

ÉTUDE DE LA RADIOACTIVITÉ MARINE DANS LE MONDE DRESSER LE BILAN

PAR PAVEL P. POVINEC ET ORIHIKO TOGAWA

On recense dans le milieu marin un nombre croissant de sources de radioactivité provenant d'activités humaines. On connaît notamment les retombées mondiales des essais atmosphériques d'armes nucléaires, l'accident de Tchernobyl, les rejets de radionucléides provenant d'installations nucléaires, les rejets passés de déchets radioactifs, les accidents de sous-marins nucléaires, les apports des sites d'essais nucléaires, les pertes de sources radioactives et la combustion de radioisotopes utilisés comme sources d'énergie par les satellites.

En règle générale, les radionucléides présents dans le milieu marin diffèrent d'une région à l'autre. Ces différences s'expliquent par la dynamique du milieu marin et par l'origine des radionucléides dans une région donnée. Pour évaluer de façon scientifique la radioactivité marine, il faut donc connaître à la fois les termes sources et les processus océaniques.

Actuellement, la radioactivité est déposée de façon inégale dans les océans. Les retombées mondiales sont, on le sait, essentiellement dues aux essais d'armes nucléaires effectués dans les années 60. Les rejets provenant des centrales de retraitement du combustible

nucléaire ou les rejets passés de déchets radioactifs liquides et solides sont généralement confinés, quant à eux, à des zones plus localisées. Néanmoins, même dans ces conditions, des radionucléides solubles ont été transportés sur de longues distances par les courants océaniques.

Pour pouvoir estimer les apports de radionucléides provenant de sources locales, les scientifiques ont besoin de mieux comprendre la répartition des radionucléides dans les océans et mers du monde. Cette compréhension est nécessaire pour analyser les résultats d'études scientifiques portant sur des zones limitées telles que d'anciens sites de décharge, qui peuvent ensuite être étudiées de façon plus approfondie.

Pour aider à mieux comprendre le milieu marin, le Laboratoire de l'environnement marin (LEM) de l'AIEA a lancé, en 1996, un projet quinquennal intitulé « Recherche sur la radioactivité marine dans le monde (MARS) », dont les activités sont financées par l'Agence japonaise pour la science et la technologie. Le présent article évoque brièvement ce projet et décrit les recherches et les études scientifiques menées par le LEM et par ses partenaires mondiaux dans ce domaine.

RECHERCHES

Le projet MARS a pour objet de renseigner sur la radioactivité qui prévaut en haute mer et d'améliorer la connaissance de la répartition actuelle des radionucléides. Il permet d'examiner de façon comparative les résultats d'études nationales et internationales portant sur la radioactivité. Il permet aussi de mieux connaître les processus qui influent sur la répartition des radionucléides et des sources qui ont introduit la radioactivité en haute mer.

Une réunion d'experts organisée en 1996 à Monaco a aidé à orienter le projet. Les experts ont recommandé d'étudier l'océan Pacifique Nord et l'océan Atlantique tout en effectuant des prélèvements complémentaires dans l'océan Indien. Ils ont en outre préconisé d'accorder la priorité absolue au Pacifique Nord car on manquait de données récentes et ont recommandé de localiser les stations d'échantillonnage sur des sites pour lesquels on disposait de données historiques complètes et de qualité, comme par exemple les sites utilisés dans les années 70 dans le cadre du

M. Povinec est directeur du Laboratoire de radiométrie et M. Togawa l'un des experts de ce laboratoire, section du Laboratoire de l'environnement marin (LEM) de l'AIEA à Monaco.

programme GEOSECS (étude géochimique de sections d'océans) ou des sites dont les résultats pourraient être transposés à des études contemporaines portant sur des océans entiers.

Le projet a pour objectifs:

- d'examiner les répartitions actuelles de radionucléides clés (tritium, carbone 14, strontium 90, césium 137 et isotopes de plutonium) dans l'eau, les sédiments et le biote des océans;
- d'extrapoler des données à partir d'études contemporaines portant sur des océans entiers, telle l'étude par traceurs menée dans le cadre du programme WOCE (programme hydrographique d'expériences sur la circulation océanique mondiale), pour lesquelles on dispose de nombreuses données sur le tritium qui pourraient être utilisées pour prédire les concentrations de strontium 90 et de césium 137 dans les mêmes régions;
- d'étudier l'évolution chronologique des concentrations de radionucléides dans l'eau à l'aide de données historiques et récentes de qualité;
- de recenser les principales sources de radionucléides artificiels dans les océans;
- d'incorporer toutes les données disponibles sur les répartitions de radionucléides dans l'eau, les sédiments et le biote dans la base de données mondiale sur la radioactivité marine de façon à pouvoir étudier les variations temporelles et spatiales de radionucléides clés.

Programme de recherche coordonné (PRC). Un programme de recherche coordonné sur l'étude de la radioactivité marine dans le monde, auquel participent notamment des experts danois,

allemands, indiens, italiens, japonais, coréens du sud et américains, a été lancé en 1998 pour appuyer les recherches du projet MARS. Les travaux permettront de mieux comprendre les répartitions actuelles de radionucléides dans la colonne d'eau et dans les sédiments de haute mer, et de prévoir leur impact radiologique. Ce programme, qui bénéficie d'un soutien extrabudgétaire du Japon, favorisera l'étude de la radioactivité marine dans les États membres par une assistance méthodologique et une aide à la gestion de la qualité des analyses. Toutes les données obtenues concernant les concentrations de radionucléides dans l'eau, les sédiments et le biote seront mises à la disposition des États membres de l'AIEA sous forme électronique, aussi bien sur CD-ROM que sur Internet.

EXPÉDITIONS SCIENTIFIQUES

Le projet MARS s'appuie en outre sur un certain nombre d'expéditions scientifiques menées en haute mer.

Expédition de l'AIEA dans l'océan Pacifique (1997). Cette expédition a été menée par le LEM en coopération avec neuf organismes établis dans cinq États membres de l'AIEA (*voir encadré*). C'était la première fois qu'une expédition océanographique en haute mer était intégralement organisée et menée à bien par l'Agence.

L'expédition a été menée dans le nord-ouest de l'océan Pacifique du 21 octobre au 20 novembre 1997. Elle avait pour principal objectif de prélever à différentes profondeurs de l'eau, des sédiments et des échantillons de biote et d'effectuer des mesures océanographiques (salinité,

température, etc.). L'analyse des échantillons prélevés et les mesures effectuées pendant la croisière permettront d'étudier la répartition des radionucléides artificiels et naturels dans le milieu marin. Ces travaux aideront en outre à étudier les signaux isotopiques susceptibles d'avoir été produits par l'effet « El Niño ». Par ailleurs, les scientifiques rechercheront d'éventuels effets, en fonction de la latitude, sur la répartition des radionucléides naturels dans l'eau de mer, le plancton et les poissons.

L'expédition, menée à bord du navire de recherches *Bosei Maru* de l'Université de Tokai, a suivi un itinéraire triangulaire reliant Shimizu (Japon), Milwaukee Sea-Mountain à l'est, les îles Marshall au sud avec escale à Pohnpei (États fédérés de Micronésie), puis de nouveau Shimizu. Des prélèvements ont été effectués dans 20 stations, dont quatre stations GEOSECS et sept stations proches des atolls de Bikini et d'Enewetak.

Des échantillons d'eau de mer ont été prélevés à plusieurs profondeurs et en différents endroits à l'aide d'échantillonneurs à grand volume, de pompes submersibles et d'un système CTP (conductivité, température et profondeur) équipé d'échantillonneurs rosettes multi-bouteilles. Des sédiments et des échantillons de biote ont été prélevés en utilisant, respectivement, un carottier et des tiges et filets de pêche. Des mesures CTP et de chimie générale ont également été effectuées. On a prélevé, au total, cinq jeux d'échantillons d'eau de grand volume, douze jeux d'échantillons d'eau de faible volume, quinze carottes de sédiments, quarante-cinq échantillons de poissons de trois



À droite, des échantillons d'eau de mer sont prélevés à partir du navire japonais Bosei Maru pendant l'expédition menée en 1997 par l'AIEA dans l'océan Pacifique. Ont participé à cette expédition des scientifiques de cinq pays et de neuf organismes parmi lesquels l'Agence maritime et hydrographique fédérale (Allemagne); l'Institut coréen de recherche océanographique et de développement (République de Corée); le Laboratoire de recherche physique (Inde); l'Université de Linköping (Suède) et cinq organismes japonais: l'Institut japonais de recherche sur l'énergie atomique (établissement de Mutsu); le Centre japonais d'analyse chimique; la Fondation japonaise pour les sciences de la mer (Laboratoire marin de Mutsu); l'Institut de recherche météorologique; et l'Université de Tokai. Au total, vingt-deux participants, y compris six fonctionnaires de l'AIEA (LEM) ont pris part à l'expédition. Certains des participants posent ci-dessus avec des membres de l'équipage. (Crédit: LEM)



espèces différentes et des échantillons de plancton.

Des analyses chimiques de préconcentration de certains radionucléides (strontium 90, césium 137, plutonium 239/240 et américium 241) ont été effectuées à bord pour réduire d'environ vingt fois le

volume des grands échantillons d'eau. Cela a permis d'effectuer, en vue d'analyses ultérieures, des envois par voie de surface de Shimizu vers Monaco et vers des laboratoires d'États membres participants.

Les concentrations de tritium, de carbone 14, de techné-

tium 99, d'iode 129 et de plutonium (ICP-MS) seront mesurées dans des échantillons d'eau de mer prélevés à l'aide du système CTP/échantillonneurs rosettes multi-bouteilles. Dans les échantillons de sédiments et de biote, en revanche, on mesurera non seulement ces

radionucléides artificiels, mais aussi des radionucléides naturels (polonium 210, radium 226, thorium 230, uranium 234 et uranium 238).

Les résultats préliminaires obtenus par le système CTP et les mesures de chimie générale figurent dans un rapport que le LEM a publié peu après l'expédition. Les scientifiques du LEM, les organismes participants et d'autres laboratoires d'États membres de l'AIEA (Canada, Allemagne, Inde, Japon, Nouvelle-Zélande et États-Unis) procèdent actuellement à une analyse complète des échantillons prélevés. Les résultats définitifs de ces travaux d'analyse devraient être publiés en 1999.

Expédition commune Japon-Corée-Russie. Dans le cadre d'un accord conclu entre le Japon, la République de Corée et la Fédération de Russie, le LEM a été invité à participer à des expéditions communes vers d'anciens sites de rejet de déchets radioactifs dans le nord-ouest de l'océan Pacifique et dans ses mers marginales. L'objectif était d'étudier la contamination radiologique du milieu marin par les déchets radioactifs rejetés dans le passé par l'ex-URSS, la Fédération de Russie, la République de Corée et le Japon.

L'expédition, menée à bord du navire de recherches russe *Okean*, s'est déroulée en deux phases: la première, du 22 mars au 11 avril 1994, a porté sur des sites de rejets en mer du Japon/Chine orientale; la seconde, du 15 août au 15 septembre 1995, a porté sur des sites de rejets en mer d'Okhotsk, dans le nord-ouest de l'océan Pacifique et en mer du Japon/Chine orientale.

Des échantillons d'eau de surface et de fond ainsi que des sédiments de fond ont été

prélevés dans quatorze stations correspondant aux zones où des déchets radioactifs de plus de 700 TBq avaient été rejetés, et dans six autres stations situées en dehors de ces zones. Dans deux zones où des quantités plus importantes de déchets radioactifs avaient été rejetées, des eaux intermédiaires ont également été prélevées à plusieurs profondeurs. Des prélèvements ont en outre été effectués dans deux stations proches de l'île de Sakhaline, en mer d'Okhotsk, où une source de strontium 90 de 13 PBq avait été perdue accidentellement.

Sur les échantillons prélevés, les scientifiques du LEM ont effectué des mesures de tritium, de carbone 14, de strontium 90, d'iode 129, de césium 137, de plutonium 239/240 et d'américium 241. Il s'est avéré que les concentrations de tritium, de strontium 90, de césium 137, de plutonium 238 et de plutonium 239/240 dans l'eau de mer et dans les sédiments des zones de rejet étaient faibles et ne différaient pas sensiblement de celles relevées dans les zones de fond correspondantes. Ces niveaux étaient également faibles par rapport à ceux généralement relevés dans le nord-ouest de l'océan Pacifique et dans ses mers marginales.

Les inventaires de strontium 90, de césium 137 et de plutonium 239/240 estimés à partir de profils verticaux d'eau de mer et de sédiments présentaient un excédent par rapport aux densités de dépôt cumulées des retombées mondiales, mais restaient cohérents avec les observations réalisées précédemment dans ces régions. Ces résultats ainsi que les rapports d'activité isotopique militaient en faveur d'une prédominance, dans les zones de

prélèvement, des retombées mondiales.

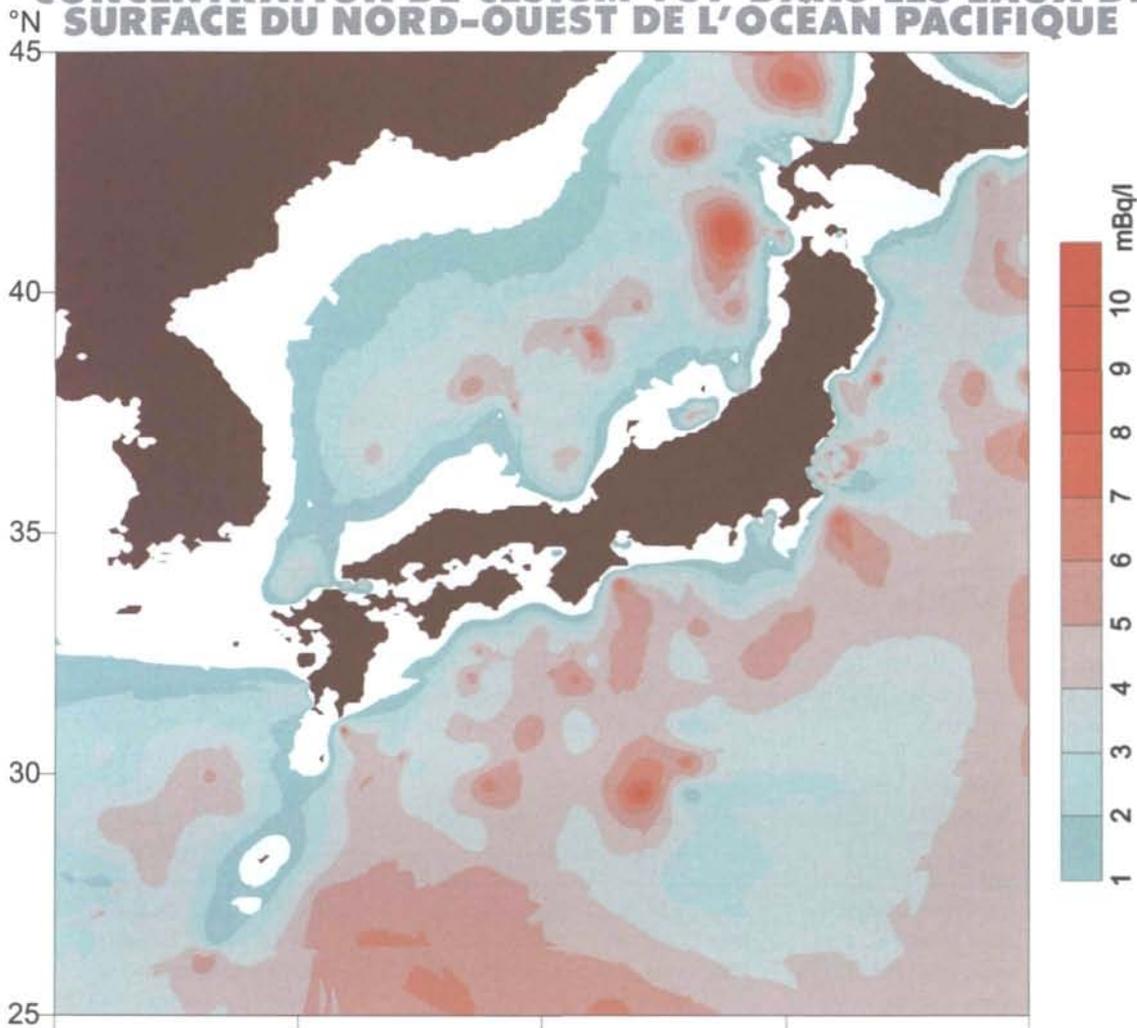
Expéditions dans l'océan Indien. Des scientifiques du LEM ont participé à deux expéditions scientifiques menées dans l'océan Indien.

La première de ces expéditions a été menée en collaboration avec le Centre de recherches sur le milieu marin de l'Agence nationale pour les technologies nouvelles, l'énergie et l'environnement (ENEA) de La Spezia (Italie). Menée du 8 mars au 9 avril 1998 à bord du navire de recherches italien *Italica* lors de son retour de l'Antarctique vers l'Italie, elle avait pour objectif d'étudier la répartition des radionucléides artificiels dans les eaux de surface de l'océan Indien.

De l'eau de mer a été prélevée dans quarante et une stations d'échantillonnage, tous les cinq degrés de longitude environ, suivant une transversale s'étendant de Lyttelton (sud-ouest de la Nouvelle-Zélande) à Ravenne (Italie) en passant par le détroit de Cook, la mer de Tasmanie, le détroit de Bass, la Grande Baie Australienne, l'océan Indien, le golfe d'Aden, la mer Rouge, le canal de Suez et la mer Méditerranée. De l'eau de mer a été prélevée à une profondeur moyenne de quatre mètres à l'aide du système de pompage embarqué sur le navire. Des analyses chimiques de préconcentration de certains radionucléides (strontium 90, césium 137, plutonium 239/240 et américium 241) ont été effectuées à bord en recourant à la même méthode que lors de l'expédition menée par l'AIEA dans l'océan Pacifique en 1997.

De petits échantillons supplémentaires d'eau de mer ont été prélevés en vue de leur analyse ultérieure (tritium et iode 129) ainsi qu'à des fins

CONCENTRATION DE CÉSIUM 137 DANS LES EAUX DE SURFACE DU NORD-OUEST DE L'OCEAN PACIFIQUE



d'archivage. L'analyse de ces échantillons s'effectuera au LEM et à l'ENEA, les résultats devant être disponibles en 1999.

La seconde expédition a été menée à l'invitation du Département indien des océans et du développement (DOD). Cette expédition, qui s'est déroulée du 19 mars au 20 avril 1998 à bord du navire de recherches du DOD *Sagar Sampada*, a été organisée par le Laboratoire de recherche physique d'Ahmedabad. Son principal objectif était de déterminer les concentrations et les répartitions (horizontales et verticales) de radionucléides artificiels dans l'eau et les sédiments.

Des prélèvements ont été effectués dans six stations, dont cinq stations GEOSECS. Chaque fois, des échantillons d'eau de mer ont été prélevés à six profondeurs différentes en recourant au système CTP/échantillonneurs rosettes multi-bouteilles. Certains radionucléides (strontium 90, césium 137, plutonium 239/240 et américium 241) ont été préconcentrés à bord. D'autres échantillons d'eau de mer ont été prélevés en vue de la mesure, au LEM, des concentrations de tritium, de technetium 99, d'iode 129 et de plutonium (ICP-MS) ainsi qu'à des fins d'archivage. Des

carottes de sédiments et des échantillons de plancton ont également été prélevés dans plusieurs stations.

L'analyse de tous les échantillons prélevés s'effectuera au LEM et au Laboratoire de recherche physique, les résultats devant être disponibles en 1999. D'autres expéditions sont prévues en 1988 et en 1999 dans l'océan Atlantique et dans le sud de l'océan Indien.

Carte: des spécialistes du LEM (Monaco) ont participé à des expéditions scientifiques qui ont fourni des renseignements précieux sur les niveaux de radioactivité des océans. (Crédit: LEM)

Une base de données sur la radioactivité marine

Dans le cadre du projet de recherche, le LEM a conçu la base de données GLOMARD (base de données mondiale sur la radioactivité marine), qui proposera aux États membres des données sur les concentrations de radionucléides dans le milieu marin. Ces informations les aideront à évaluer l'impact radiologique des rejets de déchets radioactifs et des essais nucléaires et à prendre des mesures d'urgence en cas d'accident radiologique en mer. La base GLOMARD devrait bientôt être disponible sur le site Internet de l'AIEA.

Cette base de données contient environ 40 Mo de données représentant 100 000 mesures de radioactivité effectuées dans l'eau, les sédiments, le biote et les matières en suspension prélevés dans les océans.

Elle renseigne sur l'origine des données, sur les laboratoires effectuant des analyses de radionucléides, sur la nature des échantillons (eau de mer, sédiment, biote) et sur d'autres paramètres (volume, poids), sur les traitements, méthodes d'analyse et instruments de mesure, et fournit des résultats commentés (concentrations de radionucléides, incertitudes, température, salinité, etc.).

La version actuelle de la base GLOMARD permet d'entrer, d'actualiser et d'extraire des données pour produire, à l'aide de programmes informatiques externes, différents types de cartes dont des cartes bathymétriques indiquant les répartitions de radionucléides dans les zones étudiées.

La future version de la base GLOMARD sera raccordée au Système d'information géographique, ce qui permettra

de produire des cartes bi- et tridimensionnelles plus précises et de corréliser les données relatives à la radioactivité à des données sur la bathymétrie, la température ou la salinité. On pourra également produire des cartes chronologiques de contamination.

RÉPARTITION DES RADIONUCLÉIDES

À l'aide de ces moyens cartographiques, on a étudié les répartitions de radionucléides dans les eaux de surface et dans les sédiments de surface du nord-ouest de l'océan Pacifique en utilisant des ensembles de données de la base GLOMARD (voir carte). Ces données proviennent d'institutions japonaises, essentiellement du Centre japonais d'analyses chimiques. On a évalué les profils verticaux de concentration des radionucléides, les inventaires de radionucléides et leurs rapports d'activité isotopique tant dans les colonnes d'eau de mer que dans les carottes de sédiments.

En règle générale, les concentrations de strontium 90, de césium 137 et de plutonium 239/240 dans les échantillons marins prélevés autour du Japon sont très faibles et tendent à diminuer d'année en année. Les concentrations de strontium 90 et de césium 137 dans les colonnes d'eau de mer diminuent avec la profondeur, contrairement à celles de plutonium 239/240. Les concentrations maximales de plutonium s'observent sous la surface, à une profondeur d'environ 700 mètres, en raison de processus spécifiques d'élimination intervenant dans la colonne d'eau.

Les concentrations de radionucléides dans les carottes de sédiments tendent à

diminuer avec la profondeur. Les inventaires de strontium 90, de césium 137 et de plutonium 239/240 dans l'eau de mer et dans les sédiments ont été mesurés sur plusieurs périodes entre le début des années 80 et aujourd'hui. Les rapports d'activité isotopique dans les carottes de sédiments diffèrent fortement de ceux relevés dans les colonnes d'eau de mer en raison des différences d'élimination des radionucléides de l'eau de mer vers les sédiments du fond.

Les inventaires de strontium 90, de césium 137 et de plutonium 239/240 dans la colonne d'eau du site de rejet en mer du Japon/Chine orientale sont de 3, de 5, 8 et de 0,10 kBq/m² respectivement. En comparaison, les inventaires respectifs dans la colonne d'eau du nord-ouest de l'océan Pacifique sont de 1, de 2 et de 0,11 kBq/m². Comme on le voit, les inventaires de strontium 90 et de césium 137 au niveau du site de rejet en mer du Japon/mer de Chine orientale sont nettement supérieurs à ceux observés dans le nord-ouest de l'océan Pacifique.

Les inventaires totaux de strontium 90 et de césium 137 dans l'eau et dans les sédiments sont conformes aux densités escomptées de dépôt des retombées mondiales. En revanche, ceux de plutonium 239/240 et d'américium 241 dans le nord-ouest de l'océan Pacifique présentent un excédent qui correspond peut-être à un apport supplémentaire de retombées proches transportées depuis l'océan Pacifique central.

Les études menées en mer du Japon/mer de Chine orientale et dans le nord-ouest de l'océan Pacifique ne font apparaître aucune preuve définitive

d'impact des rejets de déchets radioactifs. Toutefois, des comportements particuliers des radionucléides ont été observés.

On a estimé l'équivalent de dose efficace collectif absorbé par voie alimentaire par la population japonaise du fait des déchets radioactifs liquides rejetés en mer du Japon/mer de Chine orientale. Au total, 443 TBq de déchets liquides ont été rejetés au large de Vladivostok.

S'agissant de la composition en radionucléides des déchets, on a supposé que les rapports de cobalt 60, de strontium 90 et de césium 134 vis-à-vis du césium 137 étaient respectivement de 0,01, de 0,3 et de 0,01. Les doses imputables à des radionucléides à longue période atteignaient des valeurs maximales quatre à cinq ans après les rejets.

L'équivalent de dose efficace collectif total provenant de l'ensemble des radionucléides atteignait en 1990 une valeur maximale de 0,8 mSv. Cette dose provenait, pour environ 90%, du césium 137 essentiellement lié à la consommation de poisson. L'équivalent de dose efficace collectif engagé est estimé à 11 mSv.

On a également estimé les doses imputables aux retombées mondiales (strontium 90, césium 137 et plutonium 239/240) et aux radionucléides naturels (polonium 210) pour les comparer à celles imputables aux déchets radioactifs liquides. Les équivalents de dose efficaces collectifs ont été estimés sur la base de l'ingestion annuelle d'animaux marins capturés en 1990.

La dose collective de 17 000 mSv imputable au polonium 210 prédomine par rapport à celle de 16 mSv imputable au strontium 90, au césium 137 et au plutonium 239/240.



L'équivalent de dose efficace collectif total imputable aux déchets radioactifs liquides représente environ 5% de celui imputable aux retombées mondiales.

PERSPECTIVES

Pour pouvoir évaluer plus complètement la radioactivité du milieu marin, il faudra procéder à des études supplémentaires. Les recherches et les activités du LEM se concentreront, à l'avenir, sur les sources qui ont introduit des radionucléides dans les océans et les mers, sur la répartition des radionucléides artificiels et naturels dans le milieu marin, et sur la contribution des radionucléides artificiels et naturels aux doses reçues par la population mondiale du fait de l'ingestion d'aliments d'origine marine. Ces études aideront à déterminer les contributions respectives des différentes

sources de radioactivité, les résultats facilitant la prise de décisions dans différents domaines.

Une manifestation importante sera la tenue, en octobre 1998 à Monaco, d'un Colloque international sur la pollution marine parrainé par l'AIEA et par plusieurs organismes (*pour un aperçu des objectifs et des thèmes du colloque, voir encadré pages 4 et 5*). À cette occasion, d'éminents experts nationaux et internationaux examineront un grand nombre de questions et aideront à fixer des priorités pour les années à venir. □

Photo: des spécialistes du milieu marin déploient un carottier destiné à prélever des échantillons de sédiments sur le fond de l'océan.

(Crédit: LEM)