

QUESTIONS D'ACTUALITE DANS LE DOMAINE DE L'ENERGIE D'ORIGINE NUCLEAIRE

par

M. Sigvard Eklund,

Directeur général de l'AIEA

Quand l'énergie d'origine nucléaire commença-t-elle à jouer vraiment son rôle, en d'autres termes, quand les nouvelles centrales seront-elles en nombre important équipées de réacteurs nucléaires ? C'est là, à mon avis, la question cruciale qui se pose aujourd'hui. Il est encore un peu tôt pour lui donner une réponse définitive, mais l'évolution récente dans le domaine de l'énergie d'origine nucléaire nous oblige à repenser complètement la question sans plus attendre. Pour ce faire, il faut procéder à une enquête sur les besoins actuels et futurs en énergie et rechercher quelles sont les possibilités de faire face à ces besoins en puisant dans les réserves d'énergie connues ou dans les réserves qui pourront être disponibles ultérieurement. Une enquête de ce genre réalisée à l'échelle mondiale donnera un tableau d'ensemble, mais les conclusions auxquelles on parviendra de cette façon ne pourront évidemment s'appliquer à tous les cas particuliers, quelles que soient les conditions locales. S'il s'avérait que nos réserves seront insuffisantes, il semble évident que l'énergie d'origine nucléaire aurait une place importante dans le bilan énergétique, mais il est en même temps de la plus haute importance de savoir si les réserves d'énergie que recèlent les ressources du monde en uranium et en thorium seront suffisantes ou si elles le deviendront grâce à de nouvelles découvertes dans le domaine de la technique.

Cependant, à l'époque actuelle où les ressources classiques sont suffisantes pour permettre de faire face à nos besoins courants, il semble que l'énergie d'origine nucléaire soutienne déjà ou soit près de soutenir la concurrence des centrales classiques dans des cas isolés. Il convient également de tenir compte de certaines considérations d'ordre général touchant les caractéristiques particulières de l'énergie d'origine nucléaire - ses possibilités d'adaptation exceptionnelles pour faire face à certains besoins spéciaux en énergie, étant donné que le petit volume de combustible nécessaire à l'exploitation des centrales nucléaires simplifie les problèmes du transport du combustible et n'entraîne que de faibles coûts ; l'absence de déchets pouvant polluer l'atmosphère, etc. D'autre part, il ne faudrait pas négliger d'autres considérations, à savoir l'utilisation que l'on peut faire de l'énergie d'origine nucléaire à des fins militaires et les complications internationales qui en résultent ; la situation tout à fait particulière qui s'est

créée du fait que trois pays seulement sont actuellement à même de vendre de l'uranium enrichi et veulent bien le faire ; les règlements de sécurité très stricts qui s'appliquent toujours aux usines atomiques ; l'incertitude qui subsiste quant au prix de revient du traitement chimique du combustible irradié et à la valeur de rachat du plutonium produit dans les réacteurs.

Consommation actuelle d'énergie et d'électricité dans le monde

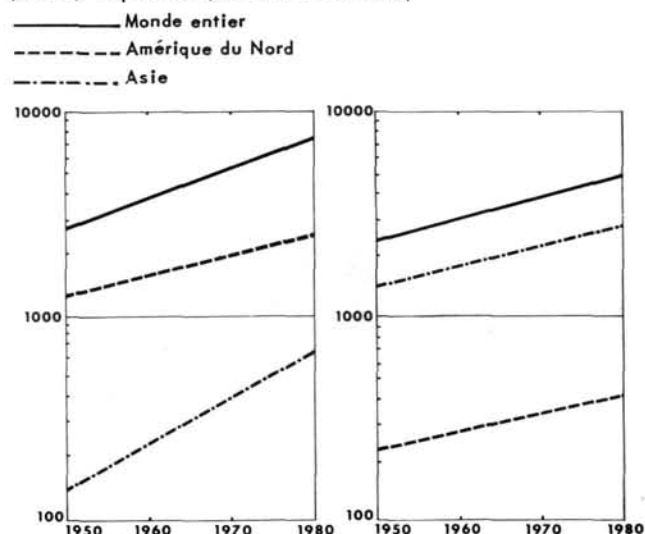
Une étude des besoins du monde en énergie doit être fondée sur des données relatives à la consommation actuelle d'énergie, le taux et les causes de son accroissement et la répartition géographique des sources d'énergie. Il faut aussi prendre en considération les ressources mondiales d'énergie connues aujourd'hui.

La figure 1 donne la courbe bien connue des besoins annuels du monde en énergie, qui croît exponentiellement et dont les valeurs doublent tous les 20 ans. Elle indique également l'accroissement de la population pendant la même période. On y a ajouté les courbes correspondantes pour l'Amérique du Nord - exemple d'une région fortement industrialisée - et

Figure 1

(Gauche) Production d'énergie (millions de tonnes de houille)

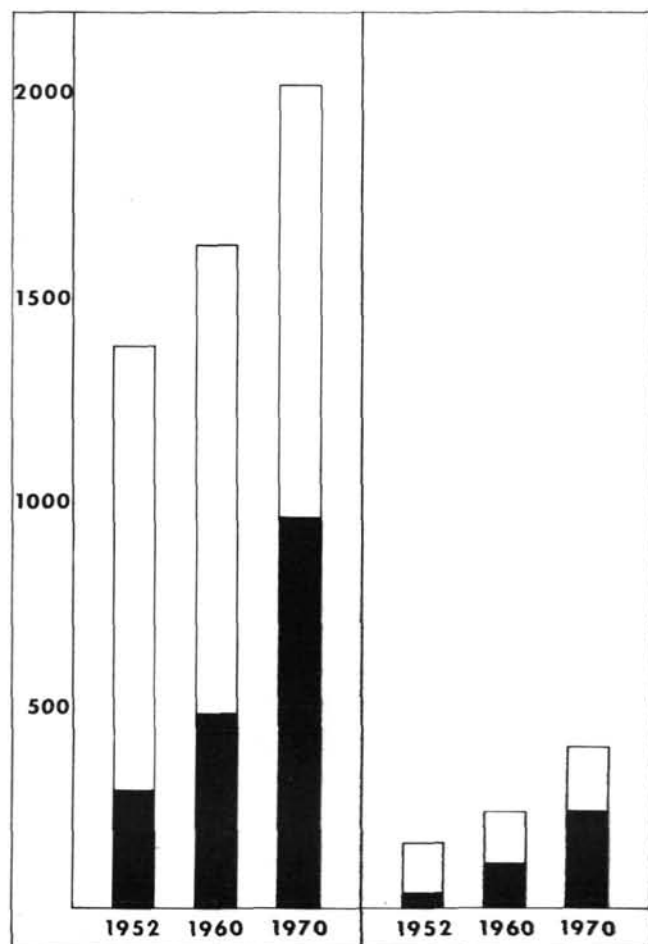
(Droite) Population (millions d'habitants)



pour l'Asie - qui comprend de nombreux pays en voie de développement. On voit clairement que l'Amérique du Nord a une consommation d'énergie très élevée bien que sa population ne représente qu'une fraction relativement faible de la population mondiale. La consommation d'énergie par habitant en Amérique du Nord atteint une valeur représentant environ six tonnes de charbon par an alors que le chiffre correspondant pour l'Asie est de 0,1.

Outre l'accroissement rapide de la population mondiale qui double actuellement en 44 ans, nous devons également tenir compte de l'accroissement rapide de la consommation d'énergie par habitant. Il n'est nullement surprenant de constater que ce taux d'accroissement est moins rapide dans les pays déjà développés que dans les pays en voie de développement. La figure 2 représente la consommation totale d'énergie pour l'Amérique du Nord et pour l'Asie pendant les années 1952 et 1960 et le niveau probable de la consommation en 1970. Les tendances de la consommation sous forme d'électricité indiquées dans

Figure 2
Production d'énergie (millions de tonnes de houille)
■ Electricité
□ Autres
(Gauche) Amérique du Nord (Droite) Asie



le graphique présentent un intérêt tout particulier. Dans les pays industrialisés, on a observé depuis longtemps une tendance évidente de la consommation d'énergie à passer des formes d'énergie simples et primaires, telles que le charbon et le pétrole, à des formes secondaires et élaborées telles que l'électricité. Il est tout à fait normal que cette tendance s'accroisse encore plus dans les pays en voie de développement qui s'efforcent de franchir rapidement les étapes du développement technique et économique que les pays avancés ont mis des siècles à parcourir. Nous mentionnerons quelques chiffres particulièrement frappants : les Etats-Unis, qui représentent environ six pour cent de la population mondiale, consomment actuellement environ 33 pour cent de toute l'électricité consommée dans le monde. Il est également intéressant de remarquer que le prix de l'électricité au consommateur américain est d'environ 26 mills/kWh alors qu'il est de 120 mills pour le consommateur togolais, par exemple. L'écart immense qu'accusent ces chiffres montre quel accroissement énorme de la production d'énergie, tout particulièrement sous sa forme secondaire d'énergie électrique, il faudra atteindre lorsque les pays en voie de développement commenceront à s'industrialiser, et également quels avantages économiques on sera en droit d'attendre lorsque ces pays disposeront d'énergie à bon marché. Il ne faut pas oublier que les pays en voie de développement représentent la plus grande partie - plus des deux tiers - de la population mondiale actuelle qui est estimée à trois milliards.

Cette tendance à consommer une part croissante de l'énergie totale sous forme d'énergie électrique est particulièrement intéressante du point de vue de l'énergie atomique, dont l'application industrielle la plus importante est en fait actuellement la production d'électricité.

Ressources mondiales d'énergie

Une évaluation des ressources mondiales de combustibles fossiles dont l'exploitation serait rentable, extraite des résultats d'une enquête présentée à la Conférence mondiale de l'énergie en 1962, figure au tableau 1.

Les chiffres mentionnés dans ce tableau appellent quelques explications. Les réserves totales de combustibles fossiles existant dans le monde sont certainement supérieures aux quantités indiquées. Toutefois, étant donné les coûts de l'extraction et les difficultés techniques que comporte l'emploi de combustibles médiocres, il faudra renoncer à exploiter une partie considérable de ces réserves, au moins pour longtemps. La rentabilité de l'extraction d'un charbon de basse qualité dépend naturellement du prix que l'on peut obtenir pour le produit final.

Il se peut également que le volume des ressources d'énergie inexploitées et des réserves extrapo-

lées indiqués dans le tableau puisse être considérablement accru en raison des opérations de prospection intensive entreprises actuellement, notamment en ce qui concerne le pétrole. C'est un fait bien connu que presque toutes les évaluations des réserves de pétrole qui ont été présentées au cours des quarante dernières années indiquaient que les ressources seraient suffisantes pour couvrir 20 à 30 années de consommation. Il convient donc de ne pas perdre de vue qu'il existe un degré d'incertitude considérable, tant en ce qui concerne la quantité totale des ressources actuelles du monde en combustibles fossiles, qu'en ce qui a trait à la fraction de ces ressources qu'il est techniquement possible d'exploiter de façon rentable. On trouvera ailleurs d'autres chiffres que ceux qui figurent dans ce tableau, mais les ordres de grandeur sont à peu près les mêmes.

Il y a aussi, évidemment, la houille blanche qui n'est pas consommée et qui se reconstitue chaque année. On estime que les réserves mondiales en énergie hydroélectrique se montent à environ 1 650 millions de kW de puissance utilisable, ce qui correspond à une consommation d'environ 2 500 millions de tonnes de charbon par an. La houille blanche ne représente qu'une petite fraction (2 %) de l'énergie totale consommée annuellement dans le monde, bien que son importance soit réellement très grande dans les pays qui manquent de combustibles fossiles.

Combien de temps dureront les ressources mondiales d'énergie ?

En admettant que le total des ressources mondiales d'énergie soit équivalent à 3 500 000 millions de tonnes de charbon, cette quantité serait suffisante pour les 800 ans à venir au rythme actuel de la consommation qui est de 4 200 millions de tonnes par an. Toutefois, l'accroissement rapide de la demande annuelle d'énergie, dont on a déjà donné l'explication, tend à réduire considérablement cette période. S'il est vrai que le degré d'incertitude dans ces évaluations est grand tant en ce qui concerne le total des ressources que celui de la consommation, il est néanmoins possible de tirer quelques conclusions qualitatives. C'est ainsi qu'il faut accepter le fait que le monde évolue vers une situation déficitaire en ce qui concerne les combustibles fossiles; situation qui s'accroît dans certaines régions et avec laquelle doivent déjà compter les pays fortement industrialisés. Sans doute le répit qui nous est laissé est-il plus long qu'on ne l'avait prédit, par exemple à la Conférence de Genève en 1955, mais en tout cas il n'est pas très long.

Il est évident qu'étant donné les besoins sans cesse croissants en énergie et la quantité limitée des ressources actuelles il faut trouver de nouvelles sources d'énergie. Lors d'une Conférence des Nations Unies qui s'est tenue en 1961, on a présenté une étude sur quelques sources non classiques (non fossiles)

d'énergie, qui avait trait à l'énergie éolienne, à l'énergie des marées, à l'énergie solaire et à l'énergie géothermique. Sans doute ces sources sont-elles intéressantes, mais aucune ne représente un potentiel comparable à celui de l'énergie nucléaire, qui est fondé sur l'existence d'une quantité considérable de matières premières.

Ressources mondiales de matières fissiles

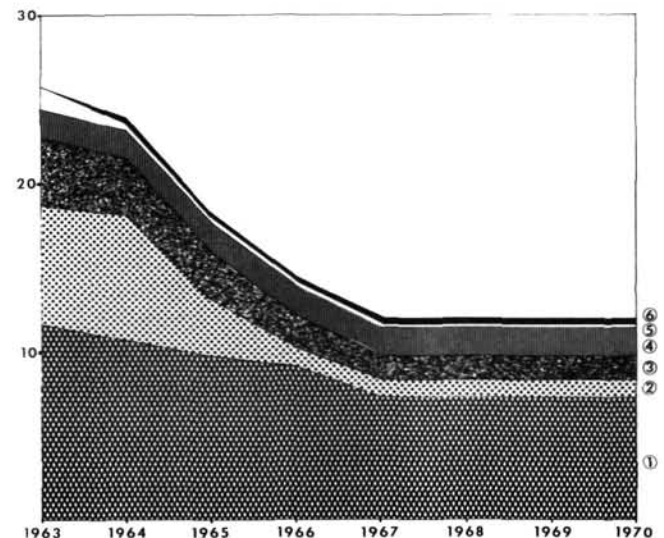
Voyons maintenant quelles sont les ressources mondiales d'uranium définies comme étant celles d'où il est possible d'extraire le métal à un prix de revient compris entre 18 et 22 dollars des Etats-Unis par kilogramme d'oxyde d'uranium (tableau 2). Les chiffres de production indiqués dans ce tableau sont les chiffres réels ou la moyenne annuelle des premiers mois de l'année 1963. Pour cet aspect de la question, on ne dispose que des données concernant le monde occidental.

Actuellement, la production diminue dans tous les pays, en raison du fléchissement de la demande correspondant aux besoins militaires; on peut s'attendre qu'elle atteindra un minimum en 1968, soit environ 10 000 tonnes (figure 3), et qu'elle augmentera à nouveau après 1970 du fait de l'augmentation des besoins civils.

En ce qui concerne l'évolution des prix, on ne possède que des renseignements fragmentaires sur les prix payés pour l'oxyde d'uranium pendant la période 1945-55. Toutefois, on ne serait sans doute pas trop loin de la vérité si l'on disait que le prix moyen payé pour ce produit a été d'environ 27 dollars le kg. Au cours de la période 1958-62, le prix s'est établi autour de 22 dollars le kg et on peut s'attendre qu'il baissera à 18 dollars environ au cours de la période

Figure 3

Production mondiale d'uranium (Estimation en milliers de tonnes). 1. Etats-Unis 2. Canada 3. Afrique du Sud 4. France 5. Australie 6. Autres pays.



1966-70 pour descendre encore entre 15 et 11 dollars le kg en 1970. Des contrats de fourniture qui portent sur des quantités allant jusqu'à 15 tonnes ont été conclus au prix de 9 dollars le kg. Il est permis de supposer que l'augmentation probable de la demande de centrales nucléaires après 1970 aura pour effet, à cette époque, un relèvement du prix.

On peut raisonnablement admettre que la quantité totale d'uranium dont l'extraction serait rentable si les prix restaient bas se monte à environ 1 500 000 tonnes pour le monde entier. Toutefois, il y a lieu de souligner que cette quantité serait au moins dix fois plus importante si l'on pouvait tenir compte des minerais dont le coût d'extraction est trois fois plus élevé.

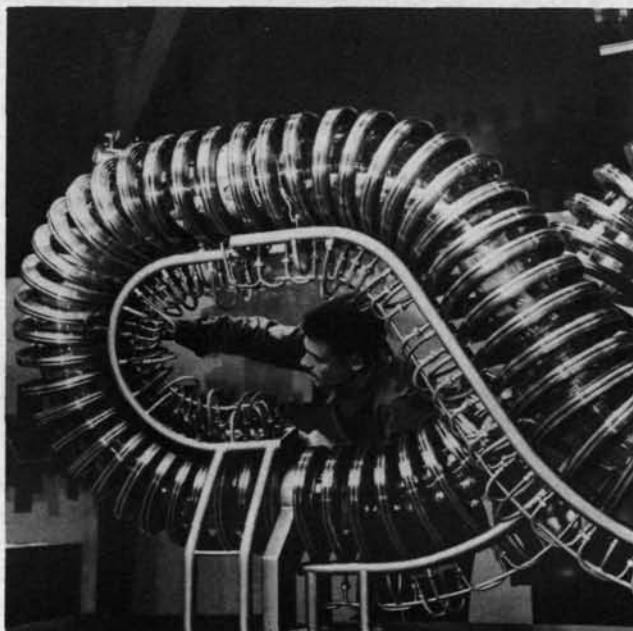
Il est donc évident que les ressources disponibles d'uranium sont quantitativement importantes. Quelle quantité d'énergie ces minerais peuvent-ils fournir ? Si l'on prend pour base une irradiation d'environ 10 000 MWj par tonne d'uranium naturel, les 600 000 tonnes qui ont été prises en considération pour le tableau 2 équivaldraient à elles seules à 17 000 millions de tonnes de charbon. Si, d'autre part, on suppose que l'uranium sera utilisé dans des réacteurs régénérateurs, on obtient, selon des évaluations modestes, une irradiation de 200 000 MWj par tonne. En pareil cas, on pourrait aussi utiliser de l'uranium provenant de minerais plus pauvres que ceux dont il est tenu compte au tableau 2 en raison de l'importance moindre du prix de la matière première ; les ressources d'uranium se monteraient alors à 15 millions de tonnes, soit l'équivalent de deux à trois fois les réserves de combustibles fossiles. En outre, si l'on exploitait également les gisements de minerais ayant une basse teneur en thorium (qui sont beaucoup plus importants que les ressources correspondantes d'uranium), le contenu en énergie des combustibles nucléaires serait dix à vingt fois plus élevé que celui des ressources de combustibles fossiles actuellement connues.

Ce sont des considérations et des prévisions à long terme de ce genre qui ont amené plusieurs pays à développer rapidement leurs programmes d'énergie atomique vers le milieu de la décennie 1950-59. Toutefois, la concurrence des diverses sources d'énergie a été d'autant plus vive qu'il n'y avait pas pénurie aiguë de ressources d'énergie et, contrairement à toute attente, les combustibles fossiles ont baissé au lieu d'augmenter ; dans de nombreux cas, des taux d'intérêt élevés ont constitué une charge particulièrement lourde pour les centrales nucléaires dont la construction exige des capitaux élevés. Les centrales classiques ont évolué du point de vue technique dans le sens d'une augmentation de la puissance des usines, ce qui a permis d'abaisser les prix de revient. Lorsque l'usine de diffusion gazeuse d'Oak Ridge a été construite en 1943, la centrale de 300 MW qui l'alimente en énergie était alors la plus

grande unité de production d'énergie existant aux Etats-Unis. De nos jours, on étudie et on construit couramment des centrales classiques d'une puissance de 600 à 1 000 MW. Il faut également admettre que les problèmes de technologie que posent les centrales nucléaires - notamment les parties classiques de ces centrales - se sont révélés plus difficiles à résoudre que l'on ne le pensait. Le prix de revient de l'énergie atomique n'a donc pas baissé aussi rapidement qu'on l'espérait à l'origine ; aussi les programmes d'énergie atomique ont-ils été freinés et leur exécution s'est prolongée bien au-delà de ce qui avait été prévu dans les rapports qui ont été présentés, par exemple, aux conférences de Genève sur l'énergie atomique en 1955 et 1958.

Sur la base des considérations qui précèdent, on peut distinguer nettement un programme à court terme et un programme à long terme pour le développement de l'énergie atomique. Le premier de ces programmes porterait sur la mise au point de réacteurs qui, bien que n'utilisant pas complètement l'uranium, permettraient néanmoins d'obtenir une assez bonne économie du combustible. Toutefois, ces types de réacteurs n'apportent pas la solution des problèmes de production d'énergie à long terme ; on pourrait même dire qu'ils entraînent un gaspillage de l'uranium. La vraie solution consiste à mettre au point des réacteurs utilisant complètement l'uranium et permettant ainsi de produire à des prix qui rendront rentables l'extraction des matières fissiles à partir des minerais pauvres et l'utilisation du thorium. Il ne faut pas non plus exclure la possibilité de tirer parti plus tard de l'énergie de fusion, ce qui consti-

Un Stellarator en huit utilisé pour les recherches sur la fusion nucléaire, exposé par les Etats-Unis à la deuxième Conférence de Genève (photo ONU).



tuerait une solution de rechange par rapport au procédé de la fission de l'atome qui est actuellement l'objet de nos préoccupations.

Situation actuelle

L'Agence internationale de l'énergie atomique publie régulièrement un répertoire des réacteurs. D'après les renseignements dont le Secrétariat disposait en janvier 1964, 11 réacteurs de puissance, de plus de 100 MW(e) chacun, étaient exploités à des fins purement civiles, leur puissance totale étant de 1 800 MW(e). Ces réacteurs sont tous des types indiqués au tableau 3.

Quel sera le rythme de construction des nouvelles centrales nucléaires ? Aux Etats-Unis, au Canada, au Royaume-Uni et dans les pays de la Communauté européenne de l'énergie atomique, pour ne citer que quelques-uns des pays avancés dans ce domaine, on a établi des plans pour le développement de la production d'énergie électrique, y compris celle d'origine nucléaire, en tenant compte de l'évolution probable en matière d'énergie classique et d'énergie nucléoélectrique. Les résultats de ces études, que l'on trouvera au tableau 4, doivent être interprétés avec toute la prudence qui s'impose en matière de prévisions dans le domaine de l'énergie d'origine nucléaire.

On estime que les centrales nucléaires devraient disposer chaque année de 30 000 tonnes d'uranium pour une puissance installée de 100 000 MW(e) qui augmenterait de 20 pour cent chaque année, comme cela pourrait bien être le cas vers 1980. Comme on le verra au tableau 2, la production actuelle d'uranium est du même ordre de grandeur. L'approvisionnement en uranium de ces réacteurs qui n'utilisent qu'une partie du combustible ne présente donc aucun problème et ne devrait pas exiger de nouveaux investissements avant 1980.

Autre question, beaucoup plus complexe celle-là : dans quelle mesure les frais de construction et d'exploitation des centrales nucléaires peuvent-ils à l'heure actuelle soutenir la comparaison avec ceux des centrales classiques ?

On trouvera au tableau 5 les renseignements recueillis à ce sujet par l'AIEA pour un certain nombre de réacteurs il y a environ deux ans, en particulier sur la production nette, les dépenses d'investissement totales et le coût du kW de puissance installée*.

On notera la différence entre les coûts indiqués pour les centrales de Tarapur et d'Oyster Creek. D'après l'entrepreneur, qui est le même dans les deux cas, cette différence est due au fait que la cen-

trale de Tarapur a une puissance moins élevée (380 MW(e), alors que la puissance minimum garantie de la centrale d'Oyster Creek est de 515 MW(e)) et qu'elle est située dans un endroit isolé, et à des difficultés spéciales sur le chantier.

S'il est difficile de comparer directement les dépenses d'investissement pour différents types de centrales nucléaires, il l'est encore davantage de comparer le prix du kWh pour différentes centrales, étant donné le nombre des éléments variables qui interviennent : facteur de charge, taux d'intérêt, durée de vie de la centrale, etc. Les résultats d'une comparaison récemment effectuée par l'AIEA sont indiqués au tableau 6.

D'après ce tableau, il semble que dans la plupart des cas les centrales nucléaires ne puissent concurrencer les centrales classiques. Toutefois, en février 1964, on a obtenu des renseignements détaillés sur les coûts pour la centrale nucléaire de la société de Jersey Central, à Oyster Creek (Etats-Unis d'Amérique). Cette centrale doit pouvoir produire de l'électricité à un prix aussi bas que n'importe quelle centrale classique qui pourrait être construite au même endroit. Les caractéristiques de cette centrale feront donc l'objet d'une analyse un peu plus détaillée.

Les groupes générateurs seront alimentés par un seul réacteur à eau bouillante dont la puissance minimum garantie sera de 515 MW(e) et la puissance définitive probable de 620 MW(e).

Les investissements s'élèvent à 68 millions de dollars, y compris la valeur d'achat du terrain, les intérêts pendant les travaux de construction, le coût de la formation des opérateurs et un million de dollars d'autres dépenses. Le coût des investissements pour toute la centrale sera donc de 132 dollars par kW pour une puissance de 515 MW(e) et de 110 dollars par kW si la puissance de 620 MW(e) est atteinte. Le coût du cycle de combustible pendant les cinq premières années a été évalué à 1,66 mill/kWh et les frais de fonctionnement et d'entretien, à 0,56 mill/kWh. Bien que le système de comptabilité soit assez complexe, on pense que les charges financières annuelles fixes s'élèveraient à 2,03 mills/kWh, en supposant une capacité de 515 MW(e), un facteur de charge de 88 % et un taux fixe moyen de 10,37 % pendant les cinq premières années.

La somme de ces éléments donne un prix de revient de 4,25 mills/kWh, avant imposition par l'Etat, si la centrale fonctionne à la puissance garantie ; si le réacteur peut fonctionner à la puissance plus élevée, le prix de revient sera de 3,79 mills/kWh. La centrale appartiendra à une compagnie d'électricité privée, qui la financera en totalité sans aucune subvention directe du Gouvernement fédéral ou de l'Etat, à l'exception des indemnités pour dommages nucléaires versées par le Gouvernement fédéral.

* On a fait figurer dans toute la mesure possible des renseignements sur les réacteurs de l'URSS, pour lesquels on ne dispose pas de données économiques.

Tous ceux qui ont essayé d'intéresser des établissements financiers à la construction de centrales nucléaires savent quelle attention ils accordent aux considérations de rentabilité; ces considérations jouent un rôle décisif lorsqu'on a le choix entre différentes formes d'énergie primaire. Au moment où l'énergie d'origine nucléaire commence à concurrencer l'énergie classique, comme c'est le cas par exemple pour Oyster Creek, il faut s'attendre à voir les producteurs de charbon et de mazout réagir par une guerre des prix, au cas où ils ne pourraient trouver immédiatement d'autres marchés. Il est intéressant de suivre les pourparlers en cours et de noter les mesures que les producteurs de charbon proposent maintenant d'adopter à la suite de la décision prise l'an dernier de construire une centrale à Oyster Creek.

Le prix du charbon à Oyster Creek était autrefois de 29,5 cents par million de Btu et on pensait, d'après les appels d'offres, qu'il baisserait jusqu'à 26 cents par million de Btu. Ce sont ces chiffres qui ont été utilisés pour comparer les prix de revient de l'énergie produite par les centrales classiques et par les centrales nucléaires et qui ont motivé la décision dans le cas d'Oyster Creek. Pour que le charbon puisse concurrencer le combustible nucléaire, il faudrait que son prix soit d'environ 20 cents par million de Btu, montant qui n'excède pas de plus de 10 % le prix en vigueur dans les secteurs charbonniers de Pennsylvanie.

Il y a une dizaine d'années, on disait couramment que le meilleur moyen d'abaisser le prix de revient concernant les centrales nucléaires serait d'abaisser le prix de revient de l'énergie d'origine classique. L'appel d'offres pour Oyster Creek montre entre autres que la situation semble renversée et que désormais la baisse des prix de revient de l'énergie d'origine nucléaire est, en quelque sorte, une garantie contre une hausse des prix des combustibles classiques. Il est évident que l'apparition sur le marché d'un nouveau combustible a amené les producteurs de charbon et de mazout à une concurrence des prix - on pourrait presque dire à un contrôle des prix - qui sert en fin de compte les intérêts des consommateurs.

Si le prix de revient de l'énergie d'origine nucléaire et de l'énergie classique était le même, sur quoi se fonderait-on pour comparer ces deux sources d'énergie? On a fait valoir que, dans l'intérêt des générations futures, l'humanité devrait épargner les ressources d'hydrocarbures complexes, mais malgré la valeur qu'il peut présenter en soi, il ne semble pas que cet argument ait vraiment eu une influence sur les compagnies d'électricité. L'homme, semble-t-il, a toujours mal exploité ses ressources chaque fois qu'il a pu le faire, et il est peu probable que la génération actuelle fasse exception à la règle. Il ne semble pas non plus qu'il y ait à présent un grand

consommateur de combustibles fossiles pour prendre la relève.

Il convient de souligner que l'expérience acquise en matière d'exploitation de centrales nucléaires au Royaume-Uni et aux Etats-Unis est extrêmement encourageante et a démontré la simplicité et la sûreté de fonctionnement de ces installations. Les réacteurs nucléaires se révèlent d'un maniement plus facile et plus simple qu'on n'avait osé l'espérer au début et les plans ont été établis avec une telle prudence qu'il est possible d'améliorer beaucoup le rendement prévu et, partant, de réduire les prix de revient. Il a fallu 134 jours pour changer le combustible du réacteur de Shippingport la première fois, et 32 jours seulement la troisième fois; le rendement du réacteur Yankee était initialement de 141 MW(e), il a été porté à 160 MW(e), puis, au début de 1964, à 175 MW(e). Ces résultats plaident en faveur de l'énergie d'origine nucléaire.

Il ne faut pas oublier non plus que l'énergie d'origine nucléaire ne fait pas que remplacer purement et simplement l'énergie classique. Avec cette nouvelle forme d'énergie, les fumées industrielles disparaîtraient et les quantités de combustible à transporter deviendraient négligeables. Etant donné l'urbanisation rapide actuelle dans les pays industrialisés, il est non seulement possible mais probable que les règlements sur la pollution de l'atmosphère deviendront trop sévères pour que des centrales classiques puissent exister dans les grandes agglomérations comme Los Angeles, par exemple. L'énergie d'origine nucléaire pourrait donc résoudre le problème lorsque le public sera parvenu au stade où une centrale nucléaire lui inspirera la même confiance qu'une usine à gaz ou un poste d'essence dans une ville.

Oyster Creek a causé une certaine inquiétude, qui ne s'est pas limitée aux producteurs de charbon. Les entreprises rivales "bien informées" disent que le prix offert est si bas que le contractant perdra de l'argent. En même temps, il est évident que de nouveaux marchés ont peut-être été ouverts - les pourparlers qui ont lieu actuellement au Royaume-Uni au sujet du type de la prochaine grande centrale nucléaire en donnent la preuve.

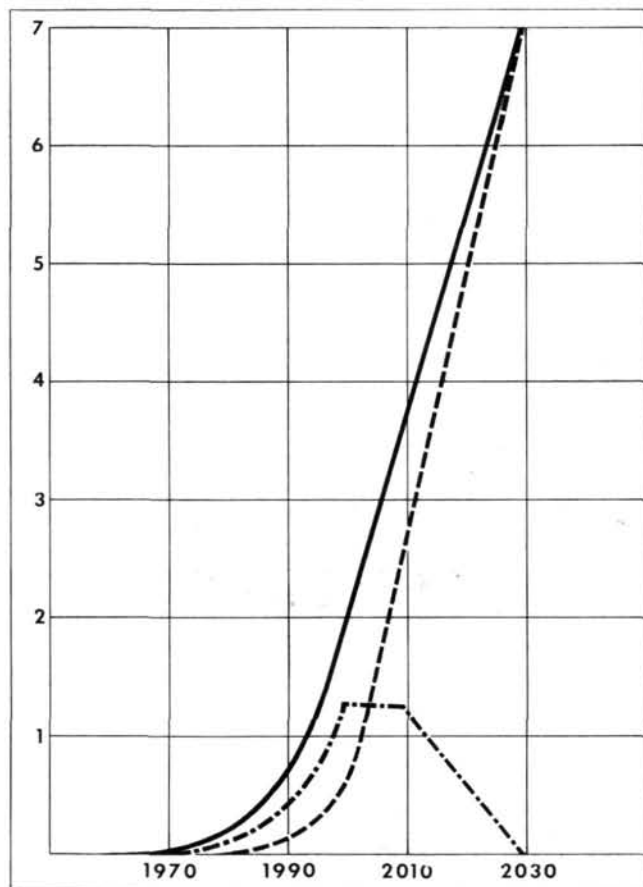
L'appel d'offres soulève aussi la question de savoir dans quelle mesure il y a intérêt à mettre au point d'autres types de réacteurs qui ne permettront d'obtenir un prix de production comparable à ceux d'Oyster Creek qu'après plusieurs générations. Dans l'intérêt de la technologie des réacteurs, il faut espérer que les responsables dans ce domaine, qu'ils appartiennent au secteur privé ou à l'administration nationale, ne se laisseront pas influencer par des considérations à court terme. Les différents types de réacteurs ont des caractéristiques différentes et leur intérêt varie suivant le point de vue que l'on adopte.

Pour certains types de réacteurs, par exemple le réacteur à haute température refroidi par un gaz et ralenti au graphite, on souhaiterait que les études entreprises se poursuivent en vue de réaliser des prototypes de plus grande taille; plusieurs variantes de réacteurs ralentis à l'eau lourde ouvrent un autre domaine d'étude qui intéresse particulièrement ceux qui ne veulent pas dépendre des combustibles enrichis.

Figure 4

Puissance thermique (millions de MW)

----- Réacteurs à neutrons thermiques
 - - - - - Réacteurs surgénérateurs
 ——— Total



Des questions peuvent également se poser au sujet des tâches qu'il faudrait maintenant confier aux grandes organisations créées dans nombre de pays pour "exploiter l'atome", comme on disait. Il ne faut pas oublier que malgré la mise au point de réacteurs pouvant soutenir la concurrence avec des centrales classiques, on n'a encore trouvé qu'une solution provisoire qui sera vite dépassée; l'étude du surgénérateur commercial reste encore à faire. Dans le présent article, mes prévisions ne vont pas plus loin que 1980, exception faite toutefois en ce qui concerne la figure 4. Celle-ci indique la puissance globale des réacteurs à neutrons thermiques qui produiront le plutonium à employer plus tard dans les surgénéra-

teurs à neutrons rapides, ainsi que la puissance de ces derniers, en fonction du temps jusqu'à l'année 2030. On constatera que les surgénérateurs ne remplacent que lentement les réacteurs thermiques habituels; en effet, il faut un long délai - de 10 à 20 ans - avant qu'un surgénérateur parvienne à doubler la quantité initiale de matières fissiles. Le choix s'établit entre la filière des surgénérateurs à neutrons rapides, fondée sur le cycle uranium-plutonium, et celle des surgénérateurs à neutrons thermiques qui utilisent le cycle thorium-uranium-233; que l'on se prononce pour l'un ou pour l'autre type, l'étude en sera longue et ses résultats importants, et les organisations nationales qui en sont chargées seront occupées pendant longtemps.

A mesure que l'industrie reprend à son compte l'étude des réacteurs thermiques, on peut s'attendre à une participation moins active des laboratoires nationaux et supposer qu'ils se consacreront désormais à des études à long terme plus poussées - partant, par exemple, sur les surgénérateurs - ou à des travaux de caractère fondamental comme la recherche en radiobiologie.

Il n'est guère facile d'équilibrer les tâches qu'il faudrait confier respectivement aux laboratoires nationaux, aux sections d'étude des entreprises industrielles et aux laboratoires de recherche des universités et grandes écoles techniques. L'appel d'offres d'Oyster Creek contribuera sans aucun doute à remettre la question en discussion.

Abordons maintenant les questions de sécurité. L'industrie atomique a été dès le début si consciente des problèmes de sécurité que nous avons toutes les raisons de penser qu'après avoir enrichi son expérience elle aura tendance à adoucir les mesures et à simplifier les pratiques actuellement en vigueur. Cette évolution est à l'opposé de celle que suivent habituellement les industries dont les émanations polluent l'atmosphère ou les eaux; d'une façon générale, celles-ci n'ont établi des règlements restrictifs que lorsque la pollution avait atteint des niveaux qui laissent nettement apparaître son caractère nuisible, sinon dangereux. L'étude systématique des questions que posent le choix du site et la sécurité est importante du point de vue des aspects économiques de l'énergie nucléoélectrique et permettra sans nul doute de diminuer les frais d'investissements qu'exigent ces centrales. Une campagne d'information plus active peut également contribuer à mieux faire comprendre la nouvelle technologie et à susciter un intérêt plus vif à son égard.

Dans plusieurs parties du monde, le public semble toujours éprouver une certaine appréhension à l'égard des établissements nucléaires. Il est fort probable que la responsabilité en incombe en partie aux armes nucléaires et à leurs effets. Sinon, il serait incompréhensible que les rayonnements susci-

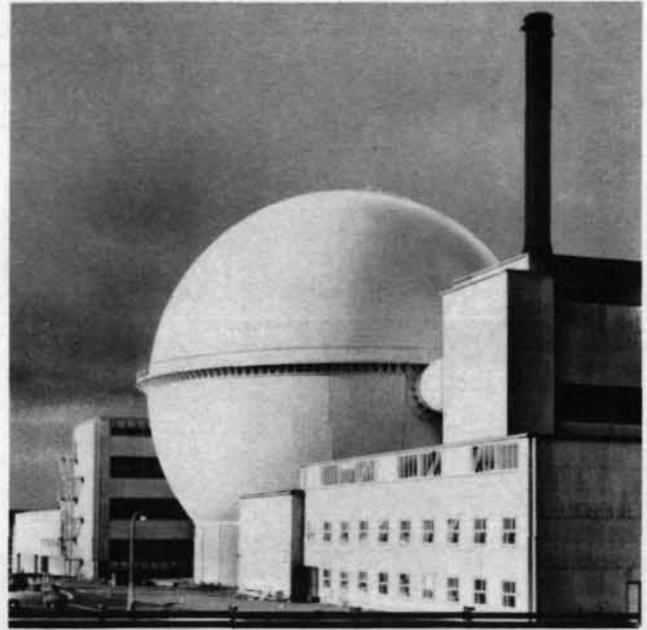
tent une telle anxiété à une époque où nul ne s'étonne que des milliers de personnes trouvent chaque mois la mort dans des accidents de la route ou que 200 personnes aient succombé à New York sous l'effet de la première vague de "smog".

Il existe d'autres vastes domaines où se posent des problèmes dont la solution exigera également des travaux de recherche et de mise au point. L'élimination des déchets radioactifs en est un et le transport des matières radioactives, notamment des combustibles irradiés, en est un autre. En ce qui concerne le combustible usé, les efforts devraient s'orienter vers la création ou l'aménagement d'usines régionales pour le traitement de ces éléments radioactifs. Cela permettrait de simplifier le transport et d'en réduire le coût, d'apporter les améliorations indispensables à l'économie du traitement des combustibles irradiés grâce à un écoulement plus rapide et, enfin, de faciliter l'établissement d'un contrôle international des matières fissiles. Par exemple, une centrale nucléaire d'une puissance installée de 25 000 MW(e) exigerait une usine de traitement de combustible irradié d'une capacité journalière de dix tonnes. Les frais d'exploitation d'une telle installation ne seraient que deux fois supérieurs à ceux d'une usine ayant une capacité d'une tonne par jour. Ces chiffres montrent à quel point il est souhaitable que les producteurs d'énergie d'origine nucléaire coopèrent étroitement, d'abord sur le plan mondial et plus tard sur le plan régional.

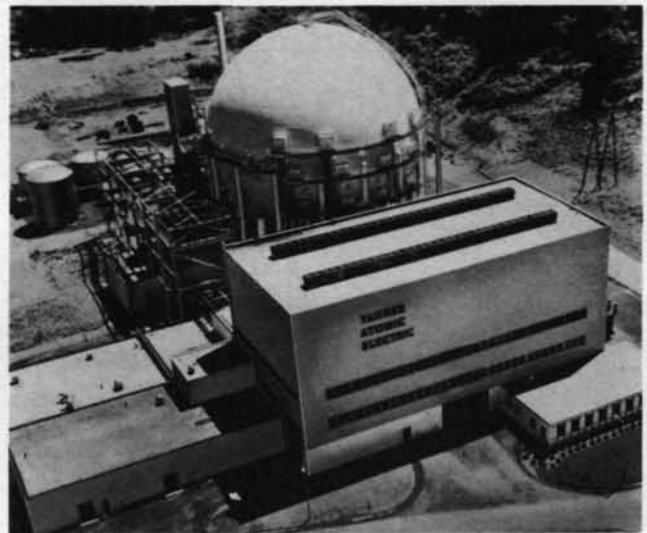
Enfin, il convient de mentionner brièvement les possibilités d'obtenir des matières fissiles enrichies (uranium-235 ou plutonium) pour réacteurs. Les seuls producteurs d'uranium-235 sont actuellement les Etats-Unis, le Royaume-Uni et l'Union soviétique, et chacun de ces trois pays a exporté des matières enrichies. Leur capacité de production est évidemment considérable; en 1963, l'AIEA a estimé les quantités disponibles de plutonium et d'uranium-235 à quelque 3 000 tonnes. Il est intéressant de comparer ce chiffre aux 750 kg que contient le réacteur Dresden, de 205 MW(e).

Le dernier tarif pour l'uranium enrichi a été établi en juillet 1962 par la Commission de l'énergie atomique des Etats-Unis (CEA-EU) qui s'est déclaré prête à garantir l'approvisionnement en combustible de tout réacteur pendant toute la durée de son exploitation. Cependant, ces prix doivent être considérés comme quelque peu artificiels, du fait qu'ils se trouvent étroitement liés à la production d'armements. La question de l'enrichissement à façon revêt sous ce rapport le plus haut intérêt.

Les conditions artificielles qui règnent sur ce marché apparaissent nettement dans la concurrence que se livrent les vendeurs possibles de plutonium à l'Euratom; ce dernier a pu ainsi passer un contrat d'approvisionnement à 42 dollars le gramme,



Réacteur surgénérateur expérimental à neutrons rapides, Dounreay, Grande-Bretagne (photo UKAEA).



La Centrale nucléaire Yankee, Etats-Unis d'Amérique.

alors que dans la première offre le prix était de 112 dollars.

La fourniture de combustible par les Etats-Unis et le Royaume-Uni est en principe assortie de la condition que le pays fournisseur se réserve le droit de faire vérifier par des inspecteurs si la matière est bien utilisée aux fins pacifiques spécifiées. A l'heure actuelle, les Etats-Unis sont en pourparlers avec plusieurs pays en vue de confier ces inspections à l'AIEA. Il est à noter que le système de garanties de l'Agence a été récemment étendu aux réacteurs d'une puissance thermique supérieure à 100 MW.

Cette décision n'a pas fait réapparaître les nombreuses divergences d'opinion qui s'étaient manifestées avec tant de vigueur il y a trois ans encore, lors de l'établissement du système de garanties. Il a été décidé en même temps que l'ensemble du système ferait l'objet d'une révision, laquelle a été confiée à un comité du Conseil des gouverneurs.

L'inspection des réacteurs, qui est à la base de tout le système de garanties, nous amène à modifier quelque peu les vieilles notions de droits souverains absolus. A la suite de l'extension prévue des programmes civils d'énergie atomique, les matières fissiles produites dans les réacteurs seront bien plus abondantes qu'à présent. Il importe donc au plus haut point d'établir un système de contrôle international permettant de s'assurer que ces matières sont utilisées à des fins exclusivement pacifiques. Le lien entre cette question et celle du désarmement international ressort, par exemple, du fait que c'est à une séance de la Conférence sur le désarmement, à Genève, que les Etats-Unis ont offert de placer leur réacteur Yankee (Massachusetts) sous les garanties de l'Agence.

Vingt-six ans se sont écoulés depuis la découverte du processus de fission, 22 ans depuis le démarrage du premier réacteur et 11 ans depuis la mise en service de la première génératrice nucléaire ralentie à l'eau ordinaire. Comme tant de fois déjà dans l'histoire de l'énergie d'origine nucléaire, nous nous trouvons de nouveau à un tournant. Après une époque de prévisions pessimistes, il est maintenant permis d'espérer en voyant que dans certaines conditions les centrales nucléaires peuvent être compétitives. Cependant, il ne faut oublier qu'au fur et à mesure que l'énergie d'origine nucléaire se développe, l'objectif se déplace aussi. Compte tenu des éléments retardateurs que comportent nos systèmes économiques, il semble probable que la nouvelle source d'énergie ne sera introduite que progressivement. Il faut encore attendre la réaction des producteurs de combustibles fossiles.

Tableau 1
Ressources énergétiques du monde
en équivalent charbon

en millions de tonnes	
Houille, charbon brun et lignite	3 000 000
Tourbe	100 000
Pétrole et schistes bitumineux	210 000
Gaz naturel	90 000
Total	3 400 000

(Conférence mondiale de l'énergie, Enquête sur les ressources énergétiques, 1962)

Tableau 2

Ressources d'uranium et de thorium
et production d'uranium

	Ressources (tonnes de l'élément dans le minerai)		Production en 1963 (en tonnes d'équivalent élément U)
	U	Th	
Afrique du Sud	250 000	15 000	3 500
Afrique occidentale	-	15 000	-
Canada	145 000	210 000	6 000
Etats-Unis d'Amérique	132 000	50 000	11 000
France	26 000	-	1 000
Australie	10 000	50 000	800
Congo (Léopoldville)	8 000	-	-
Nyassaland	-	10 000	-
Portugal	5 500	-	300
Gabon	5 000	-	400
Argentine	3 800	-	-
Brésil	-	300 000	-
Italie	1 600	-	-
Espagne	1 500	-	100
Inde	1 200	300 000	-
Ceylan	-	50 000	-
Japon	1 000	-	-
Allemagne (République fédérale d')	800	-	-
Autres pays	1 000	-	200
Total	592 400	1 000 000	23 300

Tableau 3
Centrales nucléaires d'une puissance supérieure à 100 MW(e) en service au 31 janvier 1964

Type du réacteur	Nombre des réacteurs	Nombre des centrales	Puissance en MW(e)
Graphite/gaz	5	3	726
Graphite/eau	1	1	100
Eau sous pression	3	3	611
Eau bouillante	2	2	330
Total	11	9	1 767

Tableau 4
Contribution des centrales nucléaires à la production d'électricité, 1960 à 1980

	1960 à 1970			1970 à 1980		
	Puissance totale en MW(e)	Puissance des centrales nucléaires		Puissance totale en MW(e)	Puissance des centrales nucléaires	
	MW(e)	%		MW(e)	%	
Etats-Unis	150 000	5 000	3	190 000	38 000	20
Canada	25 000	1 000	4	28 000	5 000	18
Royaume-Uni	40 000	5 000	13	65 000	12 000	18
Euratom	55 000	4 000	7	115 000	30 000	26
Autres pays européens	20 000	1 500	7	46 000	5 000	10
Autres pays (y compris l'Inde, le Japon et le Pakistan)	60 000	4 000	6	100 000	10 000	10
Total	350 000	20 500	6	544 000	100 000	18

Tableau 5

Dépenses d'investissement pour quelques centrales nucléaires

	Type	Date du démarrage	Puissance nette en MW(e)	Dépenses d'investissement	
				en millions de dollars	en dollars par kW(e)
Dresden (Etats-Unis)	Eau bouillante	1959	205	51,3	250
KRB (Rép. féd. d'Allemagne)	Eau bouillante	1965/66 1965/66	237 237	70,0 70,0	295 295
Tarapur (Inde)	Eau bouillante	1966	380 (2 x 190)	101,5	267
Oyster Creek (Etats-Unis)	Eau bouillante	1968	515 (minimum)	68,0	132
Yankee, Mass. (Etats-Unis)	Eau sous pression	1960	158	39,2	248
San Onofre (Etats-Unis)	Eau sous pression	1966	373	91,5	245
Conn. Yankee (Etats-Unis)	Eau sous pression	1967	463	84,9	183
Wylfa (Royaume-Uni)	Refroidissement par un gaz	1967/68	1 180 (2 x 590)	280,0	236
Candu (Canada)	D ₂ O	1965	202	81,5	403

Tableau 6

Prix du kWh pour quelques centrales nucléaires

	Date du démarrage	Mills/kWh			Total
		Investissement	Combustible	Fonctionnement	
Yankee 1	1960	5,50 ^{a/}	2,42 ^{b/}	1,15	9,1
Yankee 2	1962	5,50 ^{a/}	4,75 ^{c/}	1,15	11,4
Bradwell	1963	5,60 ^{d/}	2,80	0,60	9,0
Bodega Bay	1966	3,71 ^{e/}	1,79 ^{c/}	0,72	6,2
Candu	1965	3,41 ^{f/}	1,21	1,14	5,8

- a/ D'après les éléments suivants : taux annuel des charges fixes = 14,6 %; facteur de charge = 84 %; dépenses d'investissement = 248 dollars par kW.
- b/ Compte tenu de la valeur de rachat du plutonium à 30 dollars le gramme de Pu métallique. Non compris la redevance d'utilisation de l'uranium. Coût de l'irradiation estimé d'après le tarif de la CEA-EU pour l'uranium enrichi, en vigueur du 1er juillet 1961 au 30 juin 1962.
- c/ Compte tenu de la valeur de rachat du plutonium à 8 dollars le gramme de Pu sous forme de nitrate. Y compris la redevance d'utilisation de l'uranium. Coût de l'irradiation de l'uranium estimé d'après le tarif de la CEA-EU pour l'uranium enrichi, applicable depuis le 1er juillet 1962.
- d/ D'après les éléments suivants : taux d'intérêt annuel = 5,5 % et durée d'exploitation effective de la centrale = 20 ans, soit taux annuel des charges fixes = 8,37 %; facteur d'utilisation = 80 % et dépenses d'investissement = 465 dollars par kW.
- e/ D'après les éléments suivants : taux annuel des charges fixes = 13,2 %; facteur d'utilisation = 80 %; dépenses d'investissement = 197 dollars par kW.
- f/ D'après les éléments suivants : taux d'intérêt = 4,5 %; amortissement de l'eau lourde sur 40 ans, du réacteur proprement dit sur 15 ans, et du reste de l'installation sur plus de 30 ans, soit un taux annuel des charges fixes de 6,48 %; facteur d'utilisation = 80 %; dépenses d'investissement = 403 dollars par kW.