

Développement de l'énergie d'origine nucléaire et besoins en combustible, 1975-2000

par E. Goodman et R. Krymm*

Le présent article fait le point de prévisions récentes portant sur la capacité d'origine nucléaire qui devrait être installée dans le monde, d'ici la fin du siècle.

A partir d'une étude des marges d'incertitude qui entachent de telles prévisions, les auteurs ont déterminé un niveau probable et un niveau maximum en fonction desquels ils ont calculé les besoins en uranium et en services d'enrichissement afin de les comparer avec les sources d'approvisionnement existantes et prévues.

Indépendamment de ses conséquences économiques proches ou lointaines, la récente crise de l'énergie, qui a eu pour effet de quadrupler le prix du pétrole brut dans les principales régions exportatrices et, par voie de conséquence, de faire monter le prix des combustibles classiques, a brusquement rappelé au monde que les ressources d'énergie n'étaient pas illimitées. Malgré de nombreuses mises en garde, cette vérité première avait été quelque peu méconnue pendant ces vingt dernières années grisantes où la consommation d'énergie s'est développée de manière effrénée.

Les estimations relatives aux réserves de combustibles fossiles varient considérablement; elles se situent généralement entre $1,5 \times 10^{12}$ et $1,5 \times 10^{13}$ tonnes d'équivalent en charbon soit, pour utiliser une unité un plus commode, entre 40 et 400 Q ($Q = 10^{18}$ BTU = 250×10^{15} kcal), le charbon représentant de loin la plus grande part. La consommation annuelle du globe étant actuellement d'environ 0,28 Q, il semblerait à première vue que la question de l'épuisement des ressources ne se pose pas pour l'immédiat. Et cependant, même si le taux d'augmentation de la consommation d'énergie est ramené à 4% au lieu des 5% qu'il a atteint pendant les 20 dernières années, ces réserves seront épuisées en 50 ans si l'on retient le chiffre le plus faible de 40 Q, et en un siècle environ, si le chiffre de 400 Q est fondé. Il est donc indispensable de trouver de nouvelles formes d'énergie qui ne soient pas tributaires des combustibles fossiles, et l'énergie obtenue par fission nucléaire semble de loin la plus prometteuse.

Il serait spécieux de vouloir comparer à ces chiffres les quantités d'énergie que pourraient produire des réacteurs analogues à ceux qui sont actuellement en service, à partir d'uranium à bas prix extrait des réserves reconnues aujourd'hui, dont on sait qu'elles ne représentent que

* Cette étude a été établie à l'occasion du symposium tenu en Grèce du 19 au 23 mai par la Commission économique pour l'Europe, concernant le rôle de l'énergie électrique dans la satisfaction des besoins futurs en énergie et la coopération internationale en ce domaine.

de 1 à 3 Q. La géologie de l'uranium est relativement nouvelle et la prospection s'est limitée à des formations privilégiées situées dans quelques pays seulement. Pendant près de vingt ans, la recherche de nouveaux gisements a stagné, la demande étant très faible. Or, il semble ne faire doute que la reprise actuelle des prospections et leur extension à des régions du monde jusqu'à présent négligées accroîtront considérablement le volume des réserves reconnues. En outre, et cette perspective est peut-être encore plus importante, il est possible d'exploiter des minerais à faible teneur dont on avait presque fait fi par le passé. Etant donné que le coût de l'uranium ne représente qu'une partie infime du prix de revient de l'électricité d'origine nucléaire, on pourrait envisager d'utiliser de manière rentable des matières premières coûtant cinq fois le prix moyen actuel, sans élever de plus de 50% le prix de revient de l'électricité. Enfin, le perfectionnement de l'équipement nucléaire permettra peut-être d'obtenir, à partir d'une même quantité d'uranium, 10 à 60 fois plus d'énergie que n'en produisent les réacteurs industriels d'aujourd'hui. Si l'on tient compte de tous ces éléments, on constate que les réserves de combustible nucléaire sont du même ordre de grandeur que celles des combustibles fossiles si l'on utilise les mêmes types d'appareils qu'aujourd'hui et qu'elles peuvent leur être de dix à cent fois supérieures si l'on a recours à des surgénérateurs. Ainsi, les difficultés ne sont donc pas imputables aux réserves de combustible mais bien plutôt à des problèmes qui relèvent de la technique et du matériel et qui peuvent être résolus, ainsi que les réalisations des vingt dernières années nous en donnent la certitude.

Depuis la Conférence de Genève de 1955, vingt années se sont écoulées et des résultats remarquables ont été obtenus dans le domaine de l'énergie d'origine nucléaire. Pour simplifier, on peut dire que les dix premières années (1955-1965) ont été marquées par l'apparition de plusieurs systèmes intéressants de production d'énergie nucléaire qui ont permis de passer des prototypes aux centrales industrielles; pendant la deuxième période (1965-1975), les pays industrialisés ont très vite doté leurs réseaux de grandes centrales nucléaires, et quelques pays en voie de développement sont également parvenus à mettre en service de telles installations.

Quelques chiffres repris du **Tableau 1** permettent de montrer à quel point l'évolution a été rapide. En 1955, seuls deux pays au monde possédaient un réacteur, la puissance installée de ces installations étant au total de 7,4 MWe. En 1965, le nombre des réacteurs était passé à 66, répartis dans neuf pays et totalisant 7000 MWe. En 1975, on peut escompter que plus de 200 centrales, correspondant à une puissance installée de près de 92 000 MWe, seront exploitées et qu'en 1980, il y en aura 400 totalisant près de 250 000 MWe et réparties dans 26 pays.

TABLEAU 1: Evolution de la puissance installée d'origine nucléaire

	1955	1960	1965	1970	1975
Puissance installée d'origine nucléaire (en milliers de MWe)	0,007	0,13	7,1	20	92
Nombre de réacteurs de puissance	2	24	66	98	200
Nombre de pays dans lesquels fonctionnaient des réacteurs	2	5	9	14	19

LES PREVISIONS EN MATIERE D'ENERGIE NUCLEAIRE: LEURS LIMITES

AVANT LA CRISE DE L'ENERGIE DE 1973-1974

De 1945 à 1970, on avait quelque peu perdu de vue non seulement que les ressources en combustibles fossiles risquaient de s'épuiser mais encore que les prévisions relatives à l'énergie primaire et à l'électricité comportaient des incertitudes. Les extrapolations des tendances observées par le passé, complétées le cas échéant par des études de corrélation sur l'évolution probable du PNB et par des enquêtes sur la demande dans les divers secteurs, avaient fini par convaincre les spécialistes que la demande en énergie primaire continuerait

Vue du réacteur à eau lourde générateur de vapeur de Winfrith, Angleterre, montrant la surveillance des opérations d'alésage des tubes de force pendant un arrêt pour rechargement. Photo: UKAEA



de progresser sans perturbation à raison de 4 à 5% par an et que la consommation d'électricité connaîtrait un taux de croissance de 7 à 8% au moins jusqu'à la fin du siècle dans les pays ayant atteint leur plein développement industriel, des taux nettement plus élevés étant à prévoir dans certains pays se développant rapidement. Cette vue du monde reposait sur l'hypothèse rassurante que les prix de l'énergie demeureraient stables et suivraient tout juste la tendance générale à l'inflation, ou même, comme cela avait été le cas entre 1950 et 1970, évolueraient en fait plus lentement.

Dans cette parfaite harmonie entre les prévisions et la réalité, seule l'énergie d'origine nucléaire jetait une note discordante. Toutes les difficultés que connaît une industrie de premier plan à ses débuts: passage de fabrication de prototypes à la production de centrales rentables, améliorations constantes de la conception des centrales, problèmes de construction, difficultés d'approvisionnement en matières et en éléments indispensables, crédits de financement, questions de réglementation et attitude du législateur et du public entraînaient des retards et obligeaient à corriger les estimations de coûts, l'idée qu'on se faisait de la place future de l'énergie nucléaire dans l'économie dépendant de l'optimisme des experts et du moment où ces derniers établissaient leurs prévisions. Le meilleur moyen d'illustrer ces écarts est peut-être de reprendre succinctement les prévisions établies au cours de douze dernières années concernant la puissance nucléaire totale qui devrait être installée en 1980 aux Etats-Unis d'Amérique qui sont un des principaux pays producteur d'énergie d'origine nucléaire. Comme le montre le **Tableau 2**, non seulement les prévisions concernant la puissance installée en 1980 ont pratiquement varié de un à quatre entre 1962 et 1970, ce qui peut s'expliquer par les améliorations constantes de la conception des centrales et par les succès enregistrés dans le fonctionnement de toute une série de centrales mais, entre 1970 et 1974, elles ont diminué de 30% malgré la conjoncture difficile qu'a entraînée l'augmentation rapide du coût des combustibles fossiles.

TABLEAU 2: Variation des prévisions relatives à la puissance nucléaire installée aux Etats-Unis en 1980

	1962	1964	1966	1967	1970	1971	1972	1974	1975
Puissance installée probable en 1980 (en milliers de MWe)	40	75	95	145	150	151	132	102	[a]

[a] En cours de préparation.

REPERCUSSIONS DE LA CRISE DE L'ENERGIE

Qu'en moins de trois mois (décembre 1973 à février 1974) le prix du pétrole brut, qui est maintenant le combustible le plus utilisé au monde, ait quadruplé est un événement sans précédent dans l'histoire de l'énergie de l'après-guerre. Sans parler des bouleversements économiques et financiers qui risquent d'en résulter à court terme, les effets lointains qui se feront sentir sur la demande d'énergie primaire et d'électricité rendent plus incertaines que jamais les prévisions faites dans ce domaine.

Cette incertitude résulte essentiellement de deux inconnues: combien de temps le prix actuel se maintiendra-t-il et quelles seront ses conséquences sur la demande?

La première question, qui exigerait que l'on connaisse le degré de cohésion du cartel de l'OPEP, ne peut recevoir que des réponses hypothétiques. Selon toute probabilité, le coût actuel du brut léger en provenance des pays arabes, qui est de 10 dollars le baril, ne pourra

être dévalué par l'inflation que dans une faible mesure. Les spécialistes estiment actuellement à 6 ou 9 dollars (en prix constant de 1973) le prix le plus bas qu'il soit possible ou même souhaitable d'atteindre. En d'autres termes, il est universellement admis que l'époque de l'énergie à bon marché est désormais révolue.

Que le prix du pétrole demeure constant ou diminue légèrement, il est de toute façon extrêmement difficile de dire quelles seront les conséquences de cette situation sur la demande des différents types d'énergie. Les coefficients d'élasticité de la demande applicables aux divers combustibles n'ont été évalués que pour des variations de prix relativement faibles et ne peuvent guère servir à évaluer les conséquences des bouleversements actuels.

Pour connaître la demande d'électricité, il faut évidemment déterminer quelle est sa sensibilité aux fluctuations des prix. En outre, il convient de tenir compte de l'effet de compensation qui pourrait se produire si certains usagers d'énergie primaire décidaient de recourir à l'électricité pour remplacer le pétrole, ainsi que de changements qui pourraient intervenir dans la forme de la courbe de la demande de charge.

On aurait pu penser que si les prévisions concernant la demande d'énergie classique étaient brusquement devenues très incertaines, celles qui portaient sur l'énergie nucléaire auraient dû gagner en rigueur. D'un point de vue strictement économique, la situation complexe et variable de la fin des années soixante et du début des années soixante-dix devenait soudain très claire. Même dans les hypothèses les plus défavorables où le prix du minerai d'uranium aurait triplé et le coût des opérations d'enrichissement aurait doublé, il ne semblait pas que les coûts correspondant au cycle du combustible nucléaire, exprimés en dollars constants de 1974, dussent dépasser 4 millions le kWh contre 16 millions le kWh pour le pétrole, soit une économie annuelle de 70 dollars par kWh avec un facteur de charge de 65%. En trois ou quatre ans, de telles économies de combustible permettraient d'amortir les dépenses d'investissement supplémentaires qu'exige une centrale nucléaire de 1000 MW par rapport à une centrale de même puissance alimentée au pétrole.

Il aurait donc semblé que, mis à part les pays possédant d'importantes réserves hydrauliques ou charbonnières inexploitées, on aurait pu poser en hypothèse, pour les prévisions concernant l'énergie nucléaire, qu'à partir de 1980, toutes les nouvelles centrales assurant la charge de base de grands réseaux interconnectés auraient dû être des centrales nucléaires qu'auraient complétées quelques centrales hydroélectriques de stockage et des centrales à turbine à gaz, jusqu'à ce qu'elles fournissent environ 60% du total de la puissance installée et qu'elles produisent plus de 80% de l'énergie totale.

Il est toutefois vite apparu que les prévisions théoriques fondées sur des comparaisons purement économiques se heurtaient à divers obstacles que l'on peut classer en deux grandes catégories:

- a) ceux qui résultent de l'application généralisée d'une nouvelle technique exigeant des investissements importants et une infrastructure ultra moderne, dont il a déjà été question plus haut, ont été accentués par l'accélération des programmes, dont l'application était déjà très rapide. Ces difficultés ont particulièrement touché le financement qui a exigé des dépenses importantes au moment même où l'inflation et les taux d'intérêt avaient atteint leur maximum. Les projets nucléo-énergétiques entraînent en effet des dépenses particulièrement élevées pendant la période de lancement. En un sens, ces dépenses ne portent pas seulement sur des biens d'établissement mais encore sur de l'énergie car dans les centrales nucléaires et dans les installations connexes produisant le combustible, les investissements en énergie sont au départ plus importants que ce n'est le cas pour les centrales classiques.
- b) ceux qui sont liés aux risques inhérents au fonctionnement des centrales nucléaires et à la maîtrise du cycle des combustibles. Ces problèmes, contrairement à ceux de la

première catégorie, sont propres aux opérations nucléaires et n'ont pas d'équivalent dans d'autres techniques. Il faut donc leur trouver des solutions originales. Les risques d'accidents peu importants sont plus nombreux dans les centrales à combustible classique mais le cycle du combustible nucléaire comporte davantage de stades présentant un danger latent. Cependant, les problèmes de sécurité que soulèvent la construction et le fonctionnement des centrales nucléaires et la surveillance stricte de toutes les phases complexes du cycle du combustible nucléaire étaient déjà apparus à la plupart des observateurs avant la crise de l'énergie. Lorsque des programmes nucléo-énergétiques beaucoup plus importants, semblèrent se justifier, ces problèmes qui apparurent dans un éclairage différent, firent l'objet d'études nouvelles et plus vastes dont on ignore encore si elles permettront de mieux faire accepter les programmes nucléo-énergétiques par le public ou si elles entraîneront des retards.

Il n'est donc pas surprenant que l'avenir de l'énergie nucléaire pendant les vingt-cinq prochaines années continue d'être envisagé de façon extrêmement variable, comme le montrent les **Tableaux 3 et 4**.

TABLEAU 3: Prévisions concernant la puissance nucléaire installée en milliers de MWe: maxima et minima

(USAEC Décembre 1974 [1])

	1980		1985		1990		2000	
	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.	Min.	Max.
Etats-Unis	85	112	231	275	410	575	850	1400
Reste du Monde	113	157	290	420	640	900	1600	2550
TOTAL MONDIAL	198	269	521	695	1050	1475	2450	3950

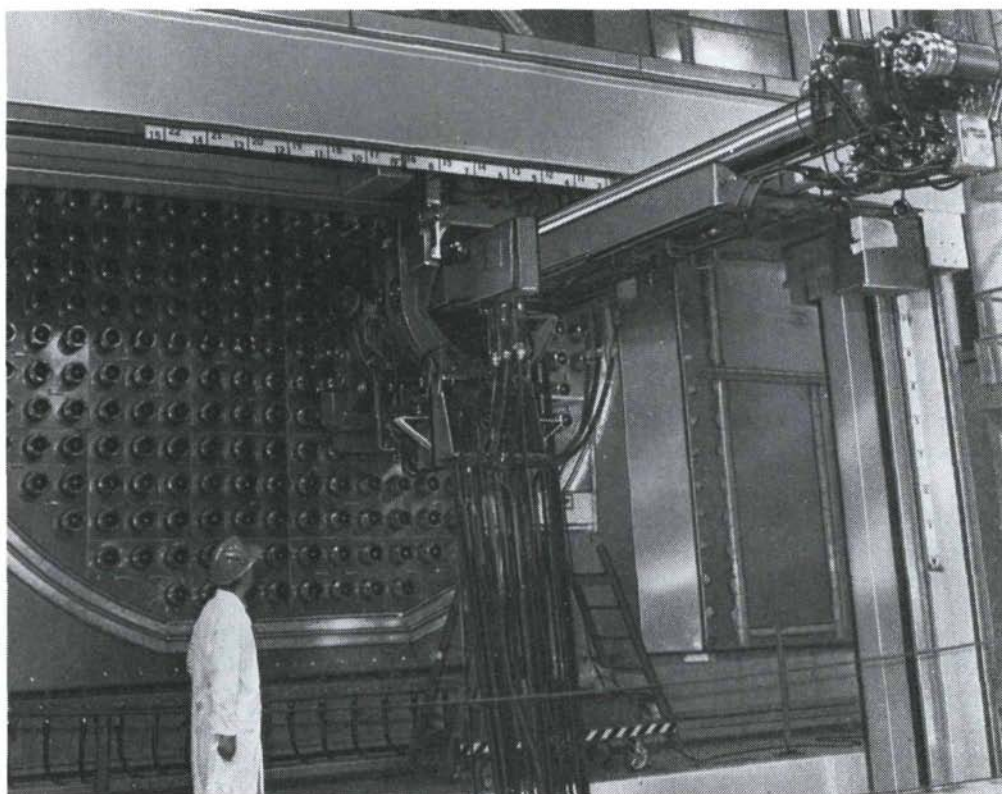
TABLEAU 4: Estimations les plus vraisemblables et estimations maximales de la puissance nucléaire installée (en milliers de MWe)

(AIEA Septembre 1974 [2] révisé)

	1980		1985		1990		2000	
	la plus vrai-semblable	Max.	la plus vrai-semblable	Max.	la plus vrai-semblable	Max.	la plus vrai-semblable	Max.
TOTAL MONDIAL	255	287	663	850	1350	1850	3600	5300

ESTIMATION DE BASE ET ESTIMATION MAXIMALE DE LA CROISSANCE DE LA PUISSANCE NUCLEAIRE INSTALLEE

Les considérations générales exposées jusqu'ici montrent à l'évidence que pour déterminer rationnellement le rôle que l'énergie nucléaire peut être appelée à jouer dans un réseau électrique donné, il ne suffit pas de définir la combinaison de centrales nucléaires et de centrales classiques la meilleure du point de vue économique. En fait, il faut tenir compte dans les calculs d'optimisation de très nombreux facteurs limitatifs auxquels il est



Mécanisme de chargement de la centrale nucléaire de Pickering, près de Toronto. Photo: EACL

actuellement impossible d'attribuer une valeur. On peut citer à ce sujet les difficultés qui découlent des autorisations et des règlements, ainsi que de l'attitude du public envers l'énergie nucléaire et de la mesure dans laquelle les gouvernements se sont engagés à y recourir. Dans de nombreux pays en voie de développement, les problèmes que soulève le financement des dépenses supplémentaires en devises sont tels que les gouvernements sont contraints de différer le lancement d'entreprises qui auraient été autrement extrêmement avantageuses. D'autres pays, comme l'Union soviétique, qui possèdent de vastes réserves de combustibles et d'énergie hydraulique exploitables à bas prix pourront continuer de fixer avec beaucoup de souplesse leurs objectifs à moyen et à long terme dans le domaine de l'énergie d'origine nucléaire.

Déjà grandes lorsqu'il s'agit de prévisions au niveau national, les incertitudes croissent et se multiplient lorsqu'on essaie d'établir des prévisions à l'échelon du globe. En effet, les chiffres fournis ne recouvrent pas tous les mêmes éléments et n'ont pas tous la même rigueur, ce qui rend toute addition sujette à caution; de plus, de simples totaux ne peuvent presque jamais rendre compte des influences que les plans des différents pays peuvent avoir les uns sur les autres. La prudence impose donc de présenter toutes les estimations relatives au développement de l'énergie nucléaire avec deux chiffres extrêmes indiquant les minimums et les maximums prévus. C'est d'après ce principe que sont présentés les **tableaux 5 et 6** qui correspondent respectivement à un programme de base et à un programme accéléré.

PROGRAMME DE BASE (TABLEAU 5)

Les différentes méthodes utilisées et les divers types de données fournies ont conduit à grouper les pays en trois catégories:

- Les pays de l'OCDE dont les estimations reposent sur une série d'études faites par des groupes d'experts nationaux et mises à jour très récemment, en novembre 1974 (3,4).
- Les pays en voie de développement qui ne font pas partie de l'OCDE et qui n'appartiennent pas au groupe des Etats à économie planifiée. Les estimations relatives à ces pays reposent sur une étude de marché poussée faite par l'AIEA à partir des résultats de missions envoyées dans onze de ces pays, la méthode employée ayant été étendue aux autres pays (5,6).
- Les pays à économie planifiée pour lesquels on a tenu compte au maximum des objectifs connus fixés dans les plans nationaux, en les complétant dans le cas de l'Union soviétique par une extrapolation du rapport établi par le passé entre le programme nucléo-énergétique de ce pays et celui des Etats-Unis d'Amérique.

D'après les estimations contenues dans ce tableau, l'énergie nucléaire devrait, à la fin du siècle, finir par représenter une puissance installée de 3 600 000 MWe, soit 40% de la puissance totale installée dans le monde. Ces estimations ne semblent guère devoir être modifiées par une légère diminution du prix actuellement élevé des combustibles fossiles et devraient rester pratiquement inchangées même si celui-ci était réduit d'un tiers.

TABLEAU 5: Prévisions relatives au développement de l'énergie d'origine nucléaire (programme de base)*

	Puissance installée d'origine nucléaire en milliers de MWe en fin d'année				
	1975	1980	1985	1990	2000
CEE	20,6	51,7	129	264	
Pays européens de l'OCDE (y compris ceux de la CEE)	25,8	75,7	175	345	
Amérique du Nord	49,8	108,6	275	531	
Japon et autres pays	4,6	22	62	107	
Total des pays de l'OCDE	80,2	206,3	512	983	2600
Pays en voie de développement	2,0	10,5	47	126	360
Total partiel	82,2	216,8	559	1109	2960
Pays à économie planifiée	9,5	38,4	104	246	640
TOTAL	91,7	255,2	663	1355	3600

* A l'exclusion de la Chine continentale pour laquelle on ne possède aucun renseignement.

PROGRAMME ACCELERE (TABLEAU 6)

Il faut tout d'abord bien prévoir que les hypothèses retenues pour ce cas visent à établir une situation extrême, afin d'évaluer l'influence qu'une accélération rapide des programmes de base pourrait avoir sur les services relatifs au cycle du combustible. Il est postulé que le rapport de un à cinq qui existe actuellement entre le coût de production des combustibles

nucléaires et le prix des combustibles fossiles restera inchangé pendant toute la période considérée et les principaux systèmes de production d'énergie sont comparés uniquement en fonction de leur coût de production, les difficultés propres à la production d'énergie nucléaire étant considérées comme résolues au cours des dix années à venir. Dans ces conditions, les centrales nucléaires pourraient en l'an 2000 correspondre à 60% de la puissance installée, la courbe de croissance devant s'élever progressivement et sans heurt jusqu'à cette époque.

Si de telles conditions sont, il faut bien le reconnaître, assez théoriques, elles semblent cependant devoir être remplies par plusieurs pays, dont la France et le Japon, et elles correspondent à une situation extrême de fonction de laquelle on peut calculer les quantités de minerais d'uranium et les travaux de séparation nécessaires.

TABLEAU 6: Estimation du développement de l'énergie nucléaire (programme accéléré)*

	Puissance nucléaire installée en milliers de MWe en fin d'année			
	1980	1985	1990	2000
CEE	58	167	367	
Pays européens de l'OCDE (y compris ceux de la CEE)	83	227	480	
Amérique du Nord	119	358	743	
Japon et autres pays	35	82	146	
Total des pays de l'OCDE	237	667	1369	3800
Pays en voie de développement	12	66	185	500
Total partiel	249	733	1554	4300
Pays à économie planifiée	38	117	290	1000
TOTAL	287	850	1844	5300

* A l'exclusion de la Chine continentale pour laquelle on ne possède aucun renseignement.

ESTIMATION DE LA DEMANDE ET DE L'OFFRE D'URANIUM ET DU TRAVAIL DE SEPARATION

DEMANDE

Afin de calculer les quantités d'uranium naturel et le travail de séparation que supposent les prévisions données au **tableau 5** concernant la puissance nucléaire installée, il faut préciser les types de réacteurs ainsi que les caractéristiques de charge et les délais. Le **tableau 7** donne la répartition retenue pour les divers types de réacteurs dans les deux programmes considérés. Le programme de base repose sur les prévisions établies au début de 1973 et révisées qui sont contenues dans le **tableau 5** et le programme accéléré sur les données du **tableau 6**. Dans l'un et l'autre cas, on n'a pas tenu compte des pays dont l'économie est planifiée; en effet, les projections doivent permettre de comparer l'offre et la demande et l'on n'a que fort peu de renseignements concernant les réserves d'uranium et les possibilités de séparation dans ces pays.

La combinaison de réacteurs donnée au **tableau 7** pour le programme de base jusqu'en 1990 est très proche de celle qui correspond au cas le plus vraisemblable envisagé dans le rapport

établi en août 1973 pour l'OCDE/AEA/AIEA [3] puis remis à jour [4] où l'on constate une forte prépondérance des réacteurs à eau légère. On a postulé des retards analogues aux différentes étapes du cycle du combustible ainsi qu'un facteur de charge de 70% pendant toute la période considérée. Il se pourrait d'ailleurs que, dans le programme accéléré, il faille retenir pour la période située entre 1990 et 2000 un facteur de charge légèrement inférieur et décroissant progressivement à mesure que l'énergie d'origine nucléaire assurera une part plus importante de la puissance totale installée. En revanche, il faut tenir compte pour cette même époque des besoins à pourvoir pour le chauffage, l'énergie supplémentaire requise à cette fin ayant pour effet de neutraliser cette diminution. Les caractéristiques retenues pour les réacteurs sont les mêmes que celles qui ont été établies dans le rapport mixte OCDE/AEN/AIEA [3].

TABLEAU 7: Combinaison de réacteurs retenue pour établir les besoins d'uranium et de travail de séparation^{a)}

	Puissance installée (GWe)						
	1970	1975	1980	1985	1990	1995	2000
I Hypothèse de base^{b)}							
Magnox	5	7	7	7	7	7	7
Réacteur poussé refroidi par un gaz	—	4,3	6	6	6	6	6
Réacteur à eau lourde	1	4	11	23	46	73	101
Réacteur à haute température	—	—	2	10	43	116	206
Réacteur sur-générateur rapide	—	—	1	5	43	247	856
Réacteur à eau légère	8	66,9	190	508	964	1421	1734
TOTAL	14	82,2	217	559	1109	1920	2910
II Hypothèse optimale^{c)}							
Magnox	5	7	7	7	7	7	7
Réacteur poussé refroidi par un gaz	—	4,3	6	6	6	6	6
Réacteur à eau lourde	1	4	11	29	62	104	147
Réacteur à haute température	—	—	2	12	57	163	302
Réacteur sur-générateur rapide	—	—	1	6	57	348	1228
Réacteur à eau légère	8	66,9	222	673	1365	2177	2710
TOTAL	14	82,2	249	733	1554	2805	4400

Notes:

a) On a admis que la puissance produite par réacteurs à eau légère était assurée à 60% par des réacteurs à eau bouillante et à 40% par des réacteurs à eau sous pression.

b) D'après le tableau 5, à l'exclusion des pays à économie planifiée.

c) D'après le tableau 6, à l'exclusion des pays à économie planifiée.

Les **tableaux 8 et 9** indiquent respectivement quelles seront les besoins en uranium et en travail de séparation. Dans les cas où l'on recycle le plutonium, on a admis qu'après avoir tenu compte des besoins des générateurs surrégénérateurs, tout le plutonium dépassant un stock de réserve de 50 tonnes serait recyclé dans des réacteurs à eau légère. Il est à noter que le recyclage du plutonium modifie relativement peu les quantités cumulées d'uranium naturel et le travail de séparation nécessaires, quel que soit le programme de construction de centrales nucléaires; ce phénomène est imputable aux constantes de temps propres au cycle du combustible. En outre, une grande partie de la demande correspond au chargement initial du coeur des réacteurs pendant les périodes considérées et on ne peut pas utiliser pour cette opération les produits de recyclage du plutonium.

TABLEAU 8: Projection des besoins d'uranium^{a)} (10³ tonnes U)

	Sans recyclage du plutonium		Avec recyclage du plutonium	
	Par an	Cumulé	Par an	Cumulé
I Hypothèse de base^{b)}				
1973	19	19	19	19
1975	19	52	19	52
1980	56	253	52	243
1985	114	696	104	651
1990	180	1463	166	1358
1995	235	2560	225	2380
2000	258	3830	258	3650
II Hypothèse optimale^{c)}				
1973	19	19	19	19
1975	24	57	24	57
1980	73	303	69	292
1985	160	917	149	866
1990	263	2028	244	1896
1995	353	3660	339	3430
2000	377	5550	377	5300

Notes:

- a) Les rejets à l'usine d'enrichissement ayant une teneur de 0,275%.
- b) D'après le tableau 5, à l'exclusion des pays à économie planifiée.
- c) D'après le tableau 6, à l'exclusion des pays à économie planifiée.

TABLEAU 9: Projection du travail de séparation nécessaire^{a)} (10³ tonnes U)

	Sans recyclage du plutonium		Avec recyclage du plutonium	
	Par an	Cumulé	Par an	Cumulé
I Programme de base^{b)}				
1973	10	10	10	10
1975	12	29	12	29
1980	30	132	27	124
1985	67	388	59	349
1990	116	868	103	774
1995	168	1610	159	1450
2000	184	2500	184	2340
II Programme accéléré^{c)}				
1973	10	10	10	10
1975	13	30	13	30
1980	38	153	34	142
1985	94	499	83	452
1990	168	1186	151	1069
1995	241	2270	228	2070
2000	276	3620	276	3400

Notes:

- a) Les rejets à l'usine d'enrichissement ayant une teneur de 0,275%.
- b) D'après le tableau 5, à l'exclusion des pays à économie planifiée.
- c) D'après le tableau 6, à l'exclusion des pays à économie planifiée.

OFFRE

Le **tableau 10** donne un état des réserves certaines et des réserves supplémentaires probables dont le coût d'exploitation est inférieur à 15 dollars la livre d' U_3O_8 . Ces réserves probables sont définies comme des filons de minerai d'uranium dont on suppose l'existence dans des prolongements non prospectés de gisements connus ou dans d'éventuels gisements situés dans des régions au sous-sol uranifère. On a fixé à 15 dollars la livre d' U_3O_8 le coût maximum d'exploitation car on a jusqu'à présent relativement peu prospecté les régions où le coût d'exploitation risque d'être plus élevé.

Une comparaison de ces chiffres avec ceux de la demande figurant dans la partie précédente, montre que les réserves assurées entrant dans cette catégorie de coût seront presque épuisées en 1990 avec le programme de base et en 1988 avec le programme accéléré et que le recyclage du plutonium ne retarderait cet épuisement guère plus d'une année.

Il ne faut cependant pas oublier que l'industrie de l'extraction de l'uranium devrait maintenir des réserves prouvées correspondant en moyenne aux besoins pour assurer huit années de consommation. Il faudrait donc découvrir environ 2 millions de tonnes de réserves supplémentaires d'ici à 1990, avec le programme de base, et 2,5 millions d'ici à 1988 avec le programme accéléré. Il serait aussi éminemment souhaitable que les travaux de prospection progressent régulièrement de façon que les réserves découvertes, qui se sont

TABEAU 10: Estimation des réserves d'uranium dont le coût d'exploitation ne dépassait pas 15 dollars des Etats-Unis la livre d' U_3O_8 ^{a)} en janvier 1973 (milliers de tonnes)

	Pratiquement assuré	Ressources supplémentaires estimées ^{b)}
Etats-Unis	400	679
Canada	307	526
Afrique du Sud	264	34
Australie	100	107
Reste du monde (non compris les pays à économie planifiée)	475	202
TOTAL	1546	1548

Notes:

a) Valeur du dollar en mars 1973 = 0,829 DTS (droit de tirages spéciaux)

b) D'après la définition donnée à la page 12 du document de référence [3].

établies à 65 000 tonnes en moyenne par an au cours des huit dernières années, s'élèvent graduellement jusqu'à 230 000 tonnes par an d'ici 1990.

En ce qui concerne le travail de séparation, le présent article ne prétend pas établir un calendrier précis des besoins en centrales nouvelles venant s'ajouter à celles qui sont déjà prévues et dont la puissance est indiquée au **tableau 11**. Il est évident que, d'après les hypothèses posées ici et sans tenir compte des stocks existants, des installations supplémentaires de séparation devront être construites au début des années quatre-vingt pour l'un et l'autre programme. Le recyclage du plutonium repousserait cette nécessité d'environ deux ans. On pourrait obtenir un résultat analogue en augmentant la teneur des rejets mais cette opération nécessiterait des quantités d'uranium supplémentaires.

Par manque d'information, il n'a pas été possible d'évaluer l'offre et la demande d'uranium ainsi que le travail de séparation nécessaire dans les pays à économie planifiée. Ces pays possèdent peut-être des installations d'enrichissement et des réserves d'uranium importantes, ce qui pourrait différer le moment où ils devront mettre en place de nouvelles installations capables de pourvoir à la demande mondiale. Les accords récemment conclus entre les utilisateurs d'uranium enrichi et l'Union soviétique ont déjà eu des conséquences sur les possibilités d'enrichissement de l'uranium.

Il convient de souligner que la situation en matière de réserves d'uranium naturelles et d'installations de séparation ne freinera probablement pas le développement de l'énergie nucléaire à condition que de bons plans à long terme soient mis en œuvre afin d'éviter que des pénuries ne viennent perturber sous peu l'ensemble du système d'approvisionnement. Dans le cas de l'uranium, les réserves supplémentaires probables mentionnées au **tableau 10**, qui garantissent un approvisionnement jusqu'en 1995 même dans le cas du programme accéléré, représentent une évaluation prudente. Encore plus importante est la possibilité d'exploiter de vastes réserves à un prix de revient dépassant la limite de 15 dollars la livre d' U_3O_8 fixée aux fins de la présente analyse.

Même si le coût de production de la livre d' U_3O_8 passait à 30 dollars, le prix de l'électricité ne dépasserait que de 1,3 million celui de l'électricité fournie par les réacteurs à eau légère,

TABLEAU 11: Estimation de la puissance de séparation (URSS non comprise) (1975–1985)

	Puissance en tonnes d'unités de séparation		
	1975	1980	1985
Etats-Unis	17 000	27 000	27 000
Urenco	250	2 000	10 000
Eurodif	200	5 000	9 000
UKAEA	400	400	400
TOTAL	17 850	34 400	48 400

ce qui ne modifierait guère la position concurrentielle de l'énergie nucléaire. On n'a pas encore évalué de façon systématique les réserves dont l'exploitation coûterait de 15 à 30 dollars la livre d' U_3O_8 mais les recherches de plus en plus étendues effectuées dans des régions propices, que ce soit dans des pays industrialisés ou dans des pays en voie de développement, devraient permettre de découvrir dans cette catégorie des réserves aussi importantes que celles pour lesquelles le coût d'exploitation est inférieur à 15 dollars.

Bien que les opérations de séparation coûtent cher en valeur absolue, elle doit être considérée en fonction du coût de construction des centrales nucléaires. Les investissements consacrés aux usines d'enrichissement par diffusion gazeuse (y compris les centrales nécessaires à ces usines) n'atteignent pas 7% du coût total des installations nucléaires qu'elles sont appelées à desservir, ce pourcentage étant inférieur à 5% dans le cas des centrifugeuses. Dans ce domaine, tout comme dans celui de la prospection de l'uranium, il s'agit beaucoup plus de prévoir le meilleur calendrier possible que de remédier à des pénuries insurmontables.

Malheureusement, les plans relatifs à la puissance d'enrichissement de l'uranium doivent en grande partie être établis très prochainement et il faut pour cela connaître la puissance nucléaire qui sera installée au début des années quatre-vingt. Les nouvelles installations d'enrichissement doivent être prévues et construites en temps utile pour que leur démarrage coïncide avec le calendrier de développement de l'énergie nucléaire et le problème se trouve encore compliqué du fait que le moment où les nouvelles installations d'enrichissement deviendront nécessaires dépend de l'importance du recyclage du plutonium et éventuellement de sources supplémentaires d'uranium enrichi. Il va sans dire que les plans d'extraction, de conversion, de fabrication et de retraitement d' U_3O_8 sont fonction de l'importance de la puissance nucléaire installée.

La situation au début des années quatre-vingt sera capitale pour l'ensemble des industries du cycle du combustible qui, par le passé, a surtout souffert d'un excédent de capacité. Il semble déjà qu'on puisse craindre pour cette époque une offre insuffisante et des pénuries. Le marché régi par la loi du vendeur, qui se dessine déjà pour l'achat de minerais, ainsi que l'insuffisance des possibilités de retraitement aux Etats-Unis sont les signes avant-coureurs d'une telle situation. Un manque d'installations d'enrichissement représente un tel risque pour l'économie nucléaire et les délais nécessaires pour construire des usines supplémentaires sont si longs qu'il faudrait peut-être mettre au point un système de coopération internationale ou régionale pour remédier à cette situation. Au stade du retraitement, un ou deux ans de retard dans la mise en route des usines n'est pas aussi grave. Le combustible usé peut être stocké pendant cette période, de préférence près du réacteur,

sans qu'il en résulte de graves inconvénients économiques si cette opération est prévue. Même, en retardant la mise en route de nouvelles usines de retraitement, on pourrait construire des usines plus importantes dont la taille permettrait de réaliser des économies d'échelle. Cet avantage éventuel doit être mis en regard des pertes de valeur actualisée du plutonium et de l'uranium contenus dans le combustible stocké.

Ce raisonnement autrefois valable ne l'est plus entièrement du fait de l'apparition des réacteurs surgénérateurs. L'économie de tels systèmes repose entièrement sur la production, la récupération et la réutilisation de nouvelles matières. En fait, il semblerait avantageux pour l'économie globale du système de retraiter du combustible n'ayant à subir qu'un bref refroidissement. Il semble donc que le moment soit venu de lancer de vastes travaux de recherche et de mise au point sur le retraitement des combustibles irradiés dans les surgénérateurs. L'insuffisance actuelle des installations de retraitement des combustibles destinés aux réacteurs à eau légère deviendrait intolérable dans le cas d'une économie reposant sur les surgénérateurs. L'AIEA étudie actuellement les modalités de coopération régionale pour le retraitement et espère pouvoir continuer à encourager la coopération internationale et l'étude des autres phases du cycle du combustible.

CONCLUSIONS

Le présent article a montré abondamment à quel point il était difficile de préciser l'importance de la puissance nucléaire installée à tel ou tel moment de l'avenir. Ces incertitudes sont, cependant contrebalancées par la certitude qu'à l'avenir l'essentiel de l'énergie utilisée par les hommes sera d'origine nucléaire. Plusieurs types éprouvés de centrales nucléaires fonctionnent de façon pleinement satisfaisante et on étudie plusieurs autres systèmes perfectionnés qui offrent d'excellentes perspectives, ce qui constitue une garantie complète contre toutes les difficultés imprévues que pourrait soulever un type particulier de réacteur. En outre, l'offre de combustible nucléaire dépend de matières premières qui sont beaucoup plus abondantes dans l'écorce terrestre que ne le laissent entendre les estimations relatives aux réserves sûres. Celles-ci ne sont constituées que par des gisements à haute teneur existant dans certains pays seulement et elles sont donc inférieures à la quantité totale existante. Le cycle du combustible nucléaire compense sa complexité par une souplesse qui permet des temps d'arrêt entre les différentes phases, par exemple entre l'alimentation en uranium naturel et les travaux de séparation ou bien entre le stockage et le recyclage du plutonium. Cette souplesse ne dispense pas d'établir des plans à l'avance et de prendre les mesures indispensables à chaque stade du cycle du combustible nucléaire, mais elle joue un rôle protecteur contre des modifications brutales ou des fluctuations intenses de prix.

En conclusion, quels que soient les retards momentanés ou même les reculs, on peut raisonnablement s'attendre que les centrales nucléaires fournissent plus de la moitié de l'électricité qui sera produite dans le monde à la fin du siècle.

REFERENCES

- [1] "Nuclear Power Growth 1974-2000", USAEC, WASH-1139(74), févr. 1974.
- [2] J.A. Lane et al., "The Role of Nuclear Power in the Future Energy Supply of the World", World Energy Conference Paper No 4.1-22, Detroit (1974).
- [3] Uranium: ressources, production et demande, rapport établi conjointement par L'ENEA de L'OCDE et L'AIEA.
- [4] "Energy Prospects to 1985", OECD Report, nov. (1974).
- [5] "Etude du marché de l'énergie d'origine nucléaire dans les pays en voie de développement - Rapport général, AIEA, septembre 1973.
- [6] Etude du marché de l'énergie d'origine nucléaire dans les pays en voie de développement - Edition de 1974, AIEA STI/PUB/395, oct. 1974.



COURS EN ITALIE

Cette photo montre les participants au premier Cours interrégional sur l'amélioration des plantes du point de vue de la résistance aux maladies, y compris l'utilisation des méthodes de mutations induites, qui a eu lieu à la fin de l'année dernière à Casaccia, en Italie. Ce cours a réuni 15 participants venant d'autant de pays.

Le cours était organisé conjointement par l'AIEA et la FAO avec l'aide de l'Office suédois pour le développement international (SIDA) et du Gouvernement italien. Le cours a eu lieu au Laboratoire d'applications agricoles du CNEN et le Professeur A. Bozzini, Directeur de cet institut, a également dirigé le cours. Le conseiller scientifique et co-directeur était M. E.A. Favret, de Castelar (Argentine).

Le cours a consisté en conférences, séminaires, débats et travaux de laboratoire. Il a porté sur les différents aspects de l'amélioration et de la protection des plantes, un certain nombre de culture et de maladies particulières, une introduction aux mutations induites, des techniques de sélection de types particuliers à partir de populations génétiquement diverses, le renforcement de la résistance aux maladies chez certaines variétés de plantes et d'autres sujets connexes.