

**Zeitschrift:** Bulletin des Schweizerischen Elektrotechnischen Vereins, des Verbandes Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen = Bulletin de l'Association suisse des électriciens, de l'Association des entreprises électriques suisses

**Herausgeber:** Schweizerischer Elektrotechnischer Verein ; Verband Schweizerischer Elektrizitätsunternehmen

**Band:** 67 (1976)

**Heft:** 17

**Artikel:** Le cycle du combustible nucléaire

**Autor:** [s.n.]

**DOI:** <https://doi.org/10.5169/seals-915203>

### **Nutzungsbedingungen**

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

### **Conditions d'utilisation**

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

### **Terms of use**

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

**Download PDF:** 16.01.2026

**ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>**

# Le cycle du combustible nucléaire

Par le Groupe d'information sur les problèmes de combustibles nucléaires<sup>1)</sup>

*Es wird der Brennstoffkreislauf von Kernkraftwerken beschrieben und kommentiert, welche mit leicht angereichertem Uran betrieben werden. Es handelt sich dabei vor allem um Leichtwasserreaktoren (Druck- und Siedewasserreaktoren).*

*Nach einer Beschreibung der verschiedenen Stufen des Brennstoffzyklus werden die wichtigsten Aspekte erläutert, die sich zur Deckung des notwendigen Bedarfs Europas an Natururan, Anreicherungs- und Wiederaufbereitungskapazität ergeben. Abschliessend werden die finanziellen Fragen erörtert, denen sich die Elektrizitätswerke in der Zukunft zur Durchführung des notwendigen Investitionsvolumens gegenübergestellt sehen.*

## 1. Les étapes du cycle du combustible

Le schéma de la fig. 1 résume les diverses opérations et transformations que subit le combustible nucléaire employé dans les réacteurs à uranium faiblement enrichi. L'ensemble de ces opérations et transformations s'appelle le cycle du combustible nucléaire.

Il comporte les étapes décrites brièvement ci-après:

1. L'uranium existe en grandes quantités sur la surface du globe, sous diverses formes et à des concentrations fort variables. Actuellement, pour couvrir les besoins, on se borne à exploiter des minerais d'une teneur comprise entre quelques pour-cent et quelques pour-mille.

L'extraction du minerai (1) consiste à mettre à jour et extraire du sol les roches uranifères.

2. Etant donné que l'uranium se trouve mélangé dans les minerais à des quantités importantes de stériles, il est nécessaire d'en effectuer la concentration (2). Pour alléger les transports, cette opération se fait autant que possible au voisinage de la mine.

La concentration par voie chimique, précédée éventuellement d'une première concentration physique, comporte les opérations successives suivantes: broyage, lixiviation, purification et concentration proprement dite.

Le produit de l'opération de concentration se présente sous forme d'uranite solide (yellow-cake) contenant encore un solde d'impuretés.

3. Les procédés d'enrichissement de l'uranium actuellement utilisés exigent qu'il soit au préalable mis sous forme d'un composé gazeux. Le composé choisi est l'hexafluorure d'uranium ( $UF_6$ ).

Cette opération est dite fluoration (3). Elle s'accompagne d'une purification très poussée par voie chimique.

4. Pour les réacteurs dont le cycle de combustible est étudié dans ce rapport, il est nécessaire que la teneur de l'isotope fissile de l'uranium  $U^{235}$  soit augmentée par rapport à celle de l'uranium trouvé dans la nature.

Cette opération est connue sous le nom de «enrichissement de l'uranium» (4) ou «séparation isotopique de l'uranium».

Jusqu'à un passé récent, la seule technique utilisée à l'échelle industrielle était celle de la diffusion gazeuse de l' $UF_6$  à travers

Le rapport décrit et commente le cycle du combustible employé dans les réacteurs utilisant de l'uranium faiblement enrichi, et notamment dans les réacteurs des filières à eau légère (eau pressurisée et eau bouillante).

Après avoir décrit les différentes étapes du cycle du combustible, les auteurs en reprennent les aspects principaux pour faire le point des besoins actuels et futurs de l'Europe en uranium naturel, en capacités d'enrichissement et en usines de retraitement. Ils abordent ensuite la question des investissements correspondants, au financement desquels les entreprises d'électricité peuvent se trouver amenées à participer. Une motion relative à cet aspect du problème est annexé au rapport.

une cascade de barrières poreuses. Aujourd'hui, une autre technique, la séparation des isotopes par centrifugation, fait l'objet d'un développement industriel. D'autres méthodes sont étudiées, mais jusqu'à présent n'ont pas encore donné lieu à des réalisations qui dépassent celles du laboratoire (laser) ou de l'usine pilote (tuyères).

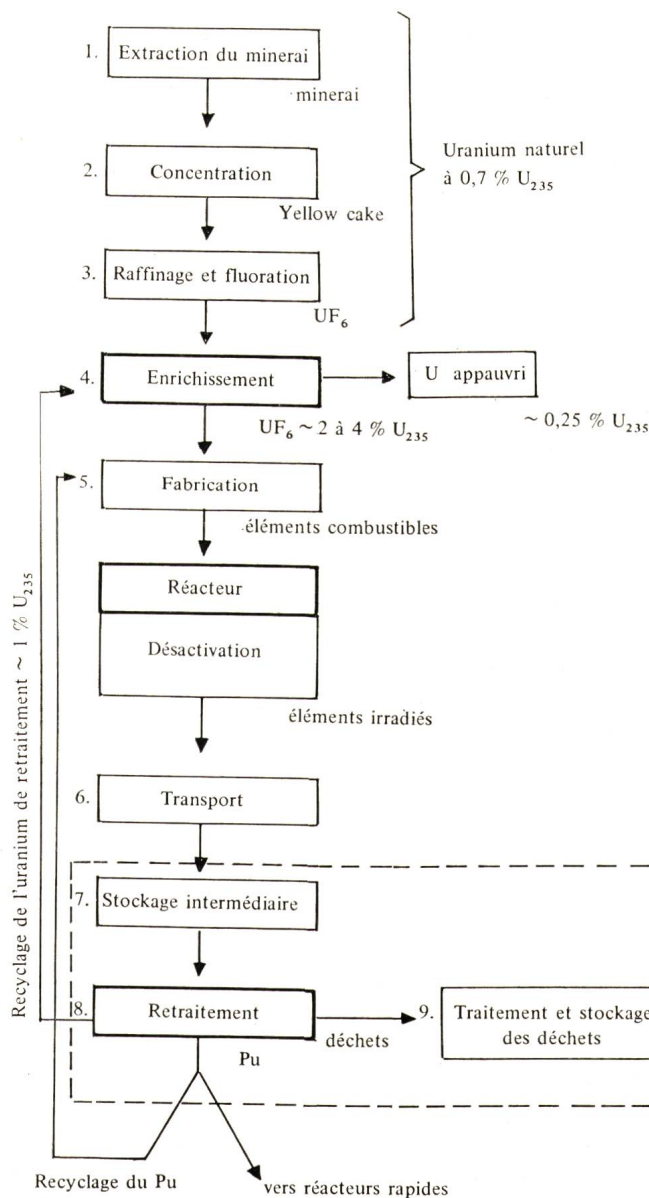


Fig. 1 Cycle de combustible pour réacteur à eau avec recyclage de l'uranium

<sup>1)</sup> Ce groupe a la composition ci-après: M. P. Nihoul (Belgique), président, M. F. Dierkens (Belgique), secrétaire, MM. U. Belleli (Italie), M. Durand (France), A. D. Lindo (Pays-Bas), F. Louis (Belgique), H. Mirschinka (République fédérale d'Allemagne), M. Townsend (Grande-Bretagne), membres, MM. A. V. Y. Ortiz (Espagne), E. Svenske (Suède), E. Trümpy (Suisse), observateurs, MM. Braatz (République fédérale d'Allemagne) et Minnard (France) ont participé à la rédaction du rapport.



Après l'opération d'enrichissement, il reste un résidu dont la teneur en uranium fissile est inférieure à celle de l'uranium naturel. Un abaissement de la teneur de ces rejets en uranium fissile réduit la consommation d'uranium naturel, mais accroît le travail de séparation isotopique.

Comme la teneur de rejet est réglable dans une certaine mesure, un choix économique peut être fait, qui dépend des conditions du marché de l'uranium naturel et du coût du travail de séparation. L'enrichissement est une étape essentielle du cycle de combustible; pour des raisons historiques, elle a été réalisée jusqu'à présent sous forme de monopole d'Etat. En effet, les premières usines d'enrichissement avaient des applications uniquement militaires et dès lors sont restées sous le contrôle strict des autorités gouvernementales, qui ont assuré le développement des procédés utilisés. Toutefois, une tendance se fait jour pour confier la mise en œuvre de ces procédés à l'industrie privée.

5. La fabrication des éléments combustibles (5) est l'opération qui aboutit à fournir le combustible qui est effectivement mis dans le réacteur.

Elle comprend deux opérations successives:

- la conversion chimique en poudre de dioxyde d'uranium ( $\text{UO}_2$ ) du gaz  $\text{UF}_6$  enrichi en isotope fissile;
- les opérations mécaniques de fabrication des pastilles de dioxyde d'uranium par frittage, la constitution de crayons par gainage de colonnes de pastilles et le montage de ces crayons en assemblages (éléments combustibles) prêts à être introduits dans le réacteur.

La fabrication fait appel à des techniques relativement simples, mais dont la mise en œuvre est délicate et doit être faite avec un soin méticuleux.

Les éléments combustibles seront, dans le réacteur, disposés suivant la géométrie la plus convenable aux interactions neutroniques.

6. La production d'énergie dans le réacteur modifie l'état des éléments combustibles. Après leur irradiation, ils contiennent:

- de l'uranium à une teneur en isotope fissile appauvrie par rapport à celle du début du séjour dans le réacteur, mais cependant encore légèrement supérieure à celle de l'uranium naturel;
- du plutonium formé par l'action neutronique sur l'isotope  $\text{U}^{238}$ ;
- des produits de fission radioactifs;
- les éléments de gainage et de structure.

L'acheminement du combustible irradié des centrales électriques nucléaires jusqu'à l'usine de retraitement du combustible doit être considéré comme une étape distincte du cycle de combustible, en raison des normes de sécurité très strictes appliquées à ce transport (6).

7. et 8. Le retraitement (8) est l'opération qui permet de récupérer les produits qui pourront être réintroduits dans un nouveau cycle de production d'énergie et de séparer les déchets radioactifs.

Si ce retraitement ne peut pas être fait immédiatement après la période de désactivation de quelques mois qui suit le séjour des éléments dans le réacteur, il est nécessaire de prévoir des piscines de stockage intermédiaire (7) où les éléments combustibles irradiés attendent de pouvoir être retraités.

Pour réduire les manutentions successives, il y a intérêt à prévoir les piscines intermédiaires sur le site même des usines de retraitement.

9. La dernière étape du cycle du combustible est relative aux dispositions à prendre au sujet des déchets radioactifs (9) issus des usines de retraitement du combustible.

Cependant, les volumes à traiter sont incomparablement faibles par rapport à ceux des déchets d'autres industries; ils peuvent être conservés et facilement surveillés par des techniques parfaitement maîtrisées. Des recherches et des réalisations pilotes existent déjà en vue d'améliorer les conditions de transport et réduire encore le volume occupé.

Le plutonium recueilli lors des opérations de retraitement des éléments combustibles irradiés est un produit très utile à la satisfaction des besoins mondiaux en énergie primaire, soit par recyclage dans les réacteurs à neutrons thermiques actuels – car il se substitue facilement à l'uranium fissile  $\text{U}^{235}$  – soit pour le développement de la filière des réacteurs à neutrons rapides. La première de ces utilisations pourrait réduire la demande en uranium naturel jusqu'à un facteur de l'ordre de 10 % vers le milieu de la prochaine décennie et 20 % à plus long terme, tandis que la seconde est de nature à prolonger les ressources en matières fissiles pour plusieurs siècles.

## 2. Aspects principaux du cycle de combustible

### 2.1 Prévisions de développement de l'énergie nucléaire

Une enquête a été faite auprès des producteurs d'électricité européens pour connaître leurs besoins en uranium naturel, en capacités d'enrichissement et en usines de retraitement. Ces besoins découlent directement des centrales en fonctionnement et des projets de construction de centrales électriques nucléaires utilisant du combustible à uranium légèrement enrichi, tels qu'ils sont définis par les programmes nationaux. Le parc des centrales électriques nucléaires, pour l'ensemble de l'Europe de l'Ouest, tel qu'il était prévu en 1975, était:

- 1975: 20  $\text{GW}_{\text{el}}$
- 1980: 80  $\text{GW}_{\text{el}}$
- 1985: 200  $\text{GW}_{\text{el}}$

Il faut noter que dans ces chiffres, la quote-part des pays de la Communauté Européenne s'élève à:

- 1975: 15  $\text{GW}_{\text{el}}$
- 1980: 60  $\text{GW}_{\text{el}}$
- 1985: 150  $\text{GW}_{\text{el}}$

Une nouvelle enquête portant sur la mise à jour de ces programmes est en cours au début de l'année 1976. Ses résultats feront l'objet d'une communication orale.

### 2.2 Besoins en uranium naturel

Cela étant, les besoins annuels en uranium naturel sont estimés comme suit pour l'Europe de l'Ouest, sur la base d'une teneur de rejet de 0,28 %, et sans tenir compte d'un éventuel recyclage du plutonium:

- en 1975: 8 400 tonnes d'uranium naturel par an,
- en 1980: 27 000 tonnes d'uranium naturel par an,
- en 1985: 52 000 tonnes d'uranium naturel par an.

La hausse des prix des produits pétroliers et les menaces d'embargo fin 1973 ont conduit à une forte augmentation des programmes et fait prendre conscience à tous de l'importance des besoins en uranium naturel et de la nécessité d'en garantir la satisfaction. De ce fait, et bien que les programmes nucléaires d'un certain nombre de pays aient depuis été réduits de façon significative, la demande de concentré d'uranium est actuellement forte devant l'offre.



Les prix de l'uranium sont devenus rémunérateurs, ce qui va conduire à augmenter les recherches et garantir ainsi à long terme les approvisionnements. Les exploitations ont repris, ce qui – à assez court terme – va rétablir une situation normale caractérisée par un équilibre entre l'offre et la demande.

La production indigène ne couvre actuellement qu'une faible partie des besoins européens. Par conséquent, les producteurs d'électricité doivent se tourner vers les marchés extérieurs. Dans ces marchés, les pays fortement industrialisés ont tendance à se réserver les quantités nécessaires à la couverture de leurs propres besoins et donc à appliquer certaines mesures restrictives à l'exportation de l'uranium.

L'Europe doit donc se tourner vers les pays où des ressources importantes ont été ou sont susceptibles d'être trouvées et où les besoins nationaux sont encore modestes.

Dans ces derniers pays, l'exploration et le développement des ressources dépendront pour une large part d'une aide extérieure à laquelle les sociétés d'électricité européennes pourraient être amenées à participer.

Par ailleurs, certains pays producteurs d'uranium naturel envisagent aussi d'enrichir eux-mêmes leur uranium dans le but d'exporter un produit plus élaboré.

### 2.3 Besoins en capacités d'enrichissement

Une estimation des besoins de l'Europe et plus spécialement de la Communauté Européenne en travail d'enrichissement a été faite sur la base des programmes des puissances électriques nucléaires décrits précédemment.

Les besoins en travail d'enrichissement s'établissent comme suit pour l'ensemble de l'Europe de l'Ouest :

en 1975: 4 millions d'unités de travail de séparation par an,  
en 1980: 14 millions d'unités de travail de séparation par an,  
en 1985: 28 millions d'unités de travail de séparation par an.

Pour couvrir leurs besoins les électriciens européens ont d'abord conclu des contrats à long terme avec les Etats-Unis d'Amérique auxquels se sont ajoutés ensuite quelques contrats passés avec l'URSS, plus les faibles possibilités existantes en Europe.

En raison de l'augmentation des besoins mondiaux et de la saturation des usines américaines actuelles, l'Europe ne pouvait plus s'appuyer exclusivement sur l'étranger pour le développement de son programme nucléaire. Devant cette situation et en raison du caractère vital de cette opération, elle a entrepris de s'équiper en usines d'enrichissement susceptibles d'assurer, vers 1985, sensiblement la moitié de ses besoins propres. Une usine utilisant la technique de diffusion gazeuse, d'une capacité annuelle de dix millions d'unités de travail de séparation ainsi que deux usines utilisant la technique de centrifugation, chacune d'une capacité d'un million d'unités de travail de séparation par an, seront bientôt en service.

On peut estimer que les besoins européens sont ainsi raisonnablement couverts jusqu'au milieu de la décennie 1980/1990.

Au-delà, ces usines ne seront plus suffisantes, et des capacités d'enrichissement supplémentaires devront être trouvées, tant sur le plan mondial que sur le plan européen.

Aux Etats-Unis, en dehors des programmes d'augmentation de la capacité des usines d'enrichissement existantes, un projet d'une usine à diffusion gazeuse d'une capacité de dix millions d'unités par an est actuellement à l'étude. Toutefois, aucune décision n'a encore été prise quant à la date de réalisation de

ce projet. Il en est de même de projets d'usines utilisant le procédé par centrifugation.

En Europe, une seconde usine par diffusion gazeuse de même taille que la première est sérieusement mise à l'étude dès à présent, ainsi que plusieurs unités de plus faible capacité unitaire, utilisant le procédé par centrifugation et dont la construction sera programmée pour suivre la demande.

Le temps nécessaire pour la mise en place d'une usine d'enrichissement étant du même ordre de grandeur que celui de la construction des centrales électriques nucléaires qu'elle sera amenée à alimenter, un programme adéquat de construction des usines d'enrichissement peut être engagé parallèlement à celui de la construction des centrales.

### 2.4 Besoins en usines de retraitement

Alors que naguère certains faisaient des prévisions optimistes de surcapacité en usines de retraitement, on constate aujourd'hui une réelle insuffisance. Les prévisions actuelles s'établissent comme suit pour l'ensemble de l'Europe de l'Ouest :

en 1975: 170 tonnes d'oxyde par an,  
en 1980: 1150 tonnes d'oxyde par an,  
en 1985: 3700 tonnes d'oxyde par an.

Pour l'Europe, la quantité totale cumulée d'éléments combustibles à retraiter à partir d'aujourd'hui jusqu'à fin 1985 atteindra approximativement 17000 tonnes. Or, les moyens de retraitement qui sont déjà décidés ne pourront traiter que quelque 9000 tonnes, laissant ainsi en 1985 un solde de 8000 tonnes en attente de retraitement.

Pour pallier ces insuffisances, des efforts sont envisagés en Europe dans deux directions: d'une part, la création d'autres usines de retraitement, d'autre part, et dans la mesure où cela est nécessaire, la construction de piscines pour le stockage temporaire des éléments irradiés, en attendant leur retraitement.

En Europe, le groupement international United Reprocessors a été organisé pour se consacrer aux opérations de retraitement du combustible. Dans ce cadre, outre l'usine de La Hague, en France, qui sera prochainement mise en service avec une capacité finale de 800 tonnes par an, sont en projet une usine en Allemagne, dont le début de la mise en service est prévu vers 1985, pour une capacité finale de 1500 tonnes par an, et une autre d'environ 1000 tonnes par an en Grande-Bretagne.

En outre, il faut signaler que l'Italie s'oriente vers la construction d'une usine à mettre en service dans la seconde moitié de la prochaine décennie. Par ailleurs, des études sont en cours pour examiner la remise en fonctionnement de l'usine d'Eurochemie située en Belgique, dont la capacité de 40 tonnes par an pourrait être portée à 60 tonnes par an, puis éventuellement à 300 tonnes par an.

Devant certaines difficultés de mise en route de leur industrie, des industriels du retraitement considèrent que leurs clients devraient participer aux risques financiers propres à cette activité.

En attendant l'aboutissement de ces programmes, il est envisagé de construire des piscines de stockage intermédiaire pour une capacité d'environ 8000 tonnes.

Quoi qu'il en soit, l'ensemble des projets de construction d'usines de retraitement dont il a été question ci-dessus ne couvre que les besoins courants des centrales électriques nucléaires dont la mise en service sera antérieure à l'année 1980.



Il sera nécessaire de mettre en chantier d'autres projets pour les centrales postérieures à cette date; tout retard obligerait à accroître les capacités de stockage intermédiaire et retarderait la récupération de l'uranium et du plutonium contenus dans les éléments combustibles.

Dans le cycle complet du combustible nucléaire, et particulièrement lors de l'opération de retraitement, il est en effet important de tenir compte des besoins en plutonium du programme des réacteurs rapides.

Ce programme, par une meilleure utilisation qu'il fait de l'uranium en épuisant le combustible avec un rendement global de l'ordre de 50 fois plus élevé que celui des réacteurs thermiques, présente un intérêt accru par la pression qu'il ne manquera pas d'exercer sur les prix de l'uranium naturel.

### 3. Investissements

Les centrales électriques nucléaires, par rapport aux centrales électriques à combustibles fossiles, se caractérisent par un investissement plus élevé, mais aussi par un coût de combustible plus faible.

La résultante de ces deux facteurs conduit à un prix de l'énergie nucléaire inférieur à celui de l'énergie produite au départ des combustibles fossiles.

Cependant, la mise en place du cycle du combustible nucléaire appelle des investissements nouveaux qui lui sont spécifiques. Il importe donc de se rendre compte de l'importance de ces investissements.

Il n'est actuellement pas possible de produire des chiffres exacts pour les investissements propres à chaque étape du cycle du combustible; en effet, il s'agit d'un marché qui commence seulement à s'organiser et qui, dans certains cas, ne bénéficie pas encore d'une expérience industrielle suffisante.

Cependant, on peut considérer que le rapport des investissements liés au cycle du combustible à ceux des centrales nucléaires se situe entre 15 et 20%, y compris la prospection du minerai d'uranium. Comme ordre de grandeur, on retiendra:

environ 10% pour l'enrichissement de l'uranium, y compris l'investissement des centrales chargées de fournir l'énergie correspondante; quelque 3% pour la production d'hexafluorure d'uranium, c'est-à-dire l'extraction du minerai et sa fluoration; le retraitement du combustible irradié avec le stockage des déchets radioactifs peut actuellement se situer autour de 3 à 4%; la fabrication des éléments combustibles, la prospection du minerai d'uranium et les autres étapes du cycle pour le solde.

### 4. Conclusions

La mission des entreprises d'électricité consiste à produire de l'énergie électrique au moindre coût, à garantir la continuité de cette production, à veiller au développement de techniques propres à assurer, dans les meilleures conditions, les besoins futurs définis par une politique énergétique.

Il leur appartient donc:

- de veiller à la sécurité des approvisionnements à des prix qui soient représentatifs des coûts réels;

- de suivre tous les efforts d'amélioration technique dans le cycle du combustible, notamment ceux destinés à favoriser l'évolution des techniques de production d'électricité nucléaire.

En outre, ils doivent être assurés que la sûreté nucléaire est aussi effective dans l'ensemble du cycle de combustible qu'elle l'est dans les centrales nucléaires.

Dans ces conditions, les principaux utilisateurs du combustible nucléaire que sont les électriciens doivent se doter des moyens leur permettant d'assumer leur responsabilité relative au cycle du combustible. Dans ce but, ils peuvent se trouver amenés à participer au financement des investissements correspondant à certaines étapes de ce cycle.

Ces investissements représentent certes une charge importante, mais toutefois relativement faible rapportée au coût des centrales. Les électriciens peuvent donc raisonnablement envisager d'y participer; ils contribueront ainsi à maintenir la large compétitivité de l'électricité d'origine nucléaire.