METHODES DE CALCUL DU PRIX DE REVIENT DE L'ENERGIE D'ORIGINE NUCLEAIRE

Il est certain que l'énergie d'origine nucléaire ne pourra prendre un développement considérable que si elle présente des avantages économiques et avant tout si son prix est compétitif. De tous côtés, on cherche donc à obtenir des renseignements sur le coût des centrales nucléaires d'un modèle éprouvé. L'Agence internationale de l'énergie atomique rassemble des données techniques et financières sur divers types de génératrices nucléaires et les tient à la disposition de ses Etats Membres. Un rapport sur la situation actuelle de l'énergie d'origine nucléaire a été présenté à la Conférence générale en 1960; une version révisée de ce texte est établie cette année.

Certains Etats Membres de l'Agence ont éprouvé des difficultés à adapter à leur propre situation les données sur les prix de revient valables pour d'autres pays. Indépendamment du fait que le prix de revient de l'énergie d'origine nucléaire est influencé par des facteurs qui souvent varient beaucoup d'un pays à l'autre, les méthodes de calcul employées ne sont pas les mêmes dans tous les pays. Aussi, l'Agence estime-t-elle qu'une de ses tâches essentielles est de contribuer à établir sur des bases fermes une méthode de calcul du prix de revient de l'énergie d'origine nucléaire qui permette d'évaluer les données disponibles sur les prix de revient et de les utiliser dans des situations différentes.

Un groupe international d'experts* réuni par le Directeur général de l'Agence a récemment élaboré, après avoir procédé à un examen détaillé des méthodes de calcul du prix de revient, un rapport intitulé "Introduction aux méthodes de calcul du prix de revient de l'énergie d'origine nucléaire aux bornes de la centrale". Le rapport est destiné à aider les Etats Membres de l'Agence - notamment ceux où la technologie nucléaire est moins développée qu'ailleurs - à faire une enquête économique préliminaire avant de construire une centrale nucléaire. Il définit les différents chefs de dépenses que comporte l'exécution d'une entreprise de ce genre, il contient des suggestions sur la manière d'adapter les données disponibles à la situation considérée et il expose plusieurs méthodes d'imputation des dépenses.

Le rapport souligne que le calcul du prix de revient aux bornes d'une seule centrale nucléaire ne constitue qu'une première étape dans l'étude de la rentabilité de l'énergie d'origine nucléaire. Si

la centrale doit faire partie d'un réseau, il faudra comparer ce prix à celui du courant aux bornes d'une centrale classique qui alimenterait le même réseau. De plus, si un pays envisage d'exécuter un programme national d'énergie d'origine nucléaire, il devra prendre en considération ce que ce programme coûterait indirectement à l'économie nationale et le comparer à ce qu'il en coûterait si l'on adoptait d'autres solutions possibles. Ces aspects plus généraux de l'enquête économique devraient faire l'objet d'études distinctes; le rapport a pour objet d'aider les pays qui envisagent de produire de l'énergie d'origine nucléaire à procéder à une évaluation du prix de revient de l'électricité ou de la chaleur industrielle produites par des réacteurs nucléaires.

Trois catégories de dépenses

Il semble qu'en principe le prix de revient de l'énergie d'origine nucléaire doive être calculé selon les mêmes méthodes que celui de l'énergie classique. Dans l'un et l'autre cas, il s'agit de déterminer le prix de revient unitaire du courant aux bornes de la centrale en se fondant sur le coût des investissements, le coût du combustible et les frais d'exploitation et d'entretien et dépenses diverses. Mais étant donné la variété des types de réacteurs, les caractéristiques exceptionnelles du combustible nucléaire et l'expérience insuffisante dans l'exploitation des réacteurs de puissance, il est plus difficile d'établir le prix de revient de l'énergie produite dans le cas des centrales nucléaires que dans celui des centrales classiques. Dans l'introduction au rapport, sont examinées certaines particularités du prix de revient de l'énergie d'origine nucléaire sous les rubriques correspondant aux trois catégories de coûts mentionnées ci-dessus.

Dans toute comparaison entre l'énergie d'origine nucléaire et l'énergie classique, ce qui frappe le plus c'est la différence entre les immobilisations, notamment dans le cas des petites centrales. Cet écart est dû en grande partie au prix élevé du réacteur, du matériel auxiliaire et des dispositifs de sécurité.

Les immobilisations sous forme de stocks de combustible sont également très différentes. Dans le cas des génératrices nucléaires, la valeur totale du combustible nécessaire - stocks et charge du réacteur - peut atteindre le décuple, par rapport à une centrale thermique alimentée au charbon. En outre, le coût du combustible par unité d'énergie produite est beaucoup plus sensible aux variations des dimensions de la centrale dans le cas de

* Les membres du groupe étaient venus des pays suivants: Canada, Etats-Unis, France, Hongrie, Inde, Italie, Japon, Royaume-Uni et Suède.

l'énergie d'origine nucléaire que dans celui de l'énergie classique. D'autre part, à l'heure actuelle, on ne peut importer du combustible nucléaire que d'un petit nombre de pays, alors que les sources d'approvisionnement en combustibles classiques sont très nombreuses. Enfin, si l'on veut réutiliser le combustible irradié dans un réacteur nucléaire, il faut engager des dépenses très élevées pour le transporter et le traiter.

En ce qui concerne les frais de fonctionnement et d'entretien, le rapport souligne qu'en raison des risques inhérents aux rayonnements, il faut prendre des précautions spéciales pour protéger les personnes, ce qui entraîne des dépenses de cette catégorie plus élevées que pour les centrales classiques.

Dans les trois chapitres qui suivent l'introduction, le rapport fait l'analyse détaillée des trois catégories de dépenses indiquées plus haut. Le premier chapitre passe en revue l'ensemble des dépenses qu'entraîne la construction d'une centrale électrique.

Coût de construction de la centrale

Pour évaluer ce coût, il est important d'avoir un plan d'imputation détaillé des dépenses qui permette de les identifier toutes. En outre, un tel plan faciliterait les comparaisons entre différents types de centrales nucléaires entre elles.

Sauf pour le réacteur et les installations annexes, les éléments du coût d'une centrale nucléaire sont, à bien des égards, analogues à ceux du coût d'une centrale classique. Les principaux sont énumérés dans un appendice au rapport : 1) terrains et droits de propriété; 2) aménagement des terrains; ouvrages et bâtiments; 3) réacteur et matériel auxiliaire; 4) circuit principal - échangeurs de chaleur et dispositifs auxiliaires; 5) matériel de surchauffe; 6) circuit secondaire et génératrice électrique; 7) matériel divers; 8) dépenses connexes. Les dépenses afférentes à chacun de ces éléments peuvent être imputées aux différents postes suivants : a) matériaux et matériel; b) frais de transport; c) impôts et taxes; d) frais de main-d'oeuvre et de montage; e) coût total du matériel installé.

En outre, on peut encore subdiviser les huit principaux éléments du coût de la construction d'une centrale afin de pouvoir mieux saisir les dépenses et les comparer avec précision. Ainsi, selon le plan d'imputation donné dans le rapport, la rubrique "réacteur et matériel auxiliaire" se subdivise comme suit : a) réacteur proprement dit; b) circuits de refroidissement et de chauffe; dispositifs auxiliaires; c) matériel de manutention du combustible; d) appareillage du réacteur et dispositifs auxiliaires; e) ralentisseur; f) réflecteur (s'il est distinct du ralentisseur); g) circuit du ralentisseur et parties constitutives; h) divers (tels que le matériel de laboratoire); i) pièces de rechange. De même, les "dépenses connexes"

comprennent les sous-rubriques : a) études, projets et essais (études préliminaires, etc.); b) dépenses indirectes (par exemple dépenses d'administration générale, etc.); c) mise en service (par exemple essais préalables à la mise en service); d) honoraires et droits divers (par exemple émoluments des notaires); e) intérêts pendant la construction; f) réserve pour dépenses imprévues.

Ces exemples indiquent comment ventiler les dépenses pour pouvoir adapter utilement à la situation prévalant dans un pays des données relatives à un autre pays; plus la ventilation sera détaillée, plus précieux seront les renseignements obtenus.

Coût du combustible

Constatant que les dépenses d'investissement relatives aux centrales nucléaires sont très élevées, le rapport fait ressortir que l'énergie d'origine nucléaire ne sera rentable que si l'on parvient à améliorer le rendement du combustible et à faire baisser le coût du combustible par unité d'énergie produite. Après avoir décrit les divers cycles de combustible, le rapport souligne l'importance considérable que présentent les réacteurs à uranium naturel du fait que leur combustible est moins cher et plus facile à obtenir. Il fait également ressortir que si l'uranium enrichi est plus onéreux, ce combustible permet, en revanche, un choix plus grand en ce qui concerne les matériaux de gainage et les formes chimiques du combustible; on peut ainsi obtenir un rendement plus élevé et, partant, une réduction sur l'ensemble des immobilisations par unité d'énergie. Il s'ensuit qu'un cycle de combustible doit être évalué non isolément, mais compte tenu de son effet global sur le prix de revient de l'énergie produite.

Le rapport énumère les facteurs économiques et techniques qui déterminent l'élément "coût du combustible nucléaire" dans le prix de revient de l'énergie aux bornes de la centrale. Le premier de ces facteurs est le coût du combustible sous la forme dans laquelle il est chargé dans le réacteur. Le deuxième est la valeur du combustible irradié, c'est-à-dire la valeur des produits fissiles et fertiles qu'il contient, déduction faite des frais de transport, d'assurance et de traitement. Un troisième facteur est le taux de combustion, c'est-à-dire la quantité de chaleur produite par un poids donné de combustible nucléaire avant déchargement du réacteur et traitement. Un autre facteur est la gestion du combustible (méthode d'approvisionnement en combustible, réserves de combustible nécessaires, manutention du combustible après déchargement, etc.). Un cinquième est la puissance spécifique d'un réacteur exprimée en kilowatts de puissance thermique par kilogramme de combustible. Il faut mentionner aussi le rendement thermique de la centrale qui détermine le nombre d'unités d'énergie électrique que produira une unité de chaleur. Le taux d'intérêt et le facteur d'utilisation de la centrale constituent également des paramètres importants en raison des sommes con-

sidérables immobilisées sous forme de combustible. Enfin, la durée de vie de la centrale peut aussi avoir une influence sur la part qui revient au combustible dans le prix du courant aux bornes de la centrale.

Frais d'exploitation et d'entretien; divers

Dans le rapport, toutes les dépenses autres que les investissements et les frais de combustible sont classées dans cette troisième catégorie. Les frais d'exploitation courants des centrales nucléaires comme des centrales classiques comprennent des dépenses telles que : main-d'oeuvre et commandement, matières consommables, entretien et divers. Un plan d'imputation de ces frais figure dans un appendice au rapport.

Tant que l'on n'aura pas plus d'expérience en matière de fonctionnement des génératrices nucléaires, il faudra probablement affecter aux centrales de ce type un personnel spécialisé, surtout dans les services de génie nucléaire et de santé et de sécurité. Cet état de choses contribuera certainement à maintenir les frais d'exploitation à un niveau élevé. Il se peut aussi que dans une centrale nucléaire les frais de commandement dépassent dans l'ensemble les frais correspondants des centrales classiques.

Pour ce qui est de l'entretien, les frais afférents au matériel classique dans une centrale nucléaire pourront être évalués d'après les frais d'entretien des centrales classiques. Etant donné les risques particuliers inhérents à la partie nucléaire de la centrale, il est probable que son entretien sera plus onéreux; ainsi, il peut être nécessaire d'exécuter une partie des opérations d'entretien par télécommande.

Quant aux fluides de refroidissement et ralentisseurs spéciaux, tels que l'eau lourde ou les liquides organiques qu'utilisent certains types de centrales nucléaires, le coût de la charge initiale de ces matières est imputé dans le rapport sur les dépenses d'équipement, mais l'achat de tout complément indispensable est considéré comme une dépense d'exploitation. Il se peut que certaines autres fournitures spéciales soient également nécessaires en cours d'exploitation. En ce qui concerne les frais divers, un poste important est constitué par les primes d'assurance au tiers pour le cas d'accident nucléaire. Le rapport fait ressortir qu'il n'y a pas de règle rigide pour la ventilation des frais entre les différentes catégories prévues. Ce qui importe, c'est de veiller à ne négliger aucune dépense qui puisse influencer le résultat final.

Evaluation du prix de revient aux bornes de la centrale

Après avoir déterminé et réparti les frais de construction, le coût du combustible et les dépenses d'exploitation et d'entretien, il s'agit d'établir le prix de revient par unité d'énergie produite. Des

chiffres indiquant exactement les prix de revient aux bornes d'une seule centrale permettraient de comparer sur le plan économique deux réacteurs pour lesquels la structure des dépenses d'investissement, des coûts de combustible et des frais d'exploitation et d'entretien est différente, à condition qu'ils soient destinés à rendre à peu près les mêmes services, au cours d'une même période et à l'intérieur d'un même réseau.

Comme il est souligné dans le rapport, il ne faudrait cependant pas utiliser ces chiffres sans discernement pour établir des comparaisons entre centrales classiques et centrales nucléaires. L'introduction de centrales nucléaires dans un réseau en modifiera complètement l'exploitation; aussi la détermination du coût réel de l'exploitation d'une centrale nucléaire exige-t-elle une analyse économique de l'ensemble du réseau pendant plusieurs années.

Les méthodes de calcul du prix de revient aux bornes de la centrale sont de deux types : les méthodes de l'état stationnaire et la méthode du bilan actualisé. Bien que les méthodes de l'état stationnaire diffèrent d'un pays à l'autre selon les modes d'approvisionnement en combustible employés, elles ont toutes un trait fondamental commun. Les calculs se fondent sur l'hypothèse que l'état d'équilibre, dans lequel les principaux paramètres du prix de revient tels que le niveau d'irradiation moyen du combustible et le facteur d'utilisation de la centrale sont supposés constants, est réalisé. Par des ajustements appropriés, on peut ensuite tenir compte des variations que ces paramètres peuvent subir pendant la durée de vie du réacteur. La méthode du bilan actualisé, par contre, est conçue de manière à pouvoir être appliquée à tous les types de réacteurs quel que soit le mode d'approvisionnement en combustible employé. Elle comporte l'établissement d'une liste de toutes les dépenses prévues pendant la durée de vie du réacteur et la détermination de leur valeur actualisée. En égalisant cette valeur actualisée des dépenses et la valeur actualisée de la quantité d'énergie que l'on attend du réacteur, on obtient le prix de revient aux bornes de la centrale.

Dans les méthodes de l'état stationnaire, le prix de revient du kilowattheure (unité de l'énergie produite) est considéré comme la somme de ses éléments : dépenses d'investissement, coût du combustible, frais d'exploitation et d'entretien, et autres dépenses. Pour déterminer le montant total des dépenses d'investissement au moment du démarrage, on fait la somme de toutes les dépenses de cette catégorie et l'on y ajoute une charge financière au titre des intérêts pendant la construction. On obtient la charge financière annuelle en tenant compte du taux d'intérêt annuel appliqué au total des investissements, de l'amortissement (calculé en déterminant les annuités qui, si elles étaient mises en réserve chaque année, finiraient par atteindre, au moment du déclassement de la centrale, le montant total des dépenses d'investissement initiales) et, le cas échéant, des impôts et primes

d'assurance. On établit l'élément "investissement" pour une année en divisant la charge financière annuelle par le nombre de kilowattheures produits pendant l'année considérée.

En ce qui concerne l'élément "coût du combustible", le rapport décrit les méthodes employées au Canada, au Royaume-Uni et aux Etats-Unis; il fait ensuite ressortir que, pour imputer ces dépenses aux kilowattheures d'énergie produite, il peut être nécessaire de calculer toute une série de sous-éléments qui correspondent aux rubriques suivantes : location du combustible, appauvrissement du combustible, transformation du combustible, traitement chimique, transport, transformation de l'uranium, transformation du plutonium, valeur de vente du plutonium.

Pour ce qui est de l'élément "frais d'exploitation et d'entretien", toutes les dépenses de cette catégorie peuvent s'exprimer sous forme de coûts annuels par kilowatt de puissance installée. On obtient donc simplement l'élément correspondant du prix de revient en additionnant ces coûts et en divisant le total par le nombre annuel de kilowattheures d'énergie produite par kilowatt de puissance installée.

Les méthodes de l'état stationnaire ont l'avantage de permettre des calculs rapides et de donner des résultats dont l'exactitude est plus que

suffisante, compte tenu du caractère incertain des valeurs actuelles et futures des données. Ces méthodes sont toutefois sujettes à certaines restrictions; on obtiendrait, par exemple, des prix de revient différents suivant les années si les paramètres d'exploitation ou les paramètres économiques tels que le facteur d'utilisation de la centrale et le coût du combustible devaient varier pendant la durée de vie du réacteur.

On peut résoudre ces difficultés grâce à la méthode du bilan actualisé qui est employée dans divers pays pour les évaluations économiques générales. Comme déjà brièvement expliqué plus haut, cette méthode comporte l'établissement d'un calendrier dans lequel on inscrit (année par année) toutes les dépenses d'investissement, de combustible, d'exploitation et autres, et les sommes encaissées au titre des reprises liées à l'exploitation du réacteur pendant toute sa durée de vie, ainsi que les quantités prévues d'énergie produite. On détermine ensuite un prix de revient par kilowattheure qui rende la valeur actualisée de la quantité d'énergie que produira le réacteur égale à la valeur actualisée de toutes les dépenses au moment du démarrage. L'emploi de la méthode du bilan actualisé est particulièrement indiqué lorsque le type de combustible est complexe, que la période nécessaire pour atteindre l'équilibre est relativement longue ou que l'on peut prédire exactement les variations futures des paramètres pertinents.

(Suite de la page 12)

l'ordre de grandeur de la dose gamma; le scintillement d'une lampe au néon et la hauteur de son du signal audible augmentent en fonction de l'intensité de la dose. N'ayant pas d'interrupteur de mise en service, l'appareil assure une protection continue; il peut, grâce à une pile à mercure de 4 volts, fonctionner un mois. Le système de détection repose sur le principe de Geiger-Muller.

Trois scientifiques yougoslaves, B. J. Kovač, S. D. Mučdeka et M. V. Šobajić ont décrit un appareil pour le contrôle des rayonnements à distance. L'instrument relié à un appareil téléphonique normal

renseigne automatiquement sur l'intensité du rayonnement dans une zone donnée, en réponse à tout appel téléphonique, en l'absence de personnel technique pour donner l'information au téléphone.

Les différentes séances de la conférence ont été présidées par : C. J. Borkowski (Etats-Unis), E. Djakov (Institut unifié de recherches nucléaires, Doubna, URSS), E. Gatti (Italie), G. Gianelli (EURATOM), K. Kandiah (Royaume-Uni), J. Keller (Pologne), B. Lalovic (Yougoslavie), M. Surdin (France), R. Vestergaard (Suède) et P. Weinzierl (Autriche).