

1115
**SOCIÉTÉ DES ÉLECTRICIENS
DES ÉLECTRONICIENS
ET DES RADIOÉLECTRICIENS
(S.E.E.)**

10, av. Pierre Larousse - 92240 MALAKOFF

CEA-CONF--3355

UNF FR7602025

INIS

Congrès national de la S.E.E.: évolution du problème de
l'énergie dans le monde. Conséquences sur la production
et l'utilisation d'énergie électrique.
Biarritz, France, 30 septembre-4 octobre 1975

7

LES DIVERSES FILIERES DANS LE MONDE

par M. C. PIERRE (C.E.A.)

LES DIVERSES FILIERES DANS LE MONDE

par M.

C. PIERRE

Chef du Département des Programmes (C.E.A.)

RESUME

Si les filières imaginables se comptent par centaines, moins d'une dizaine ont effectivement contribué à la production d'énergie et parmi elles la filière des LWR (réacteurs refroidis et modérés à l'eau ordinaire), représente les 3/4 de la puissance installée et une plus grande proportion encore des centrales en commande. Mais cette suprématie écrasante ne peut être définitive. Les problèmes d'approvisionnement en matière fissile imposeront sans doute le recours massif aux réacteurs rapides, réacteurs surrégénérateurs qui produisent plus de matière fissile qu'ils n'en consomment. Grâce à leurs caractéristiques particulières, les réacteurs à haute température devraient également prendre une place. Ces trois filières ont d'ailleurs l'avantage d'être en grande partie complémentaires.

THE VARIOUS LINES FOLLOWED IN THE WORLD

by M.

C. PIERRE

Programme Department Chief (C.E.A.)

ABSTRACT

If the imaginable lines can be counted in hundreds, at least ten of them have effectively contributed to the production of energy and among them the LWR line (reactors cooled and moderated with ordinary water) represent 3/4 of the installed power and an even greater proportion of orders for nuclear power stations. The problems of fissile material supply will undoubtedly make it imperative to have massive recourse to fast reactors, superregenerating reactors that produce more fissile material than they consume. Thanks to their special characteristics, high temperature reactors should also play a part. These three lines have, moreover, the advantage of being to a great extent complementary.

DIE VERSCHIEDENEN REAKTOR-BAUREIHEN DER WELT

VON

C. PIERRE

Leiter der Abteilung «Programme» des Kommissariats für Atomenergie

ZUSAMMENFASSUNG

Zu den denkbaren Reaktor-Baureihen gehören einige hundert, jedoch haben weniger als ein Dutzend echt zur Energie-Erzeugung beigetragen. Hierunter belgen LWR (mit gewöhnlichem Wasser gekühlte Reaktoren) 3/4 der installierten Leistung. Unter den bestellten Kernkraftwerken ist dieser Anteil noch höher. Diese erdrückende Vorherrschaft kann nicht endgültig andauern. Die Probleme der Brennstoffversorgung werden ohne Zweifel den massiven Rückgriff auf schnelle Reaktoren über kurz oder lang erzwingen, d. h. es werden schnelle Brüter erforderlich, die mehr Spaltmaterial erzeugen, als sie verbrauchen. Wegen ihrer besonderen Eigenschaften dürften die Hochtemperaturreaktoren ebenfalls einen Platz belegen. Diese drei Baureihen haben im übrigen den Vorteil, sich grösstenteils gegenseitig zu vervollständigen.

LAS DISTINTAS FAMILIAS DE REACTORES EN EL MUNDO

por

C. PIERRE

*Jefe del Departamento de Programas de la Junta Francesa
de Energía Nuclear (Commissariat à l'Énergie Atomique)*

RESUMEN

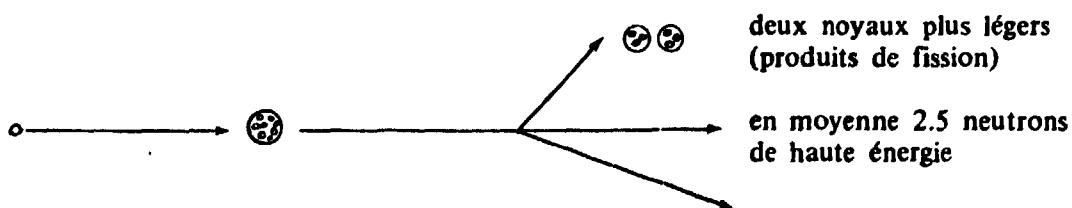
Si las familias de reactores imaginables pueden ser evaluadas a varios cientos, no es menos cierto que menos de un centenar han contribuido realmente a la producción de energía y, entre las mismas, la familia de los LWR (reactores enfriados y moderados mediante agua ordinaria) representa las tres cuartas partes de la potencia instalada y una mayor proporción aún si se tienen en cuenta las centrales en construcción o encargadas. En cambio, esta supremacía aplastante no puede ser definitiva. Los problemas de aprovisionamiento en cuanto a materias físi les, habrán de imponer sin duda el recurso intensivo a los reactores de neutrones rápidos, reactores regeneradores que, en realidad, producen una mayor cantidad de materia que la consumida para su funcionamiento. También deberían abrirse paso los reactores que operan con temperaturas elevadas, debido a sus características particulares. Estas tres familias de reactores presentan, además, la ventaja de ser complementarias en gran parte.

LES DIVERSES FILIERES DANS LE MONDE

Après avoir évoqué la grande variété des dispositifs qui ont été envisagés ou essayés pour récupérer l'énergie de fission, on indiquera le poids actuel de chacune des solutions retenues. Mais la situation d'aujourd'hui, c'est aussi le bilan des commandes passées et des programmes décidés, c'est enfin l'état des recherches en cours, qui, avec l'évolution pressentie sur les différents marchés, permet d'esquisser l'avenir.

1 - LES FILIERES NUCLEAIRES

1.1.1 La découverte de la fission de certains noyaux a rendu possible la production d'énergie d'origine nucléaire. Le principe en est rappelé sur le schéma suivant :



Les neutrons de basse énergie (dits neutrons thermiques car leur énergie est comparable à celle que l'agitation thermique confère aux molécules d'un gaz), ont une plus grande probabilité de provoquer une fission ; aussi cherche-t-on généralement à ralentir les neutrons issus de la fission.

1.1.2 Un réacteur nucléaire est donc la combinaison de 3 éléments :

- 1 corps fissile,
- 1 modérateur si l'on veut utiliser des neutrons de basse énergie (corps de faible masse atomique et évidemment absorbant peu les neutrons),
- 1 fluide caloporteur pour évacuer la chaleur produite.

Quel est l'éventail des choix possibles :

- pour le caloporteur : eau ordinaire, eau lourde, gaz (CO_2 ou He), métal ou sel fondu, liquide organique,
- pour le modérateur : hydrogène, deutérium, béryllium carbone (ou aucun si l'on choisit d'opérer avec des neutrons rapides),
- pour le corps fissile (on dit plus couramment le combustible) le problème se complique, puisqu'il faut distinguer :

- sa nature : U²³⁵ - Pu²³⁹ - U²³³
- son état physique : solide (métal - oxyde - carbure) fondu - dissout - suspension.

On a donc la possibilité de $5 \times 5 \times 3 \times 4 = 300$ types de réacteurs différents, et, effectivement, aux premiers âges de l'énergie nucléaire, les imaginations se sont donné libre cours et de nombreux projets ont vu le jour, bon nombre ayant donné lieu à la construction d'installations expérimentales ayant connu plus ou moins de succès.

1.2 La diversité des solutions théoriques est grande : essayons de revenir à des considérations pratiques.

1.2.1 Tout d'abord un seul corps fissile existe à l'état naturel : l'uranium 235 qui constitue 0,7 % de l'uranium naturel. Le plutonium est le résultat de l'absorption d'un neutron par l'uranium 238, l'uranium 233 est issu de la même manière du thorium. Donc l'emploi de Pu ou d'U 233 suppose l'existence de réacteurs nucléaires pour les produire (ajoutons que ce sont des produits délicats à manipuler, car très actifs). De plus U⁵, Pu, U³ sont substituables l'un à l'autre (avec, certes, des rendements différents).

Au plan des principes, la distinction entre les différentes variétés fissiles n'est donc pas essentielle.

1.2.2 Quant à l'état physique du combustible, les variantes «dissout ou en suspension», représentent une curiosité historique sans grand espoir pratique. L'utilisation de combustible fondu paraît possible, le combustible est alors en même temps le caloporteur. Cette filière comporte des avantages potentiels et donne lieu à des travaux exploratoires.

On peut donc, pour s'en tenir à l'examen des solutions notablement développées, se limiter aux filières utilisant un combustible solide, leur variété provenant seulement des diverses possibilités pratiques de combinaison des caloporteurs et des modérateurs.

1.2.3 A ce stade, un cas est encore singulier, c'est celui où l'on ne veut pas ralentir les neutrons ; on se passera donc de modérateur mais cela limite le choix des caloporteurs puisque ceux qui sont aussi des modérateurs devront être éliminés ; il ne reste donc que deux possibilités, utiliser un gaz ou un corps non modérateur fondu. (En pratique le gaz est l'hélium, le corps fondu, le sodium).

1.2.4 Il faut noter enfin que le béryllium, bien qu'excellent modérateur, n'a eu que des applications exceptionnelles (réacteurs spatiaux), car ce n'est pas un corps courant et sa manipulation n'est pas sans danger (l'oxyde de béryllium ou glucine étant toxique), et que l'on a pratiquement renoncé à l'emploi de liquides organiques comme modérateur et caloporteur. Plusieurs installations expérimentales ont fonctionné avec ce type de fluide dont l'avantage essentiel est une très basse tension de vapeur même à haute température, mais les inconvénients (risques d'inflammation et dépôts), s'en sont révélés majeurs.

1.3.1 Dans ces conditions, en dehors des solutions déjà mentionnées au passage (réacteurs rapides, et, accessoirement réacteurs à sels fondus), les principales filières sont décrites dans le tableau ci-dessous où l'on a mentionné les types de réacteurs existants et les pays qui ont mis au point les techniques correspondantes.

CALOPORTEUR		MODERATEUR		
		Hydrogène	Deutérium	Graphite
CALOPORTEUR	Eau ordinaire	BWR (USA, RFA, Suède, URSS) PWR (USA, RFA, URSS, FRANCE)	HWBLWR* (Canada) SGHWR (GB)	GPWR* (USA, URSS) RBMK* (URSS)
	Eau lourde		BHWR* (Canada) PHWR* (Canada RFA)	
	Gaz		HWGCR* (France, RFA, Tchéc.)	UNGG* (France) MAGNOX* (GB) AGR (GB) HTR (USA - RFA)

1.3.2 Nous avons souligné que l'uranium 235 était le seul corps fissile naturel ; il faut souligner que seuls certains types de réacteurs peuvent utiliser l'uranium sous sa forme naturelle (99,3 % d'U 238 - 0,7 % d'U 235), nous les indiquons dans le tableau par un astérisque (d'ailleurs, même pour ces réacteurs, l'utilisation d'uranium faiblement enrichi, 0,9 % par exemple permettrait d'améliorer le rendement). Les réacteurs électrogènes modérés à l'eau légère emploient de l'uranium enrichi entre 2 % et 4 %.

2 - LE BILAN EN FIN 1974

2.0 Après avoir souligné la diversité des filières possibles, nous avons restreint le choix au raisonnable : il est temps maintenant de regarder le bilan réel des puissances installées au 31.12.1974. On ne tient compte dans les tableaux suivants, que des puissances électriques, c'est-à-dire qu'on élimine toutes autres applications, essentiellement aujourd'hui, la propulsion navale nucléaire.

2.1 Bilan quantitatif

- Bilan par filière au 31.12.74

CALOPORTEUR		MODERATEUR		
		Hydrogène	Deutérium (D ₂ O)	Graphite
CALOPORTEUR	Eau ordinaire	76,2 %	0,5 %	3,8 %
	Eau lourde		4,6 %	
	Gaz		0,3 %	13,4 %
Réacteurs rapides (refroidis au sodium liquide)			1,3 %	

- Bilan par type : le détail en est le suivant (réacteurs en fonctionnement au 31.12.74).

PWR	54 unités	13 pays	31.800 MWe inst.	44,3 %
BWR	43 unités	10 pays	22.900 MWe "	31,9 %
UNGG	36 unités	5 pays	9.200 MWe "	12,8 %
MAGNOX				
AGR	1 unité	1 pays	40 MWe "	0,06 %
HTR	2 unités	2 pays	350 MWe "	0,5 %
PHWR	9 unités	5 pays	3.100 MWe "	4,6 %
BHWR	1 unité	1 pays	25 MWe "	0,03 %
HWBLWR	2 unités	2 pays	360 MWe "	0,5 %
HWGCR	2 unités	2 pays	230 MWe "	0,3 %
GPWR	9 unités	2 pays	1.400 MWe "	2,0 %
RBMK	4 unités	1 pays	1.300 MWe "	1,8 %
Réacteurs rapides	7 unités	5 pays	940 MWe "	1,3 %
Total	170 unités	19 pays	71.800 MWe "	

2.2 Bilan qualitatif

Il est nécessaire d'en évoquer ici même sommairement deux aspects, qui donnent lieu aujourd'hui à bien des commentaires.

2.2.1 Sans entrer dans des considérations très poussées, quelques données économiques peuvent éclairer le débat.

La comparaison des coûts du kWh, à peu près équilibrée entre nucléaire et fuel jusqu'en 1973, a basculé depuis lors en faveur du nucléaire.

Coûts en centimes/kWh

	Nucléaire	Thermique classique
Début 1973	4,5	4,8
Avril 1975	6,05	10,8

Pour poser correctement les problèmes, il est utile de savoir comment se décomposent ces coûts (en centimes/kWh) :

	Nucléaire (PWR)	Thermique
Exploitation	1,18	1,10
Combustible	1,72	7,85
Investissement	3,15	1,85

L'intérêt du nucléaire provient donc de son faible coût de combustible. Pour un réacteur à eau ordinaire, ce coût se décompose de la manière suivante :

- Fabrication 0,32
- Enrichissement 0,62
- Minerais 0,71

et on admet que le coût du retraitement est compensé par la valeur de l'U 235 et du plutonium que l'on récupère.

Notons ainsi que la Consolidated Edison (USA) indique pour l'année 1974 les coûts suivants :

10⁻² \$ /kWh

	Thermique Bowline Point 600 MWe	Nucléaire Indian Point 2 870 MWe
Fonctionnement	0,15	0,16
Combustible	2,29	0,32
Investissement	0,90	1,00
Total	3,35	1,48

La marge est donc, aux conditions actuelles, considérable, et l'on voit mal comment elle pourrait être comblée, quelle que puisse être la tendance à la hausse sur certains produits ou service du secteur nucléaire.

2.2.2 Un autre domaine appelle des indications chiffrées : celui des disponibilités.

Dès qu'un réacteur nucléaire est arrêté, quelle qu'en soit la raison, une large publicité est faite à l'événement, ce qui a pu répandre des idées fausses. En réalité les réacteurs nucléaires jouissent d'une disponibilité tout à fait satisfaisante ainsi que l'indique le tableau ci-dessous où sont portées les disponibilités moyennes annuelles en 1973 et 1974 et les disponibilités cumulées en fin 1974 pour les réacteurs de plus de 150 MWe.

	Facteur de charge 1973	Facteur de charge 1974	Facteur de charge moyen cumulé	Nombre d'unités en service, fin 1974
PWR	59	59,8	54,8	29
BWR	61,1	49,6	52,6	21
UNGG MAGNOX	58,1	64,4	58,8	17
PHWR	60,6	60,6	56,4	6

On notera que les facteurs de charge moyens, cumulés depuis les premiers couplages, prennent en compte l'effet d'inévitables maladies de jeunesse. Ils ne sont donc pas à ce titre vraiment représentatifs de l'état de maturité des filières.

3 - L'EVOLUTION A COURT TERME

La présentation faite jusqu'ici est celle de la situation à la fin 1974. Elle s'inscrit dans une histoire encore courte mais déjà significative de l'énergie nucléaire.

3.1.1 Pour se limiter aux chiffres les plus globaux, le tableau ci-dessous donne l'évolution des puissances installées depuis 1960.

	1960	1965	1970	1971	1972	1973	1974
Puissance installée	1.399	8.356	23.123	29.112	38.781	53.094	71.820
Nombre d'unités	20	63	99	111	129	147	170
Nombre de pays concernés	5	10	15	16	17	17	19

C'est au cours des dernières années de cette croissance rapide, que les filières des réacteurs à eau ordinaire (LWR) se sont taillé la part du lion. A court terme, cette tendance ne peut que s'affirmer, d'autant que la France et la Grande-Bretagne, producteurs, initialement de filières à gaz y ont renoncé pour la suite de leur programme.

3.1.2 C'est ce qui apparaît sur les deux tableaux ci-dessous, l'un donnant la liste par filière, des divergences attendues en 1975 (où l'on note l'aboutissement du programme AGR lancé par la Grande-Bretagne à la fin des années 60).

AGR	2.500 MWe	12 %
PWR	9.200 MWe	47 %
BWR	6.100 MWe	30 %
RBMK	1.000 MWe	5 %
FBR	600 MWe	3 %
PHWR	700 MWe	3 %
Total	20.100 MWe (12 pays - 27 unités)	

l'autre récapitulant les puissances en construction ou en commande (en MWe - monde communiste exclu).

	76 - 79		80 - 84	
	MWe	%	MWe	%
PWR	58.100	60,2	86.600	60,0
BWR	30.800	31,9	47.800	33,1
AGR	3.700	3,8	—	—
HTR	—	—	5.100	3,5
D ₂ O (PHWR)	3.600	3,7	4.200	2,9
FBR	300	0,3	600	0,4
Total	96.500 (110 unités, 20 pays)		144.300 (142 unités, 14 pays)	

3.1.3 La France joue dans ces perspectives un rôle notable puisque le programme quantitatif décidé en 1974 et confirmé en 1975 est considérable : environ 50.000 MWe devraient être installés d'ici 1985. Sont prévues la mise en chantier de :

- 6 tranches de 900 à 1.000 MW en 1974
- 7 tranches de 900 à 1.000 MW en 1975
- 12.000 MWe au total en 1976 et 1977.

Ces centrales seront toutes du type uranium enrichi eau ordinaire.

Les premières commandes et les plus nombreuses ont été passées à FRAMATOME, filiale de Creusot Loire (51 %) et de Westinghouse (45 %) et titulaire depuis 1958 de la licence Westinghouse pour réacteurs à eau pressurisée. Frmatome a déjà réalisé la centrale de la SENA à Chooz (Ardennes), d'une puissance de 280 MWe en fonctionnement depuis 1970 et participé en Belgique à celle de TIHANGE, 870 MWe, qui a été couplée au réseau en Mars 1975 ; viendront ensuite les deux tranches de FESSENHEIM : mise en service industrielle en 76).

Dans un souci de diversification, EDF a traité au début de 1974 avec un autre fournisseur, SOGERCA filiale à 50 % d'Alstom, titulaire de la licence General Electric Co pour les réacteurs à eau bouillante.

3.1.4 On voit de quel formidable effet de série bénéficie la filière LWR, effet auquel s'ajoute la puissance financière et industrielle de ses deux principaux constructeurs Westinghouse et General Electric. Dans la gamme des utilisations actuelles, ces réacteurs paraissent par conséquent difficiles à détrôner.

3.2.1 Les jeux sont-ils donc définitivement faits ? La production d'énergie nucléaire est-elle réservée exclusivement aux réacteurs à eau ordinaire ? Il ne le semble pas, ce qui est d'ailleurs conforme au sens commun, puisqu'aucune technique, même dominante ne peut se prévaloir d'exclusivité, ni de pérennité.

3.2.2 Au plan purement technique tout d'abord, des limites technologiques sont pressenties, après que l'on soit passé en 10 ans des réacteurs de démonstration de quelques dizaines de MWe, à des centrales de quelques centaines de MWe, puis d'un millier ou plus.

L'eau en effet est un assez mauvais fluide caloporteur, du fait de sa faible température d'ébullition. Pour obtenir des rendements thermodynamiques convenables, il faut donc opérer sous des pressions élevées (150 atmosphères pour les réacteurs à eau pressurisée - PWR - 75 atmosphères pour les réacteurs à eau bouillante). Les hautes pressions des PWR obligent à utiliser des cuves en acier d'épaisseur spectaculaire : 20 à 25 cm ; nous atteignons les limites technologiques en matière de soudure. Par ailleurs, de tels composants (4 m de diamètre, 12 m de haut, poids total de plus de 300 t) ne peuvent être construits qu'en usine et posent des problèmes de transport. Il semble difficile de pouvoir aller à des tailles plus élevées malgré la tentation de rechercher un abaissement du coût d'investissement spécifique par augmentation des puissances. Les BWR sont moins gênés par ce problème car leur pression est inférieure et nécessite donc des cuves moins épaisses et surtout laissent espérer l'utilisation de caissons en béton précontraint. Mais leur puissance spécifique est moindre et donc à puissance égale, la taille augmente ; de plus, l'eau bout dans le cœur et ces deux facteurs rendent le contrôle beaucoup plus délicat.

3.2.3 Parallèlement, la taille des plus gros turbo-alternateurs est passée de 500 MW pour les machines de Tihange à 1.000 MW pour celles de Fessenheim et de Bugey, palier qu'il est déjà question de déborder avec des unités de 1.200 MW. D'autre part, les caractéristiques assez médiocres de la vapeur produite par une centrale à eau légère conduisent à des groupes turbo-alternateurs plus gros et qui tournent à 1.500 t/mn au lieu de 3.000. Les problèmes techniques ainsi posés ne sont peut-être pas moindres que ceux des chaudières nucléaires auxquelles ils sont associés. (Rappelons que la mise au point des différents paliers utilisés dans les centrales classiques a été aussi une opération délicate).

3.2.4 Tout ceci conduit à penser que les puissances unitaires réalisées aujourd'hui dans la filière à eau ordinaire, ne sauraient encore croître beaucoup et que ce n'est pas par ce biais qu'elles pourront maintenir leur suprématie. Au reste, cette poursuite de l'évolution vers les très hautes puissances, rendrait encore plus critiquée une autre de leurs limites, leur rendement thermodynamique médiocre qui réagit comme l'on sait sur les problèmes d'environnement.

3.3.1 Mais deux éléments surtout paraissent déterminants pour limiter dans l'espace ou dans le temps le recours aux réacteurs LWR:

3.3.2 L'un découle d'une sujétion politique qui pèse sur leur emploi : ils exigent de l'uranium enrichi. Or actuellement l'enrichissement de l'uranium est l'exclusivité de trois producteurs : les USA, l'URSS et le groupement international EURODIF (France, Espagne, Belgique, Italie avec le soutien de l'Iran), auxquels il faut ajouter URENCO (Allemagne, Pays-Bas, Grande-Bretagne). D'autres groupements pourraient s'y ajouter, mais leur nombre restera limité.

Pour les pays qui souhaitent éviter une dépendance énergétique trop étroite, mais qui ne disposent pas des ressources nécessaires pour se lancer dans l'enrichissement, la voie de l'uranium naturel peut donc rester attrayante bien que les données actuelles fassent ressortir un coût plus élevé. En effet, non seulement les réacteurs modérés au graphite ou à l'eau lourde conduisent à un investissement plus élevé, mais paradoxalement ils aboutissent aussi à un coût de combustible plus fort, l'avantage d'utiliser de l'uranium naturel étant plus qu'annihilé par l'obligation de retraiter des volumes beaucoup plus importants de combustible irradié.

3.3.3 L'autre enfin, devrait devenir prépondérant : la disponibilité en uranium, que les réacteurs à eau ordinaire utilisent assez mal, si bien qu'une pénétration progressive de l'énergie nucléaire reposant uniquement sur cette filière, aboutirait très vite, même avec des hypothèses de croissance très modestes à des besoins impressionnants en uranium naturel que l'on voit mal comment satisfaire à terme.

De ce point de vue, le recours à des filières à uranium naturel ne serait guère un allègement. Mais si aucune de ces filières ne peut garantir l'avenir, elles ont au moins l'avantage de le préparer, dans la mesure où elles produisent du plutonium valorisable dans les réacteurs à neutrons rapides dont il sera question ci-dessous.

4 - L'AVENIR A MOYEN ET LONG TERME

4.1 Si l'on ne veut donc pas que l'énergie nucléaire n'assure qu'une transition de quelques décennies entre les énergies classiques, et une énergie de remplacement... dont on ne voit pas ce qu'elle pourrait être, force est donc d'admettre que se feront progressivement une place sur le marché, des réacteurs permettant une utilisation très supérieure de l'uranium. Le cas idéal est évidemment celui des surrégénérateurs qui produisent plus de matière fissile qu'ils n'en consomment, et parmi ceux-ci, la seule filière qui ait atteint le stade industriel et qui paraisse à portée des réalisations économiques est la filière neutrons rapides utilisant le sodium liquide comme caloporteur (LMFBR). Par capture d'un neutron, l'uranium 238 y est transformé en plutonium 239 qui est lui-même un corps fissile et les caractéristiques du cœur peuvent être calculées de telle sorte qu'à la fission d'un noyau de plutonium corresponde la création de plus d'un noyau de plutonium (cette propriété permet de produire 50 à 80 fois plus d'énergie avec la même quantité d'uranium naturel). De plus, ils sont particulièrement bien appropriés à l'utilisation du plutonium (sous-produit fatal des réacteurs à neutrons thermiques). Les programmes connus aujourd'hui, aussi bien en Europe qu'aux USA (et en URSS), permettent d'espérer qu'au cours de la prochaine décennie seront réunis les éléments nécessaires à une percée massive de cette filière. A court terme, c'est l'espoir d'obtenir rapidement un coût de cycle du combustible favorable qui conditionnera ce succès (même si dans les premières années l'uranium naturel est encore relativement abondant et si l'industrie du plutonium n'est pas encore en régime) ; à long terme, c'est l'amélioration globale du taux de surrégénération (faisant intervenir les caractéristiques « en pile » et « hors pile ») qui sera décisif.

4.2 Parmi les autres filières, l'une d'entre elles, la filière dite à « haute température » devrait également se faire une place à moyen terme. Ses atouts sont en effet spécifiques.

Nous avons déjà signalé que les réacteurs à eau légère fonctionnaient à température assez basse (la température de sortie des PWR est d'environ 330 °C, celle des BWR de 290 °C), ce qui conduit à des rendements thermodynamiques peu élevés ; par ailleurs, cela leur interdit la fourniture de chaleur pour bon nombre d'emplois industriels. Il y a un créneau qui pourrait être avantageusement mis à profit par les HTR ou réacteurs à haute température.

Le modèle actuel fonctionne avec une température de sortie de 750 °C, mais le réacteur tout entier en matériaux réfractaires pourrait aisément monter plus haut et les limitations proviennent de problèmes de tenue des matériaux des circuits à des températures supérieures à 800 °C. Le rendement actuel de 40 % pourrait donc être augmenté, en même temps que s'ouvrirait l'éventail des applications industrielles vers la pétrochimie, la sidérurgie, ou plus tard vers la production d'hydrogène. Par ailleurs, ces réacteurs ont été étudiés pour

fonctionner avec un cycle de combustible basé sur l'uranium 233 et le thorium (l'uranium 233 est un corps fissile doté de propriétés neutroniques intéressantes, il est le résultat de la capture d'un neutron par le thorium), et le thorium est plus répandu que l'uranium ; le recours aux HTR améliorerait donc d'autant les ressources finales en matériaux fissiles. Il faut souligner que d'autres réacteurs peuvent utiliser ce cycle, mais les HTR sont les seuls réacteurs existants qui le fassent. (Aux USA, l'Amiral Rickover, père des sous-marins à propulsion nucléaire, est un propagandiste fervent des réacteurs modérés à l'eau légère et utilisant l'uranium 233 comme combustible, ces réacteurs pourraient même être surrégénérateurs).

4.3 Enfin on a surtout mis l'accent jusqu'ici sur l'emploi des réacteurs nucléaires pour produire de l'électricité ; or, la fission est productrice de chaleur. Mention a été faite d'applications possibles des hautes et très hautes températures. Mais c'est vers le bas de la gamme des températures que des changements peuvent intervenir rapidement dans les structures de production et aller jusqu'à une mutation profonde ; plus encore que le kWh nucléaire, la thermie nucléaire est devenue largement compétitive, non seulement à partir de grandes installations, mais à partir de centrales de petites tailles (jusqu'à 100 ou 200 MWthermiques, seuil évidemment dépendant des conditions locales et des taux d'utilisation). Du même coup, c'est l'énorme marché de la chaleur, industrielle, domestique ou tertiaire (plus de 60 Mtep en 1985), qui peut être attaqué par le nucléaire. Les voies peuvent être multiples, depuis la fourniture par les grands centres producteurs d'électricité d'une fraction faible de leur énergie sous forme de chaleur, en passant par la fourniture de chaleur par des centrales à dominante électrogène, mais plus proche des centres de consommation, jusqu'aux petites centrales à dominante calogène (calogène pure ou fournissant également de l'électricité de pointe). Rien ne dit que cette plus grande dispersion des installations nucléaires soit un obstacle ; on peut concevoir au contraire, à la lumière des débats actuels, qu'une collectivité accepte bien des installations sans rejets thermiques, de faible nuisance esthétique, et surtout résolvant ses problèmes propres. Les spécialistes de l'économie, de l'aménagement du territoire, et de l'écologie pourraient en somme y trouver leur compte !

5 - CONCLUSION

5.1 Après des années difficiles, marquées par des hésitations et des fluctuations sur les perspectives à long terme et des compétitions, et parfois des querelles techniques, le recours à l'énergie nucléaire s'impose aujourd'hui à l'évidence. Au plan économique, on voit mal comment sa compétitivité pourrait être remise en cause, dans une large gamme de taux de charge des installations. Au plan technique, la situation est bien décantée : pour les applications actuelles, la filière à eau ordinaire s'est imposée dans la plupart des grands pays industriels, et, l'effet de série jouant, sa position paraît très solide, même si, pour des raisons plus politiques qu'économiques ou techniques, les filières à uranium naturel se développent ou retrouvent une nouvelle vigueur. En même temps ces filières, grâce au plutonium produit, ouvrent la voie du futur, c'est-à-dire permettent la pénétration des réacteurs rapides surrégénérateurs, qui sont nécessaires si l'on veut éviter à terme une pénurie de matière fissile ; coïncidence heureuse, il y a en gros, concordance entre les délais nécessaires, d'une part, à la mise au point complète de la filière et, d'autre part, à la production de plutonium pour assurer les premières charges de ces réacteurs.

5.2 En même temps, devraient se développer les applications calogènes des réacteurs utilisant les techniques actuelles, et arriver à maturité les réacteurs à haute température.

5.3 Une telle esquisse de l'avenir proche est entièrement fondée sur des filières déjà en opération : il faut, en effet, dans ce domaine se méfier des vues futuristes. Le développement d'une filière nécessite des efforts et des dépenses considérables (le principe en est toujours simple, mais la mise en œuvre pose de nombreux problèmes technologiques), dont l'ordre de grandeur (on évoque parfois le chiffre de 10 milliards), incite à être conservateur. Mais à la fois parce que l'enjeu est considérable, et, parce que les techniques nucléaires n'ont guère, depuis leurs premiers balbutiements, qu'une trentaine d'années, il faut à l'inverse se garder d'imaginer l'évolution à son terme. Qui peut dire aujourd'hui l'avenir des réacteurs rapides à gaz ou des réacteurs à sels fondus ?

