

Regards nouveaux sur les coûts de l'énergie d'origine nucléaire

par Rurik Krymm*

Au milieu de l'année 1973, les prédictions relatives à la production d'énergie d'origine nucléaire, fondées sur des prévisions de coûts pour plusieurs grandes centrales et sur les contrats passés en vue de leur construction et de leur approvisionnement en combustible, indiquaient que l'énergie d'origine nucléaire allait absorber rapidement une part croissante du marché de l'énergie et qu'elle pourrait représenter environ le tiers de la consommation brute totale d'énergie dans le monde à la fin du siècle. Ces prédictions reposaient généralement sur des comparaisons des coûts des centrales nucléaires et des centrales au mazout à une époque où le prix de vente du pétrole brut était de l'ordre de 2 à 3 dollars le baril. Moins d'un an plus tard, le prix du pétrole brut dans les principales zones d'exportation avait quadruplé et atteignait de 8 à 12 dollars le baril, tandis que les prix des produits pétroliers, ainsi que ceux du charbon et du gaz sur les marchés nationaux amorçaient une hausse rapide que les réglementations nationales ne pouvaient freiner que temporairement. Les économistes et naturellement les planificateurs étaient en

droit de supposer qu'une augmentation de 300% du prix du principal combustible concurrentiel qui, à vues humaines, paraissait irréversible, devrait se traduire par une brusque révision en hausse des programmes d'énergie d'origine nucléaire, limitée seulement par les délais nécessaires pour dévaler la capacité de fabrication d'installations et l'infrastructure du cycle du combustible nucléaire. L'intérêt politique qu'il y a à réduire la dépendance des pays à l'égard des importations du combustible semblaient justifier encore davantage le recours à l'énergie d'origine nucléaire. Des programmes nucléaires ont été effectivement révisés sur la base de ces arguments éminemment raisonnables. Pourtant, sauf dans quelques pays, à la fin de 1975 les projections relatives à la croissance de l'énergie d'origine nucléaire étaient en deça non seulement des objectifs envisagés lors de la première réaction à la crise du pétrole, mais même des niveaux prévus à une époque où il allait de soi que l'on disposerait jusqu'à la fin du siècle de pétrole à un prix égal au quart de son prix actuel.

Les causes de ce paradoxe, qui apparaît plainement au tableau 1, sont souvent divisées en deux catégories selon qu'elles sont économiques ou non. Cette répartition, pour être pratique, est quelque peu artificielle. Mise à part l'opinion extrême suivant laquelle "l'énergie d'origine nucléaire est dangereuse quel qu'en soit le prix", on peut apaiser en dernière analyse la plupart des inquiétudes exprimées si énergiquement et souvent de manière entièrement légitime à l'égard des risques particuliers aux centrales nucléaires et à leurs cycles du combustible en acceptant d'assumer des dépenses supplémentaires. La sûreté d'exploitation, la protection de l'environnement, le contrôle des diverses phases du

* Chef de la Section des études économiques, Division de l'énergie d'origine nucléaire et des réacteurs.

Pour permettre le développement de l'énergie d'origine nucléaire, il faut améliorer la formation du personnel chargé de faire fonctionner les réacteurs. A la centrale nucléaire de Pickering (Ontario, Canada), on a installé un simulateur de centrale nucléaire. Le simulateur est la reproduction exacte de la salle de commande de l'une des quatre unités électrogènes de Pickering. Les opérateurs apprendront, à l'aide du simulateur, à répondre aux situations normales, anormales et exceptionnelles en présence desquelles ils pourraient se trouver. Photo: Energie atomique du Canada Limitée



TABEAU 1: Accroissement de la puissance nucléaire mondiale¹ – Evolution des prédictions²
(puissance installée – à la fin de l'année – en GW(e))

Date de la prédiction Année	1969	1970	1973	1975	1976
1970	25,6	18	14	–	–
1975	101-125	118	94	71	–
1980	235–330	300	264	179–192	–
1985	–	610	567	475–525	440–450
1990	–	–	1070	875–1000	750–850
2000	–	–	–	2000–2500	1700–2000

¹ Compte non tenu des pays à économie planifiée

² Prédications OCDE/AEN – IAEA établies sur la base des renseignements fournis par les pays Membres.

TABEAU 2: Panorama des prévisions des coûts d'investissement pour des centrales équipées de réacteurs à eau légère d'une puissance de l'ordre de 1000 MW(e)
(Exprimées en dollars courants compte tenu de la révision des prix)

Date des prévisions	Mi-67	Mi-69	Mi-72	Début 73	Fin 74
Date d'entrée en service	Mi-71	Mi-74	Fin 77	Fin 77	83
Coûts unitaires (dollars courants par kW(e))	134	200	350	440	720

TABEAU 3: Moyenne des prévisions des coûts unitaires d'investissement pour les centrales équipées de réacteurs à eau légère et les centrales alimentées au charbon et au mazout¹ dans la gamme des 1000 à 1100 MW(e)
(Exprimées en dollars de mi-1974 par kW(e))

	Réacteurs à eau légère	Charbon	Mazout
Prévisions de 1969	267	235	200
Prévisions de 1974	500±75	425±40 ²	350±25 ²
Gamme des rapports entre les prévisions de 1974 et celles de 1969	1,59–2,15	1,64–2	1,63–1,88

¹ Deux unités identiques sur le même site avec refroidissement à circuit ouvert.

² Avec des systèmes d'élimination de SO₂.

cycle du combustible nucléaire et notamment de la phase terminale ont été ou peuvent être améliorés au point de réduire le risque nucléaire prévu à un degré sensiblement inférieur à celui qui est accepté comme une conséquence inévitable de la vie quotidienne dans notre société industrielle. Ces mesures ont entraîné un surcroît de dépenses qui apparaît à la fois directement et indirectement dans les prévisions de coûts récentes sous diverses formes: inclusion de dispositifs de sûreté complémentaires, coûts de personnel technique plus élevés, prolongation de la durée de construction et extension des plans d'intervention en cas d'urgence.

COÛTS DES INVESTISSEMENTS POUR LES CENTRALES NUCLEAIRES – UNE RETROSPECTIVE

Au premier coup d'oeil sur les prévisions des coûts d'investissement pour les réacteurs à eau légère faites au cours des sept ou huit dernières années, on s'aperçoit que les chiffres sont dispersés dans un intervalle si large qu'il est difficile de croire à la fiabilité des estimations futures. Le tableau 2, fondé sur la série d'études effectuées par la Commission de l'énergie atomique des Etats-Unis pendant un certain nombre d'années, résume une situation qui ne laisse pas d'être inquiétante.

Exprimés en dollars courants, les coûts unitaires des investissements pour des centrales nucléaires refroidies et modérées à l'eau légère comprises dans la même gamme de dimensions sembleraient avoir plus que quintuplé en sept ans. Si l'on tenait compte des prévisions faites à la fin de 1975, le facteur de multiplication serait de près de six. Etant donné que ni le coût du matériel ni la quantité de main-d'œuvre nécessaire pour la construction n'ont marqué d'augmentation de cette grandeur, la situation appelle manifestement une analyse plus poussée, dont la première étape consistera à établir une séparation entre les augmentations "apparentes" dues à une comptabilisation de l'inflation et les coûts supplémentaires "réels" dus à l'apparition de besoins inattendus.

Augmentations dues à l'inflation

Les chiffres indiqués au tableau 2 contiennent une part variable pour tenir compte de la révision des prix, évaluée pour des périodes de temps différentes à des taux différents, ce qui gêne considérablement tous les efforts visant à déterminer les coûts supplémentaires réels par opposition aux augmentations dues à l'inflation.

Si importante et nécessaire que soit la prévision exacte de la révision des prix pour le fabricant, la compagnie d'électricité, le banquier ou le tarificateur, il faut cependant corriger son impact sur le total des coûts d'investissement si l'on veut faire des comparaisons d'ordre économique dans le temps ou dans l'espace. Le fait d'inclure la révision des prix dans les prévisions des coûts totaux revient à mesurer une distance entre deux points avec un étalon qui diminuerait de longueur de manière souvent irrégulière à mesure que l'on avancerait du point de départ à celui d'arrivée. Ainsi, pour obtenir le coût total de 720 dollars/kW(e) pour une centrale qui fonctionnerait en 1983 et dont la construction exigerait par exemple 7,5 années, on fait la somme d'un certain nombre de dollars de 1976 avec un autre nombre de dollars de 1977, etc., jusqu'en 1983. De toute évidence, il n'y a pas de commune mesure entre ce total et celui des prévisions de dépenses pour une centrale au mazout qui serait mise en service la même année mais dont la construction ne commencerait qu'en 1978, ni avec le total des coûts afférents à une centrale nucléaire qui serait mise en service à une époque différente, puisque chacun de ces totaux représenterait une somme de dollars de valeurs différentes.

Une autre source de confusion tient aux prévisions des intérêts pendant la construction en période d'inflation. Le montant des intérêts pendant la construction est naturellement lié

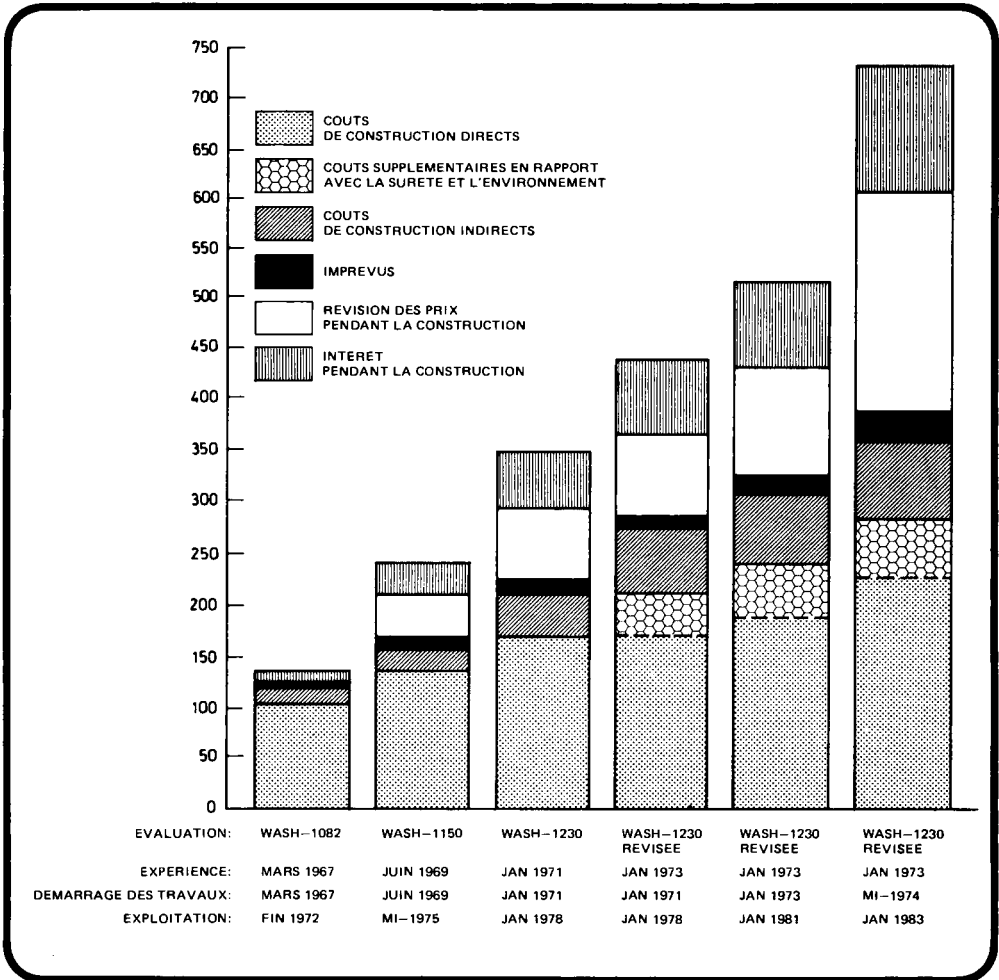


Fig.1. Comparaison des prévisions de coûts pour les centrales nucléaires [coût d'investissement total pour des unités de 1000 MW(e)]

au taux admis pour la révision des prix, non seulement parce que les paiements progressifs sur lesquels l'intérêt est dû varient, mais aussi parce que le taux d'intérêt dépend lui-même du taux de révision des prix. Il est bien évident qu'il ne sera pas possible d'obtenir des fonds dans les mêmes conditions d'individus ou de gouvernements si le taux d'inflation prévu est, par exemple, de 10% ou s'il est nul. Le même argument s'applique de manière plus générale au taux d'actualisation. Celui-ci est toutefois souvent ignoré dans les prévisions de coûts.

La figure 1, extraite d'une étude des coûts de l'énergie d'origine nucléaire contenue dans le rapport de la Commission de l'énergie atomique des Etats-Unis WASH-1345, illustre l'importance de ces considérations. La révision des prix pour les réacteurs à eau légère qui doivent être mis en service en 1983 est de l'ordre de 25% du total, alors qu'elle représentait une partie presque insignifiante des prévisions de 1967. Mais la figure 1 ne présente qu'une image incomplète de la situation, car même si l'on corrige l'impact de la révision des prix, les résultats obtenus restent exprimés en unités monétaires de valeurs différentes allant de 1967 à 1974.

Coûts supplémentaires "réels"

L'étape suivante consiste à ramener toutes les prévisions à un dénominateur commun en exprimant tous les coûts en dollars d'une année déterminée. On trouvera un exemple de comparaison économique ainsi "corrigée" au tableau 3, dans lequel la révision des prix a été éliminée, l'intérêt pendant la construction ajusté, et les prévisions des coûts d'investissement faites en 1969 et 1974 pour les centrales nucléaires, alimentées au charbon et alimentées au mazout dans la gamme de 1000 à 1100 MW(e), exprimées en dollars constants de mi-1974. Si les chiffres obtenus constituent inévitablement des moyennes abstraites sans rapport avec un cas déterminé, ils n'en apportent pas moins certains éclaircissements sur ce qui s'est produit en fait au cours des cinq dernières années:

1. Ces prévisions en dollars constants pour les centrales nucléaires ont augmenté au cours de cinq dernières années de 60% à 115% et non de 200% comme la figure 1 peut le donner à entendre.
2. Au cours de la même période, ces mêmes prévisions pour les centrales à combustible fossile ont également augmenté de pourcentages qui ne sont en moyenne que faiblement inférieurs à ceux qui s'appliquent aux centrales nucléaires.
3. Les marges d'incertitude sur les coûts sont légèrement plus grandes pour les centrales nucléaires.

Les causes de ces augmentations sont complexes et interdépendantes. Si nous laissons de côté les sous-estimations liées aux politiques agressives de pénétration des marchés qui ont prévalu essentiellement au cours de la période 1966-69, ces causes peuvent être réparties approximativement entre des variations des coûts liés à l'environnement, des coûts de sûreté, des coûts indirects et des coûts imprévus, dont l'analyse détaillée n'entre pas dans le cadre du présent article. Néanmoins, on peut soutenir avec quelque raison que les considérations liées à l'environnement et à la sûreté sont à l'origine de la plus grande part des augmentations, sans doute en raison de besoins nouveaux en matériel, mais aussi du fait du développement considérable des services d'ingénierie et de construction, de la prolongation de la période de construction et du gonflement substantiel des provisions pour imprévus.

Le tableau 4, qui récapitule les prévisions faites en 1969 et 1974 pour différentes catégories de personnel nécessaire pour l'ingénierie et la construction de centrales nucléaires, montre que les rapports entre les nombres d'heures de travail sont du même ordre de grandeur que les rapports de coûts du tableau 3 et confirme, dans une certaine mesure, la validité de l'affirmation quant aux causes principales de l'augmentation des coûts.

Coûts unitaires d'investissement pour les centrales équipées de réacteurs à eau légère

Les chiffres du tableau 3 peuvent servir à évaluer approximativement les différences de coûts unitaires d'investissement pour les grands réacteurs à eau légère des pays industriels et pour les centrales alimentées en combustibles fossiles. Cependant, pour que les résultats soient cohérents, il faut comparer les valeurs supérieures des prévisions pour les centrales nucléaires aux valeurs supérieures des prévisions pour les centrales alimentées en combustible fossile car il serait quelque peu illogique de supposer que les considérations relatives à l'environnement, qui sont l'une des principales causes d'augmentations possibles, s'appliqueraient de manière spécialement forte à une catégorie de centrales et pas du tout à une autre. Dans ces conditions, les différences approximatives de coûts unitaires d'investissement pour les centrales nucléaires et les centrales au charbon semblent être de 40 à 110 dollars par kW(e) et celles qui séparent les centrales nucléaires et les centrales au mazout de 100 à 200 dollars de mi-1974. Pour être prudent, on pourrait retenir comme indication générale les différences maximales de 110 dollars pour le charbon et de 200 dollars pour le mazout.

TABLEAU 4: Prévisions moyennes passées et présentes des besoins en personnel pour la construction d'une centrale nucléaire de 1000 MW(e)
(en millions d'heures de travail)

	Prévisions moyennes de 1969	Prévisions moyennes de 1974	Rapport entre les prévisions
I. Main-d'œuvre pour la construction	6	11	1,83
II. Services techniques:			
a) Architecture industrielle	0,7	1,2	1,71
b) Direction des travaux	0,7	1,3	1,86

TABLEAU 5: Limites estimées des coûts directs de la phase initiale du cycle du combustible pour un réacteur à eau légère à l'équilibre
(dollars de la mi-1974)¹

	dollar/kilo de combustible	mills/kWh
Uranium et conversion de l'uranium	339–500	1,41–2,10
Séparation des isotopes	296–440	1,23–1,83
Fabrication	120–150	0,5 –0,62
Total des coûts directs	755–1090	3,14–4,55
Coûts indirects	–	1,23–1,80
Coûts totaux de la phase initiale	–	4,37–6,35

¹ Centrale de 1000 MW(e) – rendement thermique: 33%
enrichissement du combustible: 0,03
taux de combustion à l'équilibre: 30 000 MWd/t

TABLEAU 6: Prix limites du charbon et du pétrole sur le site de l'installation
(dollars de mi-74 pour 1 million de kilocalories)

	Charbon	Pétrole
Cas le plus défavorable pour les centrales nucléaires	3,76	4,56
Cas le plus favorable pour les centrales nucléaires	1,84	2,35

Note: Pour ces calculs, on a utilisé un taux d'actualisation de 10% à prix constants et un facteur de charge de 70%.

Il convient de souligner tout spécialement que l'analyse ci-dessus ne concerne que les grandes centrales équipées des réacteurs à eau légère des pays industriels qui exécutent d'importants programmes nucléaires.

Il serait à la fois vain et fallacieux de chercher à extrapoler ces chiffres aux prévisions de coûts pour une première centrale nucléaire dans un pays en voie de développement, par exemple, en établissant de simples rapports entre le coût unitaire et les dimensions de l'installation. Etant donné la variabilité des facteurs aussi essentiels que l'infrastructure de l'industrie et de la main-d'œuvre, les conditions existant sur le site, les sources d'approvisionnement, le type de contrat et les dispositions financières, chaque situation est unique et toute généralisation impossible.

COÛTS DU CYCLE DU COMBUSTIBLE NUCLEAIRE

Au cours des trois dernières années, les prévisions de coûts de certains des principaux éléments du cycle du combustible nucléaire ont varié encore davantage que celles des coûts d'investissement. Des marges d'incertitude particulièrement grandes existent pour la phase finale du cycle du combustible et il semble donc raisonnable de séparer les coûts de la phase initiale de ceux du retraitement et du recyclage.

Coûts de la phase initiale

Uranium: Au cours des trois années allant de 1973 à 1976, on a enregistré une augmentation sensationnelle du prix de U_2O_8 , qui au début des années 70 était compris entre 6 et 8 dollars la livre. Il n'est toutefois pas possible de ramener cette augmentation à un seul chiffre. On ne peut pas non plus faire de prévisions valables pour l'avenir en se fondant sur les prix des quantités disponibles d'uranium livrables en 1976, qui ont atteint 42 dollars la livre à la fin de 1975, ou sur les prix payés pour les quantités, livrées au cours de l'année en vertu de contrats antérieurs, qui sont bien inférieurs, ou sur les prix convenus en vertu de nouveaux contrats signés au cours d'une période de tension marquée.

Tout ce que l'on peut dire est que l'ère de l'uranium à bon marché est révolue, mais que les résultats de l'explosion des prix de 1974 et 1975 doivent encore se faire sentir, notamment sous forme de découvertes nouvelles et de possibilités de production dans des régions intéressantes où la prospection a été limitée ou inexistante pendant une longue période d'euphorie. Il semblerait raisonnable de prévoir que les prix futurs de la livre d' U_3O_8 seront compris entre 20 dollars et 30 dollars de mi-1974 avec un taux de révision correspondant à celui de l'inflation générale.

Enrichissement. Les prix actuels des services d'enrichissement fournis par des installations construites il y a plusieurs décennies ne donnent pas non plus d'indication sur les prix futurs. Les prix actuels de 53 à 61 dollars par kg de travail de séparation demandés par les Etats-Unis seront probablement largement dépassés pour les installations nouvelles et il paraît indiqué de prévoir des prix allant de 80 dollars à 120 dollars de mi-1974, ajustés de manière à tenir compte de l'inflation générale.

Fabrication du combustible. Cette composante du coût est demeurée stable dans le passé et restera probablement comprise entre 120 dollars et 150 dollars par kg de combustible fabriqué.

Le tableau 5 récapitule les conséquences de ces prévisions pour le prix de revient du combustible d'uranium enrichi à 3% et pour l'élément combustible du prix de revient de

l'électricité dans une centrale équipée d'un réacteur à eau légère. Cet élément varie dans un intervalle assez large, allant de 4,37 à 6,37 mills par kWh. Cet intervalle s'élargit encore lorsqu'on tient compte de la phase terminale du cycle du combustible nucléaire.

Coûts de la phase terminale

Les principaux coûts de la phase terminale du cycle du combustible sont entachés d'une telle marge d'incertitude qu'il semble quelque peu prématuré de procéder à l'analyse économique de leur interaction. En ne tenant compte que de certains de ces coûts, on peut broser le tableau général ci-après:

Retraitement. En l'absence d'expérience à l'échelle industrielle, il n'est pas tout à fait surprenant de constater que les coûts estimatifs du retraitement varient entre 150 et 300 dollars le kg alors que les prévisions de 1972 étaient de 40 dollars le kg, ce qui, même en tenant compte de l'inflation, représente une hausse du triple au sextuple.

Coût de fabrication d'éléments combustibles mixtes Pu/U. Ce coût serait compris entre 250 dollars et 350 dollars le kg. De ce fait, la différence de coût avec la fabrication d'éléments d'uranium peut varier entre 100 et 200 dollars le kg.

La valeur de l'uranium récupéré dépendra des coûts admis pour l'uranium naturel et pour le travail de séparation.

La valeur du plutonium fissile destiné à être recyclé dans les réacteurs à eau légère dépendra également des considérations ci-dessus, mais elle sera également influencée par les coûts supplémentaires que comporte la fabrication des combustibles à base d'un mélange d'oxydes.

Ainsi donc, même dans cette énumération extrêmement simplifiée, nous aboutissons à une combinaison d'incertitudes dont sont entachées quatre des grandes composantes interdépendantes: l'uranium naturel, le travail de séparation, le retraitement et les coûts supplémentaires de fabrication. Si l'on ne retenait que les valeurs extrêmes pour chacune de ces composantes, il faudrait encore examiner 16 cas. Aux fins de la présente étude, il suffira d'indiquer que de manière très approximative le bénéfice est de 150 dollars par kg de métal lourd ou environ 0,631 mill/kWh dans le cas le plus favorable et la perte de plus 100 dollars par kg ou de plus de 0,42 mill/kWh dans le cas le plus défavorable.

Etant donné les inconnues supplémentaires que représentent les coûts de l'élimination définitive des déchets, il semblerait raisonnable, aux fins de la présente étude, de supposer que le retraitement s'avérera être une "opération blanche" et de ne pas en tenir compte dans les estimations très sommaires faites actuellement. Ceci ne diminue en rien l'importance essentielle de la phase terminale du cycle du combustible nucléaire pour le développement d'une industrie nucléaire parvenue à maturité.

La dernière observation est d'autant plus pertinente que l'intervalle des prévisions de coûts pour la phase initiale ne tient compte ni du coût d'installations agrandies de stockage du combustible sur le site de l'installation, qui se révéleront nécessaires en l'absence de retraitement, ni de la possibilité d'un retraitement obligatoire, même si celui-ci ne se traduit pas par un avantage économique. Dans l'un et l'autre cas, la limite supérieure de l'intervalle du coût total du combustible serait voisine de 7 mills le kWh, tandis que la limite inférieure pourrait tomber à 3,74 mills le kWh dans les hypothèses les plus favorables.

CONCLUSIONS PROVISOIRES

Malgré les incertitudes signalées dans les paragraphes qui précèdent, les grandes centrales nucléaires conserveront un grand avantage économique dans la plupart des situations. Cette conclusion ressort nettement du tableau 6 où sont indiqués les prix limites du charbon et

du mazout utilisés comme combustible (c'est-à-dire ceux au-delà desquels les centrales nucléaires commencent à devenir compétitives) dans les combinaisons les plus favorables et les plus défavorables des hypothèses admises dans la présente étude pour prévoir les coûts d'investissement et de combustible nucléaire.

Si nous nous préoccupons d'abord du cas le plus défavorable, les coûts de 3,76 et de 4,56 dollars pour 10^6 kilocalories pour le charbon et le mazout respectivement (qui correspondent approximativement à 26 et à 46 dollars la tonne) indiqués dans ce tableau sont actuellement sensiblement dépassés à peu près partout et, à moins d'une baisse vertigineuse des prix du mazout que ni les producteurs ni les consommateurs ne semblent souhaiter, il est extrêmement peu probable que ces coûts soient atteints dans un avenir prévisible. Dans le cas le plus favorable, l'avantage économique des centrales nucléaires devient écrasant, alors même qu'il n'est possible de déterminer sa valeur exacte que par une analyse des caractéristiques particulières à chaque cas d'espèce.

Dans ces conditions, les raisons du paradoxe que représente la réduction des programmes nucléaires malgré un avantage économique manifeste doivent être recherchées principalement en dehors du domaine de l'économie. Les ajournements et annulations qui caractérisent les programmes de commandes à court terme des compagnies d'électricité de certains pays, grands producteurs d'énergie nucléaire comme les Etats-Unis, pourraient s'expliquer par les conséquences de la récession de 1974-75 et de la stagnation de la consommation d'énergie d'origine nucléaire qui l'a accompagnée. L'équipement commandé à la fin des années 60, en supposant que la demande augmenterait de 6% à 7% par an, est entré en service en 1974 et 1975, alors que la demande ne croissait aucunement. Plusieurs compagnies se sont ainsi trouvées disposer de grosses marges de réserve à un moment où les pénuries de capitaux et la hausse brutale des prix des combustibles fossiles rendaient particulièrement difficile le financement de nouvelles installations.

Mais ceci n'est qu'une explication partielle et il convient certainement de rechercher la cause principale de ce paradoxe dans l'effet multiplicateur de l'accumulation d'incertitudes. Il est possible de quantifier de manière approximative certaines de ces incertitudes, comme on l'a fait dans la présente étude, mais les effets psychologiques de leur accumulation sur les directeurs de sociétés et sur les pouvoirs publics ne peuvent être ramenés à de simples chiffres. En outre, certaines inconnues essentielles du cycle du combustible nucléaire et de l'acceptation par le public ne peuvent tout simplement pas être traduites en termes monétaires. C'est de la définition de ces problèmes et de leur solution et non d'une multiplication de comparaisons économiques que dépendra l'avenir de l'énergie d'origine nucléaire.