

L'énergie nucléaire: rôle dans l'avenir

par H.J. Laue*

Le 29 juillet 1957, date de naissance de l'Agence internationale de l'énergie atomique, quinze ans après qu'on eut démontré qu'il était possible de produire de l'énergie à partir de l'uranium, il y avait en exploitation, dans deux pays Membres de l'AIEA, trois centrales nucléaires d'une puissance totale de 105 MWe. Le 29 juillet 1982, 277 réacteurs, d'une puissance totale de 157 500 MWe, installés dans 24 pays, fourniront au monde 9% environ de son courant électrique.

Ces chiffres montrent à l'évidence qu'en 25 ans, le nucléaire est devenu une source d'énergie fiable et rentable. Ses progrès reposent sur de vastes programmes d'études et réalisations scientifiques et techniques, qui ont permis d'analyser les défaillances possibles, leurs effets probables, ainsi que la manière de s'en prémunir au moyen de dispositifs de sûreté efficaces. Tout cela a été fait avec beaucoup plus de sérieux et de soin que pour d'autres techniques de production d'énergie. Plus de dix filières différentes de centrales nucléaires ont été conçues depuis que les premières ont été mises en service pendant les années 50, et plusieurs d'entre elles ont été essayées. Aujourd'hui, quatre types de réacteur sont utilisés à une grande échelle: le réacteur à eau sous pression, le réacteur à eau bouillante, le réacteur à eau lourde et uranium naturel et le réacteur refroidi par gaz. La figure 1 montre la croissance annuelle de la puissance installée nucléaire au cours des 25 dernières années.

A mesure qu'augmentait le nombre des centrales nucléaires en service et que s'accumulait l'expérience pratique de leur fonctionnement, leur conception subissait d'importantes modifications destinées à en améliorer le rendement et la fiabilité. Les centrales ainsi modifiées pouvaient satisfaire à des normes de sûreté plus strictes, rejeter moins de radioactivité dans l'environnement et être moins sensibles aux conséquences des erreurs humaines et des défaillances du matériel. Il semblait que toutes les conditions requises pour que le nucléaire joue le rôle capital qui lui revient dans l'approvisionnement en énergie du monde de demain étaient remplies. Le recours en temps utile aux réacteurs surgénérateurs rapides et aux réacteurs à haute température allait assurer la permanence de ce rôle et permettre au nucléaire de remplacer le pétrole.

La dure réalité

La réalité n'a malheureusement pas suivi le rythme des progrès techniques et économiques. Depuis douze ans, les prévisions relatives à l'énergie d'origine nucléaire ont dû être sévèrement révisées en baisse. La figure 2 montre, d'après les Rapports annuels de l'AIEA, les projections de la puissance installée jusqu'à l'an 2000. Elles ont constamment baissé en ce qui concerne le court terme (1975 et 1980) et subi une diminution plus sensible

encore à long terme (1990 et 2000). Malgré la crise pétrolière du milieu des années 70 et les divers programmes nationaux de relèvement du pétrole par d'autres sources d'énergie, les projections de la puissance installée établies à la fin des années 70 pour 1990 et 2000 ont subi une chute profonde. Les chiffres que donne pour ces années le Rapport pour 1980 vont du tiers au cinquième de ceux des Rapports annuels pour 1973-1974. Et ce alors que le prix du pétrole a au moins septuplé entre temps et que la pénurie d'hydrocarbures est devenue manifeste. Bien que les projections pour 1990 paraissent avoir touché le fond, des études récentes donnent à penser que celles portant sur l'an 2000 pourraient être inférieures de 20% au chiffre publié par l'Agence en 1980.

Cette chute est due à de multiples raisons*.

Avant tout, il y a la situation économique: une utilisation plus efficace de l'énergie, la diminution relative des productions grosses consommatrices d'énergie et la récession économique dans les pays industrialisés ont fortement ralenti l'accroissement de la demande de courant électrique, et en conséquence, plusieurs pays n'ont pas commandé de nouvelles centrales nucléaires.

L'expansion de l'énergie d'origine nucléaire a aussi été entravée par la méfiance qu'inspirent le problème de la sûreté des réacteurs et celui de l'élimination des déchets nucléaires à une opinion publique peu à même d'apprécier les risques à leur juste valeur. Aussi de nombreux pays ont-ils reculé devant les conséquences politiques possibles d'une décision à long terme en faveur du nucléaire.

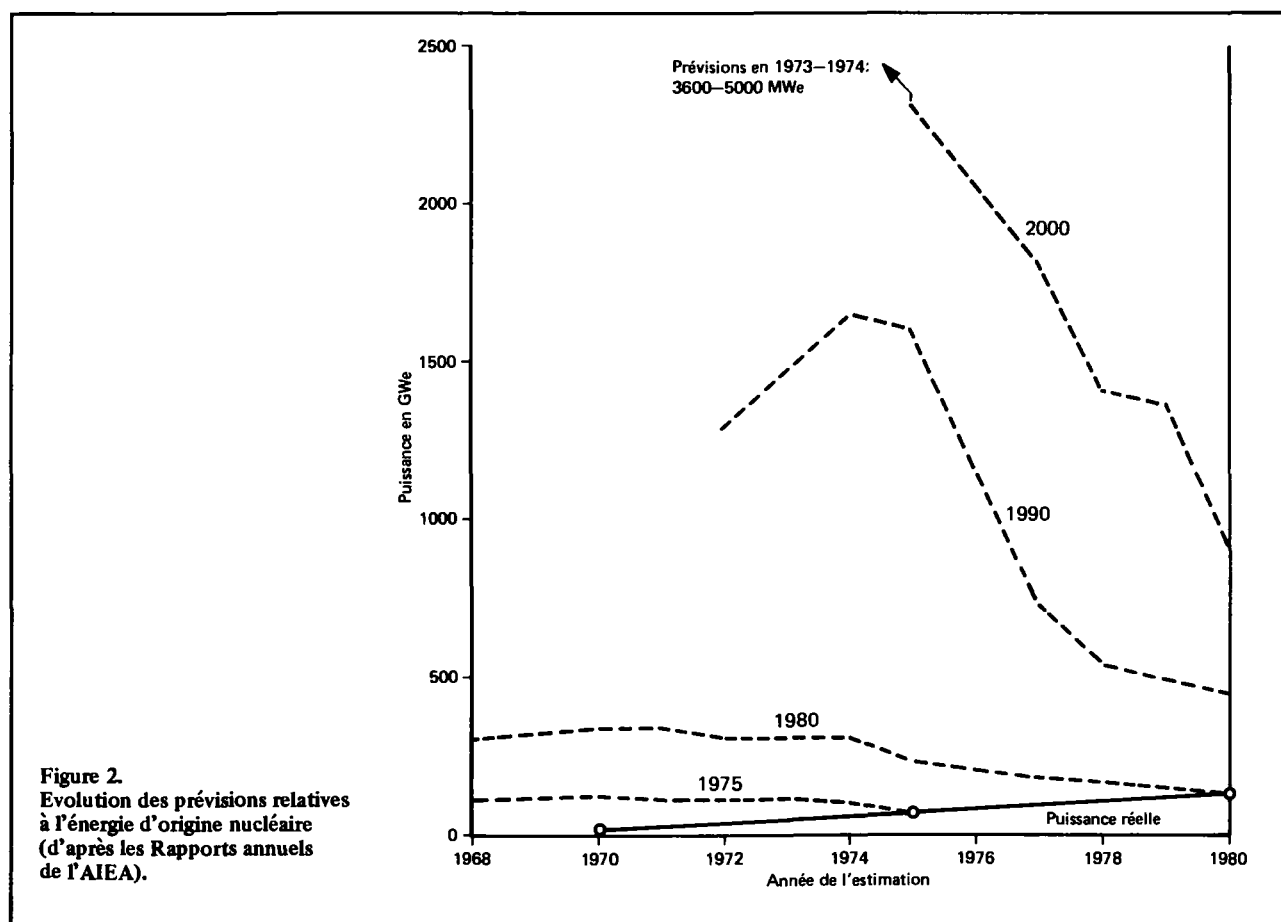
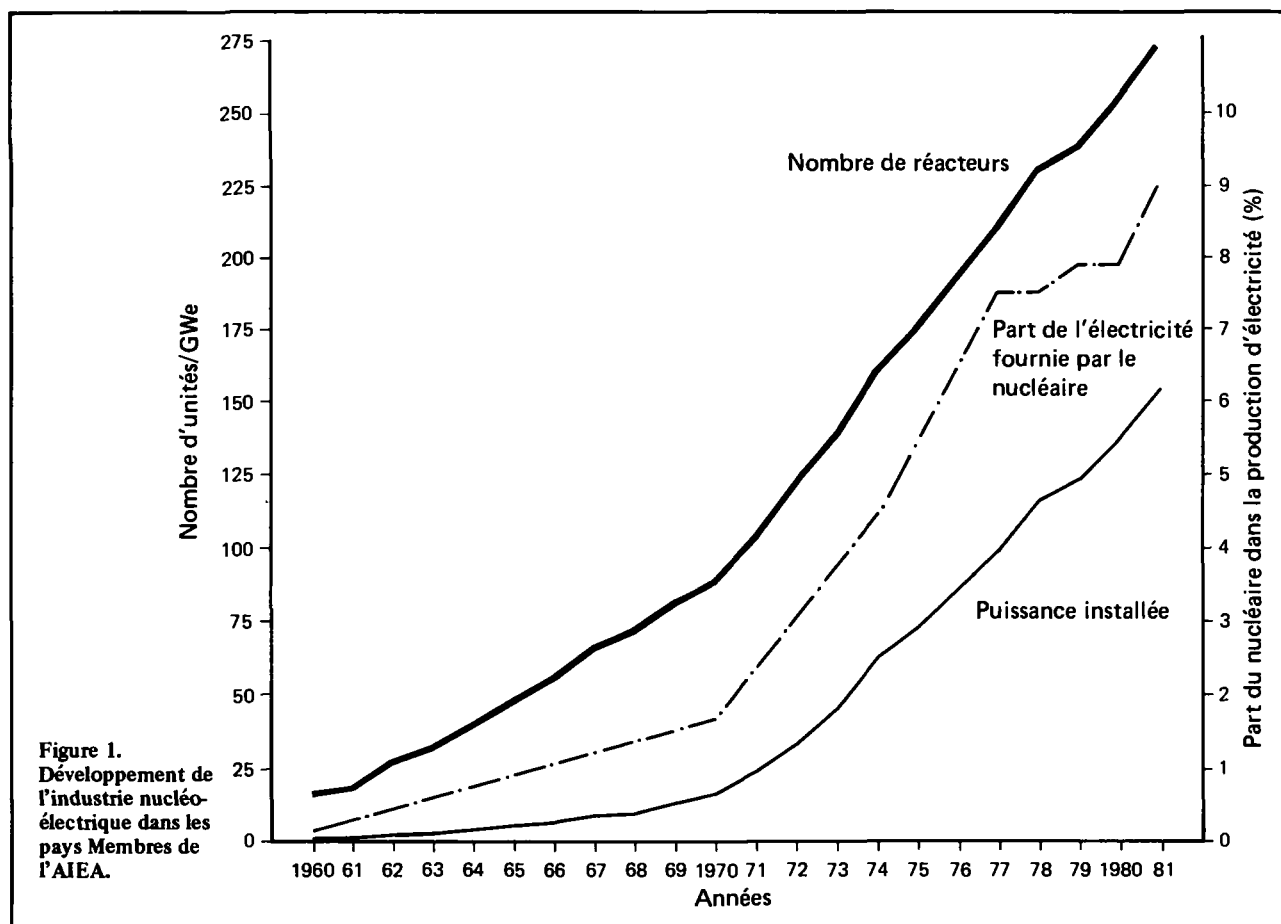
Enfin, comme l'a signalé dans sa conclusion l'Evaluation internationale du cycle du combustible nucléaire (INFCE), il se peut que des installations nucléaires civiles soient détournées de leur destination et servent à fabriquer des armes nucléaires (encore que ce détournement ne soit pas la voie normale ni la plus pratique). Cette éventualité a soulevé de graves préoccupations dans le public et les gouvernements de certains pays fournisseurs, et l'expansion ou l'adoption de l'énergie d'origine nucléaire dans les pays développés et en développement s'en est trouvée entravée.

Les prévisions révisées

On ne saurait prévoir l'expansion de l'énergie d'origine nucléaire avec tant soit peu de certitude que jusqu'à la fin de la présente décennie. En 1990, la puissance installée nucléaire sera d'environ 430 GWe, soit quelque 18% de la production totale de courant électrique. On ne peut donc s'attendre à une «percée» du nucléaire au cours de la décennie à venir. La croissance de la part du nucléaire dans la production d'électricité a été estimée à 1% de 1985 à 1990: ce faible pourcentage est presque

* M. Laue dirige, à l'Agence, la Division de l'énergie d'origine nucléaire.

* Comment va évoluer l'énergie nucléaire — Le défi des années 1980 par Sigvard Eklund, Bulletin de l'AIEA Vol. 23 N° 3 (septembre 1981).



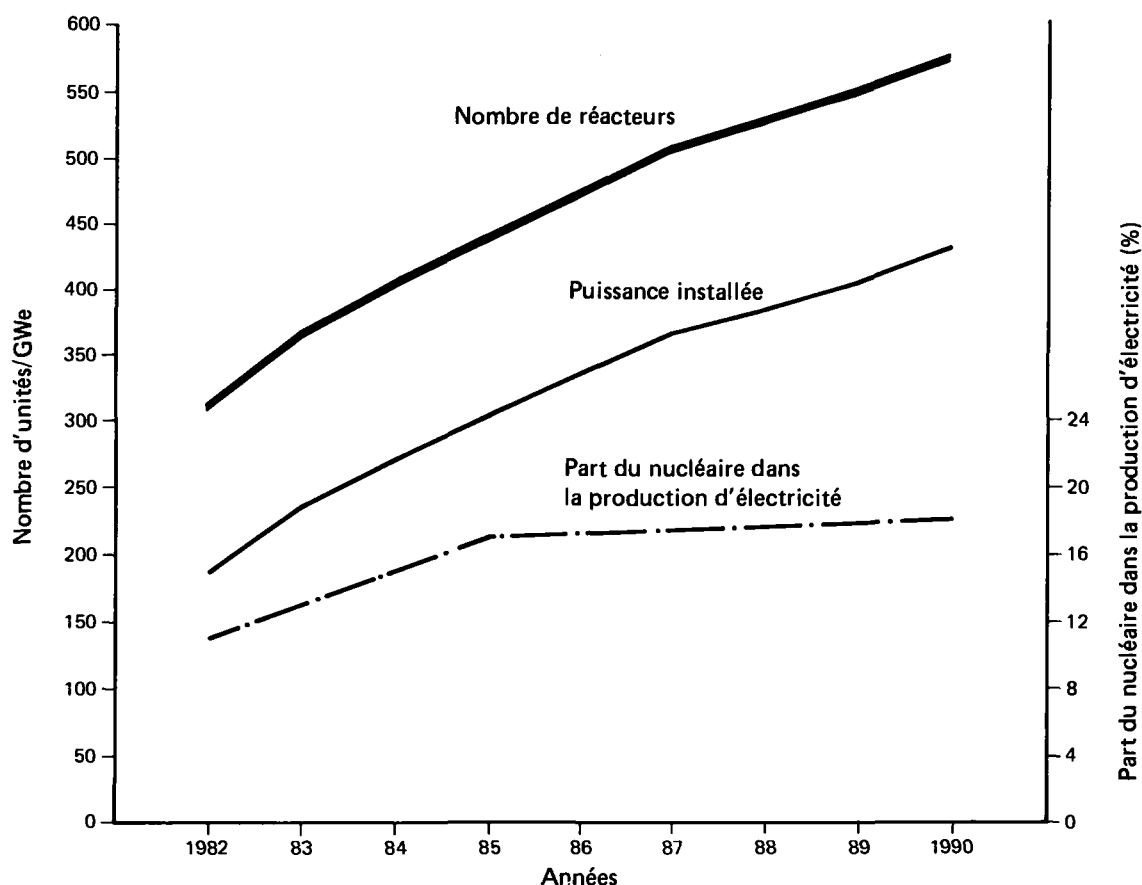


Figure 3. Projections de la croissance de l'énergie d'origine nucléaire dans les pays Membres de l'AIEA.

entièrement dû aux incertitudes politiques et économiques, à l'aggravation de la complexité et de la rigueur des procédures réglementaires, et à l'insuffisante normalisation des installations et des principaux composants. Cette situation ne manquera pas de peser sur l'industrie nucléaire dans de nombreux pays au commencement de la prochaine décennie.

Sur les 33 pays qui auront en 1990 des centrales nucléaires en service, dix seulement sont des pays en développement. Les 38 centrales de ces dix pays auront une puissance totale de 24 000 MWe et fourniront moins de 5% du total de l'électricité de tous les pays en développement, alors que cette proportion sera de 20% pour l'ensemble des pays industrialisés. (Cette estimation repose sur les chiffres relatifs aux réacteurs de puissance en service, en construction, ou dont la construction doit commencer d'ici deux ou trois ans).

Le tableau 1 donne les estimations de la puissance installée nucléaire par groupes de pays jusqu'à la fin du siècle, telles qu'elles figurent au Rapport annuel de l'AIEA pour 1981. Le tableau 2 donne les estimations de la production totale de courant électrique et de la part fournie par le nucléaire. En supposant que les centrales nucléaires continueront à assurer principalement la charge

de base, ces tableaux montrent que la part du nucléaire dans la production mondiale de courant ne pourra atteindre 23 pour cent à la fin du siècle que si l'on améliore la fiabilité des centrales.

De nombreuses centrales en service ou presque achevées ont eu de multiples problèmes de financement, de gestion, d'autorisation et de technique. Leur nombre atteint aujourd'hui la trentaine dans le monde et elles représentent une puissance totale de 27 000 MWe. Dix-sept d'entre elles n'ont jamais fonctionné ou ont vu leur construction interrompue après achèvement de 30% et plus des travaux. C'est le cas de Busher en Iran et de Zwentendorf en Autriche. Rien que pendant la première moitié de 1982, 13 centrales des Etats-Unis sont entrées dans cette catégorie, principalement pour cause de mauvaise gestion, de difficultés financières ou en raison de la baisse de la demande de courant électrique; les incertitudes politiques y ont également contribué. Sept usines, en divers pays du monde, sont depuis au moins deux années consécutives hors d'état de fonctionner pour cause de réparations, d'adaptation a posteriori ou de difficultés d'homologation. Plusieurs autres ne fonctionnent actuellement qu'à moins de la moitié de leur capacité en raison de très graves problèmes au stade de la production de vapeur.

Tableau 1. Estimations de la puissance installée (totale et nucléaire) par principaux groupes de pays (en GWe)

Groupe de pays	1981			1990			2000 (projections)		
	Totale	Nucléaire	%	Totale	Nucléaire	%	Totale	Nucléaire	%
OCDE Amérique du Nord	748	63	8	1063	145	14	1405	185–235	15
OCDE Europe	468	54	12	734	150	20	1100	225–315	24
OCDE Pacifique	193	15	8	340	31	9	510	90–130	22
PEP Europe ¹	404	18	4	746	79	11	1200	160–240	17
Asie ²	152	3,7	2	402	16	4	1040	45–80	6
Amérique latine	107	0,3	0,3	183	6,9	4	345	20–45	9
Moyen Orient et Afrique	67	—	—	122	3,3	2	270	15–30	8
Total mondial ³	2139	154	7	3600	430	12	5870	740–1075	15
Pays industrialisés à économie de marché ⁴	1410	132	9	2170	328	16	3060	500–680	20
PEP Europe ³	404	18	4	750	79	11	1200	160–240	13
Pays en développement hors PEP Europe ^{2,3}	325	4	1	680	24	4	1610	80–155	7

Les chiffres de la puissance nucléaire pour 1990 reposent sur les installations déjà en service ou en construction, ou dont la construction doit démarrer d'ici deux ou trois ans; les chiffres de la puissance totale pour 1990, ainsi que les projections de la puissance installée (nucléaire et totale) pour 2000 sont des moyennes des estimations maximales et minimales.

¹ Pays européens à économie planifiée, y compris la Yougoslavie.

² Y compris la République de Chine (Taiwan).

³ Les chiffres pour 1990 et 2000 sont arrondis.

⁴ Comprend les groupes de pays de l'OCDE, Israël et l'Afrique du Sud.

Fiabilité, indisponibilités, pertes d'énergie

Les renseignements fournis par le système de documentation sur les réacteurs de puissance* (PRIS) de l'AIEA ainsi que la connaissance détaillée des problèmes récents devraient permettre de déterminer les causes des indisponibilités prolongées ou des pertes de productivité et d'améliorer la fiabilité des centrales nucléaires. L'expérience accumulée par l'industrie nucléoélectrique représente à l'heure actuelle plus de 22,8 millions d'heures, soit 2 600 années de fonctionnement. Le PRIS couvre aujourd'hui plus de 14,9 millions d'heures, soit 1 700 années, à savoir environ les deux tiers de l'expérience accumulée jusqu'à présent. Il comporte des indicateurs de production et des chiffres de production d'énergie pour la

période 1963–1980. De plus le dossier «Indisponibilités» du système contient des informations sur quelque 9 000 indisponibilités partielles ou totales correspondant à environ 3,3 millions d'heures ou 380 années de fonctionnement de 1971 à 1980.

On peut faire comprendre l'importance économique de la fiabilité des installations de la manière suivante. Si l'on prend pour référence un facteur de charge de 80%, parfaitement réalisable d'après l'expérience des centrales nucléaires de plusieurs pays, le facteur de charge réel, qui n'a été que de 58,9% de 1960 à 1980 traduit pour les 20 dernières années une perte totale de 966,5 TWh*, soit 26,6% du total de l'électricité produite par ces centrales. Les chiffres relatifs aux facteurs de charge,

* NdT: appellation indiquée par le service de M. Laue.

* 1 TWh = 10⁹ kWh = 10⁶ MWh = 10³ GWh.

Tableau 2. Estimations de la production (totale et nucléaire) d'électricité par principaux groupes de pays (En TWh)

Groupe de pays	1981			1990			2000		
	Totale	Nucléaire	%	Totale	Nucléaire	%	Totale	Nucléaire	%
Pays industrialisés à économie de marché	5662	667	12	8 600	2000	23	12 100	3600	30
PEP Europe	1955	104	5	3 600	485	13	5 700	1200	21
Pays en développement hors PEP Europe	1134	22	2	2 800	150	5	6 800	700	10
Total mondial	8751	793	9	15 000	2600	18	24 600	5600	23

Les chiffres pour l'an 2000 sont des moyennes des estimations maximales et minimales.

Tableau 3. Facteur d'indisponibilité par rapport à un facteur de charge témoin de 80%

	Facteur de charge %	Facteur d'indisponibilité (FI) %	FI prévu %	FI imprévu %	Perte d'énergie (TWhe)	Nombre d'usines
1960	40,0	60,0	—	—	-0,141	1
1961	33,1	66,8	—	—	-1,034	2
1962	68,4	31,5	—	—	-0,425	4
1963	54,1	45,8	—	—	-3,306	9
1964	56,1	43,8	—	—	-5,136	17
1965	57,2	42,7	—	—	-6,168	22
1966	63,0	36,9	—	—	-8,057	25
1967	66,1	33,8	—	—	-7,312	30
1968	61,9	37,1	—	—	-13,301	35
1969	49,9	50,0	—	—	-31,713	40
1970	60,5	40,8	—	—	-21,637	47
1971	64,0	36,1	—	—	-22,143	58
1972	62,9	37,4	—	—	-33,210	69
1973	61,4	32,5	14,9	12,4	-47,181	94
1974	61,8	32,9	16,2	16,5	-52,773	95
1975	61,1	37,9	15,3	22,8	-85,027	116
1976	61,8	37,5	16,4	23,2	-101,776	130
1977	64,0	35,7	16,3	20,8	-104,385	144
1978	67,1	32,4	17,3	15,2	-96,268	153
1979	60,2	38,7	24,0	15,1	-165,470	167
1980	62,3	37,1	27,0	10,7	-160,039	184
Moyenne 1960-1980	58,9%			Total TWhe:	966,502	
Moyenne 1970-1980	62,5%					

empruntés au PRIS, figurent au tableau 3. Si l'on y ajoute une estimation des indisponibilités non enregistrées par le système PRIS, la perte totale d'énergie en 20 ans peut être de l'ordre de 1 500 TWhe, c'est-à-dire vingt fois la quantité d'électricité nucléaire produite en URSS en 1980. (Cette comparaison ne fait pas état des usines ayant subi des indisponibilités de plus d'une année, comme par exemple TMI-1 et TMI-2 après l'accident de 1979.)

Le tableau 4 récapitule les pertes d'énergie subies de 1971 à 1980 du fait d'indisponibilités totales inopinées des réacteurs: elles se montent à 547 TWhe, soit 16% de l'électricité produite par ces usines. La plupart des indisponibilités inopinées ont été dues à des défaillances de composants classiques, par exemple: turbo-générateurs (dans 16,4% des cas); principal système d'évacuation de la chaleur (14,4%); générateurs de vapeur (10,9%); mais il y a aussi eu les indisponibilités dues à des travaux d'entretien et de réparation imprévus (10,4%). Les pertes de production résultant de restrictions réglementaires (7,7%) s'élèvent à 42 TWhe et représentent la quantité totale de l'électricité nucléaire produite en République fédérale d'Allemagne en 1980. Ces indisponibilités n'ont, dans presque aucun cas, soulevé de problèmes de sûreté. L'incidence de la réglementation est attestée par une comparaison entre les pertes d'énergie de tous les réacteurs

à eau sous pression deux ans avant (15,5 TWhe) et deux ans après (46,6 TWhe) l'accident de Three Mile Island. (La comparaison figurant au tableau 5 ne tient pas compte du réacteur lui-même, dont la défaillance a eu lieu le 28 mars 1979). Il faut toutefois signaler qu'au cours de cette période la puissance installée des réacteurs à eau sous pression a augmenté d'un facteur de 1,2, ce qui explique en partie le triplement de la perte d'énergie calculée.

La Conférence internationale de l'AIEA sur l'expérience acquise dans le domaine nucléo-énergétique qui doit se tenir prochainement fera un examen approfondi des leçons tirées de l'exploitation des centrales nucléaires, ce qui permettra d'améliorer la fiabilité et par conséquent la rentabilité de l'énergie d'origine nucléaire. Depuis quelques années, les efforts entrepris pour améliorer encore la sûreté de l'énergie d'origine nucléaire en ont réduit la fiabilité. Donc les considérations qui militent en faveur d'une adoption de l'énergie d'origine nucléaire, à savoir la fiabilité et la rentabilité, n'ont pas retenu toute l'attention qu'il est nécessaire de leur accorder si l'on veut que cette source d'énergie soit une option viable. Quant à la sûreté des centrales nucléaires, elle ne fait pas de doute, non plus que la possibilité de l'améliorer encore: telle a été la conclusion de la Conférence internationale de l'AIEA tenue à Stockholm en 1980.

Tableau 4. Indisponibilités totales inopinées de 1971 à 1980

Causes de l'indisponibilité	Perte d'énergie		Perte de temps	
	GWhe	%	heures	%
Réacteur et accessoires	10 917,9	2,0	25 763,0	2,4
Combustible	8 313,3	1,5	18 947,7	1,7
Système et instruments de commande du réacteur	27 736,2	5,1	57 074,0	5,2
Systèmes nucléaires auxiliaires et de secours	15 277,1	2,8	33 395,6	3,1
Principal système d'évacuation de la chaleur	79 030,9	14,4	151 084,9	13,9
Générateurs de vapeur	59 379,2	10,9	144 179,7	13,2
Alimentation, condensation et circulation d'eau	28 772,4	5,3	47 832,0	4,4
Turbo-générateur	89 616,6	16,4	155 833,0	14,3
Alimentation en énergie électrique	21 905,7	4,0	38 420,0	3,5
Divers	13 227,7	2,4	31 803,6	2,9
Erreur humaine	9 008,7	1,6	16 317,6	1,5
Rechargement de combustible	2 964,1	0,5	3 943,4	0,4
Rechargement de combustible: entretien et réparation	18 056,0	3,3	31 067,1	2,9
Entretien et réparation	56 747,2	10,4	152 447,2	14,0
Essai des systèmes/composants	4 800,1	0,9	10 614,6	1,0
Formation et autorisation	49,4	0	91,0	0
Restrictions réglementaires	42 077,1	7,7	56 495,1	5,2
Autres	59 077,1	10,8	113 721,2	10,4
Total	546 956,7		1 089 030,7	

Il faut normaliser pour assurer l'avenir

Que peut-on faire pour arrêter le déclin du nucléaire évoqué au début du présent article? Comment regagner la confiance du public, améliorer la fiabilité et la rentabilité de l'énergie d'origine nucléaire, et faire qu'elle redevienne une option viable en matière d'énergie?

Sur le plan économique, la tâche qui s'impose est de réduire considérablement les délais de préparation et les temps nécessaires à la construction même des centrales, et par conséquent leur coût, sans compromettre en rien la sûreté. Il a fallu en moyenne 67,6 mois (5,6 ans) pour construire les centrales nucléaires actuellement en service; or, pour les centrales actuellement en construction, le temps moyen sera de plus de 100 mois (8,5 ans environ). En République fédérale d'Allemagne par exemple, un retard d'un an dans la construction d'une centrale nucléaire de 1 300 MWe entraîne un supplément de

dépenses d'environ 90 millions de dollars pour les seuls frais de financement. Le remède essentiel consiste en une normalisation des installations et des principaux composants, qui doit être entreprise conjointement par les autorités compétentes en matière d'autorisation, les compagnies d'électricité et les fournisseurs à l'échelle nationale, voire internationale. Il n'est ni nécessaire ni admissible que des chantiers durent dix ans et plus. Dans plusieurs pays, on a pris l'habitude de procéder à des réajustements continuels de la conception et du plan alors que la construction est en cours. Cette pratique n'améliore que très peu la sûreté mais augmente énormément les frais. Une définition nette des critères fondamentaux de conception pour la sûreté et une conduite rationnelle du chantier valent mieux que d'incessantes modifications apportées aux exigences par les autorités compétentes en matière d'autorisation. On ne saurait trop souligner qu'une conception technique donnée ne peut subir qu'un

Tableau 5. Indisponibilités totales inopinées des réacteurs à eau sous pression > 100 MWe

Causes de indisponibilité	Année 1977-78		Année 1979-80	
	Perte d'énergie GWhe	Heures	Perte d'énergie GWhe	Heures
Systèmes et instruments de commande du réacteur	3 273,4	4354,5	8 755,9	10 587,6
Entretien imprévu	6 280,1	8422,6	12 122,1	15 623,6
Restrictions réglementaires	5 972,4	5646,1	25 757,5	30 530,7
Total	15 525,9		46 635,5	

nombre limité de modifications sans qu'il soit porté atteinte aux principes fondamentaux de la sûreté. Le moyen le plus efficace d'assurer la sûreté dans la construction et l'exploitation d'une centrale nucléaire, c'est d'en incorporer les dispositifs dans la conception et le projet originels. L'expérience de la France et de l'URSS devrait être davantage suivie par les autres pays. Ces principes sont plus importants encore lorsqu'il s'agit d'exporter des centrales dans les pays en développement où les installations de référence jouent un rôle décisif pour l'adoption de l'énergie d'«origine nucléaire».

Compétitivité et disponibilité

On ne commandera de nouvelles centrales nucléaires que si le courant qu'elles produisent peut concurrencer celui des autres systèmes de production. Le grand défi de l'avenir, ce sera la compétitivité, car il est désormais généralement admis que l'énergie d'origine nucléaire ne fait courir que peu de risques à l'environnement et à la sûreté. Cette opinion est confirmée par l'expérience acquise et par des travaux de recherche: les premiers résultats expérimentaux indiquent que les rejets de radioactivité dus à un gros accident nucléaire — et, par conséquent, le nombre des victimes directes — pourraient être cent fois moindres que les estimations faites dans diverses études théoriques du risque.

La rentabilité et le rapport coût-efficacité dépendent directement de la disponibilité de l'usine. Le facteur de charge moyen, qui est d'environ 60% pour l'ensemble des centrales nucléaires, dont la plupart assurent la charge de base, peut être amélioré, car on a obtenu dans certains pays des facteurs de charge à long terme dépassant 80%. On peut éviter les indisponibilités inopinées prolongées

en améliorant l'assurance et le contrôle de la qualité, en étudiant une conception plus prudente, et en normalisant les principaux composants à l'échelon international. Il faudra adopter des procédures de conduite simplifiées, qui tiennent compte de tous les aspects des rapports entre l'homme et la machine, et conférer une plus grande sûreté intrinsèque aux principaux systèmes. L'expérience mondiale de l'exploitation, les tendances qui s'en dégagent et les leçons qu'elle apporte devraient faire l'objet d'une analyse complète dont les résultats devraient être plus largement diffusés parmi les autorités compétentes en matière d'autorisation, les compagnies d'électricité et les fournisseurs de matériel. Une expansion de la coopération internationale s'avère nécessaire, et l'AIEA a un rôle important à jouer à cet égard. Un incident grave peut avoir pour une compagnie d'électricité ou pour un petit pays des conséquences économiques intolérables qu'il faudra s'efforcer de réduire au minimum, l'éventualité de tels incidents ne pouvant être totalement écartée.

Enfin, c'est au cours même de l'exploitation de la centrale qu'il y a lieu de provisionner financièrement son déclassement et le stockage définitif des déchets. La Suède et la Finlande, par exemple, imposent la constitution à cet effet de provisions à raison de tant par kWh.

Les programmes futurs de l'AIEA, riche de l'expérience d'un quart de siècle d'utilisation pacifique de l'énergie nucléaire, auront trait à ces problèmes prioritaires et auront pour objectif d'inciter les pays Membres en développement à faire appel, davantage que par le passé, à cette nouvelle et importante source d'énergie.

Faute de relever ces défis le nucléaire ne pourra, ni dans les pays industrialisés ni dans les pays en développement, assumer dans l'avenir le rôle qui lui revient pour l'approvisionnement du monde en énergie.