

Etude de la pollution du milieu marin au moyen de techniques nucléaires et isotopiques

Quelques-unes des applications utilisées par les scientifiques pour identifier, repérer et étudier la contamination des océans

par L.D. Mee et
J.W. Readman

L'océan est un vaste réceptacle où se mélangent tous les éléments et composés présents dans la croûte terrestre, qu'ils se soient formés naturellement ou résultent des activités humaines. Le mélange est agité environ tous les 1600 ans. Il l'a donc été quatre fois seulement depuis le début de l'histoire de l'humanité, ce qui, rapporté à l'échelle des temps géologiques, correspond à la vitesse d'un mixer. Il contient donc des composés dont la concentration relative ne semble guère varier avec le temps, et une fraction beaucoup plus faible (moins de 0,1% des sels dissous) de composés en déséquilibre du fait de leur participation aux processus biologiques fondamentaux, de leur introduction par l'homme sous forme de contaminants, ou de leur réactivité géochimique.

Les océanographes se heurtent souvent à d'énormes problèmes pratiques lorsqu'ils veulent mesurer les différents composés présents dans ce mélange à l'état de traces et obtenir des données sur leur dynamique. Or, ces renseignements sont indispensables pour la compréhension de la fertilité du milieu marin et pour l'étude du transport, du devenir et des effets des contaminants marins. Les techniques nucléaires et isotopiques constituent actuellement un moyen unique d'obtenir des informations permettant d'identifier certains contaminants non nucléaires, de suivre leur cheminement dans l'environnement et, éventuellement, d'étudier leurs effets biologiques. Le présent article passe en revue certains des principaux résultats obtenus dans ce domaine et examine les perspectives d'avenir.

Traceurs océanographiques

L'eau de mer est une solution à la composition à peu près uniforme dont la concentration (salinité)

M. Mee est chef de section du Laboratoire d'étude du milieu marin (LEMM) de l'AIEA, et M. Readman est chef de l'unité de chimie organique de ce laboratoire.

varie d'un endroit à l'autre. Presque tout ce que nous savons sur la circulation marine vient donc de mesures très simples de la salinité et de la température, de mesures des courants au moyen de courantomètres, de bouées dérivantes ou de calculs fondés sur les gradients de densité et les phénomènes géostrophiques. Ces méthodes ont fourni de bonnes estimations pour le transport horizontal des masses d'eau, mais elles ne sont pas précises pour les mouvements verticaux. Or, il est indispensable d'avoir des données quantitatives sur le mélange vertical pour en savoir davantage sur la capacité des océans d'assimiler les contaminants (provenant de sources terrestres ou de rejets en mer) et sur leur fonction de récepteurs des gaz à effet de serre (mécanisme ultime de régulation du réchauffement mondial).

Nos connaissances des processus de mélange des eaux océaniques viennent pour la plupart de mesures des radionucléides des séries naturelles — par exemple le carbone 14 formé en haute atmosphère qui a servi à « dater » les eaux profondes des océans — ou de l'observation des déséquilibres radiogéochimiques entre les produits de filiation de l'uranium et du thorium naturels. L'introduction dans le milieu marin de radionucléides artificiels a été particulièrement utile pour l'étude du transport des polluants, car elle s'est faite sur une période relativement brève (cas des essais d'armes nucléaires, qui ont été suspendus après 1963) ou à partir de sources ponctuelles (cas des installations nucléaires ou des usines de retraitement). Les études consacrées à ce sujet sont nombreuses et nous prendrons un seul exemple pour illustrer leur impact.

Le plus noble de tous les traceurs radiochimiques artificiels utilisés pour étudier le mélange océanique a peut-être été le tritium, qui a été produit en grandes quantités lors des essais d'armes nucléaires et a pénétré les océans, en particulier dans les latitudes septentrionales, sous forme d'eau tritiée (HTO). Nous disons « a été », car l'activité du tritium, qui a une période de 11,3 ans, est tombée à des niveaux qui ne peuvent plus être connus que par des mesures

complexes de son produit de filiation, l'hélium 3, au moyen de spectromètres de masse. L'AIEA, et en particulier sa section de l'hydrologie isotopique, a profité de la période pendant laquelle le tritium était relativement facile à mesurer. Elle a mené des travaux originaux dans ce domaine, mais a aussi réuni des spécialistes du monde entier et produit un certain nombre de publications clés. Ce travail a fourni des renseignements précieux, qui montrent qu'au cours des 25 années qui se sont écoulées depuis l'introduction de grandes quantités de tritium dans l'océan le panache d'eau tritiée a franchi le seuil du détroit du Danemark et pénétré jusqu'à 5 km de profondeur (voir le graphique). Le phénomène s'est produit beaucoup plus rapidement que ne l'avaient prévu les océanographes, ce qui prouve que les contaminants atmosphériques solubles dans l'eau qu'engendrent les industries modernes (PCB, DDT, CFC, etc.) avaient déjà pu pénétrer dans l'océan profond.

Maintenant que le tritium n'est plus un traceur commode à l'échelle océanique, on recherche d'autres radionucléides à longue période qui pourraient mettre en évidence les processus de mélange. Les candidats possibles sont: le krypton 81 (période de $2,1 \times 10^5$ ans), qui est un produit de fission inerte mais peu soluble susceptible de rendre compte des échanges air-mer; le neptunium 237, qui apparaît surtout comme déchet des installations du combustible ou des installations de retraitement, mais a une très longue période ($2,1 \times 10^6$ ans), et l'iode 129, produit de fission qui tient le mieux en place, d'une période d'environ 10^7 ans).

Les problèmes liés à l'utilisation de ces traceurs potentiels tiennent à leur faible concentration et à leur faible radioactivité, qui rendent le comptage traditionnel pratiquement impossible. Ainsi, pour mesurer le neptunium 237 dans l'eau de mer contaminée, il faut généralement des échantillons de 10 tonnes et, après concentration et séparation chimique, faire un comptage pendant deux semaines! Le Laboratoire d'étude du milieu marin de l'AIEA à Monaco (LEMM) étudie actuellement de nouvelles techniques «non nucléaires» pour mesurer certains de ces traceurs en utilisant des spectromètres de masse à couplage inductif. Ces recherches fourniront peut-être aux océanographes de nouveaux outils qui leur permettront de suivre le cheminement et la dispersion des contaminants, nucléaires et non nucléaires, et de modéliser la capacité de l'océan de les assimiler.

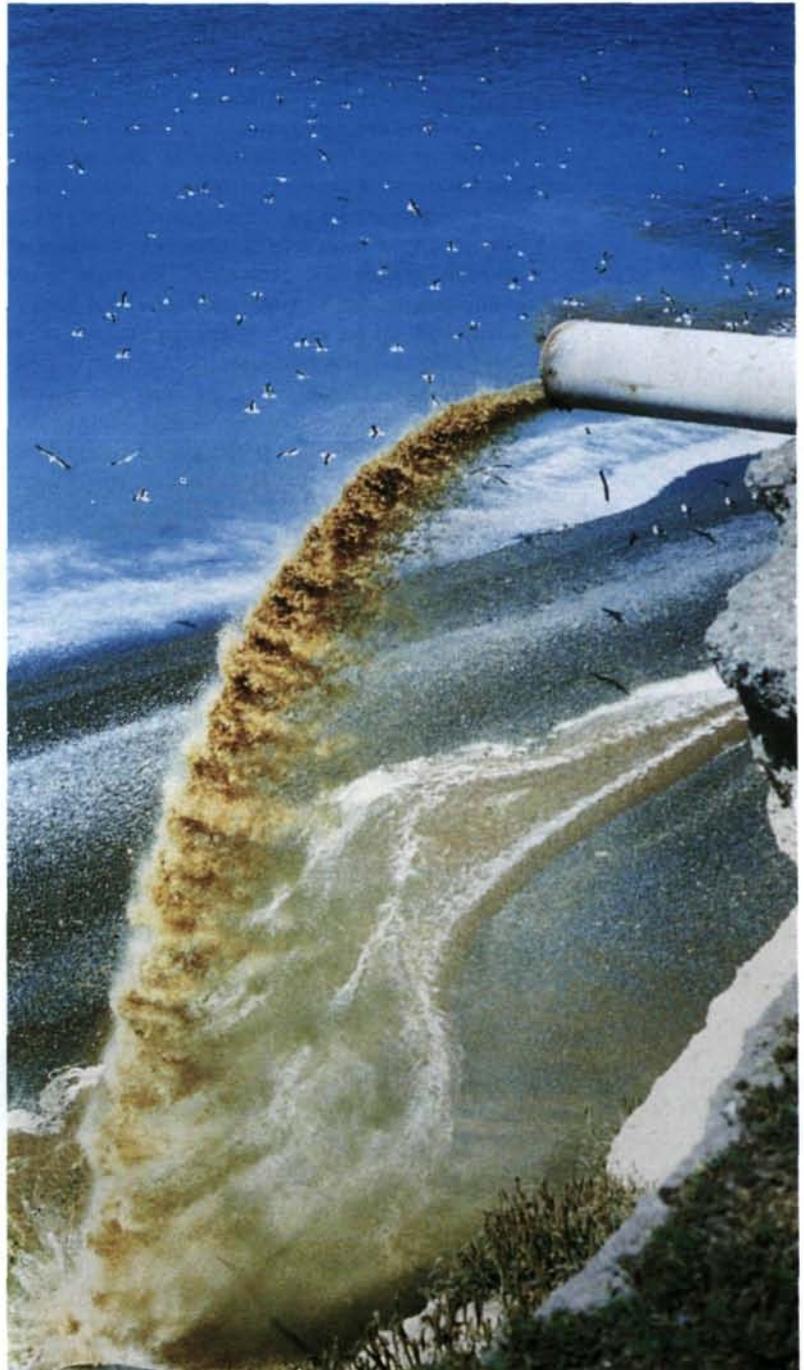
Etude des contaminants

L'introduction d'un traceur radiomarqué dans un système expérimental contrôlé permet aux scientifiques d'étudier l'interaction des différents contaminants avec d'autres composants de l'environnement. Il faut préparer soigneusement ces expériences pour que le radio-isotope que l'on introduit soit de la

même espèce chimique que le composant étudié et n'altère pas lui-même l'équilibre géochimique du système.

Le Laboratoire de Monaco et beaucoup d'autres établissements du monde entier appliquent cette méthode depuis les années 60 pour étudier le partage des métaux en traces entre les sédiments et l'eau de mer ainsi que la fixation biologique des métaux. Ces recherches ont abouti à la publication en 1985 d'une compilation des coefficients de partage sédiments/eau de mer et des facteurs de concentration biolo-

Les études de la pollution des mers comportent souvent l'application de techniques nucléaires et isotopiques. (Crédit: Kurt Adams, UNEP-SELECT)



gique pour de nombreux éléments, radioactifs et non radioactifs. L'étude de ces interactions ne présente pas qu'un intérêt théorique. L'adsorption de métaux sur des particules en suspension dans l'eau de mer et leur dépôt ultérieur sur le fond est le principal mécanisme d'auto-épuration des océans. Elle maintient la concentration de nombreux métaux toxiques en-deçà des niveaux qui menaceraient autrement l'intégrité de l'écosystème marin ou auraient des effets préjudiciables sur les populations humaines consommant des poissons ou des crustacés. La connaissance quantitative de la capacité des océans à assimiler les contaminants permet de fixer scientifiquement des limites aux rejets d'effluents dans le milieu marin. Il existe actuellement trois méthodes d'utilisation des composés radiomarqués, qui sont toutes trois très prometteuses:

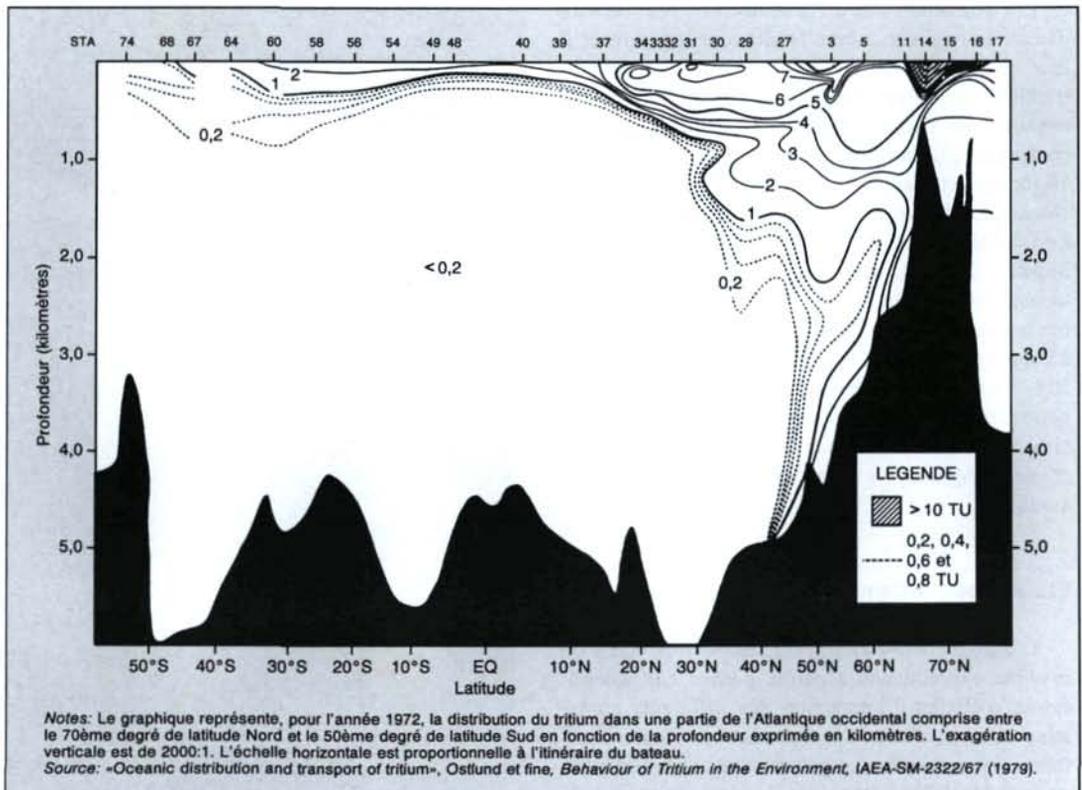
● **Poursuite des expériences de laboratoire sur les contaminants inorganiques au moyen de microcosmes contrôlés (sédiments/eau, eau/animaux, eau/sédiments/animaux).** Il reste beaucoup à faire pour comprendre les mécanismes et la dynamique de l'accumulation des métaux chez les végétaux et animaux marins, en particulier leur capacité de remobilisation et de bioaccumulation des métaux transportés sur les fonds marins par adsorption sur des particules qui s'y déposent ou par suite du rejet de déchets. Le LEMM a été le premier à réaliser de telles études, qui ont donné lieu à plus de 100 publications scientifiques. Le programme de contrats de recherche de l'Agence a également appuyé la pour-

suite des travaux de nombreux établissements nationaux sur la chimie physique des interactions eau de mer/sédiments. Ces travaux ont aidé à mieux comprendre la thermodynamique et la cinétique des processus d'adsorption et permis la mise au point de modèles plus précis pour la description et la prévision de la dispersion des métaux contaminants (y compris les radionucléides) dans le milieu réel.

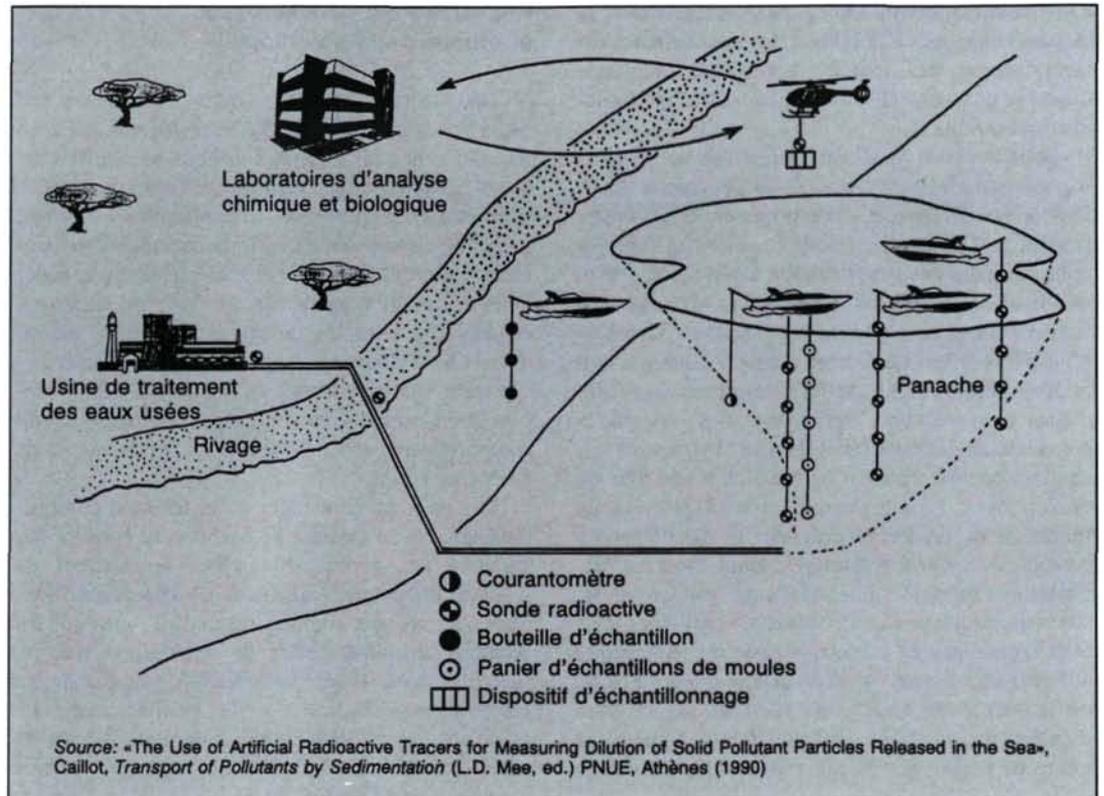
● **Mise au point de techniques utilisant des traceurs pour les composés organiques.** L'emploi de composés organiques marqués dans des expériences conçues selon les méthodes ci-dessus n'a été largement exploré dans le milieu marin qu'au cours des dernières années. Outre qu'elles offrent la possibilité d'étudier l'interaction de ces composés avec les constituants biotiques et abiotiques de l'environnement, des expériences bien conçues permettent d'étudier la dégradation des composés eux-mêmes. (Voir dans ce numéro l'article consacré aux applications de ces techniques pour l'étude des pesticides). Les succès futurs de cette approche seront liés à la synthèse par chimie organique d'analogues marqués des centaines de contaminants organiques qui constituent une menace potentielle pour les environnements marin et côtier.

● **Expériences comportant la libération de traceurs dans le milieu marin.** Pour suivre la dispersion de matériaux toxiques provenant d'émissaires sous-marins à grande profondeur (pipelines rejetant des effluents), il est nécessaire de faire des enquêtes sur le terrain comportant un maximum de mesures

Le tritium dans l'océan Atlantique occidental en 1972



**Principe
des expériences
sur le terrain
pour l'étude
de l'efficacité
des pipelines
d'évacuation
dans l'océan**



autochtones qui alimentent les écosystèmes marins et leurs relations trophiques.

Un domaine potentiellement important de la recherche sur la pollution, qui est sans doute appelé à se développer dans les années à venir, tient à la part réduite de l'azote des engrais dans l'isotope lourd. On dispose ainsi d'un moyen permettant de faire efficacement la différence entre les apports d'engrais dans les études sur l'eutrophisation (augmentation inhabituelle de la fertilisation de la mer). Il a été reconnu que l'eutrophisation était la cause la plus grave de perturbation du milieu marin résultant des activités humaines. Comme il est impossible, chimiquement, de faire une distinction entre les nutriments «naturels» et «artificiels», la technique isotopique offre une possibilité unique d'évaluer l'importance des sources terrestres de nutriments et éventuellement de les maîtriser.

Datation d'échantillons de sédiments

C'est seulement au cours des cent dernières années que l'homme a fortement pollué son environnement, du fait de l'industrialisation, du progrès des techniques, et de l'utilisation de combustibles fossiles. Dans le milieu marin, de nombreux polluants — comme les métaux lourds et les matières organiques hydrophobes — sont liés à des particules. Les sédiments forment donc un dépôt et, une fois que les polluants y sont enfouis, ils sont souvent piégés

et stabilisés (en particulier lorsqu'il n'y a pas assez d'oxygène).

Dans ces conditions, on peut prélever des échantillons et estimer, au moyen de techniques géochronologiques appropriées, la vitesse de sédimentation. Le plomb 210 (dérivé de la famille radioactive de l'uranium 238, et dont la période est de 22,4 ans) est le nucléide le plus utilisé pour étudier les antécédents de pollution. On peut analyser son activité dans tout l'échantillon, les tranches représentant des intervalles de 22,4 ans. On recherche ensuite dans les différentes couches les polluants dont on peut déterminer le mouvement et le dépôt au cours du temps.

On peut avoir confirmation de la datation en suivant les radionucléides artificiels associés aux essais d'armes nucléaires (c'est généralement le césium 137 qui a été choisi). Ces éléments/isotopes montrent un pic autour de 1963. Bien que la bioturbation au sein des sédiments puisse mélanger les matériaux dans l'échantillon, la méthode décrite ci-dessus a permis d'évaluer avec succès l'histoire des métaux en traces, des pesticides, des diphényles polychlorés, des hydrocarbures saturés (pétrole) et des hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP).

A titre d'exemple, un échantillon daté de sédiment provenant d'un estuaire du Royaume-Uni a permis de retracer l'histoire de la pollution par le plomb et par les HAP résultant de l'utilisation de combustibles fossiles. (Voir le graphique). Il montre l'augmentation considérable des rejets de ces contaminants au cours des dernières décennies.

Application de techniques isotopiques pour identifier les pétroles

La genèse du pétrole donne lieu à de nombreux signaux isotopiques qui sont en général sensiblement différents de ceux que fournit le milieu marin naturel actuel. Les teneurs en isotopes stables du carbone ont été très utiles pour la prospection du pétrole et la compréhension des processus de sa formation.

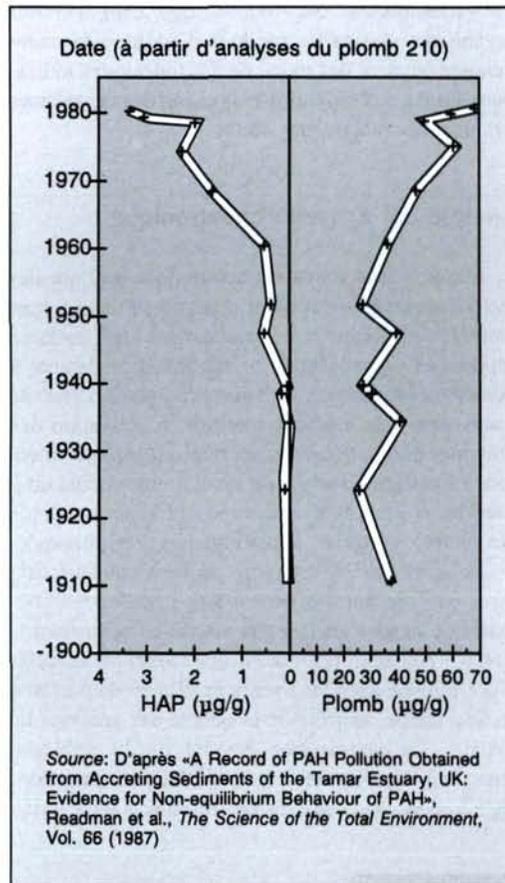
Bien que les isotopes du soufre et de l'azote soient moins nombreux dans les pétroles que les isotopes du carbone, ils permettent eux aussi de déterminer la source et l'histoire géologique de la formation du pétrole. Leur abondance est donc elle aussi caractéristique des gisements de pétrole. Autrement dit, on peut en tirer parti pour identifier les hydrocarbures déversés dans l'environnement afin d'en déterminer la ou les sources. Des études ont montré que les compositions isotopiques étaient relativement résistantes aux changements qui se produisent pendant la dégradation du pétrole dans le milieu marin.

Le Laboratoire de l'AIEA à Monaco a utilisé récemment la richesse en isotopes stables, en conjonction avec des techniques non nucléaires d'identification (spectrophotométrie par fluorescence, chromatographie en phase gazeuse en tube capillaire couplée à une détection par ionisation de flamme, et chromatographie en phase gazeuse couplée à une spectrométrie de masse) pour étudier l'étendue de la contamination du golfe Persique à la suite des déversements massifs de pétrole qui s'y sont produits pendant la guerre du Golfe. (Voir dans ce numéro l'article consacré à ce sujet).

A côté des isotopes stables, la mesure du carbone 14 peut éventuellement renseigner elle aussi sur la contamination par des produits pétroliers. Les matières organiques dérivées du pétrole contribuent par un signal nul du carbone 14 à l'activité spécifique du carbone organique marin contemporain (qui est de 261mBq/g) et à celle des matières terrestres (271mBq/g), laquelle dépasse encore d'environ 20% l'activité spécifique de fond en raison des essais récents d'armes nucléaires. Le réservoir côtier de matières organiques est, pour diverses raisons, relativement pauvre en carbone 14. Néanmoins, le signal nul du carbone 14 provenant de la contamination (en raison de la décroissance radioactive complète pendant la formation géologique du pétrole) devrait fournir une indication quantitative utile de la contribution du carbone du pétrole aux matières organiques totales du milieu marin.

Techniques de marquage en biologie moléculaire

Si l'analyse chimique permet de quantifier la présence de nombreux contaminants dans l'environnement, la question se pose toujours de savoir si les concentrations sont suffisantes pour avoir des effets biologiques nocifs.



Distribution du plomb et d'hydrocarbures aromatiques polycycliques dans un échantillon de sédiment au Royaume-Uni

On a beaucoup étudié ces dernières années les relations entre l'exposition aux contaminants et les effets biologiques observés chez les organismes marins. Les mesures de l'exposition subaiguë ont comporté des recherches des modifications cytologiques, l'induction d'enzymes, et la quantification des aberrations chromosomiques. L'attention s'est portée récemment sur les composés «génotoxiques», c'est-à-dire les polluants qui entraînent une altération de l'ADN, d'où une possibilité d'induction de cancers. Il s'agit des hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) et des diphényles polychlorés (PCB), qui, les uns comme les autres, sont omniprésents dans l'environnement.

Dans la cancérogénèse chimique, on pense que la première phase critique est une modification chimique de l'ADN. Ce phénomène implique souvent la liaison du polluant organique (ou de son métabolite actif) à l'ADN. Seules des techniques ultra-sensibles permettent de détecter des quantités infimes d'agents cancérogènes liés à l'ADN. Les méthodes de post-marquage au phosphore 32 mises au point pour les analyses de la composition de base et du séquençage des acides nucléiques se sont révélées particulièrement efficaces pour étudier les produits d'addition cancérogènes. La technique a permis de déterminer les produits d'addition résultant d'une exposition dans l'environnement à de faibles concentrations.

Les scientifiques ont montré que chez certains organismes marins les produits d'addition se maintiennent pendant des mois, ce qui fournit des indications sur les antécédents d'exposition des organismes aux agents cancérigènes chimiques.

Analyse par activation neutronique

L'analyse par activation neutronique est l'une des techniques les plus sensibles et les plus précises pour mesurer les éléments en traces dans des matrices solides. Elle peut donc être appliquée facilement à l'étude de nombreux métaux présents à l'état de traces dans des matrices marines. L'activation des principaux composants du sel marin lui-même limite son utilité dans l'analyse de l'eau de mer, mais on y remédie grâce à une séparation chimique préalable des métaux en traces à analyser (co-précipitation).

De nombreux instituts ne peuvent malheureusement pas accéder facilement aux installations coûteuses qu'exige l'analyse par activation neutronique. Celle-ci constitue néanmoins une technique de référence utilisée dans les exercices d'intercomparaison du Service de contrôle de la qualité des analyses de l'AIEA. La participation de plus de 20 établissements qui l'appliquent contribue à assurer un étalonnage précis des matières de référence de l'AIEA

qu'utilisent des centaines d'analystes dans le monde entier. C'est là un moyen de faire bénéficier des avantages des techniques nucléaires les nombreux instituts qui ne disposent pas des ressources techniques ou financières pour les appliquer de façon courante.

Un défi permanent

Les quelques exemples qui ont été choisis pour ce bref tour d'horizon illustrent le rôle majeur que les techniques nucléaires ont déjà joué dans les études consacrées à la pollution marine (comme dans l'océanographie en général) et la place importante qu'elle devraient occuper à l'avenir.

L'AIEA et en particulier son laboratoire d'étude du milieu marin de Monaco travaillent depuis plus de 30 ans à la mise au point et au perfectionnement de techniques nucléaires appliquées pour étudier le milieu marin. Ce travail ne sera jamais terminé. La société humaine se trouve confrontée à des défis toujours plus grands, qui demandent constamment des approches nouvelles et plus efficaces pour évaluer, prévoir, et réduire l'impact des activités de l'homme sur l'environnement.

Recueil
d'organismes marins
au large de Monaco
(Crédit: LEMM)

