

Le contexte nucléaire français*

par J. Havard

(Chef du Service réacteurs nucléaires et échangeurs)

et M. Israel

(Chef du Département physique des réacteurs à la Direction des études et recherches de l'E.D.F.)

Les besoins énergétiques en France

Il ne saurait être question de remettre en cause sérieusement les apports de l'utilisation de l'énergie, autre que celle du travail des hommes et des animaux domestiques, aux civilisations qui ont pu s'en servir et d'emblée nous nous placerons dans une perspective de consommation d'énergie croissante, sans pour cela qu'elle épouse indéfiniment l'allure exponentielle : nous admettrons que la consommation tendra vers une asymptote, à une certaine époque qui dépendra du degré d'industrialisation du pays considéré. Dans cette perspective, il n'est pas inutile de rappeler les besoins en énergie, à moyen et plus long terme, prévisibles actuellement pour la France, ainsi que les caractéristiques spécifiques du marché énergétique de notre pays, dont dépend la satisfaction de ces besoins.

Du côté des besoins, en 1973, 50 millions d'habitants ont consommé 175 Mtep (Million de tonnes équivalent pétrole). En l'an 2000, la population française sera, selon les prévisions, de 60 à 70 millions. Si on suppose que les besoins individuels à cette époque seront les mêmes qu'à l'heure présente, c'est-à-dire en admettant la proportionnalité entre besoins et nombre d'habitants, on est conduit à 245 Mtep. Si on remplace cette hypothèse pessimiste du point de vue de la croissance par celle qui consiste à dire qu'en l'an 2000 le Français consommera comme le citoyen américain consommait en 1973, c'est-à-dire 8,7 tep, les besoins en France seront de 600 Mtep.

Rappelons qu'à l'heure actuelle, 40 % des ménages français ne possèdent pas de moyen spécifique de chauffage. On voit donc à quoi conduit la stagnation de la consommation énergétique pour les plus défavorisés. Sans vouloir atteindre le stade américain de 1973 en l'an 2000, la planification française a prévu un niveau global de 500 Mtep, en gros, 20 % de moins que le niveau E.U. de 1973. Si on espère réduire encore ce volume par des mesures d'économie et en éliminant les gaspillages, il est de toutes façons imprévoyant de ne pas envisager de répondre au minimum à un volume de demande de 400 Mtep.

En 2060, on peut penser que la consommation atteindra son asymptote et que cette dernière pourrait se situer aux environs du milliard de tep. L'horizon 2060 étant trop éloigné pour permettre des évaluations prévisionnelles valables, on peut considérer cette valeur asymptotique comme un but à atteindre : elle correspond au niveau

* La Rédaction de *L'actualité chimique* remercie la Société Française de Physique qui lui a permis de reproduire cet article paru dans son « Encart nucléaire » de juin 1976.

américain actuel. Remarquons que l'extrapolation de la consommation au rythme de la décennie précédente conduirait à : 335 Mtep en 1985, 670 Mtep en 2000, 10 Milliards de tep en 2060.

Voilà de quoi rassurer les tenants d'une croissance limitée à laquelle il sera nécessaire d'arriver mais tout en visant un niveau de consommation satisfaisant pour tous, au bout d'une période de transition suffisamment longue pour qu'elle n'entraîne pas de bouleversements économiques fâcheux.

Examinons alors les moyens mis à notre disposition afin de faire face à ces besoins. Actuellement les besoins énergétiques nationaux sont couverts à raison de :

- 66 % par le pétrole
- 17 % par le charbon
- 9 % par le gaz naturel
- 6 % par l'énergie hydraulique
- 2 % par l'énergie nucléaire.

Rappelons que 99 % du pétrole, 50 % du gaz naturel et 30 % du charbon sont importés de l'étranger. Un accroissement des consommations pétrolières aurait le double inconvénient, politique et financier, de nous rendre encore plus dépendants et d'accroître le poids du poste combustible dans la balance des comptes, poids déjà très lourd à son niveau actuel. Il est intéressant également de noter que 36 % du fuel sont utilisés pour le chauffage des locaux et que l'industrie, avec ses 30 % de consommation, n'occupe que la deuxième place parmi les consommateurs. Quant aux transports, ils représentent 23 % de la consommation.

Examinons, alors, ce qu'on peut escompter dans l'avenir du côté des ressources classiques : les décisions gouvernementales ont conduit à limiter, depuis 1960, l'extraction du charbon qui est en déclin en France où les coûts sont élevés. En plus de cet aspect coût, son emploi également a subi un recul important et les Américains, afin de lui trouver un débouché, le transforme en gaz synthétique, ce qui a pour effet de tripler le coût de revient de la thermie charbon. La préférence pour les hydrocarbures donne au problème énergétique sa dimension internationale et apporte une communauté de préoccupations à de nombreux pays parmi lesquels il ne faut pas oublier les pays en voie de développement, qui pour la plupart ne possèdent pas de ressources en hydrocarbures.

Pour en revenir au charbon national, les révisions en hausse de son extraction et le ralentissement de la fermeture des puits, ne sont pas à la mesure du problème des approvisionnements et il ne faut pas compter que cette ressource couvre plus de 5 % de nos besoins en l'an 2000.

En ce qui concerne l'hydraulique, on sait que les sites les plus intéressants sont déjà équipés; les travaux futurs auront donc une rentabilité de moins en moins intéressante. Actuellement, l'hydraulique produit 60 milliards de kilowatt heure équivalent à 13 Mtep. La révision en hausse de ce type d'équipement ne peut représenter plus de 3,5 Mtep. Là encore, ces chiffres ne sont pas à l'échelle des 400 Mtep de l'an 2000.

Pour ce qui est de l'énergie marémotrice, le nombre de sites que l'on peut équiper est très limité. Le seul site national équipable est celui de la baie du Mont-Saint-Michel. Il pourrait représenter 13 à 17 Mtep. Mis à part le coût très élevé des investissements nécessaires, notons également qu'il pose des problèmes très complexes d'environnement.

Du côté des énergies nouvelles, dont il est très souvent question dans la littérature, il s'agit d'être vrai si on veut obtenir une image qui reflète au plus près la situation réelle de notre pays : actuellement, avec les technologies mises au point, l'apport de la géothermie et de l'énergie solaire est négligeable. Même dans le cas positif où les espoirs fondés sur le progrès technologique se réalisent, le temps nécessaire pour passer à l'échelle industrielle ne permet pas d'espérer que ces énergies satisfassent plus que quelques pour cent de nos besoins en l'an 2000.

L'énergie éolienne, l'énergie des mers, etc... ne sont à citer que pour mémoire, en raison de la modestie de leurs possibilités : un réacteur nucléaire de 1 000 MW, c'est-à-dire de la taille des réacteurs actuellement construits, équivaut à 1 000 éoliennes qui auraient chacune deux hélices de 30 mètres de diamètre : pensons au niveau de bruit insupportable qui en résulterait, à supposer

Les filières nucléaires du programme français

La base de la production d'énergie dans les centrales nucléaires est la fission des noyaux lourds. Il est bon de rappeler que le seul élément naturel dont la section efficace de fission soit assez importante pour assurer la rentabilité économique de la production d'énergie nucléaire est l'uranium 235. Toutefois, les différentes filières nucléaires en service ou en développement bénéficient également de la fission de noyaux lourds formés en pile en même temps que le processus de production d'énergie. Deux voies sont possibles suivant qu'il s'agit de la chaîne de l'uranium 238 conduisant au plutonium 239 ou de la chaîne du thorium 232 conduisant à l'uranium 233.

L'uranium 235 et l'uranium 233 ont d'excellentes caractéristiques pour des spectres de neutrons d'énergie thermique. Par contre, le plutonium a d'excellentes caractéristiques neutroniques pour des spectres d'énergies élevées, c'est-à-dire pour des neutrons rapides. La première filière développée en France est la filière graphite-gaz. Elle a l'avantage de pouvoir utiliser, sans enrichissement, l'uranium naturel qui a une teneur de l'ordre de 0,70 % en uranium 235. Le bilan neutronique est tel qu'il est possible de tirer des énergies de l'ordre de 4 000 MWj *

* La fission d'1 gramme de matériau fissile fournit une énergie d'environ 1 Mega-watt-jour thermique.

que tous les autres problèmes de la mise en œuvre se trouvent surmontés. Quant à l'énergie de la fusion thermonucléaire, le stade actuel des recherches ne permet pas de conclure à la réalisation certaine des centrales de ce type dans le cas le plus optimiste avant l'an 2020.

Le bilan précédent montre que les choix à effectuer sont limités. Le recours à l'énergie nucléaire est indispensable et c'est la seule énergie que l'on pourra substituer pour longtemps aux hydrocarbures. On peut penser que d'ici à l'an 2000, 40 à 50 % des besoins énergétiques seront exprimés sous forme de demande d'électricité. C'est donc environ 200 Mtep que le nucléaire devra couvrir.

Il ne faudrait pas, toutefois, que l'obligation de recourir à l'énergie nucléaire entraîne des coûts pour la nation qui grèveraient au départ les bienfaits de la croissance. En fait, il n'en est rien, puisque la compétitivité du nucléaire était déjà assurée avant l'accroissement spectaculaire des prix des hydrocarbures que nous avons connu. A l'heure actuelle, les calculs économiques montrent que le coût total du kWh nucléaire, frais d'exploitation et amortissement compris, est inférieur au seul coût du fuel brûlé dans une centrale thermique classique pour y produire le même kWh.

Le seul problème qui pourrait se poser est celui du financement des investissements puisqu'une centrale nucléaire coûte 60 à 70 % de plus qu'une centrale au fuel. Mais, on peut remarquer que dans le passé la part des investissements électriques a été de 5 % dans l'investissement national vers la fin des années 50 et même 6 % au plus fort de l'équipement hydroélectrique, une centrale de ce type ayant un coût d'investissement trois fois supérieur au coût d'une centrale nucléaire. Actuellement, on prévoit qu'au plus fort de l'équipement

par tonne de combustible. Ce combustible se présente sous forme de barreaux d'uranium métallique enfermés dans une gaine en magnésium-zirconium; le modérateur est le graphite et le réfrigérant est l'anhydride carbonique sous pression. Le rendement thermodynamique de l'usine est de l'ordre de 0,31.

La puissance spécifique de ce type de réacteur est faible, de l'ordre du MWe par tonne. En effet, la température interne du combustible est limitée à 650 °C vu sa forme métallique. Aussi, malgré une production importante de plutonium, de l'ordre de 60 g par GWh électrique, qui aurait fait de cette filière un excellent précurseur des réacteurs à neutrons rapides surrégénérateurs utilisant le plutonium comme combustible, la limitation de la puissance spécifique la rend impropre à l'extrapolation aux grandes tailles. Ceci constitue une des raisons de son abandon. Par ailleurs, dans le combustible déchargé après irradiation, on trouve de l'uranium appauvri, à 0,4 % d'uranium 235. Comme on le verra plus loin, le bilan en uranium naturel est plus favorable pour la filière américaine à eau pressurisée.

En France, 2 360 MWe ont été installés en graphite-gaz et un groupement de constructeurs français a vendu à l'Espagne la centrale de Vandellos, de 530 MWe. Toutefois, l'étroitesse du marché intérieur

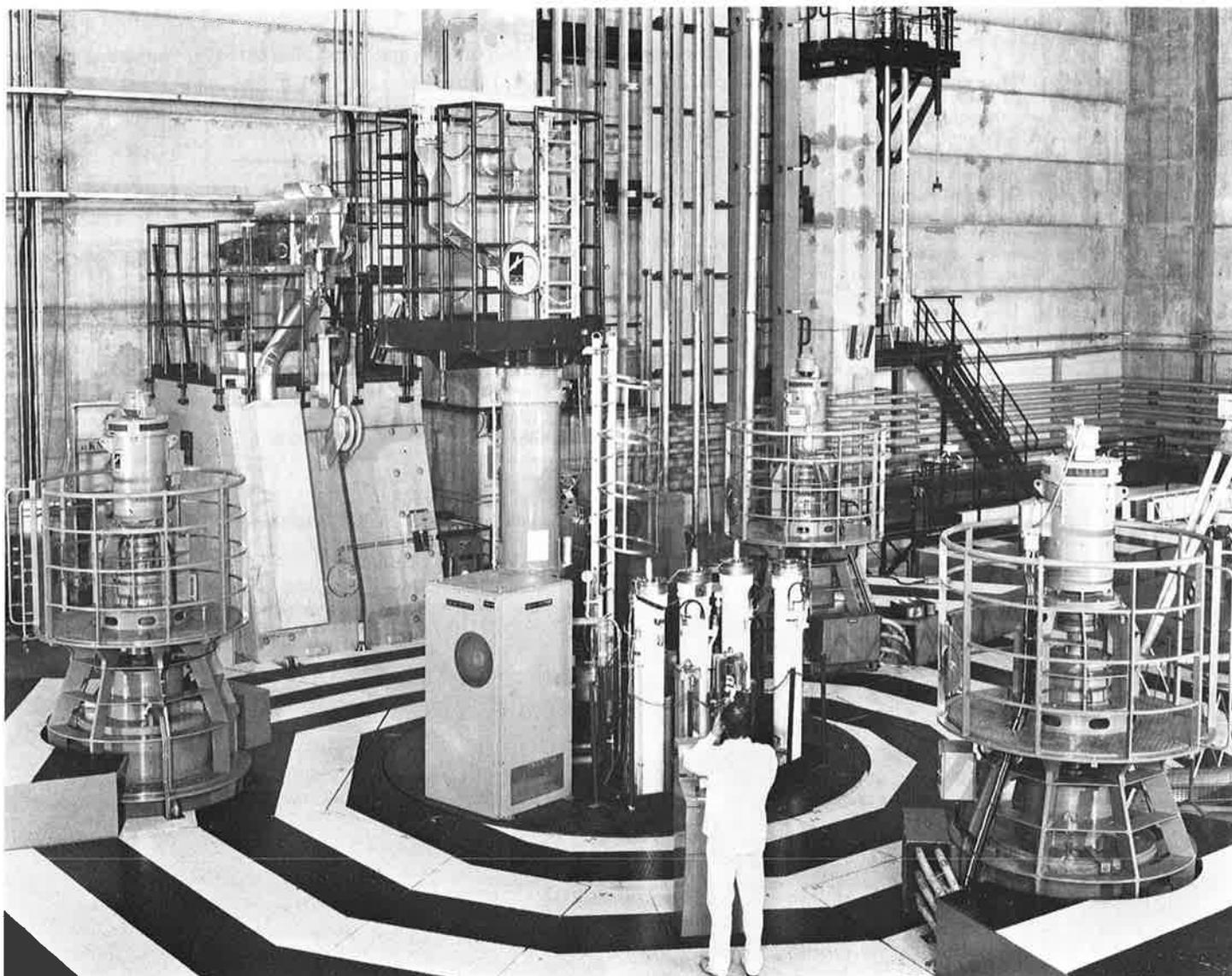
nucléaire la part des investissements électriques n'excédera pas 4 % de l'investissement national.

Comme toute industrie, la réalisation d'une centrale nucléaire et la production de son combustible demandent un investissement énergétique au départ. Les chiffres avancés çà et là ont souvent un caractère imprécis et de plus incorrect. Il est bon d'établir ce bilan afin d'apprécier l'apport énergétique net du nucléaire. En annexe, on trouvera ce bilan, prenant pour référence une centrale à eau pressurisée (PWR) de 1 000 MWe. Il en résulte que l'énergie nécessaire pour l'équipement d'une centrale de 1 000 MWe est de l'ordre de 2,5 milliards de kWh, soit moins de 6 mois de fonctionnement de la centrale en régime normal. Ceci revient à rallonger virtuellement le temps de construction de 6 mois pour tenir compte de l'énergie consommée pour l'équipement de la centrale.

Bien avant la dernière crise pétrolière et depuis les années 50, la France s'est engagée dans un programme de recherche et développement sur la production énergétique à partir de l'énergie nucléaire. Deux filières nationales ont été développées : la filière à uranium naturel graphite-gaz et la filière à neutrons rapides refroidie au sodium. Par ailleurs, on sait que la filière graphite-gaz a été abandonnée en 1969 au profit de la filière à eau pressurisée d'origine américaine et construite en France sous licence. Les conditions de licence doivent d'ailleurs être renégociées en 1982 et un important travail de recherche et développement est engagé en France pour obtenir à l'industrie française une position plus équilibrée de partenaire à partir de cette date. L'évolution du contexte technico-économique explique le changement dans le type de filière adoptée. Examinons, en France, l'évolution du choix des réacteurs construits.

et les faibles commandes extérieures pour ce type de réacteurs n'ont pas permis de réaliser des baisses de prix de revient suffisantes, dues à l'effet de série. Cette dernière raison, jointe aux autres inconvénients cités précédemment, a empêché cette filière de devenir compétitive avec les autres systèmes de production d'électricité.

La filière à eau ordinaire pressurisée, mise au point aux États-Unis par la Société Westinghouse, a succédé à la filière graphite-gaz. Le combustible de cette filière se présente sous la forme de pastilles d'oxyde d'uranium faiblement enrichi (~ 3,3 % en uranium 235) empilées dans des tubes de zircaloy servant de gaine. Ces tubes sont groupés en assemblages de 17 × 17 crayons combustibles. Le modérateur et le réfrigérant sont le même fluide : de l'eau sous pression de 155 bars. Cette eau-primaire cède ses calories à l'eau d'un circuit secondaire qui, après vaporisation, actionne un groupe turboalternateur. Le rendement thermodynamique de l'installation est de l'ordre de 0,33 net, la puissance spécifique moyenne de l'ordre de 11 MWe par tonne de combustible. La température de l'oxyde d'uranium peut atteindre 2 300 °C. En régime de fonctionnement normal et pour les réacteurs de la génération actuelle, elle est de 1 500 °C maximum au centre de la pastille d'uranium



Centrale nucléaire « Phénix » de Marcoule : hall du bâtiment du réacteur ; salle de chargement.
(Photothèque E.D.F. ; photo M. Brigaud et M. Morceau).

Cette filière se prête bien à l'extrapolation économique aux grandes puissances.

Bien que son combustible soit de l'uranium enrichi, l'utilisation de l'uranium naturel est meilleure que dans le cas du graphite-gaz. En effet, malgré l'absorption élevée de l'eau, la consommation en uranium naturel est plus faible de l'ordre de 20 kg/GWh. Si on considère le système usine d'enrichissement plus usine de production d'électricité, pour la filière à eau, et les usines de production d'électricité pour la filière graphite-gaz, les deux ensembles sont alimentés par de l'uranium naturel, mais dans un cas, le rejet est de l'uranium appauvri à 0,25 % (usine de séparation isotopique) et dans l'autre 0,4 % (combustible irradié graphite-gaz). Le combustible déchargé d'un réacteur à eau pressurisée contient encore de l'uranium enrichi à 0,9 % environ et du plutonium. La production de plutonium est moins bonne que pour la filière graphite-gaz, 24 g par GWh électrique, mais le combustible ayant fourni une énergie de l'ordre de 33 000 MWj/t de combustible métal au lieu de 4 000, le plutonium se trouve beaucoup plus

concentré et sa récupération est plus économique.

L'importance du marché mondial des réacteurs à eau ordinaire n'est pas à démontrer. Faible consommation en uranium, effet de taille, effet de série ont permis à cette filière d'être compétitive avec tous les autres systèmes de production d'électricité et ceci avant la dernière crise pétrolière. La France, indépendamment des travaux que menait le CEA dans le domaine de la propulsion navale militaire, s'était intéressée, dès 1969, à cette filière en participant, par moitié avec la Belgique, à la réalisation de la centrale de Chooz (270 MWe), pour laquelle l'industrie française avait acquis la licence Westinghouse. Elle a poursuivi cette politique en participant, également par moitié, à la réalisation de la centrale de Tihange en Belgique (870 MWe), qui a été couplée au réseau en mars 1975. Cette centrale a atteint sa puissance nominale fin juillet, a été mise en service industriel fin septembre et avait déjà produit en fin 1975 3,10 TWh, soit l'équivalent de 3 560 h à pleine puissance. Actuellement, le programme électronucléaire français est basé sur cette filière et tous les efforts sont

réunis afin d'adapter au mieux ce type de réacteurs aux spécifications traditionnelles des électriciens français.

A son tour, la filière à eau devra un jour céder la place à des types de réacteurs, dits surrégénérateurs, qui ont l'avantage de produire plus de combustible fissile que celui qui est consommé pour la production d'électricité à partir d'un matériau fertile : l'uranium 238 ou le thorium 232.

Il existe de nombreux concepts de réacteurs surrégénérateurs, à neutrons thermiques ou à neutrons rapides, utilisant le cycle thorium, uranium 233 ou uranium 238, plutonium. En France, le Commissariat à l'Énergie Atomique a développé un réacteur surrégénérateur à neutrons rapides dont le réfrigérant est le sodium. Dans les réacteurs à neutrons rapides, l'énergie des neutrons entretenant la réaction en chaîne est beaucoup plus élevée que pour les réacteurs à neutrons thermiques. Les sections efficaces en général sont faibles à ces énergies, mais la probabilité d'induire une fission plutôt qu'une réaction (n, γ) est beaucoup plus importante : il y a donc des neutrons

disponibles pour produire du plutonium à partir de l'uranium 238 présent.

On rend ainsi utilisable l'ensemble de l'uranium 238, 140 fois plus abondant que l'uranium 235 dans l'uranium naturel. De plus, tout l'uranium appauvri en provenance des rejets des usines de séparation isotopique ou des combustibles déchargés dans les autres types de centrales pourra être comptabilisé en tant que combustible nucléaire. On examinera plus loin le problème posé par la limitation des réserves d'uranium et la nécessité de l'introduction des surrégénérateurs avant l'an 2000.

A l'heure actuelle, le réacteur de démonstration Phénix, de 240 MWe, réalisé par le Commissariat à l'Énergie Atomique et Électricité de France, fournit des renseignements techniques importants sur lesquels s'appuieront les réalisations suivantes et en premier la centrale de Creys-Malville : Super-Phénix.

On trouvera sur le tableau 1 quelques caractéristiques des trois filières dont il a été question.

Tableau 1.

Quelques données relatives aux filières Graphite-gaz-U nat. ; Eau ordinaire ; Rapide sodium filière.

	Graphite-gaz	Eau légère PWR (réacteur Tihange)	Rapide sodium (réacteur filière)
Inventaire en pile en tonnes de combustible par MWe	0,9 à 1,2	0,0827	0,017
Inventaire en pile en tonnes U nat. par MWe	0,9 à 1,2	0,436	—
Inventaire en pile en kg de matière fissile par MWe	~ 7	2,17	2,4
Enrichissement moyen en pile	0,7 %	2,6 %	15 %
Rendement	0,31	0,33	0,44
Irradiation en MWj (th)/t	4 000	33 500	~ 100 000
Consommation U nat. en kg/GWhe	38	19	0,100 d'U appauvri.
Production Pu fissile en kg/GWh	0,060	0,026	0,019 * (gain de régénération 0,22)

* Ce Pu est récupéré en plus du plutonium chargé initialement.



Centrale nucléaire « Phénix » de Marcoule : télémanipulateurs.

(Photothèque E.D.F.; photo M. Morceau et M. Brigaud).

Les approvisionnements en matières combustibles

Les estimations actuelles des ressources en uranium naturel font la distinction entre les « réserves » ou « ressources raisonnablement assurées » qui correspondent à des gisements connus exploitables par des techniques actuellement éprouvées et les « ressources supplémentaires estimées » qui correspondent à des gisements dont l'existence est présumée dans des zones encore inexplorées. Dans ce qui suit, on donne sur les tableaux 2 et 3, les chiffres relatifs à l'ensemble « réserves + ressources

1 300 MWe, conduisant à environ 18 GWe en service en 1980, 48 GWe en 1985 et 70 GWe vers la décade 1990. Les sur-régénérateurs ne sont pas pris en compte. Les besoins d'enrichissement en tonnes d'unités de travail de séparation isotopique (t UTS) donnent une idée de l'effort à faire du côté de la réalisation d'usines d'enrichissement.

Eurodif, première usine d'enrichissement en France dont la participation française

20 % supérieur pour un taux de rejet de 0,30 % et sans recyclage de l'uranium. Notons également que la production annuelle française s'avère insuffisante à très court terme et que la production de 1978 pour tout l'uranium sous contrôle français suffit à peine aux besoins annuels de 1979. Ceci veut dire que les capacités de production devront être rapidement augmentées. Du côté des ressources, la prospection devra être poursuivie activement puisque les besoins cumulés en 1985 correspondent aux réserves françaises actuelles pour un coût d' U^3O_8 qui sera supérieur à 10 \$ la livre, prix de base des calculs prévisionnels actuels.

Tableau 2. Ressources mondiales.

Coût d'extraction de l'uranium inférieur à	Nature des gisements exploités teneur	Réserves + ressources estimées 10 ⁶ tonnes	Réserves 10 ⁶ tonnes d'uranium
10 \$/1bU ₃ O ₈	Conventionnels (Uraninite, UO ₂ , UO ₃ ...)	1,8	0,9
15 \$/1bU ₃ O ₈	1 %	3,1	1,6
30 \$/1bU ₃ O ₈	Schiste 60-80 ppm (10 ⁻⁶)	7,0	—
50 \$/1bU ₃ O ₈	Schiste 25-60 ppm	16,0	—
100 \$/1bU ₃ O ₈	Granite 10-20 ppm	30,0	—
200 \$/1bU ₃ O ₈	Schiste 10-25 ppm	44,0	—
Au-dessus de 200	Granite 4-10 ppm	4 600,0	—
	Eau de mer 0,003 ppm		

Tableau 3. Ressources françaises.

Coût \$/1bU ₃ O ₈	France seule		Sous contrôle français (France, Niger, Gabon)	
	Réserves tonnes d'U	Réserves + ressources estimées	Réserves	Réserves + ressources estimées
Inférieur à 10	37 000	60 000	97 000	146 000
Inférieur à 15	55 000	105 000	130 000	170 000

estimées », en séparant la part des réserves en fonction du coût d'extraction de l'uranium *.

Les ressources correspondant à des coûts supérieurs à 15 \$/1bU₃O₈ sont des estimations et on n'a pas de valeurs pour les réserves.

En 1973, les prévisions de la production annuelle française étaient :

capacité 1975 1 800 tonnes
 capacité 1978 2 000 tonnes
 Si on tient compte de la production sous contrôle français — Niger et Gabon principalement — ces chiffres sont :
 capacité 1975 3 900 tonnes
 capacité 1978 4 700 tonnes

Du côté des besoins en uranium, on trouvera sur le tableau 4 les évaluations prévisionnelles pour un programme d'équipement de centrales à eau pressurisée de 900 et

s'élève à 42,78 %, atteindra en 1982 sa capacité maximum de production de $10,8 \times 10^8$ t-UTS/an. La France disposera de 4×10^8 t-UTS/an durant toute la vie de l'usine. D'autres projets sont en cours d'étude.

La consommation en uranium naturel dépend évidemment du taux de rejet des usines d'enrichissement. Les données précédentes sont relatives à un taux de 0,25 % avec utilisation de l'uranium recyclé à partir des combustibles irradiés mais sans recyclage du plutonium. Il est intéressant de noter que le cumul vers 1990 serait de

Tableau 4.

Besoins cumulés	Tonnes U nat.	t-UTS
1980	19 600	8 100
1985	59 000	30 700
vers 1990	110 000	65 000

* Ces chiffres sont tirés des documents suivants pour le monde et pour la France : « Uranium, ressources, production et demande » O.C.D.E. et A.I.E.A., août 1973, « Nuclear Fuel resources and requirements » USAEC WASH 1243, avril 1973.

Les chiffres mondiaux ne diffèrent pas beaucoup des prévisions pour la France. Certes, au stade actuel des recherches prospectives, il est difficile d'être sûr de ce que le sous-sol recèle et rien n'interdit d'espérer la présence de minerai d'uranium d'exploitation aisée. Mais les présomptions de réserves d'uranium à des prix raisonnables laissent penser que vers l'an 2000 on serait amené à traiter des gisements à faible teneur. Ceci rend la mise au point des surrégénérateurs indispensable.

De nombreuses études ont été effectuées en vue d'analyser les conséquences sur les besoins en matières fissiles de l'introduction des réacteurs surrégénérateurs dans le parc des usines de production électrique. Toutes ces études reposent sur de nombreuses hypothèses. Ces hypothèses concernent tout d'abord les réacteurs eux-mêmes. A l'heure actuelle, les réacteurs surrégénérateurs les plus avancés sont du type rapide-sodium. Seuls l'U.R.S.S., l'Angleterre et la France ont accumulé assez d'expérience pour avancer des caractéristiques physiques valables pour les réacteurs commerciaux de la filière. Toutefois, il est nécessaire de rappeler que, même dans ces pays, on n'en est encore qu'au stade du réacteur de démonstration, et que des progrès peuvent être attendus dans le domaine de l'utilisation optimale des ressources. Pour en revenir aux hypothèses de calcul, elles concernent également le facteur de marche des centrales et tout le cycle de combustible hors pile, en particulier le temps de récupération du plutonium des combustibles déchargés après irradiation dans les centrales à eau ordinaire et le temps de récupération du plutonium des couvertures des réacteurs rapides : ces temps dépendent des procédés mis au point pour le retraitement des combustibles irradiés, domaine en plein développement actuellement, tant en France que dans le reste du monde. Aussi, les résultats présentés n'ont que valeur indicative et leur intérêt est de préciser des orientations.

On trouvera sur les figures 1, 2 et 3 les résultats d'une étude effectuée pour l'Europe des Neuf. Cette étude peut être considérée comme représentative de la situation en France, en valeur relative. Sur chacune des figures, on a porté les approvisionnements pour un programme « tout eau ordinaire », mais en recyclant le plutonium une fois dans les mêmes centrales (courbe A), en introduisant des surrégénérateurs dérivés de Phénix, utilisant au fur et à mesure le plutonium produit dans les centrales à neutrons thermiques (courbe B) et enfin en supposant que les recherches et développements en cours donneront, à partir

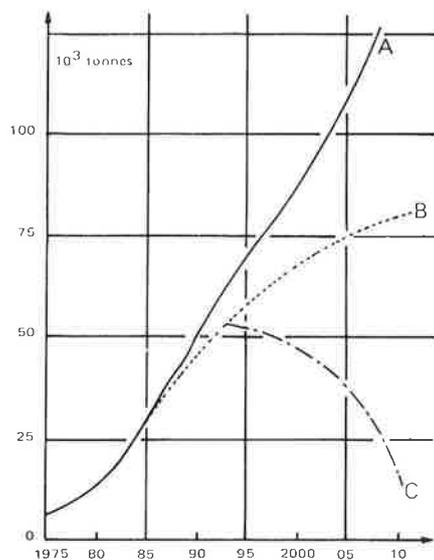


Figure 1.
Besoins annuels en uranium naturel.

de 1995, aux réacteurs de la filière rapide sodium des caractéristiques avancées entraînant des effets importants sur les besoins (courbe C). Toutefois, la date de 1995 et l'allure de la courbe sont très indicatives, vu l'incertitude, inhérente à toute recherche, sur la date d'aboutissement.

L'implantation, en Europe, de centrales à neutrons rapides permet de réduire de manière appréciable les besoins en matières fissiles. Dans le cadre des hypothèses prises en compte dans cette étude, les résultats obtenus peuvent être résumés de la manière suivante :

- avec des réacteurs utilisant un combustible $\text{PuO}_2\text{-UO}_2$ du type de celui qui est

Environnement et sûreté

Depuis quelques années, l'opinion mondiale est de plus en plus consciente du fait que toute activité industrielle entraîne des nuisances collectives. Cette prise de conscience est très bénéfique dans la mesure où elle permettra d'éliminer des activités dont le coût écologique est élevé et le bénéfice social faible. Toutes les études chiffrées qui ont été effectuées par divers organismes (en particulier l'Université de Californie) ont montré que l'énergie nucléaire présente une excellente rentabilité de ce point de vue. Le bénéfice que la société tire de l'énergie n'est pas à démontrer ici, l'éventail de ses utilisations industrielles et agricoles couvre pratiquement tous les domaines touchant de près ou de loin à l'homme. Du côté des coûts, examinons les aspects environnement et sûreté du problème. Le programme français étant essentiellement un équipement de centrales à eau pressurisée, on prendra ce réacteur comme cadre de référence.

L'environnement : choix des sites

Nous verrons plus loin que les aspects spécifiquement nucléaires de l'environnement n'ont pas de raison d'avoir une répercussion sensible sur le choix des sites. L'élément prépondérant dans ce choix est la recherche de la source froide indispensable à tout système classique de production d'énergie. Cette source froide

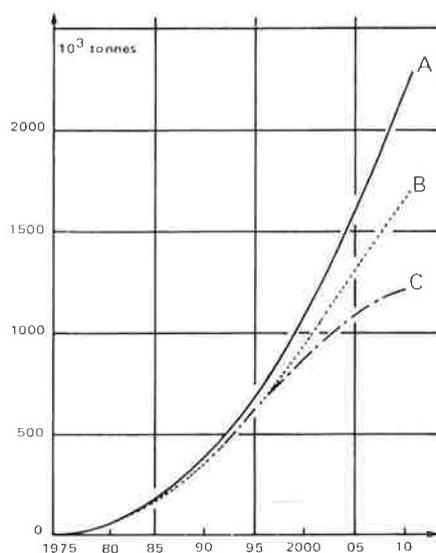


Figure 2.
Besoins cumulés en uranium naturel.

actuellement en cours de mise au point, l'économie réalisée est de l'ordre de 14 % en l'an 2000 (24 % en 2010) sur les besoins cumulés en uranium naturel. Pour les besoins annuels en unités de travail de séparation, qui représentent une mesure des installations de séparation isotopique à réaliser, les réductions sont de l'ordre de 20 % en l'an 2000 (37 % en 2010) :

- pour aboutir à une situation dans laquelle l'énergie serait produite exclusivement par des réacteurs rapides alimentés au plutonium, il est nécessaire de disposer d'un combustible ayant de meilleures caractéristiques.

Le combustible avancé utilisé dans la

est constituée par de l'eau, soit en quantité suffisante pour se contenter de l'échauffement légèrement, soit en quantité plus limitée qui nécessite alors de la vaporiser (tours de réfrigération dites « humides »).

Chaque système présente ses inconvénients : la limitation de l'échauffement moyen de l'eau demande des débits et des surfaces libres d'échange entre eau et atmosphère importants : à titre d'exemple, une centrale de bord de mer de 5 000 MW produit une élévation de température de 1° sur environ 10 km². L'utilisation de tours de réfrigération consomme l'eau évaporée (0,7 m³/s pour une tranche de 1 300 MW) réduisant donc le débit aval, ce qui constitue une limitation des cours d'eau utilisables. D'autre part, les tours constituent des monuments dont l'aspect esthétique reste subjectif, et les populations avoisinantes s'inquiètent parfois des répercussions éventuelles sur le microclimat local de la vapeur ainsi produite.

Ces inconvénients présentent une importance très différente selon les conditions locales préexistantes. Le choix des sites vise à minimiser les inconvénients. Il en résulte la nécessité d'études très détaillées des sites potentiels de façon à prévoir l'impact de l'implantation d'une centrale.

Compte tenu des caractéristiques prévisibles du réseau en 1985, la politique adoptée est de grouper 5 000 MW sur un même site,

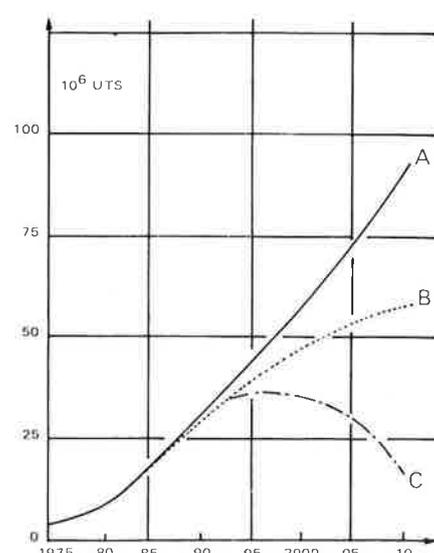


Figure 3.
Besoins annuels en UTS.

stratégie C permet de réaliser cet objectif. Les résultats de l'étude montrent la saturation des besoins en uranium naturel et UTS dans ce cas.

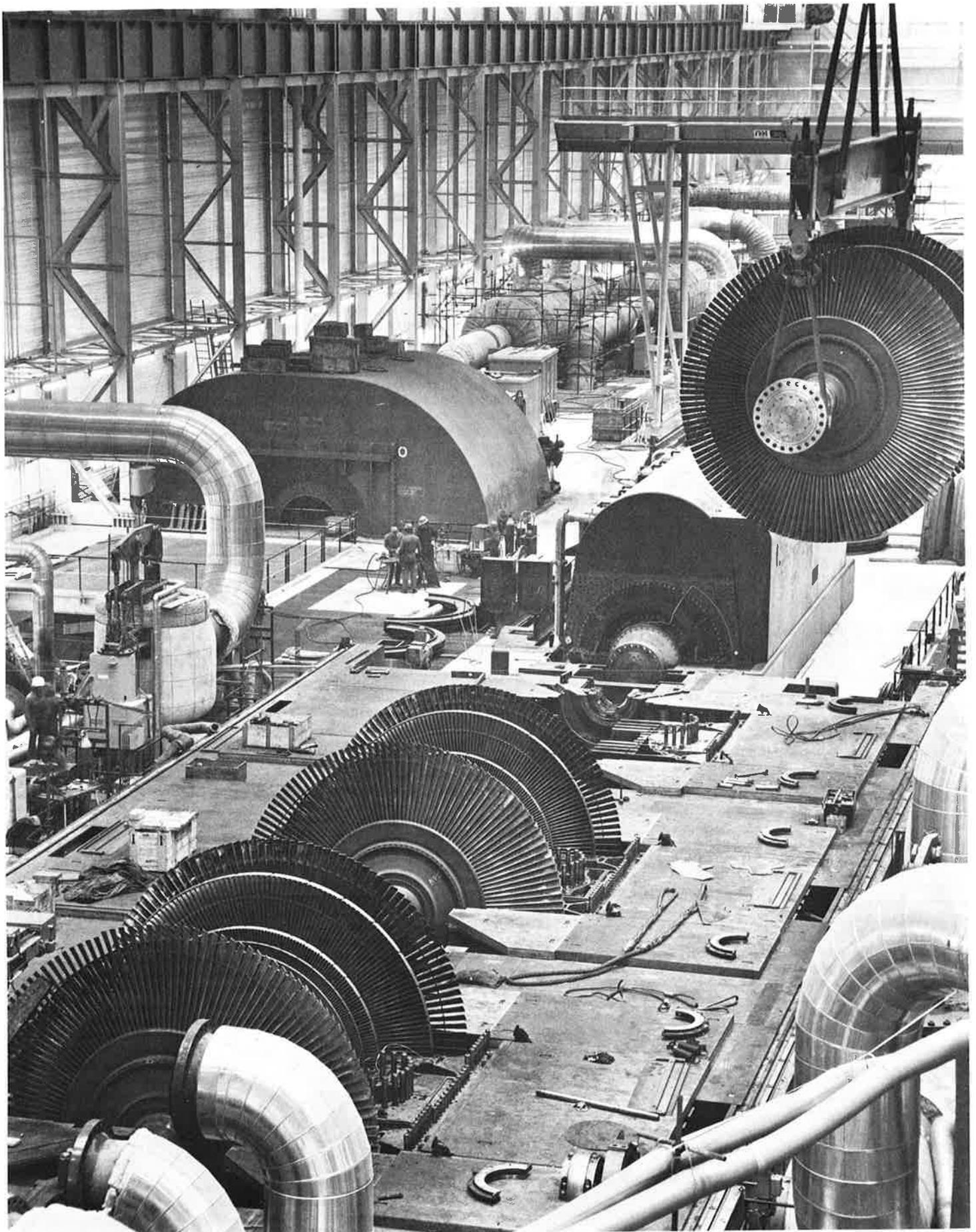
Le problème des approvisionnements n'est pas un problème à court terme vu les temps importants nécessaires pour la mise en œuvre de systèmes nouveaux de production. Bien sûr, les réserves mondiales de pétrole ne sont pas sur le point de s'épuiser et les réserves d'uranium naturel et l'énergie nucléaire assureront la continuité dans les approvisionnements. L'intérêt des études du type précédent est de montrer où se situent les limites de l'uranium naturel ainsi que les voies d'avenir.

le nombre de sites en service en 1985 devant être ainsi de 19, dont vraisemblablement 5 en bord de mer et 14 en bord de rivière, la plupart avec des réfrigérants atmosphériques humides. L'évolution ultérieure envisagée n'est pas vers la multiplication du nombre de sites mais vers l'accroissement de la puissance unitaire sur les sites en suivant l'évolution de la puissance globale installée.

Environnement : rejets radioactifs

Les produits de fission, très instables, sont des sources importantes de radioactivité. Notons que trois barrières séparent cette source de l'environnement extérieur : la gaine, dans laquelle sont enfermées les pastilles de combustible, la cuve et les tuyauteries du circuit primaire et enfin le bâtiment abritant le réacteur.

Afin de protéger le personnel, l'eau du circuit primaire est continuellement épurée en détournant une fraction du débit dans une station de traitement appropriée. Ces opérations d'épuration produisent des effluents liquides contenant des corps radioactifs ôtés à l'eau du circuit primaire. Ces effluents sont stockés afin d'éliminer par décroissance radioactive les radioéléments à période courte. Ensuite, ils sont dilués et rejetés dans l'eau de la rivière lorsqu'ils respectent et bien en deçà les



Centrale nucléaire de Fessenheim : le hall des turbines en novembre 1975. Cette centrale entrera très prochainement en activité.
(Photothèque E.D.F. ; photo M. Brigaud).

normes de concentration imposées par le Ministère de la Santé Publique. Ces opérations libèrent également les produits de fission gazeux qui sont collectés dans des réservoirs permettant la décroissance des gaz à période courte avant d'être rejetés dans l'atmosphère après filtration.

A côté de ces effluents liquides ou gazeux rejetés ainsi dans l'environnement, les opérations d'épuration et de décontamination entraînent la formation d'un certain volume de déchets radioactifs solides qui comprennent, entre autres, les filtres et résines usés qui ont piégé les produits de fission et d'activation de l'eau de réfrigération, des boues, des papiers, des chiffons et divers matériaux contaminés. Ces déchets sont soigneusement compactés, coulés dans des fûts bétonnés et sont ensuite stockés sur un site spécialement aménagé à la Hague.

Le volume des effluents liquides rejetés est de quelques milliers de m³ par an contenant de 5 à 10 Curies d'émetteurs β , γ et 1 500 Curies de tritium. Ces rejets dans un fleuve tel que le Rhin donneront des concentrations en émetteurs β , γ inférieures à 1 % des normes établies par la Santé Publique et à 1/50 000 des normes concernant le tritium.

Quant aux déchets enfermés dans les fûts de béton ils représentent un volume annuel de 200 m³. Rappelons pour mémoire que le volume annuel de cendres d'une centrale au charbon de même puissance avoisine 100 000 m³.

Pour apprécier l'effet de ces rejets, il convient de noter qu'ils s'insèrent dans une ambiance radioactive que l'humanité supporte depuis toujours. Rappelons brièvement la diversité des sources naturelles :

- le rayonnement cosmique, dose moyenne de 30 à 50 mrem/an ;
- le rayonnement de l'écorce terrestre, dû à la présence de nombreux corps radioactifs comme le radium, le potassium 40, le carbone 14..., qui entraîne une dose reçue de l'ordre de 50 mrem par an, variable suivant la région considérée : par exemple, les sols granitiques de Bretagne et d'Auvergne occasionnent une dose de 150 mrem par an alors que les habitants du Bassin Parisien ou de Champagne ne reçoivent que 30 à 50 mrem ;
- enfin, l'atmosphère contient divers corps radioactifs tel que le radon.

Les aliments que nous consommons introduisent dans l'organisme une certaine quantité de ces corps radioactifs qui provoquent une irradiation interne de l'ordre de

25 mrem par an. Face à tout cela, la part que peuvent prendre les rejets d'une centrale de 1 000 MWe pour un individu vivant à proximité de la centrale reste largement inférieure à 1 mrem/an.

Pour terminer avec les rejets radioactifs, notons qu'un MWj thermique a nécessité la fission d'1 g de métal lourd. Une centrale de 1 000 MWe, soit 3 030 MW thermique, a produit en 1 an (~ 290 jours de marche à pleine puissance) moins d'une tonne de produits de fission. Le combustible déchargé contenant de l'uranium, du plutonium et des produits de fission est stocké quelques mois sur le site de la centrale, et perd ainsi 98 % de son activité, puis transporté et traité à l'usine de la Hague. L'uranium et le plutonium seront utilisés de nouveau comme combustibles et les produits de fission stockés sous surveillance. Une méthode de vitrification de ces produits a été mise au point. Les effluents servant au retraitement sont rejetés à la mer et encore une fois la radioactivité additionnelle apportée à la radioactivité naturelle de l'océan est quasiment nulle.

Ainsi, en fonctionnement normal, les rejets radioactifs restent infimes par rapport à la radioactivité ambiante. Un estivant de la région parisienne qui séjourne en Auvergne ou en Bretagne quelques semaines reçoit une dose supplémentaire supérieure au supplément que reçoit, en un an, un individu vivant à proximité d'une centrale nucléaire.

La sûreté

La sûreté de la centrale s'exerce dans deux directions complémentaires :

- la première met en œuvre tout un dispositif permanent de surveillance qui consiste en de nombreux systèmes d'instrumentation à tous les niveaux permettant de détecter avec rapidité toute anomalie dans le fonctionnement normal de l'installation ;
- la deuxième vise à limiter les conséquences d'un accident, si celui-ci parvenait malgré tout à se produire, en mettant en œuvre les dispositifs de sécurité adéquats.

Si la mise en œuvre des différentes approches de la sûreté évoquées ci-dessus revient au constructeur et à EDF, un contrôle rigoureux et indépendant a été instauré par la législation qui a précisé les procédures à suivre.

Bien avant l'obtention de l'autorisation de création et au niveau de l'avant-projet de la centrale, des études approfondies de sûreté conduisent à l'établissement d'un rapport appelé « Rapport préliminaire de sûreté » qui consiste en une analyse minu-

tieuse et détaillée de toutes les séquences d'incidents et d'accidents et du fonctionnement des dispositifs de sûreté. Ce rapport, établi conjointement par le constructeur et Électricité de France, est présenté au Ministère chargé de l'Industrie. Celui-ci saisit le Service Central de Sûreté des Installations Nucléaires (SCSIN).

Ce Service et la Direction du Gaz et de l'Électricité informent conjointement maints Ministères : Intérieur, Aménagement du Territoire, Équipement, Affaires Culturelles, Environnement, Agriculture, Transports, Santé Publique. Une enquête publique a lieu. Un groupe permanent d'experts auprès du SCSIN est consulté par deux fois : lors de la demande d'autorisation et avant mise en exploitation. C'est ce groupe permanent qui examine le volumineux Rapport préliminaire de sûreté et émet des conclusions. Ces conclusions, et d'autres avis (du Service Central de protection contre les rayonnements ionisants du Ministère de la Santé publique...) permettent au SCSIN et à la Direction du Gaz et de l'Électricité d'élaborer un projet de décret.

La Commission interministérielle des installations nucléaires de base a alors un rôle fondamental puisqu'elle groupe experts nucléaires et représentants de tous les Ministères et qu'elle a reçu et étudié, et le rapport de sûreté et les avis émis au cours de l'enquête publique. C'est bien à la suite des conclusions de cette Commission que la construction de la Centrale peut être autorisée.

Le décret d'autorisation, qui requiert l'avis conforme du Ministre de la Santé, est pris en Conseil des Ministres. Il fixe les caractéristiques de l'installation et les prescriptions d'exploitation.

Le contrôle est loin de n'être effectué qu'*a priori*. Au Rapport préliminaire de sûreté est substitué un rapport dit provisoire, 6 mois avant le premier chargement du réacteur, puis un rapport définitif avant mise en exploitation. En cours de fonctionnement, de plus, une surveillance est effectuée par installations nucléaires de base.

Cet exposé succinct des procédures nucléaires montrent la diversité des organismes concernés et des contrôles effectués.

Les études et essais poursuivis dans le domaine de la sûreté dénotent de cet esprit d'exigence qui apparaît dans les procédures mises au point et ont pour but d'agir d'une part au niveau de la conception afin de diminuer plus encore les probabilités de défaillance et d'autre part d'améliorer le fonctionnement des dispositifs de sécurité.

Conclusion

L'analyse précédente montre d'une part, la nécessité du recours au nucléaire pour limiter l'accroissement de demande de combustibles fossiles importés, d'autre part les possibilités réelles qu'offre ce recours. Le stade industriel de la réalisation de

centrales nucléaires est certainement atteint, les conditions de réalisation de ce programme sont établies avec un ensemble de précautions extrêmes rendant le risque plus faible que jamais atteint, et l'impact sur l'environnement aussi négligeable que

possible. Ceci ne signifie pas pour autant que l'effort de développement ne soit pas poursuivi afin d'améliorer encore la fiabilité des matériels.

Annexe : bilan énergétique d'une centrale PWR de 1 000 MWe

Consommation d'énergie pour la production du combustible nucléaire

Le combustible qui alimente les centrales à eau pressurisée (mis à part la 1^{re} charge) est de l'uranium enrichi à 3,3 % en uranium 235. Pour produire ce combustible il faut de l'uranium naturel qui contient 0,7 % d'uranium 235 et des usines de séparation isotopique qui enrichissent cet uranium naturel de 0,7 % à 3,3 %. Que coûte en kWh la production d'un kg de ce combustible? Il faut de l'énergie pour extraire l'uranium naturel, pour le transformer en hexafluorure UF_6 et pour l'enrichir. Pour produire 1 kg d'uranium à 3,3 % il faut en gros 6,7 kg d'uranium naturel et 4,4 unités de travail de séparation isotopique (UTS). La production d'un kg d'uranium consomme 36 kWh; sa transformation en UF_6 , 8 kWh. L'enrichissement consomme 2 400 kWh/UTS. L'énergie nécessaire est donc de 10 855 kWh.

Une fois ce kg de combustible irradié, c'est-à-dire quand il a fourni son énergie,

il faut le retraiter; la consommation d'énergie est de 40 kWh au retraitement. L'énergie dépensée au total est donc de 10 895 kWh. Quelle est l'énergie qui a été fournie par ce kg de combustible? 33 MWj thermique ou 250 000 kWh. L'énergie nécessaire à produire ce combustible représente donc $10\ 895/250\ 000 \approx 4,4\ %$ de l'énergie qu'il a fournie.

Consommation d'énergie pour l'équipement d'une centrale nucléaire

Cette consommation se décompose en deux postes : le premier relatif à la construction de la centrale, le second relatif à la première charge de combustible.

Construction de la centrale

Une étude de l'INSEE sur la part de l'énergie incorporée dans les différents produits de l'industrie montrent que le coût d'équipement d'un kWe nucléaire se compose d'une quantité d'énergie équivalente à 425 kg de fuel, compte tenu de l'ensemble des composants directs et indirects de la centrale nucléaire : bâtiments et T.P., gros

matériels d'équipement, construction électrique, etc... Ceci représente donc 1 800 kWh par kW électrique.

Consommation énergétique de la première charge

L'énergie consommée par la production de la première charge de la centrale est plus faible que celle des recharges calculées précédemment, le combustible étant moins enrichi. Un calcul analogue à celui déjà fait, tenant compte de cette différence, conduit à une consommation de 8 000 kWh pour 1 kg de combustible première charge. Le premier cœur d'une centrale contenant 80 tonnes de combustible, l'énergie consommée est de $80 \times 10^3 \times 8\ 000 = 0,65$ milliard de kWh.

L'énergie nécessaire pour l'équipement d'une centrale de 1 000 MWe est donc de :

- 1,8 milliard de kWh pour la construction,
- 0,65 milliard de kWh pour la première charge,
- soit au total de l'ordre de 2,5 milliards de kWh, c'est-à-dire 2 500 heures de fonctionnement de la centrale.