

Les chercheurs sont maintenant convaincus que l'évolution biologique a commencé dans des couches d'argile plutôt que dans la mer primordiale. Il est intéressant de noter que l'argile consiste en un réseau poreux d'atomes disposés selon les règles géodésiques au sein de formes octaédriques et tétraédriques. Comme ces octaèdres et ces tétraèdres ne sont pas fortement compactés, ils peuvent bouger et glisser les uns par rapport aux autres. Cette souplesse, semble-t-il, permet à l'argile de catalyser un grand nombre de réactions chimiques, notamment celles qui ont pu produire les premiers éléments de construction de la vie organique.

Avec le temps, différents ensembles moléculaires se sont auto-assemblés pour former les premières structures ayant une fonction spécifique – les précurseurs des organites actuels –, qui se combinèrent pour créer les premières cellules. Ces cellules produisirent elles-mêmes des protéines qui s'auto-assemblèrent pour donner des supports d'ancrage des matrices extracellulaires, qui, à leur tour, se sont auto-assemblées en tissus pluricellulaires. Des organes se développèrent par auto-assemblage de tissus, et des organismes complexes firent leur apparition par combinaison et remodelage progressif d'organes différents. Le développement d'un embryon à partir d'un spermatozoïde et d'un ovule récapitule toutes ces étapes d'auto-organisation.

L'apparition de l'ADN et des gènes donna naissance à un nouveau mécanisme pour engendrer une diversité structurelle qui accéléra l'Évolution. Pendant tout ce temps, les règles défi-

nissant le processus d'auto-assemblage hiérarchique restèrent pratiquement inchangées. Il n'est donc pas surprenant que la disposition générale des os et des muscles soit extraordinairement voisine chez *Tyrannosaurus rex* et chez *Homo sapiens*, que les animaux, les insectes et les plantes doivent tous aux contraintes la stabilité mécanique de leurs organismes et que les formes géodésiques telles qu'hexagones, pentagones et spirales soient omniprésentes dans les systèmes naturels.

Ces principes de construction sont-ils universels? S'appliquent-ils à des structures qui sont façonnées par le jeu de forces de très grande ou de très petite envergure? Nous ne le savons pas. K. Snelson a cependant proposé un étonnant modèle d'atomes fondé sur la tensesgrité, et qui prolonge le modèle proposé en 1923 par le physicien français Louis de Broglie. Buckminster Fuller lui-même imagina que le Système solaire est une structure composée de multiples anneaux non déformables dont le mouvement planétaire est stabilisé par une attraction gravitationnelle continue. Le fait que notre Univers en expansion contienne de gigantesques amas de galaxies liées par la gravitation et des trous noirs isolés qui sont le siège, localement, d'énormes forces de compression nous conduit à nous interroger. Après tout, il n'y a peut-être dans la nature qu'un seul thème directeur. Comme le suggérait, au début du XX^e siècle, le zoologiste écossais D'Arcy Thompson, en se référant à Galilée qui, lui-même, citait Platon : le Grand Livre de la Nature serait-il écrit dans le langage de la géométrie?

Donald INGBER est professeur de pathologie à l'Université Harvard. Il est le fondateur de la Société *Molecular Geodesics Inc.* qui conçoit des matériaux nouveaux dont les propriétés sont inspirées des structures biologiques.

Donald L.D. CASPAR, *Movement and Self-Control in Protein Assemblies*, in *Biophysical Journal*, vol. 32, n° 1, pp. 103-138, octobre 1980.

Clay Minerals and the Origin of Life, sous la direction de A. Graham Cairns-Smith et Hyman Hartman, Cambridge University Press, 1986.

Donald E. INGBER, *Cellular Tensegrity : Defining New Rules of Biological Design That Govern the Cytoskeleton*, in *Journal*

of Cell Science, vol. 104, n° 3, pp. 613-627, mars 1993.

Ning WANG, James P. BUTLER et Donald E. INGBER, *Mechanotransduction across the Cell Surface and through the Cytoskeleton*, in *Science*, vol. 260, pp. 1124-1127, 21 mai 1993.

D'Arcy W. THOMPSON, *Forme et croissance*, Seuil-CNRS Éditions, 1994.

Christopher S. CHEN, Milan MRKSICH, Sui HUANG, George M. WHITESIDES et Donald E. INGBER, *Geometric Control of Cell Life and Death*, in *Science*, vol. 276, pp. 1425-1428, 30 mai 1997.

Donald E. INGBER, *Tensegrity : The Architectural Basis of Cellular Mechanotransduction*, in *Annual Review of Physiology*, vol. 59, pp. 575-599, 1997.

L'enfouissement sous-marin des déchets radioactifs

CHARLES HOLLISTER • STEVEN NADIS

Peut-on stocker les déchets nucléaires dans les sédiments des fonds océaniques ? Les conditions sont favorables, mais des études restent à faire.

Les plaines abyssales, au centre des grandes plaques océaniques, semblent être parmi les terrains les moins valorisables de la planète. Le socle rocheux y est couvert d'une boue noire et pâteuse sur plusieurs centaines de mètres d'épaisseur. Dénuées de végétation et très peu fréquentées par la faune océanique, ces régions sont en outre dépourvues de richesses minérales.

Toutefois, nos sociétés pourraient y trouver la solution de deux problèmes lancinants : on pourrait apparemment y enfouir les déchets radioactifs issus de l'industrie électronucléaire, ainsi que les matériaux provenant du démantèlement des bombes atomiques. Les problèmes posés par ces deux types de déchets sont différents, mais l'enfouissement sous-marin serait une solution commune et définitive.

Des déchets radioactifs, barreaux de combustible usagé des centrales nucléaires et boues toxiques entreposées sur les sites de production d'armes nucléaires, ont été accumulés depuis plus d'un demi-siècle dans l'attente d'une méthode de stockage permanent. Aux États-Unis, 30 000 tonnes de combustible usagé attendent dans les bassins des centrales nucléaires, et cette quantité s'accroît d'environ 2 000 tonnes par an. Le dépôt de déchets nucléaires qui se construisait à Yucca Mountain, dans le Nevada, est aujourd'hui bloqué ; il ne devrait pas ouvrir avant 2015. En France, les centrales nucléaires produisent environ 1 200 tonnes de combustible usagé par an ; on évalue qu'en 2020, il y aura 57 000 mètres cubes de déchets de moyenne activité et 5 000 mètres cubes de déchets de haute activité.

Le problème du plutonium et de l'uranium issus du démantèlement des armes nucléaires est encore plus grave : qu'advient-il si de tels matériaux tombaient entre les mains d'individus ou d'états mal intentionnés ? Alors qu'une seule tonne de plutonium suffit à la fabrication de centaines de têtes nucléaires, les États-Unis et la Russie ont accumulé chacun plus de 100 tonnes de plutonium de qualité militaire, 50 tonnes de plutonium moins pur et des centaines de tonnes d'uranium très enrichi.

Deux méthodes de traitement des déchets sont aujourd'hui mises en œuvre, mais aucune n'apporte de solution définitive. La première est la vitrification : un mélange de plutonium militaire et d'autres déchets radioactifs est coulé dans un verre ou dans une céramique qui empêchent la fuite des atomes radioactif dans l'environnement et qui interdisent quasiment l'extraction du plutonium. Cette vitrification ne bloque toutefois pas les radiations : les déchets vitrifiés restent dangereux tant qu'ils ne sont pas entreposés dans un site approprié.

Aux États-Unis, une seule usine de vitrification a été construite, et même si elle fonctionnait à pleine capacité, elle ne produirait chaque jour qu'un seul cylindre de verre contenant à peine plus de 20 kilogrammes de plutonium, pour un coût unitaire de huit millions de francs. À ce coût, on devra ajouter celui du stockage.

La seconde méthode est la fabrication d'un combustible mixte pour les centrales nucléaires, par le mélange d'oxyde de plutonium et d'oxyde d'uranium : le combustible MOX. Cette méthode est utilisée en France. Aux

États-Unis, l'utilisation d'un tel combustible nécessiterait de profondes transformations des centrales nucléaires. De toutes façons, les réacteurs à oxyde mixte produisent d'autres déchets radioactifs.

Les déchets existent : il faut les traiter

Le gouvernement américain devra bientôt prendre une décision : depuis 15 ans, les sociétés qui exploitent des centrales nucléaires aux États-Unis paient par avance le ministère américain de l'Énergie pour le stockage ou le retraitement de leurs déchets, et les tribunaux viennent d'ordonner à ce ministère de s'acquitter de ses obligations contractuelles en acceptant, dès cette année, les barreaux de combustible usagé des centrales nucléaires. Que deviendront ces matériaux ? Le Sénat américain a voté des crédits pour la construction d'un site de stockage temporaire à Yucca Mountain, mais le président Clinton s'oppose à cette mesure provisoire.

Nous suggérons de ne rien décider dans l'urgence et, surtout, de ne prendre aucune décision irréversible. On devrait se contenter pour l'instant de transférer, selon les besoins, le combustible usagé, actuellement entreposé dans des bassins, vers des sites de stockage à sec et de colmater les conteneurs de déchets radioactifs sur les sites militaires. On doit laisser le temps aux scientifiques et aux ingénieurs d'explorer en détail les méthodes possibles de stockage permanent.

Certains ont proposé d'envoyer les déchets nucléaires dans l'espace, voire dans le Soleil, mais la plupart des

spécialistes pensent qu'il serait plus sûr et moins coûteux de les stocker sous terre. Pourquoi, toutefois, la recherche de sites de dépôt convenables a-t-elle été quasi restreinte aux continents? Les fonds océaniques, soit 70 pour cent de la surface de la planète, offrent pourtant plus de possibilités.

Nous ne proposons pas un stockage dans les fosses océaniques, à la jonction de deux plaques tectoniques : ce sont des régions très instables, et nous n'avons aucune idée de ce que deviendraient les conteneurs de déchets que l'on y déposerait. En revanche, au centre des plaques tectoniques océaniques, le terrain est l'un des plus stables de la Terre et l'un de ceux dont on connaît le mieux l'avenir. Les prélèvements de carottes sédimentaires ont montré que de vastes zones, dans les océans Atlantique et Pacifique, sont géologiquement inertes depuis 50 à 100 millions d'années. Les déchets qui y seraient enfouis seraient à l'abri des éruptions volcaniques, des séismes et de toutes les perturbations liées aux mouvements des plaques tectoniques. En outre, les boues argileuses qui constituent les sédiments ont des propriétés favorables : elles sont peu perméables à l'eau, elles adsorbent les éléments radioactifs des déchets, et elles combleraient toute fissure qui se développerait autour d'un conteneur de déchets. Ces boues pourraient accueillir des déchets vitrifiés ou non. Aucune formation géologique continentale connue n'offre tous ces avantages.

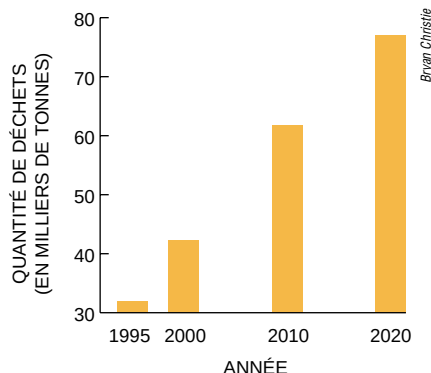
Les techniques pétrolières au service du nucléaire

Les déchets ne seraient pas déposés sur le fond océanique, mais enfouis à plusieurs centaines de mètres de profondeur dans les sédiments (le fond océanique étant lui-même à cinq kilomètres sous la surface de la mer). Les techniques de forage profond, utilisées depuis des décennies par l'industrie pétrolière pour la prospection des sédiments proches des côtes, permettraient de réaliser cette opération. Des puits cylindriques seraient creusés à plusieurs

1. UN TUBE D'ACIER, descendu d'un bateau, serait utilisé pour le forage de puits dans les limons océaniques, puis pour la descente des conteneurs de déchets nucléaires. Les déchets seraient ensuite recouverts de boue sous-marine argileuse qui isolerait efficacement les matériaux radioactifs.

George Retzack



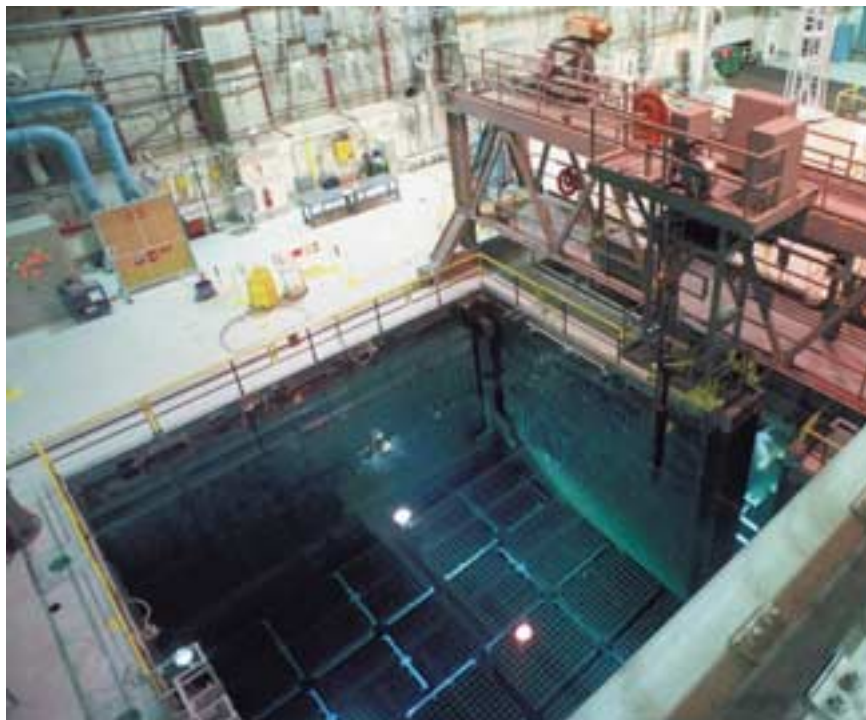


2. LA QUANTITÉ DE COMBUSTIBLE nucléaire usagé va plus que doubler aux États-Unis d'ici 2020, même si aucune nouvelle centrale nucléaire n'est construite (graphe). En l'absence d'une solution de stockage permanent, ce combustible usagé est entreposé dans des bassins de refroidissement (ci-dessus).

centaines de mètres les uns des autres, pour faciliter les manœuvres ; les conteneurs de plutonium ou d'autres déchets radioactifs y seraient ensuite descendus, accrochés à des câbles. Chaque conteneur serait enfin recouvert de boue, sur 20 mètres d'épaisseur au moins, et l'on empilerait ainsi plusieurs conteneurs dans le même puits.

Les conteneurs de déchets se désagrégeraient au bout de quelques milliers d'années, mais, dans les sédiments océaniques, les argiles boueuses, qui se lient fortement au plutonium et à de nombreux autres éléments radioactifs, éviteraient que ces derniers ne s'échappent dans l'océan. On a mesuré en laboratoire que le plutonium (et d'autres éléments radioactifs plus lourds que l'uranium) enfoui dans l'argile ne se déplacerait pas de plus de quelques mètres en 100 000 ans. Si l'on enfouit les déchets assez profondément, ils ne remonteront au niveau du fond océanique que lorsque leur radioactivité aura disparu ou sera devenue inférieure à la radioactivité naturelle de l'eau de mer.

Malgré ces résultats prometteurs, toute recherche a cessé dans ce domaine depuis 1986, quand les États-Unis, principaux bailleurs de fonds, se sont concentrés sur le stockage terrestre. En 1987, le gouvernement américain a décidé de consacrer tous les crédits au site de stockage de Yucca Mountain. Malheureusement, même si ce dépôt est un jour utilisé, il ne pourra pas accueillir tous les déchets radioactifs d'origine civile et militaire qui se seront accumulés d'ici là, sans compter ceux que les centrales nucléaires continueront de produire.



Les responsables politiques devront se rendre à l'évidence : l'étude d'autres modes de stockage est nécessaire.

À quelles questions des recherches elles répondre ? D'abord, nous devons être certains que les produits radioactifs resteront assez longtemps dans les couches sédimentaires profondes où on les déposera. Les vitesses de diffusion du plutonium et des autres radioéléments sont-elles aussi faibles dans les boues sédimentaires qu'en laboratoire ? Quelles sont les vitesses de migration de l'uranium et de quelques autres éléments des déchets radioactifs, que nous ne connaissons pas ? La chaleur dégagée par la radioactivité des déchets modifie-t-elle la structure et les propriétés des boues argileuses ? Apparemment, des formes vivantes multicellulaires mobiles vivent seulement dans le premier mètre d'épaisseur des limons abyssaux ; en dessous, aucun organisme ne semble susceptible de transporter des substances radioactives vers la surface. Cette hypothèse doit être vérifiée.

Les déchets resteraient-ils au fond ?

Nous ne savons pas non plus très bien ce qui se passerait si des matériaux radioactifs remontaient sur le fond océanique. À quelle vitesse des composés radioactifs relativement solubles (tels

ceux du césium et du technétium) se dilueraient-ils jusqu'aux concentrations ambiantes ? Et que deviendraient les éléments peu solubles, tel le plutonium ? Aujourd'hui, nous ne connaissons pas de courant assez fort pour transporter des particules d'argile liées à du plutonium jusqu'à la surface de l'océan : ces matériaux resteraient sur le lit océanique, à moins que des créatures se nourrissant sur le fond des océans ne les ingurgitent.

Le transport des déchets nucléaires en haute mer pose d'autres problèmes : nous devons prévoir des conteneurs de déchets facilement récupérables au fond de l'océan, au cas où un bateau coulerait ou, plus simplement, perdrait accidentellement sa cargaison. Cette possibilité de récupération devrait d'ailleurs être étendue aux conteneurs enfouis dans les sédiments : nous aurons peut-être un jour besoin de récupérer des matériaux nucléaires, tel le plutonium. On n'utiliserait alors les mêmes techniques de forage que pour l'enfouissement, en s'aidant de techniques de positionnement par satellite. Nous n'avons pas à craindre que cette possibilité de récupération soit exploitée pour le détournement de matériaux radioactifs : aujourd'hui, aucun État non nucléaire ne maîtrise les techniques nécessaires à cette récupération. En outre, la réalisation clandestine d'une telle opération serait quasi impossible.

Le coût des recherches nécessaires pour évaluer l'intérêt du stockage océanique atteindrait peut-être un milliard et demi de francs, mais il serait dérisoire par rapport aux 12 milliards de francs déjà dépensés pour l'évaluation du site de Yucca Mountain (une dizaine d'autres milliards seront sans doute nécessaires avant l'achèvement des études et la prise de décisions définitives, alors qu'aucune construction, excepté des tunnels exploratoires, n'a encore commencé). Pourtant, aucun État ne semble vouloir investir dans une quelconque recherche sur le stockage sous-marin.

Pourquoi cette attitude, alors que l'Académie des sciences américaine déclarait en 1994 que le stockage du plutonium militaire au fond des océans était la «principale solution concurrente des dépôts géologiques souterrains» et jugeait que sa mise en œuvre était «potentiellement rapide et d'un coût faible à modéré»? Une partie de l'opinion publique semble hostile à cette solution, mais les habitants et les élus du Nevada sont aussi hostiles au projet de Yucca Mountain : il serait

sans doute plus facile de faire accepter des dépôts sous-marins, loin de toute habitation humaine, que des dépôts terrestres.

Une opposition irrationnelle

En 1997, le stockage sous-marin de déchets radioactifs a été la cible d'une attaque législative aux États-Unis : un projet de loi proposé à la Chambre des représentants propose son inter-



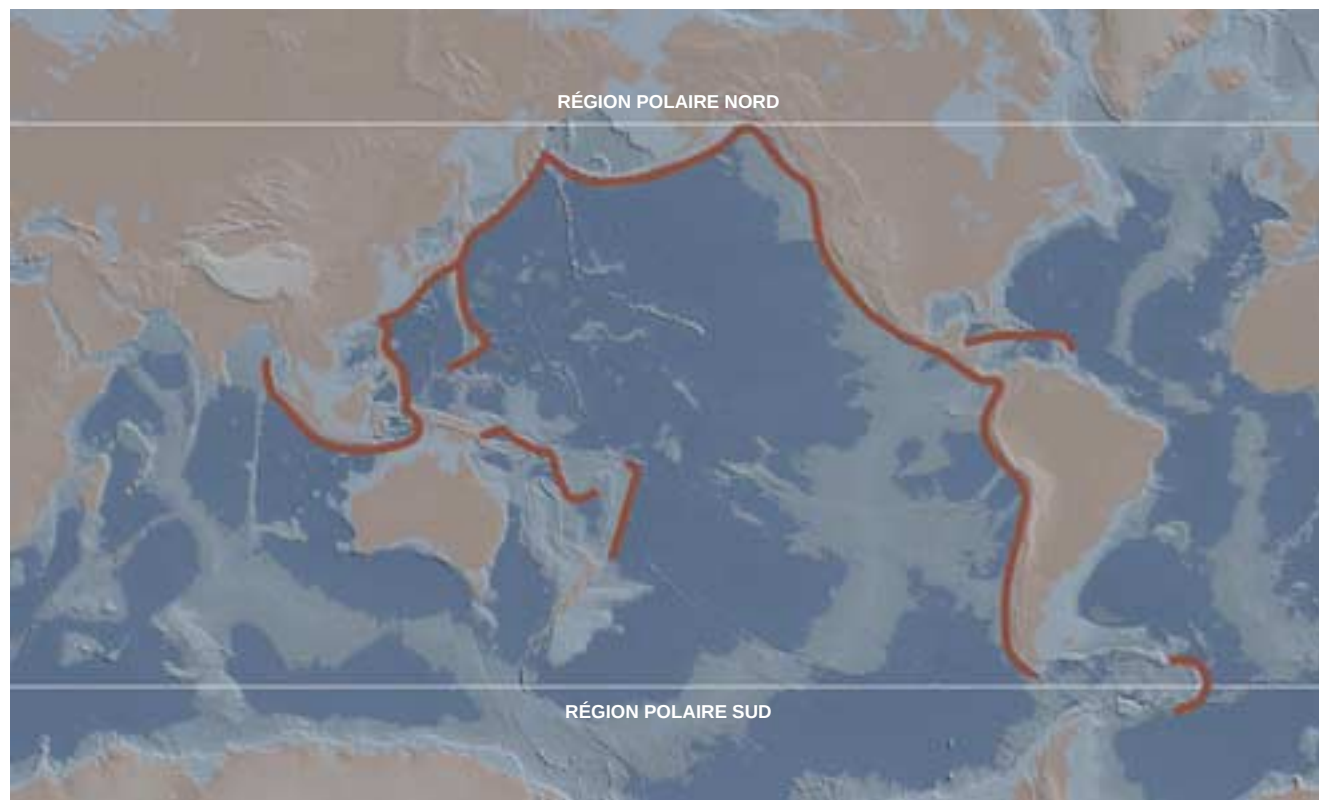
Daniel Huiszter, AP Photo

3. UN NAVIRE DE FORAGE PROFOND (ici, celui du Programme de forage océanique) creuserait des puits dans le fond de l'océan, y insérerait des conteneurs de déchets nucléaires et les scellerait avec de la boue.

diction et celle du financement gouvernemental de toute activité qui y serait associée, y compris la recherche. L'interdiction du stockage sous-marin est compréhensible tant que nous ne sommes pas certains qu'il est inoffensif pour l'homme et pour l'environnement, mais l'interdiction de toute recherche sur une technique prometteuse d'élimination des déchets nucléaires est insensée.

Le stockage sous-marin est également menacé par la législation internationale. En 1996, lors d'une rencontre organisée par l'Organisation maritime internationale, les signataires de la Convention de Londres sur les déchets ont interdit le stockage des matériaux nucléaires sous les fonds océaniques. Cette décision doit encore être ratifiée par les différents États, ce qui prendra sans doute plusieurs années, mais nous la contestons. Le stockage réglementé de déchets nucléaires ne peut être apparenté à une décharge sauvage.

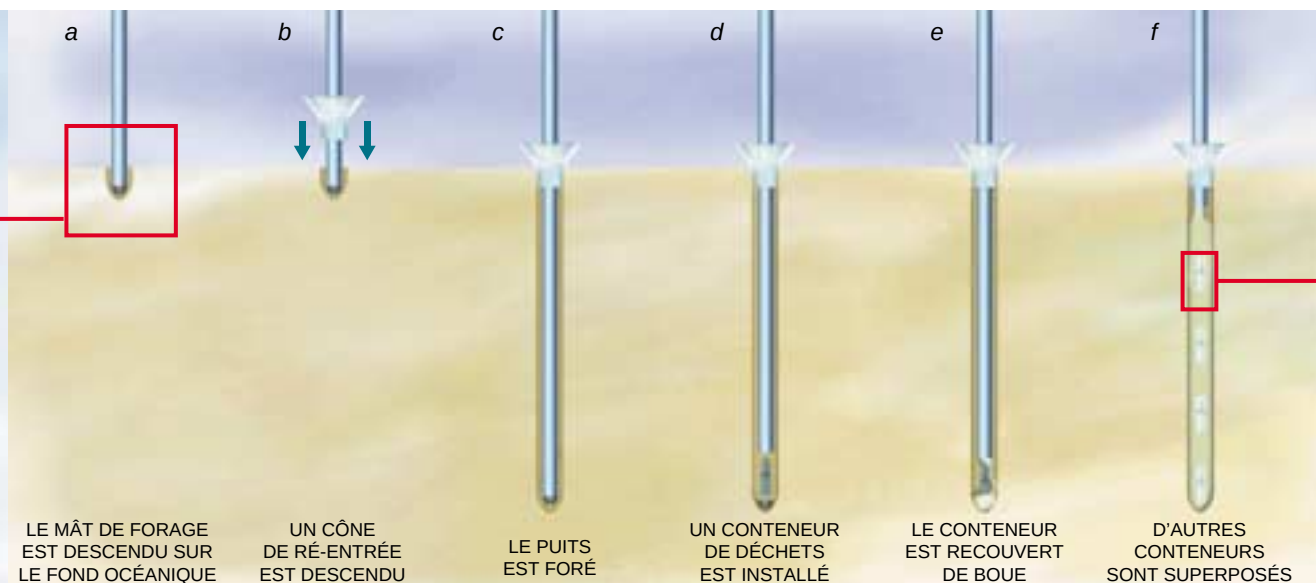
Heureusement, même si l'interdiction devient effective, la Convention de Londres permet sa révision



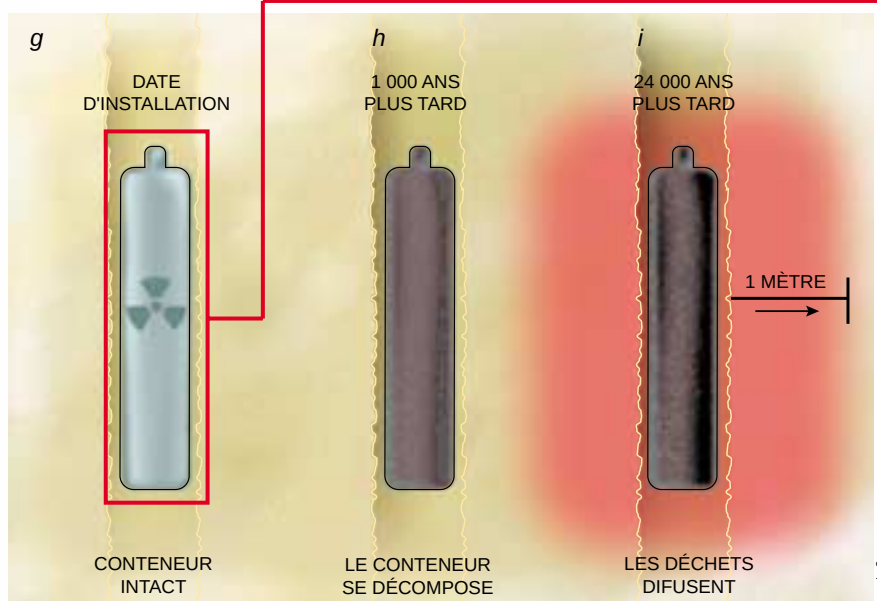
William F. Haxby

4. TOUS LES FONDS SOUS-MARINS ne conviennent pas au stockage des déchets nucléaires. Les zones où le lit de l'océan est à moins de quatre kilomètres de profondeur (en bleu clair) coïncident avec les dorsales où se créent les plaques tectoniques, et sont souvent couvertes de sédiments inappropriés. Dans d'autres régions, telles les frontières de plaques (en rouge), l'activité tectonique (ou le volcanisme) serait dangereuse. Les régions polaires (de latitude

supérieure à 60 degrés) sont à écarter, car leurs sédiments marins contiennent fréquemment des fragments rocheux emportés par les icebergs. Même après l'exclusion de ces régions et d'autres zones étendues, telles le pourtour des plateaux continentaux, où les sédiments sont assez épais pour abriter d'importantes quantités de pétrole ou de gaz, de vastes étendues de fonds marins (en bleu foncé) offrent encore d'amples possibilités pour enfouir des déchets nucléaires.



5. LE STOCKAGE SOUS-MARIN s'effectuerait en plusieurs opérations. Après la descente au fond d'une conduite de forage segmentée de plusieurs kilomètres de long (a), on adapterait un «cône de ré-entrée» autour de la conduite (b), qui guiderait jusqu'au puits une éventuelle autre conduite de forage. La rotation de la conduite, à laquelle serait fixée un trépan, creuserait un puits dans le fond de l'océan (c). Après le détachement du trépan, on descendrait dans la conduite un conteneur de déchets accroché à un câble (d). Après le comblement de cette partie du puits avec de la boue pompée à travers la conduite (e), on empilerait d'autres conteneurs (f), celui du dessus reposant à quelques dizaines de mètres au-dessous du fond sous-marin (g). Environ 1 000 ans après, le conteneur métallique serait corrodé, et les déchets radioactifs seraient au contact de la boue (h). Après 24 000 ans, quand la moitié du plutonium 239 radioactif serait désintégré, le plutonium et d'autres éléments lourds auraient migré vers l'extérieur sur moins d'un mètre (i).



Laurie Graze

dans 25 ans : on pourrait profiter de ce délai pour trouver les réponses aux questions scientifiques et techniques dont nous avons dressé la liste et pour évaluer plus précisément les coûts de ce mode de stockage. Si tout se passe bien, la Convention de Londres fournirait alors une base internationale pour un programme de stockage sous-marin.

Ce délai de 25 ans permettrait aussi de convaincre l'opinion publique. Aujourd'hui, des écologistes contestent toutes les mesures de traitement des déchets nucléaires, en particulier leur dépôt dans les océans. Cette position de principe n'est pas raisonnable. Les déchets nucléaires que nous avons produits, et que nous continuerons à produire, auront des conséquences sur l'environnement pendant quelques

centaines de milliers d'années, et il vaudrait mieux fonder les décisions que nous prendrons quant à leur devenir sur des travaux scientifiques sérieux.

À moins d'une avancée scientifique et technique miraculeuse, telle la découverte d'une méthode de transformation simple et rapide des éléments radioactifs en éléments stables ou celle d'un moyen sûr et peu coûteux

de les envoyer dans le Soleil, nous devrions trouver un endroit sur la planète où les entreposer. Les États ne devraient pas mettre tous leurs espoirs dans des projets de stockage souterrain. Ils doivent aux générations futures d'élargir leurs perspectives et d'explorer d'autres possibilités, y compris celles impliquant les épaisses couches de boue sous-marines.

Charles HOLLISTER est vice-président de l'Institut océanographique Woods Hole. Steven NADIS est écrivain.

C.D. HOLLISTER, D.R. ANDERSON et G.R. HEATH, *Subseabed Disposal of Nuclear Wastes*, in *Science*, vol. 213, pp. 1321-1326, 18 septembre 1981.

Management and Disposition of Excess

Weapons Plutonium, National Research Council, National Academy Press, 1994.

Steven NADIS, *The Sub-Seabed Solution*, in *Atlantic Monthly*, pp. 28-39, octobre 1996.

John F. AHEARNE, *Radioactive Waste : The Size of the Problem*, in *Physics Today*, vol. 50, n° 6, pp. 24-29, juin 1997.

