90 % (cas de l'usine « très haute » de Pierrelatte).

L'uranium s'enrichit en aval de la barrière, tandis qu'il s'appauvrit en amont. Pour atteindre le taux d'enrichissement voulu, il faut faire franchir à l'hexafluorure un nombre suffisant de barrières.

Une usine de diffusion gazeuse comporte une succession d'« étages » comprenant chacun un diffuseur doté de barrières, un compresseur qui communique au gaz la pression recherchée et un échangeur de chaleur qui le maintient à la température voulue.

Chaque diffuseur est relié à celui qui se trouve en aval vers lequel est dirigé le flux de l'uranium venant d'être enrichi. Il est également relié au diffuseur en amont, vers lequel est orienté le flux de l'uranium venant d'être appauvri. Cette succession de diffuseurs porte le nom de cascade.

L'ultracentrifugation

Ce procédé repose sur l'utilisation d'un champ de gravitation intense, obtenu dans un récipient tournant à grande vitesse où se produit la séparation des atomes d'uranium 238, plus lourds, qui auront donc tendance à s'amasser au voisinage de la paroi et des atomes d'uranium 235, plus légers, qui vont donc se rassembler vers le centre. C'est le principe de l'essoreuse ou de l'écrémeuse.

Afin de limiter les pertes par frottement, le récipient tourne à l'intérieur d'une enceinte sous vide et est couplé directement au moteur.

ANNEXE N° 4

EVOLUTION DU BILAN DE L'ENERGIE PRIMAIRE EN FRANCE

Evolution de la consommation d'énergie primaire (en millions de tec)

| | 1955 | 1960 | 1965 | 1970 | 1973 |
|-------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Charbon | 70,6 | 70,2 | 68,5 | 57,1 | 45,3 |
| Pétrole | 28,1 | 40,3 | 74,6 | 131,1 | 174,3 |
| Gaz naturel | 0,5 | 4,5 | 7,9 | 14,6 | 22,5 |
| Electricité primaire | 8,5 | 13,4 | 16,1 | 20,4 | 20,4 |
| TOTAL | 107,7 | 128,4 | 167,1 | 223,2 | 262,5 |

Evolution de la production française d'énergie primaire (en millions de tec)

| | 1955 | 1960 | 1965 | 1970 | 1973 |
|-------------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| Charbon | 57,4 | 58,3 | 54,5 | 40,6 | 31 |
| Pétrole | 1,2 | 2,8 | 4,2 | 3,2 | 2,8 |
| Gaz naturel | 0,4 | 4,5 | 7,8 | 10,6 | 10 |
| Electricité primaire | 8,5 | 13,5 | 15,7 | 20,5 | 19,4 |
| TOTAL | 67,5 | 79,1 | 82,2 | 74,9 | 63,2 |

**Prévisions d'évolution de la structure des consommations
d'énergie primaire**

comparaison entre la France et le monde (en % du total)

| | 1970 | | 1985 | |
|-------------------------------------|-------|------------------|-------|--------|
| | Monde | France | Monde | France |
| Combustibles Minéraux Solides | 32,6 | 25,5 | 22,5 | 7,6 |
| Gaz naturel | 19,4 | 6,5 | 16,8 | 13,9 |
| Pétrole | 42,6 | 58,7 | 45,2 | 48,4 |
| Hydraulique | 5,4 | 8,5 | 4,9 | 5,3 |
| Nucléaire | | ($\simeq 0,8$) | 10,6 | 24,8 |
| TOTAL | 100 | 100 | 100 | 100 |

Evolution prévue de la part du nucléaire en France (en %)

| | 1970 | 1985 |
|-------------------------------|------|------|
| Part de l'électricité/Energie | 21,0 | 35,4 |
| Part du nucléaire/Electricité | 3,6 | 70,2 |
| Part du nucléaire/Energie | 0,8 | 24,8 |

LEXIQUE

Accélérateur

Dispositif permettant d'obtenir des flux intenses de particules chargées de grande énergie (électrons, protons, etc...) par utilisation de champs électriques, magnétiques ou électromagnétiques.

Actif

Radioactif: doué de radioactivité (voir radioactivité).

Activation

Action tendant à rendre une substance radioactive.

Atome

Le plus petit élément (corps simple) présentant un caractère chimique déterminé.

Barre de contrôle (ou de commande)

Barre dont le déplacement au sein d'un réacteur permet de régler la puissance fournie. La matière des barres (acier au bore, cadmium), absorbe facilement les neutrons.

Barre de sécurité

Barre de contrôle à déclenchement automatique interrompant les réactions en chaîne lors d'un incident survenant dans un réacteur.

Bombe au cobalt

Appareil de radiothérapie utilisant les rayons gamma du radiocobalt 60 (énergie 1,33 Me V). La méthode de traitement est dite télécuriethérapie ou téléthérapie.

Breeder - (Breeding) ou réacteur surrégénérateur appelé quelquefois pile couveuse

Réacteur dans lequel le nombre de noyaux fissiles produits est supérieur au nombre de noyaux consommés.

Cartouche de combustible

Ensemble constitué par un ou plusieurs barreaux de combustible nucléaire et leur gaine.

Chambre d'ionisation

Enceinte constituée par un cylindre (cathode), concentrique à une anode et dans laquelle se trouve un gaz. Les deux électrodes sont portées à une tension de l'ordre de 100 volts. Une particule ionisante traversant le cylindre donne un courant ionique dans la chambre qui devient détecteur qualitatif et quantitatif. L'enregistrement peut se faire après amplification.

Charges (de réacteur nucléaire)

Quantité de combustible nucléaire contenu dans une pile.

Château de plomb

Structure permettant la protection contre les émissions de radioactivité.

Cœur

Partie active d'un réacteur.

Combustible

Matière fissile utilisée dans un réacteur. Le combustible peut être pur (U 233, U 235, Pu 239), fissile seulement en partie (uranium naturel) ou être composé (uranium enrichi). Il peut se présenter sous forme solide, semi-fluide ou liquide.

Compteur de Geiger (ou Geiger-Muller)

Analogue à la « chambre d'ionisation », le compteur de Geiger est soumis à une tension de l'ordre de 400 à 1 500 volts. Il se forme le long de l'anode une couche ionique uniforme et la quantité d'énergie libérée ne dépend que des caractéristiques électriques et géométriques du compteur, et non de la particule incidente et de son énergie. On dit souvent « tube Geiger » ou « tube GM ».

Contamination (radioactive)

Présence indésirable d'une substance radioactive.

Désintégration radioactive

Modification subie par un noyau avec émission de particules.

Deutérium (D)

Isotope de l'hydrogène de nombre de masse 2.

Diffusion gazeuse

Méthode de séparation des isotopes.

Eau lourde (D₂O)

Eau dans laquelle les atomes à hydrogène sont remplacés par des atomes de deutérium. Agent modérateur dans les piles atomiques.

Effluent

Gaz, aérosol, ou liquide produit lors de l'exploitation d'une installation et dont il faut contrôler l'épandage à l'extérieur.

Enrichissement

Processus par lequel la proportion d'un isotope déterminé est augmenté dans son élément.

Fertile

Qualifie une substance qui, après réaction de capture neutronique, donne une substance fissile.

Fissile

Susceptible de subir la fission.

Fission

Rupture d'un noyau avec libération d'énergie et de particules.

Fissions en chaîne

Fissions produisant des particules de même nature que celles qui les provoquent et qui engendrent de nouvelles fissions.

Fusion

Union de deux noyaux avec libération d'énergie et de particules.

Gaine

Revêtement d'un combustible nucléaire formant enveloppe étanche.

Gaz rares

Gaz sans aucune affinité chimique, ne donnant aucun composé. Les gaz rares sont l'argon, l'hélium, le krypton, le néon, le xénon.

Ion

Atome ou molécule possédant une charge électrique non nulle.

Ionisation

Phénomène par lequel un ou plusieurs électrons sont émis (ou absorbés) par un atome ou une molécule, lesquels sont alors transformés en ions.

Irradiation

Action de soumettre un objet, ou un organisme vivant, à un flux de photons ou de particules.

Isotope

Élément dont les atomes possèdent le même nombre d'électrons et de photons, mais un nombre différent de neutrons ; ils ont les mêmes propriétés chimiques, mais des propriétés physiques légèrement différentes.

Masse atomique

Masse relative d'un atome, l'unité étant par définition, le 1/16 de celle de l'oxygène. On a ainsi comme masses atomiques : hydrogène 1,0081, oxygène 16,000, uranium 238,07, etc...

Masse critique

Masse de combustible nucléaire nécessaire pour qu'une réaction en chaîne puisse s'amorcer.

Modérateur ou ralentisseur

Substance qui freine les neutrons dans un réacteur nucléaire.

Molécule

Groupe d'atomes ayant un caractère chimique propre et dont la cohésion est assurée par liaison électronique. Deux atomes se réuniront pour former des molécules quand il manquera des électrons à la couche extérieure de l'un deux.

Mutation

Modification dans l'ordre ou la structure des gènes ou des chromosomes ; elle peut être spontanée, ou induite par des rayonnements ou des substances chimiques.

Neutron

Particule fondamentale neutre facilement absorbée par les noyaux. Nombre de masse $A = 1$.

Nombre atomique Z

Numéro d'ordre dans la classification périodique des éléments. Z est égal au nombre de protons et au nombre d'électrons.

Nombre de masse A

Nombre de nucléons (neutron et proton) contenu dans un noyau.

Noyau

Partie centrale d'un atome, siège des phénomènes de radioactivité, constituées d'un ou plusieurs nucléons (neutrons et protons). La stabilité du noyau dépend du rapport neutrons/protons.

Nucléon

Particule fondamentale d'un noyau, proton ou neutron. Le nombre de masse A est égal au nombre de nucléons.

Nuclide

Atome défini par son nombre de masse A, son nombre atomique Z et son état énergétique. On dit aussi nucléide. Un nucléide radioactif est un radionucléide, terme préféré de plus en plus à celui de radioisotope.

Période biologique

Temps nécessaire pour qu'un organisme vivant ait éliminé par voie naturelle la moitié d'une quantité absorbée d'un radioélément. La « période biologique effective » tient compte de la période de radioactivité.

Période radioactive

Temps nécessaire pour que la moitié des atomes d'un radioisotope se soient désintégrés.

Photon

Quantum de rayonnement électromagnétique.

Pile atomique

Synonyme de réacteur nucléaire.

Plutonium

Elément de nombre atomique $Z = 94$. Le plutonium 239, isotope fissile, est obtenu dans les réacteurs nucléaires à partir de l'uranium 238 ; il est utilisé comme combustible dans les réacteurs surrégénérateurs. Sa manipulation exige de strictes précautions, car c'est un émetteur de rayonnement alpha, presque aussi dangereux que le radium.

Produits de fission

Ou résidus de fission. Fragments résultant d'une fission. Certains de ces nuclides sont radioactifs.

Proportion isotopique

Pourcentage d'un isotope déterminé dans un corps simple. Exemple : l'uranium naturel contient 0,7 % d'uranium 235 et 99,3 % d'uranium 238.

Protection biologique

Protection des êtres vivants contre les effets des rayonnements et des particules.

Proton

Particule fondamentale à charge positive. Le proton est un noyau d'hydrogène. Nombre de masse $A = 1$. Charge égale à celle de l'électron.

Radiations ionisantes

(voir rayonnement ionisant).

Radioactivité

Emission spontanée de particules ou de photons par un noyau. Plus généralement, émission d'un rayonnement accompagnée de la désintégration de l'élément qui rayonne. Radioactivité désigne le phénomène, activité désigne la grandeur.

Radioactivité artificielle

Radioactivité provoquée sur des noyaux stables ; ceux-ci sont transformés en noyaux instables par bombardement avec des particules ou des photons dans les accélérateurs ou les réacteurs par exemple.

Radioactivité naturelle

S'observe sur tous les corps lourds à partir du polonium 210.

Radioactivité résiduelle

Radioactivité mesurée après un temps déterminé ou après décontamination.

Radiobiologie

Science étudiant l'action des radiations sur les êtres vivants.

Radioélément

Toute substance radioactive. S'applique surtout aux radioisotopes artificiels.

Radioélément naturel

Radioélément se détruisant assez lentement pour avoir subsisté depuis la formation de la croûte terrestre ou radioélément produit par le rayonnement cosmique.

Radiographie

Enregistrement photographique de la structure interne d'un corps traversé par des rayons X. En cas d'emploi de rayons gamma, on a de la gammagraphie.

Radioisotope

Isotope (voir ce mot) radioactif. Les radio-isotopes sont utilisés de plus en plus dans toutes les branches de l'activité : recherche, médecine, industrie, agriculture, stérilisation, conservation.

Radionuclide

Nuclide (voir ce mot) radioactif.

Rayonnement

Processus de transmission d'énergie sous forme corpusculaire (particules) ou électromagnétique.

Rayonnement (ou rayons) alpha

Rayonnement composé de particules alpha, c'est à dire de noyaux d'hélium 4 ; il est très peu pénétrant mais très ionisant.

Rayonnement (ou rayons) bêta

Rayonnement composé de particules bêta, c'est à dire d'électrons de charge négative ou positive ; il est un peu plus pénétrant que le rayonnement alpha mais moins ionisant.

Rayonnement (ou rayons) cosmique

Rayonnement composé de particules de grande énergie, d'origine extra-terrestre ; pénétrant et ionisant, il irradie l'atmosphère en permanence avec une intensité d'autant plus forte que l'altitude est élevée.

Rayonnement électromagnétique

Rayonnement caractérisé par des variations des champs électrique et magnétique. Exemples (par ordre de longueur d'onde décroissante) : les ondes hertziennes (ou radioélectriques), les rayons infrarouges, la lumière visible, les rayons ultraviolets, les rayons X, les rayons gamma.

Rayonnement (ou rayons) gamma

Rayonnement électromagnétique très pénétrant mais peu ionisant.

Rayonnement ionisant

Rayonnement électromagnétique ou corpusculaire (particules) capable de produire directement ou indirectement des ions (atomes ou molécules de charge électrique non nulle) lors de son passage à travers la matière.

Rayonnement (ou rayons) X

Rayonnement électromagnétique pénétrant mais peu ionisant.

Réacteur nucléaire

Ensemble des dispositifs permettant d'amorcer et d'entretenir une réaction en chaîne. Le cœur est un assemblage de barreaux de combustible. Les barreaux sont entourés d'un modérateur ou ralentisseur de neutrons. L'ensemble est logé dans une cuve recouverte intérieurement d'un réflecteur. La cuve est prolongée par un bouclier, blindage d'acier suivi d'un mur de béton de plusieurs mètres. Un fluide refroidisseur extrait la forte énergie thermique dégagée.

Réacteur plutonigène

Réacteur destiné à fournir du plutonium.

Réacteur surrégénérateur - Voir Breeder.**Réaction en chaîne**

Réaction chimique ou nucléaire dont un des produits est susceptible d'engendrer une ou plusieurs réactions semblables. Elle aboutit plus ou moins rapidement à une explosion si elle n'est pas arrêtée à un certain niveau, soit naturellement, soit par intervention humaine. Dans la réaction nucléaire en chaîne, le nombre de neutrons de fission est égal ou supérieur à celui des neutrons primaires.

Réflecteur

Revêtement intérieur de la cuve d'un réacteur, diffusant vers le cœur les neutrons qui auraient pu s'en échapper.

Refroidisseur

Agent réfrigérant traversant un réacteur et passant par un échangeur thermique. On utilise comme refroidisseurs : le gaz carbonique, l'hélium, l'eau naturelle, l'eau lourde, les métaux à bas point de fusion, liquéfiés : le sodium, l'alliage sodium-potassium, etc...

Rupture de gaine

Apparition d'un défaut d'homogénéité dans la gaine.

Uranium enrichi

Uranium dont on a augmenté la teneur en isotope 235 fissile afin d'améliorer l'efficacité de la réaction en chaîne.
en chaîne.

Radionuclide

Nuclide (voir ce mot) radioactif.

BIBLIOGRAPHIE

DOCUMENTS, OUVRAGES ET ARTICLES DE SYNTHESE (1)

- Notes et Etudes Documentaires, 19 décembre 1965 : « Le développement nucléaire français depuis 1945 ».
- Problèmes Economiques, 20 mars 1969 : « Les données du problème français de l'énergie dans le cadre de la C.E.E. ».
- Cahiers Français, oct.-nov.-déc. 1969 : « L'énergie nucléaire ».
- Problèmes Economiques, 8 octobre 1970 : « Les principales options du VI^e Plan pour le secteur de l'énergie ».
- Notes et Etudes Documentaires, 1^{er} décembre 1972 : « Le Commissariat à l'Energie Atomique face à l'avenir ».
- Rapport de la Commission consultative pour la production d'électricité d'origine nucléaire (Commission PEON) et annexes à ce rapport : avril 1973.
- S.N.P., C.E.A., C.F.D.T. : « L'électronucléaire en France, situation actuelle, problèmes pour l'avenir », mars 1974.
- Extraits des déclarations de Monsieur Marcel Boiteux, Directeur Général d'E.D.F. devant la Commission temporaire de l'Energie du Conseil Economique et Social : 20 mars 1974.
- Revue « Arts et Métiers », avril 1974 : « L'énergie nucléaire », par André Ertaud, Directeur technique, GAAA.
- Avis et Rapports du Conseil Economique et social, J.O. du 24 septembre 1974 : « Les problèmes de l'énergie en France à moyen et à long terme ».
- Compte-rendu des rapports techniques de la IX^e Conférence Mondiale de l'Energie, Détroit, 22-27 septembre 1974. « Les défis posés à l'économie et à l'environnement par les futurs besoins en énergie ».
- La Documentation française : « Regards sur l'actualité », n° 4, 15 octobre 1974 : « Le pari nucléaire français ».
- Professeur Mollo Mollo (Professeur Lebreton) : « L'énergie, c'est vous ». Stock - 4^e trimestre 1974.
- Rapport de la Commission d'enquête parlementaire sur la situation de l'énergie en France, par M. Claude Coulais, député, 5 novembre 1974.
- Dossier « Energie nucléaire » : Presse environnement n° 128 - Janvier 1975.
- Enquête sur les ressources énergétiques mondiales (1974). Comité français de la Conférence mondiale de l'Energie.
- Enquête sur les ressources énergétiques mondiales (1974). Comité Français de la Conférence Mondiale de l'Energie.

LES PROGRAMMES NUCLEAIRES ETRANGERS

- Revue Française de l'Energie, n°s 239, février 1972 - 241, avril 1972 - 243 juin 1972 - 245, septembre 1972, - 248, décembre 1972.
- Japan Atomic Industrial Forum Inc., 1973 : « Nuclear power plants and the environment in Japan ».

(1) Cette bibliographie ne saurait évidemment être complète et se limite aux principaux ouvrages et articles publiés récemment sur le sujet.

- Japan Atomic Industrial Forum Inc., 1973 : « The joint role of proven, advanced and fast reactors in Japan ».
- Survey of Canada June 1974 : « The CANDU - PHW programme » by Dr. J.L. Gray, President Atomic Energy of Canada Limited.
- Survey of Canada, June 1974 : « Canada's role in world developments of nuclear energy », by the Honourable Donald S. Macdonald, Minister of Energy, Mines and Resources, Government of Canada.
- « Nuclear Reactor Systems for electricity generation », Department of Energy, London.
- Budget 1975 du Ministère fédéral allemand de la Recherche et de la Technologie.

L'ÉNERGIE

- Revue Française de l'Énergie, n° 241, avril 1972 : « Schistes bitumineux et sables asphaltiques », par Gilles Soviche.
- Revue Française de l'Énergie, n° 247, novembre 1972 « Les progrès nécessaires de la politique énergétique communautaire ».
- Ministère de l'Industrie, du Commerce et de l'Artisanat, Direction des Carburants : « Hypothèses de travail sur l'évolution de la demande d'énergie et de pétrole, 1972, 1975, 1980, 1985 ».
- Revue 2000, n° 27 : « L'énergie solaire, salut de demain », par Yvan Peyches.
- Dossiers et Documents du « Monde », n° 9, mars 1974 : « La crise de l'Énergie ».
- Document de la Direction des Etudes et Recherches de l'E.D.F., avril 1974 : « Les réalisations d'E.D.F. concernant l'énergie éolienne ».
- Commission des Communautés Européennes, 29 mai 1974 : « Vers une nouvelle stratégie de politique énergétique pour la Communauté ».
- Revue Française sur l'Énergie, n° 264, juin-juillet 1974, n° 265 août-septembre 1974, n° 251 mars 1973, n° 261 mars 1974 : sur la pénétration de l'électricité.
- Revue Française de l'Énergie n° 265 août-septembre 1974 : « L'énergie et les pays en voie de développement » A.I.E.A.
- Revue Française de l'Énergie, n° 265, août-septembre 1974. « L'énergie géothermique », par J. Goguel, vice président du B.R.G.M.
- Problèmes Economiques, 30 octobre 1974 : 1°) « Perspectives pour le charbon dans le monde et en Europe ». 2°) « Le pétrole de la Mer du Nord avant et après la crise ».
- Rapport sur les actions de recherche, développement et démonstration à mener pour économiser l'énergie dans l'industrie.
- Agence pour les économies d'énergie, le 4 décembre 1974.
- Guide statistique de l'Énergie (BNP) 1975.
- Commission de l'Énergie du VI^e Plan.

L'URANIUM

- Cahiers Français, février-mars 1967 : « L'usine de séparation isotopique de Pierrelatte ».
- Le Courrier du Parlement, 30 mars - 5 avril 1972 : « L'industrie minière de l'uranium et le marché », par Denis Granjon.
- Problèmes Economiques, 15 novembre 1972 : « L'uranium en France ».

- Rapport de l'Agence de l'O.C.D.E. pour l'énergie nucléaire (A.E.N.) sur : « L'uranium, ressources, production et demande » août 1973.
- Revue Française de l'Energie, n° 257, octobre-novembre 1973 : « L'industrie française du cycle du combustible nucléaire », par Pierre Taranger.
- Revue Française de l'Energie, n° 257, novembre 1973 : « Prévisions de développement de l'énergie nucléaire » par Michel Grenon.
- Revue Française de l'Energie, n° 265, août-septembre 1974 : « L'Enrichissement de l'Uranium, réalité industrielle d'aujourd'hui », par MM. Pecqueur, J.H. Coates, Mezin.
- Revue Française de l'Energie, n° 252, avril 1973 : « L'Europe va-t-elle manquer d'uranium enrichi ? » par Michel Pecqueur.

L'ENERGIE NUCLEAIRE ET LES CENTRALES ELECTRO-NUCLEAIRES

- Cahiers Français, janvier-février 1968 : « L'industrie nucléaire française ».
- Agence de l'O.C.D.E. pour l'énergie nucléaire, 1972 : « Principes régissant les autorisations de rejet », par J. Chanteur.
- Revue Française de l'Energie, n° 254, juin 1973 : « La Sûreté nucléaire au M.D.I.S. » par J. Servant.
- S.C.P.R.I., 152, « Pollution nucléaire et rayonnements ionisants », par J. Chanteur et P. Pellerin.
- O.R.E.A.L.M. juin 1973 : « Les Centrales nucléaires dans le Val de Loire » (L'impact socio-économique de l'implantation des centrales nucléaires).
- Revue Française de l'Energie, n° 2257, octobre-novembre 1973 « Les équipements lourds pour centrales nucléaires », par J. Lefebvre de Ladenchamps, secrétaire général de Framatome.
- Annales des Mines, janvier 1974 : « La sûreté nucléaire ».
- Annales des Mines, janvier 1974 : « Le choix des sites de centrales nucléaires », par Ph. Aussourd.
- Revue Française de l'Energie, n° 259, janvier 1974 : « Energie nucléaire, sécurité et environnement », par S. Eklund, directeur général de l'A.I.E.A.
- Revue Française de l'Energie, n° 261 mars 1974 : « Les centrales nucléaires à haute température H.T.G.R. aujourd'hui et demain » par C. Melese d'Hospital et B. Pellaud.
- Bulletin d'informations scientifiques et techniques, C.E.A. mars 1974 : « Le transport des matières radio-actives ».
- « Energie nucléaire et environnement ». Délégation Générale à l'information. Mars 1974.
- Arts et Métiers, avril 1974 : « Localisation, transport et utilisation de la production d'électricité thermonucléaire » par Michel Hug.
- American Nuclear Society : « Centrales nucléaires et environnement », questions et réponses. 1974.
- Dossier « Electricité de France » (service Central des Relations Publiques) sur « l'homme et l'énergie nucléaire ».
- Revue française de l'Energie n° 263 mai 1974 : « Les réacteurs à sels fondus », par Michel Grenon.
- Rapport au Comité National de l'eau, 5 juin 1974 : « Les décharges thermiques dans les rivières ».

— Etude de la sécurité des réacteurs : rapport du professeur Rasmussen « Une évaluation des risques d'accident dans les centrales électriques nucléaires commerciales aux Etats-Unis » - Août 1974.

— Revue Française de l'Energie, n° 265, août - septembre 1974 : « Un nouveau support de l'énergie nucléaire : l'hydrogène produit à partir de l'eau », par J. Pottier, J. Rastoin, D. Souviau, P. Courvoisier.

— Revue Française de l'Energie : n° 257 octobre-novembre 1973, n° 265, août-septembre 1974 : « Les réacteurs surrégénérateurs » par Rémy Carle.

— Ministère de l'Industrie et de la Recherche, 1974. « Programme national d'implantation des centrales nucléaires ».

— Ministère de l'Industrie et de la Recherche, novembre 1974 : « Localisation des centrales nucléaires ». ■

Ce dossier a été réalisé par la Délégation Générale à l'Information, avec la collaboration des cabinets d'études CEGI et CEGIF et avec la participation de la Délégation Générale à l'Energie, de la Délégation à l'Aménagement du Territoire et à l'Action Régionale, de la Direction du Service National de la Protection Civile, du Service Central de Protection contre les Rayonnements Ionisants, du Service Central de Sûreté des Installations Nucléaires, du CEA, d'EDF, de la Compagnie Générale d'Electricité, et de Framatome.

