

# Une opinion britannique sur la gestion des déchets de haute activité

par W. Marshall\*

Depuis quelques années, l'opinion s'intéresse beaucoup aux déchets nucléaires, et plus particulièrement à ceux qui sont les plus radioactifs, et qu'on appelle les déchets «de haute activité». Ils ont fasciné les imaginations, probablement parce qu'on a dit aux gens que la radioactivité de certains des éléments que ces déchets contiennent mettra des milliers, voire des millions d'années, à décroître. De plus, les adversaires du nucléaire ne cessent de répéter que l'industrie nucléoélectrique ne pas encore résolu le problème de la destination de ces déchets. On est en effet bien obligé de constater qu'une vingtaine d'années après la construction des premières centrales nucléaires les spécialistes sont encore en train de se demander s'il faut stocker les déchets provisoirement ou définitivement et en ce cas dans quelle roche il faut les déposer. Et quand les spécialistes parlent de poursuivre les études, le public se dit qu'ils ne savent tout simplement pas quoi faire des déchets.

Au Royaume-Uni, les incertitudes de l'opinion se sont encore aggravées du fait d'une apparente modification de la politique du Gouvernement en matière de forages géologiques. Ces travaux ont pour objet de renseigner sur les conditions qui régneraient dans des dépôts de déchets de haute activité en profondeur. Les demandes d'autorisation de forer se sont heurtées dans certaines des localités intéressées à une vive opposition, à laquelle les spécialistes ont répliqué que les forages étaient nécessaires pour trouver un moyen satisfaisant de stocker les déchets définitivement. Après quoi le Gouvernement a annoncé qu'il avait réexaminé son programme géologique et qu'on n'avait plus besoin de faire de nouveaux forages. Il est bien naturel que le public ne sache plus à quoi s'en tenir.

Pour y voir plus clair, il faut commencer par rappeler que la principale source de déchets de haute activité est le combustible irradié des centrales nucléaires. Ces déchets se composent d'uranium non consommé et de plutonium, qui sont l'un et l'autre des combustibles précieux, de produits de fission et d'actinides, tous hautement radioactifs. Après un stockage provisoire pendant lequel la radioactivité décroît à un niveau qui permet une manipulation plus facile, le combustible irradié est retraité. Cette opération sépare les éléments utiles, à savoir l'uranium et le plutonium, d'avec les déchets qui en sortent sous forme liquide. On concentre ces derniers pour en réduire le volume, et on les emmagasine sous leur forme liquide. Comme ils conservent une radioactivité suffisante pour dégager une forte quantité de chaleur, les réservoirs de

stockage doivent être refroidis au moyen d'une circulation d'eau.

Ce mode de stockage ne présente pas de difficultés techniques et est parfaitement acceptable pour un temps, mais à plus long terme le stockage des solides est plus facile, plus sûr et moins coûteux que celui des liquides. Aussi a-t-on compris, aussitôt qu'on a commencé à retraiter, qu'il y avait intérêt à transformer les déchets liquides en blocs solides en vue de leur stockage prolongé. Il n'y avait pas urgence, car ces déchets étaient produits en petite quantité: ainsi, les quelque 1 000 m<sup>3</sup> de déchets de haute activité actuellement stockés à Windscale représentent presque la quantité totale accumulée depuis 30 ans du fait du programme nucléaire du Royaume-Uni. Mais comme la solidification était la suite logique des opérations dans la gestion des déchets, de vastes études ont été entreprises sur la science et la technique de cette transformation.

Le matériau choisi pour «fixer» les déchets en question doit présenter plusieurs propriétés:

- la capacité d'accueillir tous les éléments que contient le déchet;
- une bonne résistance à la lixiviation par l'eau;
- une bonne résistance à la détérioration par les rayonnements;
- une forte conductivité thermique permettant de dissiper la chaleur dégagée par la décroissance de la radioactivité.

Le verre est un matériau très intéressant, non seulement parce qu'il possède un grand nombre des propriétés requises, mais aussi parce que la technique de sa fabrication est très évoluée. C'est pourquoi le Royaume-Uni a décidé de construire une usine de vitrification fonctionnant selon le procédé français AVM, qui a fait ses preuves et donne satisfaction à Marcoule (France). On a également proposé d'autres matériaux tels que les oxydes céramiques, et le professeur australien Ringwood a suggéré l'emploi d'une roche cristalline artificielle à laquelle il a donné le nom de *Synroc*.

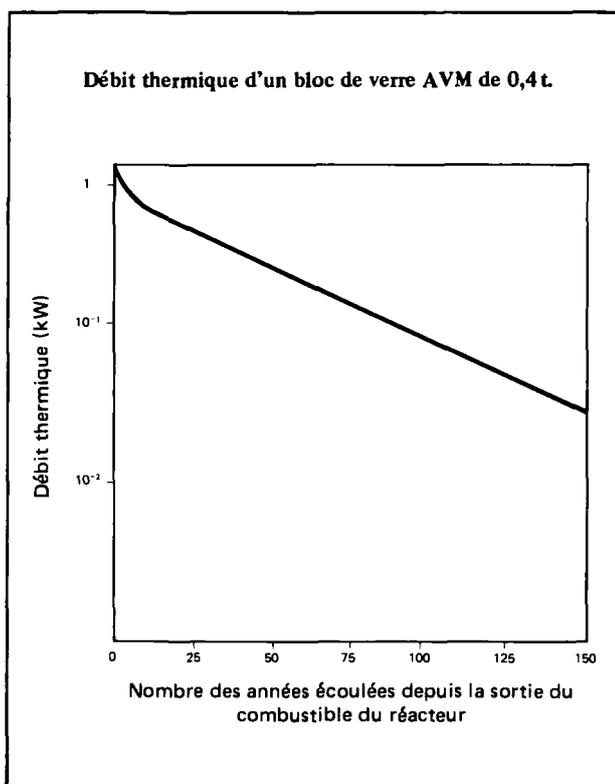
Une fois solidifié, le déchet de haute activité peut être stocké en surface aussi longtemps qu'on veut bien en assurer le peu de surveillance qu'il exige. Le débit thermique des blocs vitrifiés diminue très rapidement au cours des premières années. La figure montre la puissance thermique d'un bloc de 0,4 t contenant une forte charge de déchets. On peut revêtir de béton les blocs vitrifiés afin d'atténuer le rayonnement d'énergie provoqué par la décroissance radioactive, et les déposer dans un simple magasin à sec refroidi par un courant d'air, de dimensions modestes et n'exigeant qu'un minimum d'entretien.

\* M. Marshall est Président de l'Atomic Energy Authority du Royaume-Uni, 11 Charles II Street, Londres SW1 4QP, et membre du Comité scientifique consultatif de l'AIEA.

### Un stockage provisoire précède le stockage définitif

Bien que cet entreposage en surface ne présente aucune difficulté technique et isole le déchet de haute activité de l'environnement aussi complètement qu'on peut le souhaiter, il se pourrait que, plus tard, de bonnes raisons sociales ou politiques lui fassent préférer le stockage définitif. Nous entendons par là le dépôt des déchets en un lieu d'où l'on n'envisage pas de les extraire et où une surveillance permanente n'est pas nécessaire. Une solution particulièrement attrayante, qui fait l'objet de nombreuses études au Royaume-Uni et ailleurs, consiste à isoler les déchets solidifiés au sein de formations géologiques profondes.

En enfouissant les blocs de déchets, on les expose toutefois, pendant de très longues périodes, à l'action des eaux souterraines; on risque ainsi de leur frayer une voie qui les ramène à l'environnement de l'homme. On peut toutefois ramener ce risque à des proportions insignifiantes en choisissant un site où les eaux souterraines ne s'écoulent que très lentement, et en y aménageant les barrières dont il sera question plus loin. Il faut cependant tenir compte du fait que l'enfouissement d'un bloc peut pendant les premières années entraîner une élévation locale de la température susceptible d'augmenter la solubilité du déchet et d'intensifier la vitesse d'écoulement des eaux. Si l'on veut procéder de bonne heure à l'enfouissement, il faut faire en sorte d'éviter une élévation excessive de la température. On y parvient soit en refroidissant par circulation forcée pendant quelques années jusqu'à ce que la décroissance ait atteint le point où cette précaution n'est plus nécessaire, soit en réduisant la dimension des blocs et en les dispersant au sein de la formation pour permettre une dissipation de la chaleur par conduction naturelle.



Ces deux solutions sont techniquement possibles, mais compliquées. Elles présentent aussi des inconvénients économiques et techniques par rapport à celle qui consiste à laisser refroidir les déchets plus longtemps en surface ou à faible profondeur avant de les stocker définitivement. Au Royaume-Uni aujourd'hui, il y a lieu, de l'avis général, d'emmagasiner les déchets vitrifiés jusqu'à ce que leur débit thermique ait baissé au point de permettre leur stockage définitif. Combien de temps faudra-t-il? C'est là une question tout aussi économique que technique, mais ce sera probablement de 50 à 100 ans, voire beaucoup plus.

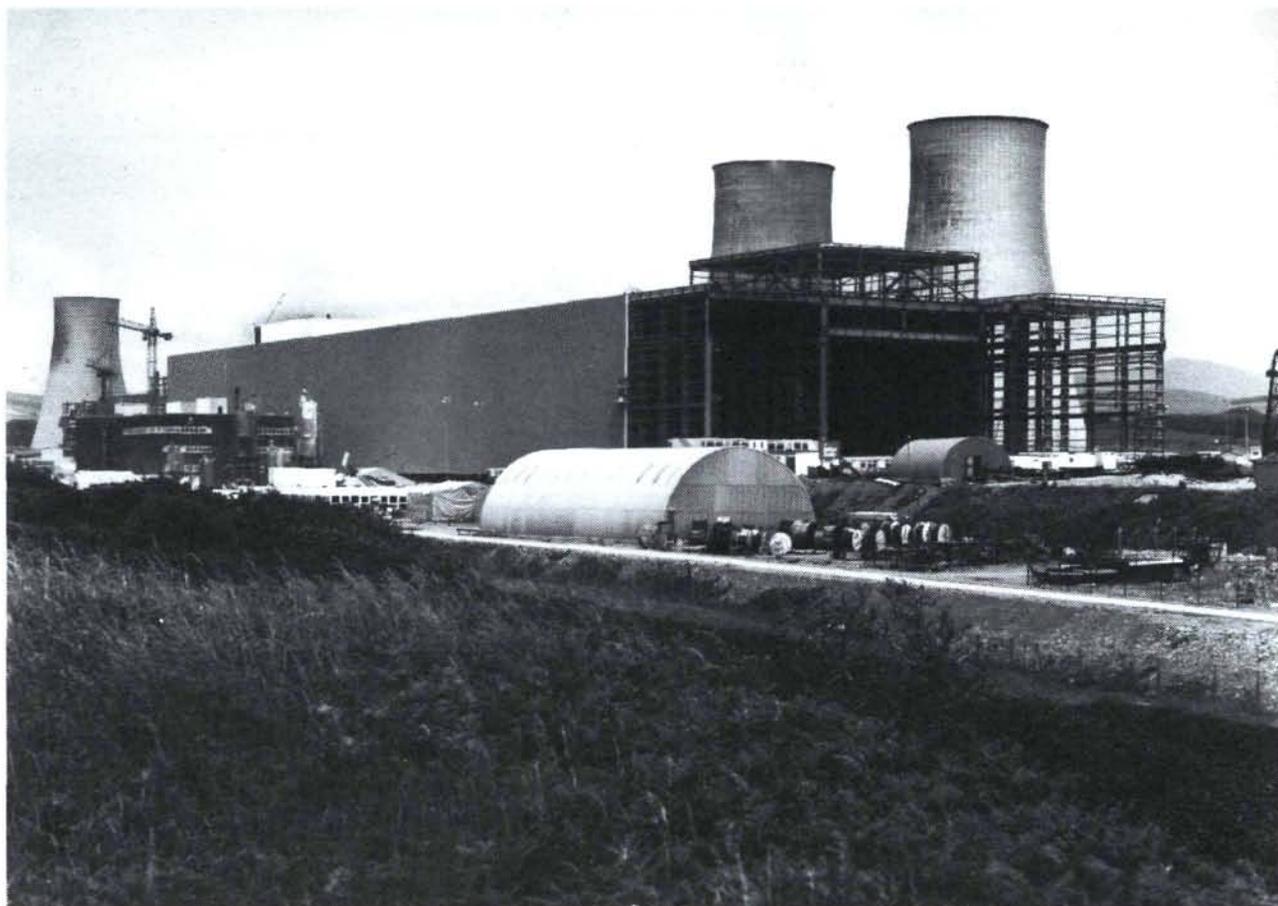
La stratégie de la gestion des déchets de haute activité au Royaume-Uni est en conséquence la suivante:

- solidifier le déchet en le transformant en blocs vitrifiés;
- emmagasiner les blocs jusqu'à ce qu'ils soient suffisamment refroidis, ce qui peut prendre de 50 à 100 ans, voire davantage;
- stocker définitivement les blocs, éventuellement dans des formations géologiques profondes, une fois que le débit thermique sera tombé à un niveau acceptable.

Outre les formations géologiques profondes, on peut envisager le dépôt sur ou sous le fond de la mer, mais nos connaissances en cette matière sont moins avancées qu'en ce qui concerne le stockage géologique.

Cette stratégie me paraît tout à fait saine et sensée. On peut toutefois lui objecter que la phase finale, celle du stockage définitif, n'a pas fait ses preuves. «Que vaut nous dira-t-on, «votre stratégie puisque vous ne pouvez pas prouver la sûreté de la méthode de stockage définitif — sûreté qui devrait être assurée pour un temps pratiquement indéterminé?» Cet argument a figuré dans le Sixième rapport de la Commission royale sur la pollution de l'environnement de 1976. La Commission royale a recommandé de s'abstenir d'exécuter aucun grand programme nucléaire tant qu'il n'a pas été irréfutablement prouvé qu'il existe une méthode permettant de confiner sans danger les déchets de haute activité à période longue pendant une durée indéterminée. Pour répondre à ce genre de critiques, plusieurs pays, dont le Royaume-Uni, ont entrepris vers le milieu des années 1970 des travaux de recherche sur la possibilité du stockage géologique. Le programme du Royaume-Uni, dont l'exécution est confiée au Département de l'environnement, fait partie du programme plus vaste de la Commission des communautés européennes.

J'ai la conviction que le stockage des déchets vitrifiés dans des formations géologiques profondes peut être rendu parfaitement inoffensif et que la quantité de radioactivité qui, après des milliers d'années, remonterait jusqu'à l'environnement de l'homme serait si faible qu'on peut la négliger. Au bout de quelques milliers d'années la radioactivité sera inférieure à celle de minerai dont on a extrait le combustible à l'origine. Ma confiance dans cette forme de stockage repose toutefois avant tout sur les diverses barrières que nous pouvons interposer entre les déchets et notre environnement. Mais ma conviction ne suffit pas: il faut apporter des preuves, les soumettre à une critique scientifique et, s'il y a le moindre doute, à l'expérimentation. Examinons donc ce que sont ces barrières et quelles autres études pourraient être faites en vue d'accroître la confiance dans leur efficacité.



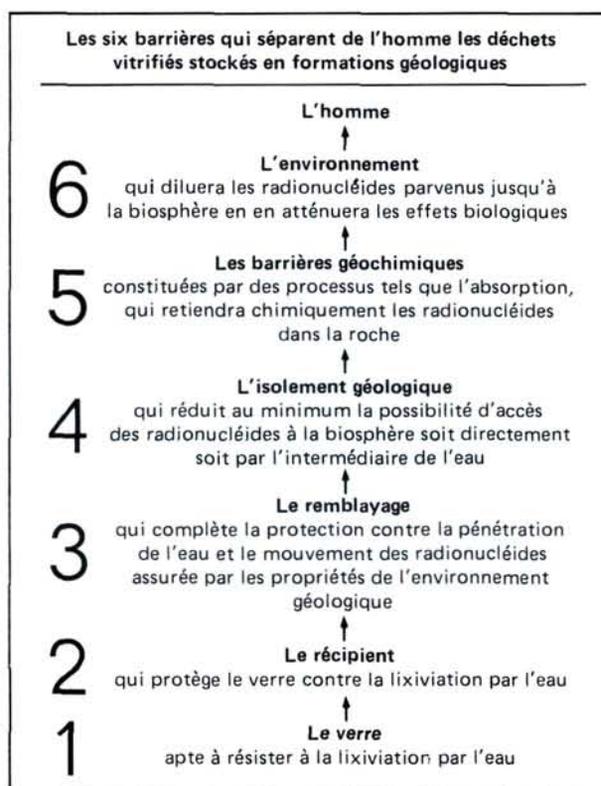
La nouvelle installation de réception et de stockage du combustible Magnox irradié (piscine 5) en construction à la British Nuclear Fuels Ltd. Sellafield (Windscale), dans la région du Cumberland (Angleterre). Le combustible Magnox irradié y sera stocké sous l'eau jusqu'à ce qu'il soit retraité.

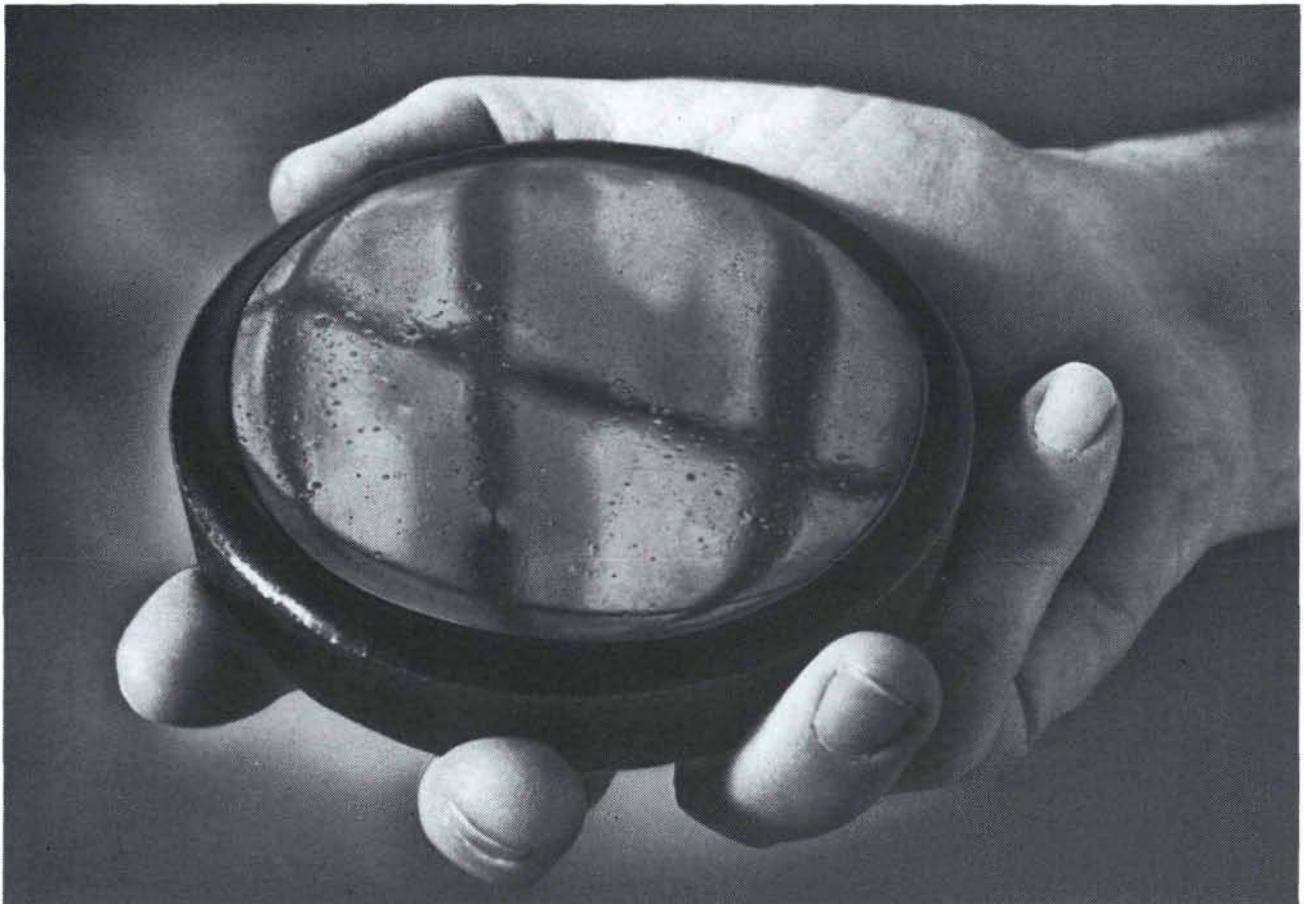
### Six barrières

Les déchets vitrifiés une fois placés dans leur dépôt définitif sont séparés de l'environnement de l'homme par six barrières, comme le montre l'encadré.

La première barrière consiste dans la forme très stable et insoluble sous laquelle le déchet est fixé dans le verre. Si, dans un avenir éloigné, de l'eau entre en contact avec le bloc vitrifié, il se produira inévitablement une certaine lixiviation du verre et des éléments radioactifs qu'il contient. Il faut donc savoir à quel taux cette lixiviation pourrait se produire. Le rayonnement, et notamment la décroissance alpha des actinides, peut agir sur le taux de lixiviation et nous avons besoin de savoir jusqu'à quel point. Le rayonnement peut également entraîner la production de radicaux libres dans l'eau qui se trouverait présente, ce qui aurait aussi pour effet d'intensifier la lixiviation, et la production d'acide azotique par irradiation de l'air ou de l'azote au contact de l'eau. Il est évident que nous avons besoin de bien comprendre tous ces mécanismes.

La seconde barrière est constituée par le récipient résistant à la corrosion qui loge le bloc vitrifié. Il sert à retarder le moment où le bloc pourrait se trouver exposé à l'eau et par conséquent à la lixiviation. Il faut qu'il reste intact pendant au moins les quelques centaines d'années nécessaires pour que les produits de fission les plus radioactifs, à savoir notamment le césium-137 et le





Echantillon factice de déchets vitrifiés. Cette quantité de verre suffirait à englober la totalité des déchets de haute activité résultant de la production par la seule voie nucléaire de tout le courant électrique utilisé par un individu au cours de sa vie.

strontium-90, décroissent jusqu'à un niveau insignifiant. Il faut donc savoir au bout de combien de temps le récipient se corrodera: sera-ce 500 ou bien 1000 ans? Quel est le matériau le plus résistant? Quel obstacle le récipient continuera-t-il à opposer à la lixiviation même après une première attaque de la corrosion?

La troisième barrière est constituée par le matériau de remblayage qu'on disposera autour du récipient pour renforcer les propriétés de l'environnement géologique qui s'opposent à la migration des radionucléides. Il peut s'agir de matériaux qui font obstacle à la pénétration de l'eau, empêchent la corrosion, ou ont, avec les éléments radioactifs que la lixiviation du bloc vitrifié pourrait entraîner, une réaction chimique qui en freine la dispersion. Nous avons besoin de savoir quels matériaux il faut utiliser (ils doivent être adaptés aux conditions géologiques), et s'ils peuvent constituer un obstacle efficace.

La quatrième barrière, c'est la nature de la formation géologique choisie pour y installer le dépôt. Elle doit être très peu perméable à l'eau (pour freiner tant la lixiviation que le retour à la biosphère des radionucléides entraînés). Nous avons besoin de pouvoir évaluer la vitesse de l'écoulement des eaux souterraines (qui peut par exemple être de l'ordre de 0,1 à 0,2 litres par mètre carré et par an) et de savoir si cette vitesse peut s'accroître du fait de fissures naturelles ou de fissures provoquées dans la roche par la

chaleur que dégagent les déchets. Nous devons aussi pouvoir évaluer la probabilité d'événements sismiques ou autres susceptibles de porter atteinte à cette barrière géologique.

La cinquième barrière est constituée par la nature géochimique des roches. De nombreux radionucléides entrent en réaction avec le milieu géologique qu'ils traversent et s'y trouvent retenus par des processus tels que l'échange d'ions, l'absorption superficielle ou la précipitation. En conséquence, même si toutes les autres barrières cèdent, nombreux seront les radionucléides qui se déplaceront le long du parcours géologique beaucoup plus lentement que l'eau, et qui pourront décroître avant d'atteindre la biosphère. D'autre part, il y a des radionucléides que ce phénomène ne freinera que peu. Il nous faut comprendre et quantifier tous ces effets.

Il y a enfin la barrière de l'environnement. Comme nous faisons toujours des hypothèses prudemment pessimistes afin que notre marge d'erreur soit du côté de la sûreté, nous devons supposer que toutes les précautions ci-dessus peuvent avoir été inutiles et qu'une certaine quantité de radioactivité atteindra la biosphère. (Il s'agit ici de ce qui se passera dans des dizaines, voire des centaines de milliers d'années). Quel sera alors le risque, compte tenu du fait que la radioactivité existe partout dans la nature, et qu'une fois arrivés dans la biosphère, les

radionucléides vont se trouver fortement dilués? Pour mener à bien une évaluation rigoureuse des risques que présente le stockage géologique des déchets, il nous faut pouvoir quantifier l'efficacité réelle de cette barrière environnementale.

#### Les barrières sont plus efficaces qu'on l'aurait cru

Le plus important des programmes de recherche entrepris dans ce domaine ayant débuté au milieu des années 1970, notre connaissance de la question s'est considérablement accrue et nous savons aujourd'hui que l'efficacité de certaines de ces barrières est supérieure de plusieurs ordres de grandeur à ce qu'on aurait cru. Si nous comprenons mieux ces problèmes, c'est grâce aux travaux effectués dans de nombreux pays, notamment l'étude KBS en Suède, les recherches canadiennes, et le programme de la Commission des communautés européennes, et qui ont donné lieu à de nombreuses publications.

Les expériences faites à Harwell sur du verre dopé au moyen de  $^{238}\text{PuO}_2$  ont montré que sous une dose de rayonnement correspondant à environ un million d'années d'existence de déchets vitrifiés provenant des réacteurs Magnox du Royaume-Uni, le taux de lixiviation n'a augmenté que d'un facteur de deux. Ce résultat, et ceux de travaux similaires concernant l'effet possible des rayonnements sur l'eau qui pourrait être présente, donnent à penser que les rayonnements n'affecteront pas sensiblement l'aptitude du verre à retenir les déchets.

Il est également établi aujourd'hui que les taux de lixiviation que l'on peut prévoir dans des formations géologiques sont très faibles, et qu'ils seront probablement déterminés par la quantité d'eau souterraine présente. Cette quantité sera probablement toujours très limitée vu les propriétés hydrauliques de la roche encaissante et du matériau de remplissage. Nous avons également appris que lorsque les blocs vitrifiés sont exposés à la lixiviation, la couche appauvrie qui se forme à la surface possède une propriété de rétention différenciée selon les éléments; en particulier il y a une rétention remarquable des actinides dont, d'après les constatations, le taux de lixiviation est de plusieurs ordres de grandeur inférieur aux taux apparents sur lesquels reposaient les premiers calculs.

L'étude suédoise mentionnée plus haut reposait sur de nombreuses expériences faites dans des sites de roches dures. Les travaux se poursuivent. L'étude a montré qu'il est parfaitement possible de concevoir dans des roches dures des dépôts tels que la quantité maximale de radioactivité susceptible d'atteindre à nouveau l'homme ne se manifestera que dans 100 000 ans, et que même en se fondant sur des hypothèses prudentes on obtient une dose très faible par rapport à celle du fond de rayonnement naturel.

#### L'avenir du programme de forages

Les résultats des études et des expériences faites dans divers pays — et sur différents types de roches — peuvent nous inspirer la plus grande confiance dans le stockage géologique, dont la sûreté et l'innocuité à l'égard de l'environnement le rendent propre à constituer le dernier stade de notre stratégie de gestion des déchets de haute activité. Mais la sûreté est une création continue. Dans de nombreux domaines, nous avons besoin d'améliorer nos connaissances, de préciser des hypothèses que nous jugeons prudentes mais qui sont encore insuffisamment vérifiées par l'expérience. C'est avant tout pour cette raison que le Royaume-Uni exécutait des travaux de forage en vue d'obtenir un complément d'information sur les propriétés des diverses roches existant en profondeur dans le pays, leur conductivité, leur teneur en eau, la présence de fissures et leurs propriétés géochimiques. Le programme n'avait pas pour but de choisir des sites déterminés.

On peut se demander jusqu'où il y a lieu de pousser ces travaux à l'heure actuelle. D'après moi, nous possédons déjà assez de renseignements pour être certains que notre stratégie est valable. Le stockage définitif de déchets de haute activité ne s'impose pas dans l'immédiat; comme j'ai essayé de le montrer, l'entreposage de déchets vitrifiés est la solution préférable pour les 50 à 100 années suivant leur sortie du réacteur. Le Département de l'environnement qui a la responsabilité du programme de forage au Royaume-Uni, vient de réexaminer le programme de recherches géologiques du pays. Il a constaté que la possibilité de stocker les déchets dans des formations profondes était désormais établie en principe, et qu'aucune contre-indication n'était apparue. Les travaux en question n'étant plus immédiatement nécessaires, et les demandes de fonds dépassant largement les ressources disponibles, le Département a décidé de ne pas prolonger le programme de forages.

De nombreux spécialistes auraient souhaité que ces travaux se poursuivent en vue de renforcer la certitude que nous avons bien compris et pouvons prévoir le comportement des déchets une fois qu'ils auront été déposés dans les profondeurs de la terre; en vue de montrer au public que les dispositifs de sûreté comportent des précautions même contre les éventualités les plus improbables; en vue de faire en sorte que nos successeurs lorsqu'ils décideront de stocker définitivement les déchets (si c'est finalement ce qu'ils veulent faire) le fassent en toute connaissance de cause. Je comprends ce souhait. J'ai toutefois la conviction que le Gouvernement a pris une position parfaitement défendable compte tenu du dossier qui lui a été présenté et de la nécessité où il se trouve de proportionner les travaux de recherche aux ressources dont il dispose.