

L'énergie d'origine nucléaire: ses perspectives d'avenir

par Rurik Krymm, James A. Lane et Ivan S. Jeloudev

Parmi les incertitudes, les doutes et les controverses qui marquent la situation de l'énergie en général et celle de l'énergie d'origine nucléaire en particulier, il est réconfortant de trouver quelques points qui recueillent l'assentiment général et peuvent nous aider à dégager les perspectives qui s'ouvrent à l'énergie nucléaire:

1. La demande mondiale d'énergie ne fera que croître, encore qu'il soit difficile de prévoir avec précision le rythme et les modalités de cet accroissement à l'échelon régional. Même si tout est mis en œuvre pour conserver l'énergie, il est probable que la consommation mondiale passera de quelque 6 milliards de tonnes d'équivalent de pétrole en 1977 à un chiffre compris entre 12 et 18 milliards à la fin du siècle.
2. La répartition très inégale des réserves de pétrole et de gaz, qui entrent pour les deux tiers environ dans les approvisionnements totaux en énergie et qui, en l'an 2000, représenteront encore la plus grande partie de la production d'énergie, fait que de nombreux pays sont de plus en plus tributaires des importations d'énergie.
3. Certes, de nouvelles découvertes de gisements d'hydrocarbures sont possibles et même probables, mais il n'en reste pas moins que ces combustibles continueront à occuper le premier rang sur la liste des ressources énergétiques en voie d'épuisement.

C'est sur cette toile de fond qu'il est possible d'envisager le rôle que peut jouer l'énergie nucléaire:

1. A moyen terme, l'énergie d'origine nucléaire peut remplacer le pétrole et le gaz dans la production d'électricité et permettre à de nombreux pays, qui n'ont ni pétrole ni gaz ni réserves de charbon, de s'affranchir de la servitude des importations.
2. A plus long terme, l'énergie d'origine nucléaire peut fournir une solution techniquement au point pour répondre à la demande globale d'énergie qui, au milieu du siècle prochain, pourrait être de l'ordre de 50 milliards en équivalent de pétrole.

Ces deux aspects sont intimement liés, étant donné que, pour s'imposer à longue échéance, l'énergie d'origine nucléaire est tributaire du développement progressif d'une vaste infrastructure industrielle pour la fabrication des équipements et pour le cycle du combustible. On se souviendra des efforts, du temps et des fonds qui ont été nécessaires pour passer des réacteurs de puissance expérimentaux à une production industrielle intensive et des 35 ans qui se sont écoulés entre la réalisation de la première pile à uranium et l'époque où les centrales nucléaires ont occupé, dans la production mondiale d'énergie, une place à peu près égale à celle des centrales hydroélectriques. C'est ce qui ressort fort bien d'une brève analyse de la situation, tant actuelle que prévue, de l'énergie d'origine nucléaire dans les pays industrialisés.

M. Krymm est Chef de la Section des études économiques de la Division de l'énergie d'origine nucléaire et des réacteurs; M. Lane est spécialiste des études de planification de l'énergie d'origine nucléaire et M. Jeloudev est Directeur général adjoint chargé du Département des opérations techniques.

L'ENERGIE D'ORIGINE NUCLEAIRE DANS LES PAYS INDUSTRIALISES

A la fin de mars 1977, la puissance des centrales nucléaires homologuées dans les pays industrialisés s'élevait à 95 GW(e), les Etats-Unis comptant pour 50% environ. Ce chiffre correspond à quelque 7% de la puissance électrique de ces pays, mais le taux annuel d'accroissement de l'énergie d'origine nucléaire a été de 28% au cours des cinq dernières années [1].

Les chiffres récents portés au tableau 1 sur la croissance de l'industrie nucléo-énergétique dans les pays de l'OCDE sont repris d'un mémoire présenté à la Conférence de Salzbourg par l'OCDE/AEN [2]. On a corrigé ces chiffres de manière à en exclure la Grèce et la Turquie et à y ajouter la République d'Afrique du Sud. Une prévision de l'AIEA pour l'URSS et la République démocratique allemande, fondée sur les données accessibles, est également donnée aux fins de comparaison. On constate que la puissance nucléaire des pays industrialisés à économie de marché pourra se situer entre 830 et 1650 GW(e) en l'an 2000. On peut rapprocher cette prévision d'une prévision des chiffres de 1350 à 1600 GW(e) prévus l'an dernier par l'OCDE/AEN et l'AIEA [3]. L'abaissement du premier chiffre est dû à l'incertitude qui règne actuellement parmi les responsables des plans nucléo-énergétiques.

L'ENERGIE D'ORIGINE NUCLEAIRE DANS LES PAYS EN VOIE DE DEVELOPPEMENT*

Si, pour atténuer les difficultés résultant de la situation de l'offre et de la demande d'énergie, de nombreux pays industrialisés devront prendre des mesures de conservation de l'énergie et réduire le taux de croissance de leur consommation, les pays en voie de développement pourront difficilement se permettre une telle attitude. Il leur est, en effet, indispensable d'accroître leur approvisionnement en énergie et lorsqu'il n'y a aucune source locale d'énergie, la seule solution possible consiste à s'équiper en nucléaire ou à employer du pétrole ou du charbon importé. Il n'est donc pas surprenant que de nombreux pays en voie de développement attendent avec impatience le moment où des centrales nucléaires pourront s'intégrer dans leur réseau.

Malgré ce grand intérêt, il n'en reste pas moins qu'en mars 1977, cinq pays en développement seulement étaient dotés de centrales nucléaires en service, dont la production nette s'élevait au total à 2000 MW(e) (2GW(e)). Ce chiffre ne représentait qu'environ 1% de la puissance électrique installée de tous les pays en voie de développement et environ 2% seulement de la puissance nucléaire mondiale. Cependant, dans ces pays et dans 11 autres pays en voie de développement et à Taïwan, des centrales nucléaires sont soit au stade des plans, soit déjà en chantier, et devraient entrer en service dès 1985, leur puissance totale atteignant 28 GW(e). Si les délais de construction de ces centrales sont tous respectés, cette tranche d'équipement permettra aux régions en développement de produire de l'électricité qui permettra d'économiser 43 millions de tonnes de pétrole par an [4].

D'après les prévisions de l'AIEA quant au développement à long terme de l'énergie d'origine nucléaire, la puissance nucléaire installée dans des pays en voie de développement à économie de marché devrait se situer entre 200 et 300 GW(e) en l'an 2000. La puissance nucléaire installée pourrait être de 80 à 120 GW(e) dans les pays en voie de développement membres du CAEM. Ces prévisions ne représentent que la moitié environ du marché potentiel des centrales nucléaires évalué par l'AIEA au début de 1974 [5].

* Par pays en voie de développement, il faut entendre les pays qui ont droit à recevoir une assistance technique de 1977 à 1981 au titre du PNUD.

Tableau 1: Prévisions relatives à l'augmentation de la production de l'énergie d'origine nucléaire pour les pays industrialisés

Région ou pays	1985	en GW(e)		
		1990	1995	2000
OCDE Europe	125–168	200–286	284–418	307–560
OCDE Amérique	141–172	215–309	305–514	370–810
OCDE Pacifique	27–49	52–85	92–158	152–270
Total OCDE	239–389	467–680	681–1090	829–1640
Moins Grèce et Turquie	293–388	465–676	674–1084	821–1628
Afrique du Sud	1–2	2–5	5–11	7–17
URSS et Rép. dém. allemande	41–69	82–121	143–226	210–340
Total pays industrialisés	335–459	549–802	822–1321	1038–1985

LE PARADOXE ET SES CAUSES

Que les objectifs nucléo-énergétiques se soient trouvés réduits, alors que le prix du pétrole a quintuplé, constitue un paradoxe qui appelle quelques explications.

Si nous laissons de côté certaines causes accidentelles, limitées dans le temps ou dans l'espace, telle la récession de 1974–1975 qui a entraîné presque partout une stagnation de la consommation d'énergie électrique et l'ajournement de la construction de nouvelles centrales, ou encore la découverte de gisements de pétrole et de gaz qui ont permis à des pays comme le Royaume-Uni et le Mexique de retarder leur expansion dans le domaine nucléaire, nous pouvons classer les principales causes de ce paradoxe en deux catégories:

1. Facteurs sociaux et politiques résultant d'une peur souvent irrationnelle des effets des centrales nucléaires et de leurs combustibles sur l'environnement et d'une inquiétude croissante quant à l'existence d'un lien possible entre l'utilisation de l'énergie nucléaire à des fins civiles et la prolifération des armes nucléaires.
2. Facteurs techniques et économiques qui ont entraîné des augmentations importantes des dépenses d'investissement et des coûts du combustible.

En ce qui concerne les dépenses d'investissement, les exigences en matière de normes de sûreté et de protection de l'environnement ont été portées à un degré qu'il était pratiquement impossible de prévoir pendant les premières années où l'énergie d'origine nucléaire a été utilisée à l'échelle industrielle.

Ce phénomène est particulièrement sensible aux Etats-Unis, où il a fallu pratiquement doubler le nombre de certains éléments importants (par exemple le béton, l'acier, la tuyauterie et les câbles) pour se conformer aux normes réglementaires. Pour la construction, le nombre d'heures d'ouvrier par kW(e) a augmenté proportionnellement. Vu la lenteur et la complexité croissante des travaux de construction des centrales nucléaires, les frais indirects ont augmenté encore plus que les frais directs. Il faut des bâtiments supplémentaires pour stocker et protéger les équipements et les matériaux de construction. Il faut, pour

chaque centrale, recourir pendant un temps plus long aux services d'environ deux fois plus d'ingénieurs et autres spécialistes pour diriger les travaux techniques et la construction.

L'assurance de la qualité et le contrôle de la qualité sont un autre domaine où les besoins se sont sensiblement accrus. Le nombre des normes applicables à l'étude et à la construction des centrales nucléaires aux Etats-Unis est passé d'environ 100 en 1970 à environ 1600 en 1976. Il ressort d'analyses de l'effet combiné des normes réglementaires que celles-ci ont eu pour effet de doubler les dépenses d'investissement réelles requises pour les centrales nucléaires.

En outre, avant 1970, les fabricants de réacteurs et les ingénieurs-architectes étaient prêts à encourir les risques financiers importants pour prendre pied sur un marché nouveau et des plus prometteurs. Or, il semblerait que de nombreux contrats à bas prix se soient traduits par des pertes financières considérables pour les adjudicataires. Les prix du pétrole ayant quadruplé en 1973, la situation de ces derniers est devenue beaucoup plus favorable et ils ont pu ajuster leurs prix à un niveau suffisant pour leur permettre de couvrir les risques commerciaux habituels.

Quant aux coûts du combustible nucléaire, les prix des concentrés d'uranium ont marqué une brusque augmentation qui, pour les livraisons immédiates, a même dépassé celle du pétrole, tandis que les coûts d'enrichissement triplaient pratiquement.

LES REACTEURS A EAU LEGERE: LEUR COMPETITIVITE ACTUELLE; LEUR AVENIR

Une discussion générale à ce sujet déborderait le cadre du présent article, mais les enseignements d'une réunion d'experts de pays avancés et de pays en développement, réunie en juin 1977 par l'AIEA pour faire le point de l'expérience récemment acquise en matière de dépenses d'investissements pour les centrales nucléaires et classiques, sont très précieux [6]. Il ressort de cette réunion que, même en faisant abstraction des coûts supplémentaires inhérents à toute réalisation nouvelle, les centrales nucléaires de 600 MW(e) auront beaucoup de difficultés à concurrencer les centrales au mazout, aux prix pratiqués actuellement pour ce combustible. Le tableau 2 fournit quelques exemples de frais de premier établissement et des coûts de production pour des centrales nucléaires et au mazout de 600 MW(e) et de 900 MWe. On voit que, pour les réacteurs à eau légère de 600 MW(e) la production revient à environ 2 mills de plus par kW que pour des centrales de même puissance alimentées au mazout. A 900 MW(e) toutefois, la tendance est inversée et les coûts de production des centrales nucléaires sont moins élevés, l'écart augmentant en fonction de la puissance des installations.

Il convient de souligner que des comparaisons économiques aussi généralisées sont assez fallacieuses car elles ne correspondent que rarement aux réalités de la situation. Ainsi, les données sur les dépenses d'investissements correspondent à un site hypothétique idéal, aux Etats-Unis, et ne tiennent pas compte d'éléments tels que la revision des prix en hausse, les taxes et impôts, la construction ou l'amélioration d'installations extérieures à la centrale (routes, ponts, ports, voies ferrées) ni de la formation et du logement des travailleurs qui construiront la centrale.

Si nous examinons maintenant les perspectives d'avenir, plusieurs considérations semblent devoir améliorer la position concurrentielle des centrales nucléaires.

1. En ce qui concerne les dépenses d'investissements, les normes applicables en matière de sûreté et de protection de l'environnement semblent avoir atteint un maximum, de sorte qu'une simplification des procédures d'octroi des permis pour des centrales nucléaires

Tableau 2: Coûts des centrales à réacteurs à eau légère et des centrales au mazout¹

	Réacteurs à eau légère		Centrales au mazout	
	600 MW(e)	900 MW(e)	600 MW(e)	900 MW(e)
Frais de premier établissement \$/kW	1150	910	540	510
Coûts de production, mills/kWh:				
Capital ²	24,2	19,2	11,4	10,8
Combustible	7,0	6,8	18,3 ³	18,3 ³
Exploitation et entretien	2,2	2,0	1,4	1,2
Total	33,4	28,0	31,1	30,3

¹ Tous les coûts sont exprimés en dollars des Etats-Unis, valeur constante au milieu de 1977.

² Installation 65%, charge annuelle 12%.

³ Fondé sur un coût du mazout à haute teneur en soufre de 11 dollars par baril.

normalisées permettra à ces dernières de réaliser, vu l'expérience acquise, des économies qui jusqu'ici restaient assez illusoires. Or, dans le cas des centrales au charbon, les dépenses pour la protection ne font au contraire qu'augmenter.

2. Pour ce qui est du coût du combustible nucléaire, une prospection intensive de l'uranium dans des zones vierges a permis de faire de nouvelles découvertes qui amèneront probablement une stabilité des prix qui est loin d'être assurée dans le cas du mazout.

PERSPECTIVES POUR LES REACTEURS DE POINTE

D'après les estimations actuelles, les ressources mondiales d'uranium naturel qui peuvent être produites à des coûts ne dépassant pas 30 dollars EU par livre de U_3O_8 (pouvoir d'achat de 1976) sont de l'ordre de 4 millions de tonnes [7], soit l'équivalent de 60 milliards de tonnes de pétrole si elles servent à alimenter des réacteurs à eau légère. Actuellement, l'équivalent en pétrole des ressources d'uranium est inférieur aux réserves de pétrole.

Si de nombreux experts pensent que ces estimations sont en-dessous de la réalité, vu que de très grandes régions du monde restent encore à prospector, une expansion nucléaire à l'échelle mondiale, entièrement fondée sur l'emploi de réacteurs à eau légère, resterait forcément limitée. C'est pourquoi on s'intéresse beaucoup aux réacteurs de pointe qui peuvent utiliser l'uranium (et le thorium) avec un meilleur rendement. Des études sur la stratégie de ces systèmes ont été récemment effectuées par un groupe de consultants sur les surgénérateurs thermiques réuni par l'Agence, afin de déterminer les ressources nécessaires pour différents types de réacteurs de pointe [8]. Le tableau 3 présente les quantités cumulées d'uranium naturel nécessaires jusqu'en 2050 pour les pays à économie de marché si l'on admet que les différents types de réacteurs de pointe ne seront mis en service à l'échelle industrielle qu'après 1995. Il ressort de ce tableau que seuls les réacteurs surgénérateurs rapides ou les réacteurs surgénérateurs au thorium liquide peuvent ramener la consommation cumulée d'uranium au niveau des ressources estimées de minerais à bas prix. Les études de stratégie sus-mentionnées donnent toute raison de poursuivre l'étude

Tableau 3: Besoins cumulés en uranium pour les pays à économie de marché¹

Type ou système de réacteur	Millions de tonnes d'uranium naturel	
	Faible croissance de l'industrie nucléaire	Forte croissance de l'industrie nucléaire
Eau légère — sans recyclage de Pu	38	60
Eau légère — recyclage de Pu	25	43
Eau légère — surgénérateur au thorium	23	44
Cycle du thorium CANDU	17	30
Surgénérateur rapide	10	15
Surgénérateur au thorium à combustible liquide	9	16
Combustible liquide + surgénérateur rapide	5	10

¹ Jusqu'en 2050.

des réacteurs de pointe. Le tableau 4 montre à quel point le monde, en dehors des Etats-Unis, est tributaire de la mise au point de réacteurs surgénérateurs rapides à métal liquide.

Les surgénérateurs au thorium liquide sont à l'étude aux Etats-Unis depuis plus de 25 ans, bien qu'à l'heure actuelle on ne consacre que relativement peu d'efforts à ces réacteurs. Cependant, un groupe de sociétés industrielles des Etats-Unis, dénommé "Groupe des sels fondus" a récemment fait une étude technique et économique des réacteurs à sels fondus et est parvenu à la conclusion qu'il est très probable que ces systèmes offrent la possibilité de produire de l'énergie d'origine nucléaire à l'échelle industrielle au début des années 1990 [9]. Etant donné que ces surgénérateurs ne peuvent servir à la prolifération des armes nucléaires et qu'ils présentent également des caractéristiques favorables du point de vue de la sûreté et de l'environnement, il est possible qu'ils suscitent un renouveau d'intérêt.

PREMIERES CONCLUSIONS

On a presque toujours tendance à évaluer les perspectives d'avenir de l'énergie d'origine nucléaire compte tenu de considérations de coûts; il ne faut toutefois pas oublier que le domaine énergétique tout entier a été marqué par un écart croissant entre les prix et les coûts de production.

Cette incohérence entre prix de vente et coûts de production a longtemps caractérisé l'industrie du pétrole, tant au niveau du brut qu'à celui des produits raffinés et a récemment commencé à s'étendre au charbon et à l'uranium.

Il est donc quelque peu illusoire de considérer les analyses économiques comme des guides sûrs pour faire des prévisions en matière d'énergie d'origine nucléaire, surtout si ces comparaisons s'étendent sur des périodes pendant lesquelles il est extrêmement douteux que les paramètres de base qui servent de données d'entrée restent valables.

Tableau 4: Projets de réacteurs surgénérateurs rapides à métal liquide en dehors des Etats-Unis

Nom	Pays	MW(th)	MW(e)	Date d'entrée en service
DFR	RU	60	14	1965
Rapsodie	France	40		1967
BOR-60	URSS	60	12	1970
BR-10	URSS	10		1973
BN-360	URSS	1000	350	1973
Phénix	France	567	250	1974
PFR	RU	600	250	1976
JOYO	Japon	100		1977
KNK-2	RFA	58	20	1977
BN-600	URSS	1470	600	1979
PEC	Italie	118		1979
SNR-300	RFA	736	312	1981
Super Phénix	France	2900	1200	1982
MONJU	Japon	714	300	1984
CFR	RU	3125	1320	1988-90
SNR-2	RFA	5000	2000	1988-90

Ainsi, des considérations qualitatives à court terme ou à long terme ont souvent plus de poids dans les options énergétiques que des évaluations monétaires des bénéfices et des coûts futurs.

Si certains de ces arguments qualitatifs, par exemple ceux qui ont trait aux effets sur l'environnement, ont pu tout récemment freiner le développement de l'énergie d'origine nucléaire, d'autres arguments font bien augurer l'avenir. Les plus importants sont les suivants:

1. L'énergie d'origine nucléaire dépend beaucoup plus des ressources humaines que des ressources naturelles. En fait, si elle se fonde sur un cycle de régénération efficace, elle devient pratiquement indépendante des matières premières.
2. Elle offre à de nombreux pays industriels et en voie de développement un moyen de les affranchir des importations d'énergie. On se souviendra à ce propos que chaque gigawatt nucléaire représente une économie d'environ 1,5 million de tonnes de pétrole par an et que les objectifs minimaux pour l'an 2000 supposent une économie de plus de la moitié de ce qu'est actuellement la production annuelle de pétrole dans le monde.

3. Elle peut fournir une assurance générale contre la pénurie d'énergie au-delà de la fin du siècle à condition que, dans l'intervalle, on ait établi une infrastructure industrielle assez large et un cycle de combustible approprié.

Il va sans dire que la nature, la portée et le rôle de cette infrastructure pourront varier d'un pays à l'autre selon, d'une part, leur degré de développement nucléaire, et d'autre part, leurs ressources naturelles en combustibles fossiles et fissiles.

Néanmoins, quelle que soit la diversité des situations nationales qui pourront se présenter, l'énergie d'origine nucléaire ne pourra contribuer pleinement à la production d'énergie mondiale que si un climat de confiance internationale dans des secteurs aussi critiques que celui de l'alimentation en combustible nucléaire et celui des garanties s'établit dans le monde entier.

Références

- [1] "Power Reactors in Member States", IAEA, mars 1977.
- [2] J. Miida et al., "Nuclear Power Programmes and Medium Term Projections in the OECD Area", IAEA-CN-36/492, mai 1977.
- [3] R. Krymm and G. Woite, "Estimates of Future Demand for Uranium and Nuclear Fuel Cycle Services", IAEA Bulletin 18, No. 5/6, automne 1976.
- [4] J.A. Lan et al., "Nuclear Power in Developing Countries", IAEA-CN-36/500, mai 1977.
- [5] "Market Survey for Nuclear Power in Developing Countries", 1974, Edition, IAEA, octobre 1974.
- [6] G. Woite, "Extrapolation of Capital Costs Experience from Industrialized to Developing Countries", à paraître en 1977.
- [7] W. Häussermann et al., "Demand and Supply Estimates for the Nuclear Fuel Cycle", IAEA-CN-36/493, mai 1977.
- [8] J.J. Went, "Status and Prospects of Thermal Breeders", IAEA-CN-36/302, mai 1977.
- [9] L.F.C. Reichle, "MSR (Pu Converters) and MSBRS in Commercial Nuclear Power Stations", IAEA-CN-36/424, mai 1977.