

## L'AVENIR DU NUCLÉAIRE



Bertrand BARRÉ (N62)



Georges CAPUS

**Bertrand Barré** a rejoint en Juin 1999 la Compagnie générale des Matières Nucléaires, COGEMA, en qualité de Directeur de la Recherche et du Développement. Il est également Directeur à la société AREVA.

B. Barré a notamment été Directeur de l'Ingénierie à TECHNICATOME (90-92) et Directeur des Réacteurs Nucléaires au CEA (94-99).

Il est Professeur à l'Institut National des Sciences et Techniques Nucléaires (INSTN).

**Georges Capus** est responsable des Etudes des Marchés Amont à la Direction Commerciale et du Développement International de COGEMA.

## L'uranium de l'eau de mer : véritable ressource énergétique ou mythe ?

### Introduction : de bonnes raisons pour étudier les ressources d'uranium des océans

Alors que l'uranium se vend aujourd'hui à des prix historiquement bas, que des mines continuent de fermer pour insuffisance de rentabilité, qu'il est virtuellement impossible de financer de la prospection à un niveau significatif, et que recycler l'uranium récupéré à partir du traitement des combustibles irradiés souffre de ce faible niveau des prix, traiter de la récupération de l'uranium dans l'eau de mer pourrait être interprété comme de la provocation. De plus (cf article dans le numéro 398 de cette revue), les gisements qui sont actuellement mis en production présentent des teneurs exceptionnellement élevées. S'attacher à évaluer la récupération d'un uranium tout à fait diffus, comme celui des océans, semble aujourd'hui relever du paradoxe.

Il y a pourtant de bonnes raisons d'examiner dès à présent les perspectives d'approvisionnement en uranium pour le très long terme.

Pour pouvoir prendre sereinement la décision de lancer des investissements à amortir sur une longue durée, disposer d'une vision à long terme sur les ressources est nécessaire.

D'autant que dans un contexte d'efforts de réduction des émissions de gaz à effet de serre, les industriels du nucléaire qui s'attendaient à voir cette source d'énergie obtenir enfin le soutien du plus grand nombre, notamment des environnementalistes, se sont vu opposer des objections diverses, au nombre desquelles la prétendue insuffisance des ressources en uranium.

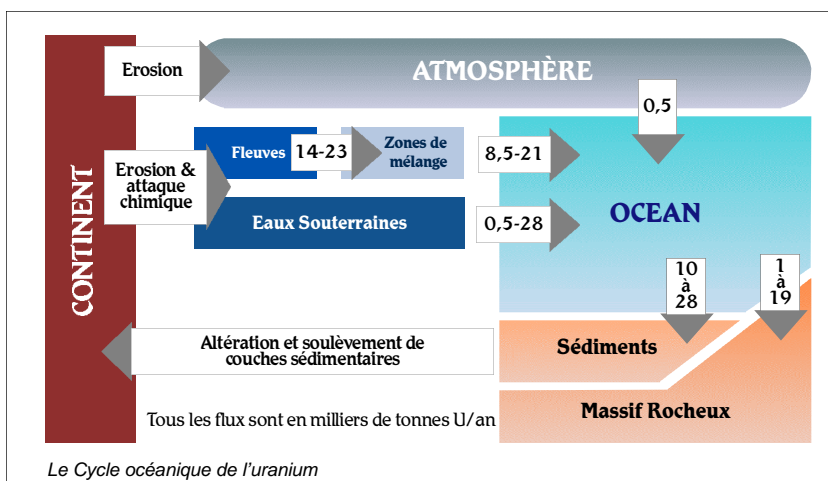
La réponse à la question de l'importance des ressources mondiales en uranium pour le long terme ne peut donc être éludée dans le cadre de la relance d'un nucléaire apportant une solution significative à la lutte contre le réchauffement planétaire. Certains, notamment aux Etats-Unis, prétendent même que ce renouveau du nucléaire devra être massif, pour apporter une contribution substantielle à cette lutte, ou ne sera pas. Or une contribution massive de kWh nucléaires présuppose des sollicitations accrues des ressources d'uranium. L'analyse de la disponibilité effective du potentiel apporté par l'uranium de l'eau de mer, doit contribuer à asseoir la vision à long terme des ressources en uranium de la planète.

### Attrait des "richesses de Neptune"

#### Des chiffres astronomiques :

Avec un volume des océans évalué à  $1,37 \times 10^{18} \text{ m}^3$ , nous nous trouvons ici face à une source considérable, même pour de très faibles teneurs. Il est couramment admis comme teneur en uranium des océans, une valeur moyenne de 3,3 microgrammes d'uranium par litre (avec une dispersion de valeurs allant de 1 à 5 microgrammes par litre en milieu océanique ouvert et plus importante encore dans des environnements marins moins homogènes). En appliquant cette teneur moyenne au volume océanique, on obtient un contenu uranifère total d'environ 4500 millions de tonnes d'uranium ( $4,5 \times 10^9 \text{ tU}$ ). Ce nombre est à comparer aux quelques 15,4 millions de tonnes de ressources minières classiques [OECD/NEA-IAEA, 2002]. Il y aurait donc dans l'océan, presque à portée de main, près de 300 fois plus d'uranium que dans les ressources minières classiques.

A l'intérieur même des gigantesques masses d'eau



océanique, les courants marins mobilisent chaque année des quantités d'uranium se chiffrant en dizaines de millions de tonnes (plus de 5 millions de tonnes pour le seul Kuro Shio qui baigne le Japon), des chiffres à faire rêver plus d'un pays peu pourvu en ressources énergétiques.

On attribue au britannique R.V Davies, la paternité de l'idée de récupérer l'uranium de l'eau de mer (Davies 1964). A cette époque qui précédait la phase de développement de

ter a priori son intérêt potentiel pour le long terme. Il faut cependant reconnaître qu'il doit y avoir a minima de sérieux problèmes à résoudre. Il n'est pas très encourageant de constater que la part de production totale réalisée à partir d'eau de mer même pour les substances les plus abondantes (cf. tableau 1) à l'état dissous, comme le chlorure de sodium ou le chlorure de magnésium, est soit limitée pour NaCl, soit même désormais nulle pour MgCl<sup>2</sup>.

On peut ajouter qu'il existe des environnements fluviaux ou lacustres où la teneur en uranium dissous est supérieure à la moyenne océanique, mais les débits ou les quantités sont souvent assez limités. On notera enfin que la teneur en uranium dissous ramenée au total des matières dissoutes ne présente pas de gain très notable par rapport à la moyenne de l'écorce terrestre (environ gain d'un facteur 3).

**Tableau 1 : Composition moyenne de l'eau de mer :**

Item	Teneur (masse)	quantité totale contenue dans les océans	commentaire
Eau (H <sub>2</sub> O)	0,990		La première ressource de l'eau de mer!
Total sels dissous	35 x 10 <sup>-3</sup>		
NaCl	27 x 10 <sup>-3</sup>		Le plus abondant des sels dissous
MgCl <sub>2</sub>	3,5 x 10 <sup>-3</sup>		Le deuxième sel dissous
MgSO <sub>4</sub>	2,0 x 10 <sup>-3</sup>		
Uranium	3,3 x 10 <sup>-9</sup>	4,5 x 10 <sup>9</sup> tonnes U	75 000 ans de consommation au rythme actuel

l'industrie électronucléaire des années 70, tous les experts prédisaient une rapide raréfaction de la ressource, et toutes les solutions à cette difficulté étaient envisagées.

#### Des avantages potentiels qui font rêver :

Outre l'attrait d'une ressource quasi inépuisable à l'échelle de temps de l'humanité, la récupération de l'uranium de l'eau de mer laisse miroiter d'autres avantages tout aussi précieux.

- A priori un faible impact environnemental (un point qui méritera vérification lors d'un éventuel passage à la pratique<sup>1</sup>), puisqu'il ne faut pas creuser d'excavation, que l'on n'engendre pas de résidus miniers, que cette récupération n'engendre pas d'émissions de radon et que l'on ne générera pratiquement pas d'exposition collective à des doses de radioactivité sur les travailleurs impliqués et encore moins sur les populations.
- Des ressources accessibles à tous les pays, qu'ils disposent de façades maritimes ou pas, puisque des installations pourraient se positionner dans les eaux internationales.

#### Mais sans doute des difficultés qu'il ne faut pas sous-estimer:

Certes, le fait que la récupération industrielle de l'uranium dans l'eau de mer n'est pas pratiquée aujourd'hui ne doit pas faire écar-

#### L'uranium dans l'eau de mer et les autres eaux superficielles

Une assez abondante littérature scientifique traite du sujet de l'uranium dans l'eau de mer.

#### Technologies de récupération de l'uranium dans l'eau de mer et essais effectués :

*Un enjeu technico-économique difficile :* le problème peut être formulé simplement en ces termes : concevoir et construire une installation capable de traiter un million de mètres cubes d'eau de mer pour 100 à 300 euros (la valeur de leur contenu uranium) et d'une capacité annuelle de traitement de l'ordre de 10<sup>12</sup> m<sup>3</sup> (environ deux fois le débit du Gange) pour pouvoir produire l'équivalent d'une mine de 1000 à 3000 tU/an selon le taux de récupération. Un premier élément d'appréciation peut être de comparer ce coût à celui d'une facture d'eau potable ou industrielle, environ un euro par mètre cube, soit un écart de quatre ordres de grandeur avec notre problème.

**Tableau 2 : sélection de données publiées sur des flux d'uranium fluviaux\* ou maritimes**

nom	localisation	débit liquide m <sup>3</sup> /an	teneur en Uranium g/l	flux d'uranium t U/an	référence
Indus	Thatta Bridge	238 x 10 <sup>9</sup>	4,94	1 176	Chabaux
Gange	Rajshahi	450 x 10 <sup>9</sup>	2,0	900	Chabaux
Huang Ho	Jimau	49 x 10 <sup>9</sup>	7,5	368	Chabaux
Amazone	Santarem	5400 x 10 <sup>9</sup>	0,04	217	Chabaux
Rhône	Arles	52 x 10 <sup>9</sup>	0,56	29	Chabaux
TOTAL FLEUVES	Monde	31 500 x 10 <sup>9</sup>	0,27	8 500	Cochran
Kuro Shio (courant noir)	Japon	1 580 000 x 10 <sup>9</sup>	3,3	5 200 000	Takanobu

\* Il s'agit ici de la seule composante uranium en solution.

Les données sur les teneurs y sont nombreuses. La valeur moyenne de 3,3 microgrammes par litre pour l'océan ouvert paraît être un ordre de grandeur consensuel, et il a été assez largement démontré que l'essentiel de cet uranium est en solution, essentiellement sous forme de complexe anionique uranyl-tricarbonat. Cette concentration évoluerait peu, l'apport fluvial, somme toute modeste et équivalant à la consommation française (cf. tableau 2), serait compensé par une immobilisation sensiblement équivalente dans les sédiments. De fait, la teneur observée serait une sorte d'équilibre de co-précipitation et d'adsorption, car de toute manière nettement au dessous de la valeur de précipitation de minéraux uranifères dans les conditions physico-chimiques de l'eau de mer.

#### Pomper l'eau de mer : quasi impasse de l'approche dynamique

Le tableau 3 montre que la dépense énergétique pour pomper un mètre cube d'eau de mer à 10 mètres de haut est d'environ un dixième de l'énergie électrique récupérée en centrale nucléaire de 100% de l'uranium contenu en solution.

Un tel écart implique à tout le moins qu'il sera quasi impossible d'utiliser une approche dynamique impliquant le pompage de l'eau de mer, à moins de récupérer d'autres substances capables d'en supporter le coût.

#### Dessalement de l'eau de mer

Le tableau 1 nous rappelle une évidence : l'eau est la première ressource contenue dans l'eau de mer. Avec des perspectives de raréfaction des ressources en eau douce, le

**Tableau 3 : Estimation du contenu dans un mètre cube d'eau de mer**

		unité
Teneur en uranium	3,3	Milligramme par m <sup>3</sup>
Valeur de ce contenu à 10\$/lbU <sub>3</sub> O <sub>8</sub>	86 x 10 <sup>-6</sup>	US dollar par m <sup>3</sup>
Energie thermique contenue dans l'uranium utilisé en LWR	1,6 x 10 <sup>6</sup> 0,46	J kWh
Energie électrique récupérée de l'uranium utilisé en LWR	5,4 x 10 <sup>5</sup> 0,15	J kWh
Energie pour accroître la température de 1 m <sup>3</sup> de 1°C	4,2 x 10 <sup>6</sup> 1,15	J kWh
Energie pour relever 1 m <sup>3</sup> de 10m de haut	12 x 10 <sup>4</sup> 0,028	J kWh
Quantité à traiter pour récupérer 1 kg d'uranium à 100% récupération	3 x 10 <sup>5</sup>	m <sup>3</sup>

dessalement de l'eau de mer est-il susceptible de mobiliser des quantités suffisantes pour la récupération d'uranium ?

La taille des installations unitaires déployées actuellement, par exemple en Espagne, leur permet de produire de 50 000 à 100 000 m<sup>3</sup> d'eau douce par jour, quantités nécessaires pour 200 000 à 400 000 habitants). Elles mobilisent de 75 000 à 150 000 m<sup>3</sup> d'eau de mer, et donc une installation unitaire déplace de 247 à 495 gU/jour, soit 90 à 180 kgU/an, même pas de quoi remplir un fût de concentrés par an.

**Refroidissement de centrales nucléaires (circuit du condenseur)**

Pour un réacteur de 1000 MW électriques, en considérant un poste d'eau alimenté par de l'eau de mer faisant appel en moyenne à deux turbopompes d'alimentation de 2725 t/h, on obtient un débit annuel d'eau de mer d'environ 40 millions de m<sup>3</sup>/an. Ceci ne mobilise au total qu'environ 130 kgU par an, soit un millième de ce que le réacteur consomme<sup>2</sup>. Encore une fois un ordre de grandeur insuffisant pour représenter une source d'uranium significative.

**Les sites exploitant l'effet de marée**

Devant l'impossibilité flagrante de pomper, certains ont eu l'idée d'utiliser des sites où l'amplitude des marées permettrait de remplir des réservoirs d'eau de mer à traiter<sup>3</sup>. Une centaine de sites avaient été répertoriés dans le monde, et on peut notamment citer le projet de l'UKAEA en bordure de l'île d'Anglesey.

**Concentrer l'uranium au moyen de dispositifs statiques**

Puisqu'il semble inenvisageable de pomper l'eau de mer, il faut trouver un moyen pour en concentrer le contenu et en quelque sorte reconstituer un minerai d'uranium atteignant une teneur assez élevée pour en justifier la manutention et le traitement. Trois techniques éventuellement complémentaires sont envisagées : évaporation, micro/nano filtration, adsorption.

L'évaporation autre que solaire constituerait une dépense énergétique très excessive (cf. tableau 3), quant à l'évaporation solaire de type marais-salants, elle se heurte à des problèmes de disponibilité de sites, de système de pompage et de maîtrise du processus de concentration en uranium.

Reposons notre problème tel qu'énoncé plus haut, soit "traiter un million de mètres cubes d'eau de mer pour 100 à 300 euros".

La seule industrie réalisant à peu près une performance comparable est celle de la pêche industrielle. En effet les chalutiers "traitent" de tels volumes pour un coût de cet ordre de grandeur. Il apparaît immédia-

Il existe des substances capables de piéger sélectivement l'uranium (cf. tableau 4). Toutefois pour nombre de ces substances, les conditions de piégeage optimal ne sont atteintes que pour des conditions physico-chimiques précises. Comme il est assez peu envisageable de modifier les paramètres physico-chimiques (par exemple pH) d'immenses volumes d'eau de mer, tout comme de réaliser des échanges liquide-liquide en mettant directement ces volumes d'eau de mer en contact avec les phases organiques utilisées pour le traitement de minerai, il faudra sélectionner des substances ayant une bonne performance dans les conditions naturelles, et susceptibles de se prêter à des échanges liquide-solide, en particulier face à de fortes teneurs de chlorure de sodium, paradoxalement l'éluant le plus couramment utilisé pour relarguer l'uranium fixé.

On constate que la teneur à saturation des meilleurs adsorbants est proche de la limite théorique.

Elle est cependant à peine suffisante pour amener ces adsorbants à une teneur égale à celle d'un minerai "pauvre" (1 gU/kg). Il est vrai que la réextraction de l'uranium adsorbé est incomparablement plus facile qu'une opération minière. Il reste que l'ex-

**Tableau 4 : les adsorbants étudiés et les résultats obtenus :**

adsorbant	expérience	teneur en U après x heures	référence
Oxyde de Titane hydraté		0,32 g/kg après 720h	Keen 1969
Granules de Silicates de Ti	Trombay Bay/Inde 1999-2000		Gupta 1999
Ilménite "améliorée"	Inde		Gupta 1999
Amidoxyme/fibres	Mutsu/Japon/1996	2g/kg /60 h	Sugo 1996
Amidoxyme /MAA	Mutsu /Japon/1998	1g/kg/60 h	Sugo 1998

tement que ce traitement s'effectue avec des filets, un système n'entraînant pas de perte de charge significative à compenser par une dépense énergétique, on est donc assez proche d'un concept statique, au moins sur ce plan.

**Dans tous les cas, il faut parvenir à concentrer puis à extraire l'uranium**

Jusqu'à présent, on constate la prédominance des recherches sur les techniques d'adsorption-élution. L'utilisation de techniques membranaires, qui ont par ailleurs enregistré de considérables progrès techniques et économiques, paraît être restée encore au stade de concept pour cette application particulière et doit présenter a priori de sérieuses difficultés de colmatage, dont l'impact, d'une manière générale, paraît avoir été négligé dans la plupart des études publiées.

traction d'uranium de l'eau de mer amènerait à installer et à traiter des tonnages considérables d'adsorbant, de l'ordre de plusieurs millions de t/an.

En outre, la cinétique de saturation est faible, ce qui exigerait des installations de taille considérable.

**Passage à la dimension industrielle ; conception et ingénierie d'unités de taille significative**

La réalisation concrète reste à accomplir. Quelques études ont été menées, notamment pour un projet britannique capable de produire environ 800 tU/an et utilisant la marée dans les îles Anglo-normandes. Plus récemment, des concepts japonais de navires ou d'îles artificielles ancrés dans un courant océanique ont été publiés. Dans ces projets japonais, l'unité serait modulaire et produirait un peu moins de 100 tU/an. Il suffirait

de multiplier les modules pour atteindre des productions significatives.

Ce concept japonais est très fortement influencé par l'importance des courants océaniques baignant l'archipel nippon, et par la situation énergétique de ce pays qui dépend notamment d'une noria de pétroliers dont on a pu dire qu'elle se composait d'une chaîne de navires espacés de seulement 100 miles nautiques sur la route venant du golfe Arabo-Persique.

### Le coût de la récupération

Des estimations ont été publiées à plusieurs reprises. Les plus étayées fluctuent dans des gammes de prix de revient de l'uranium récupéré de l'ordre de 50 à 300 US dollars la livre d' $U_3O_8$  avec une médiane très nettement au dessus des 100 dollars (à comparer avec le prix des contrats à long terme en vigueur aujourd'hui, proche de 12 dollars la livre d' $U_3O_8$ ).

Des gains supposés d'un ordre de grandeur sur les aspects techniques de la préconcentration ont conduit certains à appliquer ce coefficient aux coûts résultants. La question de savoir ce qu'il en est effectivement dans un projet industriel opérationnel reste entière.

UKAEA Report on Uranium from Sea-Water cited in Applied Atomic April 26, 1977] à la poursuite de quelques travaux au Japon ou ailleurs, on retiendra surtout la modicité des efforts financiers dévolus au sujet (cf. tableau 5).

Cette modicité des efforts n'est pas surprenante. L'examen des ordres de grandeur du contenu énergétique du mètre cube océanique, de sa teneur marchande face à la dépense énergétique ou économique pour en récupérer quelques micro-grammes d'uranium, suggère que s'il y a des perspectives, elles sont plutôt lointaines.

En outre, la progressivité du volume des ressources conventionnelles en uranium en fonction des coûts laisse penser qu'une situation de pénurie n'est pas encore en vue, même dans un contexte de relance significative du nucléaire (cf étude AIEA 2050).

Il est aussi essentiel de rappeler que les réacteurs nucléaires d'aujourd'hui - les réacteurs "thermiques" auxquels se réfère le rapport UKAEA cité ci-dessus - n'utilisent que moins de 1% du contenu énergétique de l'uranium. Les réacteurs "rapides", comme Superphénix, peuvent consommer la totalité

Tableau 5 : situation des principaux programmes de R&D :

Etape	Objectif	situation R&D Japon	autres
Expériences de laboratoire	Etude théorique du procédé	Plusieurs approches étudiées	UKAEA
Expérimentation en mer	Etude de base du procédé (récupération de qqes grammes)	Stade atteint à au moins deux reprises, dont la "première" en 1982 <sup>4</sup>	
Expérience pilote en mer	Confirmation de la faisabilité technique (récupération 1 kgU)	Projet	
Installation de démonstration	Confirmation de la faisabilité économique (récupération de qqes tonnes U)	En attente. Concept de "navire poseur de casiers" et plateforme d'éluion-production	
Déploiement industriel	Installations pouvant produire plusieurs centaines de tonnes U par an	En attente de la démonstration de faisabilité économique	

### Conclusion : y a-t-il des perspectives d'avenir?

Il est toujours difficile de conclure un tel sujet de manière définitive.

Les tests effectués ont conduit à l'émission d'avis divers selon la nature de leurs émetteurs (bailleurs de fonds, industriels, laboratoires...) et surtout de décisions fluctuant selon les "sensibilités énergétiques" des pays concernés. De la conclusion négative des Britanniques de l'UKAEA ; "It would be unwise to expect uranium from sea-water to contribute significant amounts to the world's uranium demand for thermal reactors on an acceptable timescale." [1977

de l'uranium (aux pertes de recyclage près), y compris l'uranium appauvri dont les stocks sont d'ores et déjà considérables. Certes, il s'agit d'une technologie plus coûteuse, mais l'augmentation des prix de l'uranium la rendrait rentable avant que ces prix ne justifient l'extraction d'uranium de l'eau de mer<sup>5</sup>.

Pour le très long terme, la question devrait plutôt être reformulée en "y-a-t-il, en cas de pénurie, d'autres solutions que l'uranium dans l'eau de mer pour alimenter un programme nucléaire de fission dans un futur prévisible?".

En l'état actuel des connaissances, la répon-

### Bibliographie :

- ⊙ **Uranium 2001 : Resources, Production and Demand.** - OECD/NEA et IAEA, 2002
- ⊙ **Extraction of Uranium from Sea Water** - R.V. Davies - Nature vol 203 n° 4950 pp1110-1115 - Sept. 1964
- ⊙ **Studies on the Extraction of Uranium From Sea Water** - N.J. Keen - 1969
- ⊙ **Potentiel Mondial en Uranium - Une évaluation Internationale** - OCDE-AEN et AIEA Décembre 1978
- ⊙ **Point sur les sources non classiques d'uranium et les techniques d'extraction associées** - V. Ziegler - Revue de l'Energie - p. 586-592 - novembre 1978
- ⊙ **Isotopic tracing of the dissolved U fluxes of Himalayan rivers : Implications for present and past U budgets of the Ganges-Brahmaputra system** - F. Chabaux et al.- Geochimica et Cosmochimica Acta - vol 65, n° 19, pp. 3201-3217 - 2001
- ⊙ **Japan progressing uranium recovery from sea-water** - Takanobu Sugo - Nuclear Europe Worldscan - 9-10-1999
- ⊙ **The oceanic chemistry of the uranium and thorium series nuclides** - TJ Cochran - in Uranium-series Disequilibrium - second edition- Oxford Science Publication pp.334-351
- ⊙ **Uranium Recovery From Some Secondary Sources** - CK Gupta - IAEA-TCM Vienna -15-18 June 1999

se est plutôt oui. Le thorium est largement présent dans la croûte terrestre et des gisements tout à fait significatifs en ont été répertoriés, notamment lorsque la question s'était posée au cours des années 60-70. En l'absence de demande, cette connaissance a par ailleurs peu progressé depuis trente ans. Ce thorium, s'ajoutant à l'abondance de matières nucléaires fertiles que représentent les stocks existants et à venir de  $U^{238}$ , est de nature à repousser la survenue d'une situation de pénurie bien au-delà d'un horizon prévisible.

Alors faut-il continuer les recherches sur la récupération de l'uranium dans l'eau de mer ? Nous laissons au lecteur le soin de se forger son opinion.

<sup>1</sup> Il faudra compter avec les énormes volumes de résines et d'éluants à mettre en œuvre, la noria des bateaux, etc.

<sup>2</sup> encore faudrait-il ne jamais pomper à nouveau de l'eau déjà appauvrie en uranium...

<sup>3</sup> même remarque

<sup>4</sup> Juin 1982 : 4,1 grammes d' $U_3O_8$  ont été extraits de Shikoku [Atoms in Japan, July 1982]

<sup>5</sup> L'extrême sobriété de ce type de réacteur en matières fertiles fait que le coût de l'uranium n'est qu'une fraction presque négligeable du coût total de l'énergie qu'ils produisent. C'est donc peut-être eux qui pourraient utiliser l'uranium de l'eau de mer, mais dans un futur si lointain qu'il défie un peu l'imagination.