

Rentabilité et compétitivité des centrales nucléaires

Un bilan de l'AIEA, corroboré par d'autres études,
fait apparaître une situation de force

par Leonard L. Bennett

D'une manière générale, on peut dire que les centrales nucléaires de la taille de celles qu'on trouve actuellement sur le marché sont et resteront compétitives avec les centrales alimentées au mazout. De fait, la supériorité économique des centrales nucléaires par rapport à ces dernières est écrasante, vu le niveau que les prix internationaux du pétrole ont atteint aujourd'hui.

Si l'on compare maintenant les prix de revient de l'électricité produite par les centrales nucléaires et par les centrales alimentées au charbon, on constate que les résultats dépendent de nombreux facteurs et qu'il n'existe pas de réponse unique, valable pour tous les cas. Cependant, la plupart des grandes centrales nucléaires qui entreront sous peu en service pourront produire de l'électricité à meilleur prix que les centrales alimentées au charbon. Dans certaines situations néanmoins, comme dans des régions des Etats-Unis d'Amérique et du Canada, où les centrales situées à proximité plus ou moins immédiate du carreau des mines peuvent trouver du charbon à bas prix, les centrales alimentées au charbon peuvent fournir de l'électricité à des prix compétitifs, voire inférieurs à ceux des centrales nucléaires.

Pour l'électricité produite au charbon, le facteur économique déterminant est le prix de revient du charbon livré à pied d'œuvre. Il ressort d'études de l'AIEA que les usines alimentées au charbon ont une supériorité économique quand le charbon peut être livré à un prix inférieur à 30 dollars des Etats-Unis la tonne. Pour l'énergie d'origine nucléaire, le facteur déterminant est le montant total des dépenses d'équipement, lequel augmente sensiblement si les taux d'intérêt sont élevés et si les délais de construction sont longs. Quant aux centrales alimentées au charbon, il est à prévoir qu'une réglementation très stricte sera, dans l'avenir, mise en vigueur afin de protéger l'environnement. Il en résultera une augmentation des dépenses d'investissement et des frais d'exploitation qui placera les centrales nucléaires dans une situation plus compétitive.

Les communications des pays Membres présentées lors de la Conférence internationale sur l'expérience en matière d'énergie nucléaire que l'AIEA a tenue en septembre 1982 ont confirmé l'expérience généralement favorable recueillie — à l'époque — sur un total de quelque 2600 années d'exploitation de réacteurs de centrales nucléaires jusqu'à la mi-1982. Plusieurs pays, notamment la Belgique, ont souligné que l'énergie d'origine nucléaire, une fois qu'elle a atteint un certain niveau, joue un rôle important en stabilisant, voire en faisant baisser les prix de l'énergie électrique.

M. Bennett est chef de la Section des études économiques de la Division de l'énergie d'origine nucléaire à l'AIEA.

Certes, les facteurs de charge réels des centrales nucléaires pour lesquelles on a fixé une charge de base sont quelque peu inférieurs à la valeur escomptée retenue aux fins de planification, mais l'expérience a confirmé que les centrales nucléaires permettraient, comme on pouvait s'y attendre, de réaliser dans la plupart des pays des économies par rapport aux centrales alimentées au charbon ou au mazout. Les pays qui ont présenté des communications ont fourni des preuves qui montrent clairement que les centrales nucléaires représentent, de très loin, le meilleur choix qu'il faut faire, sur le plan économique, face aux centrales au mazout et également aux centrales au charbon, sauf dans certaines régions où le charbon est abondant et bon marché.

Cette conclusion est en outre corroborée par les études que l'AIEA a faites concernant les coûts de production calculés pour des centrales nucléaires d'une puissance supérieure à 600 MWe. On estime que, dans cette gamme, les coûts de production d'électricité des centrales nucléaires sont de loin inférieurs à ceux des centrales alimentées au pétrole et que les centrales nucléaires sont compétitives sur le plan économique avec les centrales alimentées au charbon, sauf lorsque les prix du charbon sont peu élevés.

Economie des petits réacteurs

On ne possède pas actuellement de renseignements permettant d'établir des prix de revient irréfutables pour de nouveaux programmes où interviennent des réacteurs nucléaires d'une puissance inférieure ou égale à 600 MWe. Pourtant, l'AIEA a reçu, de fabricants éventuels de réacteurs de petite et moyenne puissance, quelques renseignements qui donnent des estimations assez approximatives pour des réacteurs de 200 à 400 MWe. On arrive à des chiffres qui laissent penser que des centrales nucléaires de ce genre pourraient être compétitives avec les centrales au mazout, qui resteront la principale source d'électricité dans la plupart des pays en développement.

Si maintenant on veut faire une comparaison avec les coûts de l'électricité produite par des centrales au charbon, on constate que les centrales nucléaires ne sont que marginalement compétitives pour les faibles puissances de l'ordre de 300 à 400 MWe, et ce uniquement si le prix du charbon est élevé. A noter cependant que si, dans les pays en développement, on décidait d'étendre considérablement la production d'électricité au moyen de centrales au charbon, il faudrait prévoir de gros investissements pour l'infrastructure et en particulier pour les réseaux de transport nécessaires. Il n'a pas été tenu compte de coûts de ce genre dans la présente

analyse. Il ne faudrait pas non plus négliger les répercussions qu'un vaste programme de production d'électricité au charbon pourrait avoir sur l'environnement.

Ces premiers résultats concernant les petits et moyens réacteurs étant assez encourageants, l'Agence a entrepris une étude pour établir avec plus de précision ce qu'ils coûteraient, et s'ils seraient compétitifs, et pour rechercher les débouchés que ce type de centrales nucléaires pourrait avoir à l'avenir.*

Éléments des coûts de production d'électricité d'origine nucléaire

Les principaux éléments qui interviennent dans le calcul des coûts de production d'électricité d'origine nucléaire, tels qu'ils apparaissent dans le tableau ci-joint sont: les dépenses d'équipement, le cycle du combustible nucléaire, les dépenses d'exploitation et de maintenance. On y trouve également l'indication, en pourcentage, de la part que chacun de ces trois éléments occupe dans le coût total de la production d'électricité.

Les autres éléments dont il faut également tenir compte sont les coûts de mise en place de l'infrastructure nécessaire (recherche et développement, transfert de technologie en provenance des pays industriels, développement de l'industrie nationale et formation de main-d'œuvre spécialisée, etc.) qu'implique tout programme d'équipement nucléo-énergétique. Il ne faut toutefois pas perdre de vue que toutes ces activités sont également génératrices de retombées qui profitent à l'ensemble du pays. L'intérêt que présente une centrale dépend de son facteur de charge, de sa puissance et de sa durée utile; l'économie d'un pays est tributaire des taux d'intérêts nationaux et étrangers, de l'augmentation des prix et des taux d'escompte retenus aux fins d'analyse.

* Pour de plus amples renseignements voir «Les perspectives des réacteurs de faible puissance», dans le *Bulletin de l'AIEA*, Vol.26, n° 4, décembre 1984.

Éléments des coûts de production d'électricité

Principaux éléments du coût	Part du coût de la production		
	Nucléaire	Charbon	Mazout
Dépenses d'investissement	55-80%	25-55%	10-25%
Combustible	15-30%	40-65%	70-85%
Exploitation et maintenance	5-15%	5-10%	5%

Autres facteurs déterminants

Mise en place de l'infrastructure	Durée utile de la centrale
Durée de construction de la centrale	Taux d'intérêt (étranger et local)
Facteur de charge de la centrale	Taux de dévaluation (étranger et local)
Puissance nette de la centrale	Taux d'escompte (économie nationale)

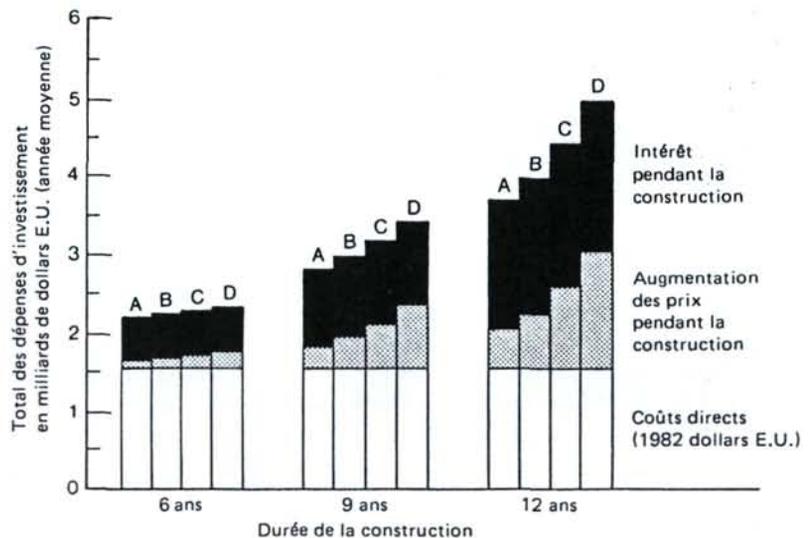
Dépenses d'investissement à consentir pour une centrale nucléaire

Les dépenses d'investissement représentant une part importante du coût total de la production d'électricité d'origine nucléaire méritent qu'on leur accorde une attention toute particulière.

La forte augmentation des dépenses d'investissement dans la plupart des pays a été un des facteurs prédominants de l'élévation des coûts de production de l'énergie d'origine nucléaire.

On a estimé qu'une des principales raisons des augmentations des dépenses d'investissement (en monnaies constantes) tenait aux modifications apportées dans certains pays aux spécifications réglementaires qui ont conduit à revoir la conception des centrales, à développer leur capacité de production et à procéder à des rattrapages en cours d'exécution. Outre les dépenses qu'ils entraînent, tous ces facteurs s'accompagnent de

Effets des délais de construction et de l'augmentation des prix pendant la période de construction sur le total des dépenses d'investissement (Réacteur à eau légère de 1250 MWe).



Source: «Nuclear and Fossil Power Plant Economics», Chaim Braun (EPRI), communication présentée à la réunion sur les bases économiques et financières de la production d'électricité d'origine nucléaire de l'ANS, Washington D.C., 8-11 avril 1984.

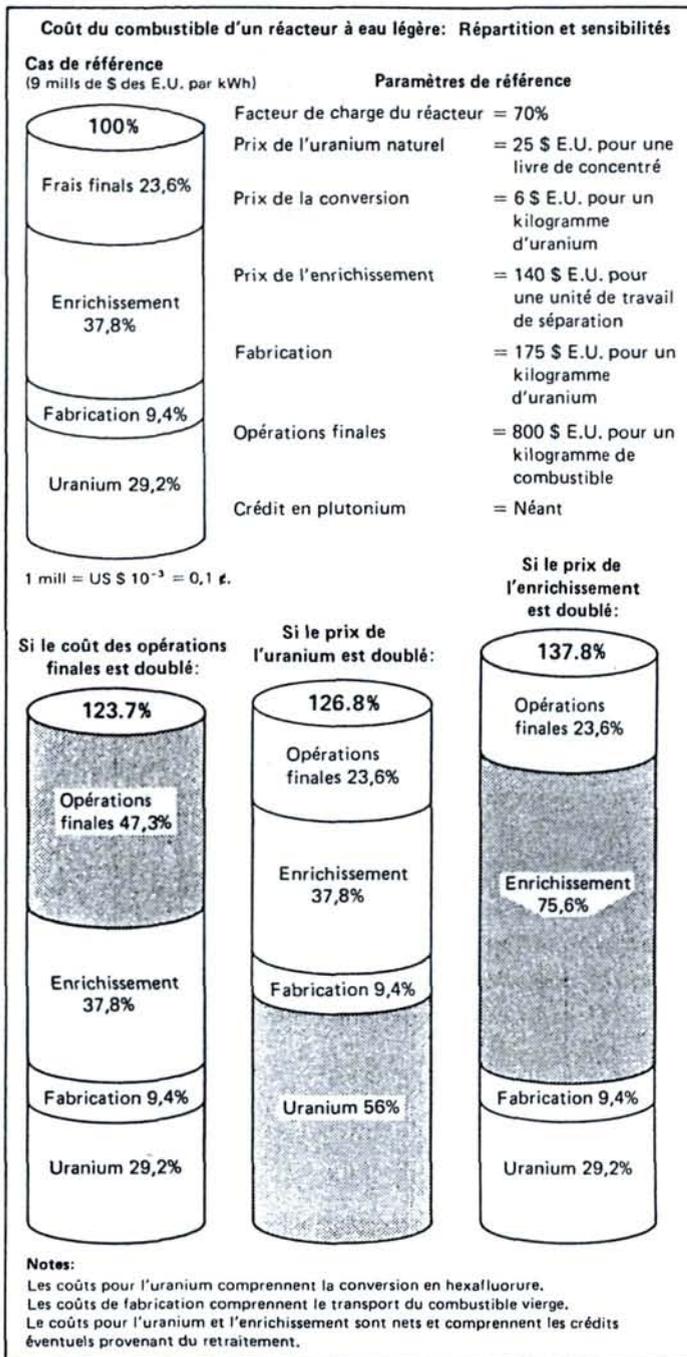
Hypothèses:

Taux réels d'augmentation des prix pendant la construction:

Coût de l'argent

- A = 0%
- B = 2%
- C = 5%
- D = 8%

- Avant impôts: 5,425% par an (réel)
- 11,75% par an (avec déflation)
- Taux d'inflation: 6% par an



directs dans le cas d'une centrale dont la construction dure six ans. En revanche, si l'on retient le même taux d'augmentation des coûts, mais si la construction s'étend sur douze années, les intérêts et l'augmentation des coûts ajoutent plus de 200% aux coûts directs.

Coûts du combustible nucléaire

Comme nous l'avons déjà indiqué, les coûts du combustible nucléaire n'entrent que pour 15 à 30% dans le coût total de l'électricité produite par les centrales nucléaires. A titre de comparaison, le coût du combustible représente 40 à 65% du coût total de la production des centrales au charbon et peut atteindre 85% pour les centrales au mazout.

Les principaux éléments des coûts du cycle du combustible pour un réacteur à eau légère et uranium enrichi sont indiqués dans le graphique ci-contre. Il est intéressant d'étudier dans quelle mesure les coûts du cycle du combustible nucléaire et les coûts totaux de l'électricité d'origine nucléaire peuvent varier en fonction de changements susceptibles d'intervenir dans ces principaux éléments. Le graphique ci-contre donne les résultats d'une telle étude.

Variations du prix de l'uranium

En postulant une valeur du concentré d'uranium (U₃O₈) égale à 25 dollars des Etats-Unis, on voit que, le prix de l'uranium doublant (soit une augmentation de 100%), le coût total de cycle du combustible nucléaire augmenterait de 27%. Cependant, le cycle du combustible n'entrant que pour 15 à 30% dans le coût total de production, l'augmentation de 100% retenue pour le prix de l'uranium n'élèverait les coûts de production de l'énergie nucléaire que de quelque 4 à 8%. A titre de comparaison, une augmentation de 100% des prix des combustibles fossiles entraînerait une élévation des coûts de production de 40 à 65% pour les centrales au charbon et de quelque 70 à 85% pour les centrales au mazout.

On voit ainsi clairement qu'une fois construite, les coûts de production futurs d'une centrale nucléaire sont beaucoup moins sensibles aux variations des prix du combustible que ce n'est le cas pour les centrales aux combustibles fossiles.

Effet des variations des prix des opérations d'enrichissement

En postulant une valeur de 140 dollars des Etats-Unis pour unité de travail de séparation, les résultats sont analogues à ceux dont il vient d'être question à propos de l'uranium. Une augmentation de 100% des prix demandés pour enrichir l'uranium entraînerait une augmentation des coûts du cycle du combustible de quelque 38% qui se traduirait par une élévation des coûts totaux de production de 6 à 11% seulement.

Variations des coûts des opérations terminales

Le troisième élément important du cycle du combustible nucléaire des réacteurs à eau légère est le coût des opérations de traitement du combustible épuisé qui comprend le retraitement et l'élimination des déchets — opérations dites terminales du cycle du combustible. Ainsi qu'il ressort du graphique, si l'on

retards dans le calendrier des travaux; il en résulte des services de l'intérêt plus lourds pendant la période de construction, surtout si les taux d'intérêt sont élevés, comme ce fut le cas aux alentours de 1980.

La figure à la page 41 fait apparaître l'importance capitale des délais de construction et du taux d'augmentation des coûts. Les coûts directs de la centrale sont d'environ 1,5 milliard de dollars des Etats-Unis. Si nous retenons un taux modique d'augmentation réelle de 5% par an et une période de construction de six années, le total des dépenses d'investissement, y compris les intérêts et l'augmentation des coûts pendant la construction, s'élève à quelque 2,2 milliards de dollars des Etats-Unis. Ainsi les intérêts et l'augmentation des coûts ont pour effet de majorer de quelque 50% les coûts

prend pour hypothèse une valeur de 800 dollars des Etats-Unis par kilogramme de combustible, une augmentation de 100% des coûts des opérations terminales entraînerait une augmentation de quelque 24% des coûts du cycle du combustible, ce qui entraîne une élévation de 4 à 7% seulement des coûts de production.

Autres considérations relatives aux coûts

Se fondant sur les études que nous venons de retracer ici, l'AIEA conclut que l'énergie d'origine nucléaire constitue une option économiquement compétitive pour l'approvisionnement futur en énergie et en électricité. Cependant, la supériorité économique de l'énergie d'origine nucléaire est fortement liée aux circonstances particulières à chaque cas et il n'est guère possible de généraliser.

Les investissements élevés et les lourdes charges qu'imposent les phases initiales du cycle des dépenses afférentes à une centrale nucléaire peuvent constituer un fardeau difficile à supporter pour un pays en développement qui doit contracter des prêts aux conditions du marché pour mettre en œuvre un programme nucléaire.

Une autre condition préalable à l'équipement nucléo-énergétique est que le pays doit disposer d'une infrastructure locale suffisamment développée. La mise en place d'une infrastructure capable de soutenir la production d'énergie d'origine nucléaire peut être une opération longue et coûteuse; elle n'en est pas moins *indispensable*. L'option nucléo-énergétique diffère en cela des autres choix possibles dont les exigences en infrastructures pour les types de centrales retenues sont beaucoup moins rigoureuses et beaucoup plus proches de celles qu'on a déjà connues.

D'un autre côté, la mise en place ou l'expansion d'une industrie reposant sur le charbon est, comme de nombreux pays ont pu l'apprendre à leurs dépens, une entreprise compliquée qui suppose une planification judicieuse de la production et des moyens de transport permettant d'assurer un approvisionnement régulier aux industries consommatrices. Si jamais auparavant on n'a utilisé le charbon pour la production d'énergie, il faudra un investissement initial considérable pour assurer le transport du charbon vers les centrales, son stockage, sa manutention et les opérations d'élimination des scories. Les investisseurs étrangers ne s'intéressant guère au charbon, les gros investissements nécessaires à l'ouverture de nouvelles mines ou à l'agrandissement des mines anciennes doivent être assurés par des fonds nationaux, en pratique essentiellement gouvernementaux. Si l'on fait une comparaison avec le pétrole, le charbon coûte cher à transporter, et sa manutention est difficile et salissante, ce qui réduit considérablement son avantage de prix.

Le transport est un élément particulièrement important pour le charbon importé. Si le transport océanique n'est pas coûteux, en revanche, les transports intérieurs sont beaucoup plus chers ce qui, dans la pratique, limite l'usage du charbon aux régions côtières ou aux emplacements intérieurs particulièrement bien desservis par des liaisons ferroviaires. Aucun de ces problèmes ne constitue par essence et à lui seul un obstacle insurmontable. Mais si on les associe, ils créent un ensemble redoutable de servitudes et, pour s'en sortir, il faut que producteurs, transporteurs et consommateurs se lient par des engagements fermes.

Les comparaisons économiques et leurs limites

Il n'existe aucune méthode absolue pour calculer correctement les coûts de production de l'électricité d'origine nucléaire ou autre et l'on ne gagnerait pas grand chose à chercher à normaliser entièrement les valeurs de références retenues pour pouvoir comparer les coûts des centrales nucléaires et ceux des centrales alimentées aux combustibles fossiles par exemple.

Même à l'échelon national, ces comparaisons entre types de combustibles (nucléaire et fossile) n'ont qu'une valeur limitée sur le plan général, vu le nombre d'hypothèses et de conditions d'exploitation propres à chaque cas considéré.

Il n'en reste pas moins que les résultats de telles études peuvent contribuer à mieux faire comprendre l'avenir économique de l'électricité d'origine nucléaire à l'échelon mondial.

C'est pourquoi le présent article retrace certaines des expériences signalées concernant la rentabilité de l'électricité d'origine nucléaire et les estimations de ses coûts futurs par rapport à ceux des centrales à combustible fossile.

Nous soulignons une fois de plus que les données fournies sur les coûts *ne doivent pas* être retenues comme données de référence à des fins de planification; elles valent seulement en tant qu'indication globale de la compétitivité générale de l'électricité d'origine nucléaire.

Toute analyse rigoureuse de l'économie de la production d'électricité d'origine nucléaire doit envisager cette source d'énergie dans le cadre de la politique générale du pays considéré en matière de développement énergétique et social. A titre d'exemple de particularités locales dont il convient de tenir compte, nous citerons la présence, le volume et le coût des réserves locales traditionnelles d'énergie, l'infrastructure physique existante (ports, routes, industries), l'infrastructure institutionnelle, les effectifs existants à tous les niveaux et les ressources financières disponibles pour un programme de production d'électricité d'origine nucléaire.

C'est ainsi qu'il est possible d'évaluer correctement les effets économiques d'un programme nucléo-énergétique tant sur le marché d'approvisionnement en énergie que sur les infrastructures industrielles nationales et sur les effectifs.

Une évaluation de ce genre est difficile à conduire à l'échelon mondial, c'est pourquoi normalement on opère à une échelle plus modeste et l'on se contente de faire une étude économique de l'extension du réseau de production d'électricité existant. Il est ainsi possible de se faire une idée suffisamment précise de l'économie de la production d'énergie d'origine nucléaire au stade de l'étude de préaisabilité, encore que de nombreuses études supplémentaires soient nécessaires pour parvenir à une décision définitive quant aux avantages économiques que l'électricité d'origine nucléaire présente pour un pays donné.

Une méthode plus simple encore, et c'est celle que nous avons adoptée aux fins du présent article, consiste à faire, sur le plan économique, une comparaison directe entre les centrales nucléaires et celles qui entrent en compétition avec elles, essentiellement les centrales à combustible fossile fonctionnant en charge de base. Il est ainsi possible d'avoir des indications approximatives sur la compétitivité des centrales nucléaires. Il va sans dire qu'une telle analyse oublierait que des centrales différentes ont des caractéristiques d'exploitation différentes et qu'il ne serait pas tenu compte des effets économiques imputables aux interactions entre les divers types de centrales et le reste des sources de production et moyens de transmission correspondants. De telles comparaisons peuvent néanmoins donner une indication générale de la compétitivité de l'électricité d'origine nucléaire par rapport aux autres options, bien que les résultats ne soient pas aussi concluants que ceux des autres méthodes évoquées précédemment.

Expérience internationale en matière de coûts

Indépendamment des études de l'AIEA, de nombreuses études sur les coûts de l'énergie nucléaire ont été faites tant à l'échelon national qu'à l'échelon international. Nous examinerons ici les points saillants de quelques-unes d'entre elles, ainsi que certaines expériences vécues en matière de coûts de production nucléo-énergétique.

AEN et UNIPEDE

En décembre 1983, l'Agence pour l'énergie nucléaire de l'Organisation de coopération et de développement économiques (AEN) a publié l'étude sur les coûts de production de l'électricité dans les centrales nucléaires et dans les centrales alimentées au charbon, qui portait sur plusieurs pays d'Europe occidentale, le Canada, le Japon et les Etats-Unis d'Amérique. Cette étude était le prolongement d'une étude antérieure, portant sur un moins grand nombre de pays, qu'avait faite l'Union internationale des producteurs et distributeurs d'énergie électrique (UNIPEDE).

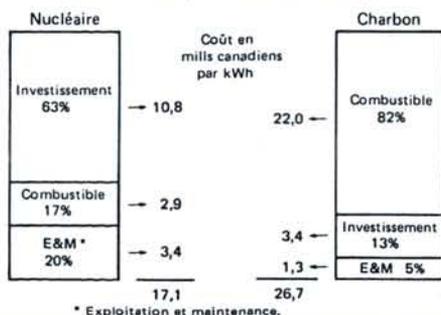
L'étude de l'AEN parvient à la conclusion qu'en Europe et au Japon, le nucléaire aura, pour ce qui est des coûts, une supériorité de 30 à 70% sur les centrales au charbon qui seront mises en service en 1990. En revanche, aux Etats-Unis d'Amérique et au Canada, la compétitivité dépend beaucoup de la région considérée. La production d'origine nucléaire marquera une supériorité économique dans les parties centrale et atlantique du Canada et pourra conserver une petite supériorité dans les parties nord-est et sud-est des Etats-Unis. Toutefois, avec les hypothèses de bases retenues, une nouvelle centrale au charbon à proximité des grands champs carbonifères de l'Amérique du Nord devrait produire de l'électricité à moindre prix, même si elle est dotée de dispositifs de désulfuration des fumées.

Les comparaisons de coûts sont très sensibles aux facteurs de charge, aux dépenses d'investissement, à certaines particularités du site, etc. Néanmoins, l'étude de l'AEN conclut que la supériorité économique des centrales nucléaires pourrait encore se maintenir en Europe occidentale, au Japon et dans la partie centrale du Canada, même si les dépenses d'investissement pour ces centrales augmentaient de 50%, ou si les coûts du cycle du combustible nucléaire doublaient, voire triplaient, ou encore si les centrales nucléaires n'étaient exploitées qu'à 50% ou moins de leur facteur de charge.

Comparaison des coûts dans certains pays représentatifs

Le lecteur trouvera également ici, sous forme résumée, les résultats d'études faites au Canada, aux Etats-Unis d'Amérique, en France et au Japon, qui donnent une comparaison des coûts de l'électricité d'origine nucléaire et de l'électricité produite par les moyens classiques.

Au Canada, Ontario Hydro a publié, en mars 1982, un rapport qui compare deux centrales: la centrale nucléaire Bruce A, avec quatre réacteurs de 740 MWe qui sont entrés en pleine exploitation en 1979, et la centrale au charbon de Nanticoke, avec huit génératrices de 490 MWe qui a commencé à fonctionner à plein en 1978. Les chiffres cités sont en mills par kilowatt-heure d'électricité pour 1981, pour une exploitation en charge de base.

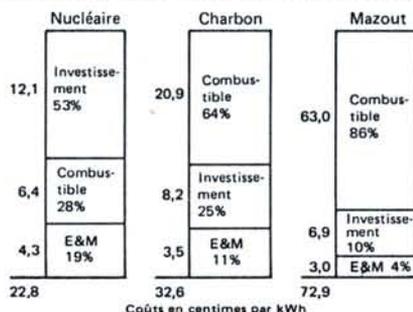


Au Japon les chiffres publiés récemment montrent que les coûts de production de l'électricité d'origine nucléaire sont de loin inférieurs à ceux des autres solutions envisagées. Les dépenses d'investissement sont exprimées en dollars des Etats-Unis par kWh; les coûts de production sont exprimés en cents des Etats-Unis par kilowatt-heure.

	Investissement*	Production**	Part du combustible***
Nucléaire	1080	4,8	25%
Thermique			
Mazout	520	8,0	80%
Gaz naturel liquide	680	7,6	70%
Charbon	800	6,0	50%
Hydraulique	2400	8,0	0

* En dollars des Etats-Unis par kWh.
 ** En cents des Etats-Unis par kWh.
 *** Combustible en pourcentage du coût de production.
 Origine: Nuclear Engineering International, août 1984.

En France, les centrales nucléaires l'emportent nettement sur les centrales à charbon ou à mazout, d'après une estimation comparative des coûts de production faite par le Commissariat à l'énergie atomique (CEA) et publiée en décembre 1984 dans *Enerpresse*. Les chiffres correspondent à des centrales moyennes types, fonctionnant à pleine capacité. Toutes les valeurs sont exprimées en centimes français par kWh pour 1984, mais se rapportent à une centrale qui sera raccordée au réseau en 1992.



Aux Etats-Unis d'Amérique, une étude du Laboratoire national d'Oak Ridge a conclu que les coûts de production des centrales nucléaires et des centrales au charbon qui seront mises en service en 1995 sont très voisins dans la plupart des régions.* Les coûts de production d'électricité d'origine nucléaire marquent un avantage dans la région sud-atlantique où le charbon doit être transporté sur de longues distances alors que les coûts de production d'électricité au charbon sont plus favorables dans les régions du centre et du centre-nord où se trouvent d'importantes réserves de charbon que l'on peut extraire à bas prix. Dans plusieurs régions, de petites variations des paramètres économiques de base pourraient se traduire par une supériorité économique de l'une ou l'autre des options.



* Projections régionales des coûts de production d'électricité d'origine nucléaire et fossile, ORNL/TM-8958 (décembre 1983).