

# ÉTUDE CONJOINTE DE LA MER MÉDITERRANÉE PAR L'AIEA ET L'UNION EUROPÉENNE PARTENARIAT MEDITERRANEEN

PAR SCOTT FOWLER, JUAN-CARLOS MIQUEL & FLORENCE BOISSON

**L**a mer Méditerranée est une masse d'eau unique du point de vue tant culturel que socioéconomique. Partie intégrante du berceau de la civilisation occidentale, elle a longtemps servi de système de perpétuation de la vie humaine aussi bien sur le plan de la nutrition que sur celui du commerce et des échanges. Aujourd'hui, elle abrite les millions d'individus qui sont établis sur ses côtes et constitue une aire de jeu pour les millions d'autres qui utilisent, à différentes époques de l'année, ses plages à des fins récréatives.

Ces activités et pressions humaines se sont inévitablement traduites par des contraintes environnementales et par une pollution qui risquent d'avoir une incidence sur le fonctionnement de cet écosystème marin critique.

Plusieurs caractéristiques océanographiques et géographiques de la Méditerranée la rendent particulièrement vulnérable aux effets potentiels des polluants artificiels. Cette mer est une masse d'eau relativement peu profonde, semi-fermée où seuls des échanges d'eau limités se produisent au niveau du détroit de Gibraltar et du Bosphore. L'eau de surface moins salée de l'océan Atlantique pénètre au niveau de Gibraltar et circule lentement dans le sens anti-horaire autour du bassin méditerranéen. Là, elle se réchauffe progressivement et devient plus salée du fait de l'exposition au soleil et de l'évaporation intense. Les faibles courants côtiers et l'absence générale de marées se combinent

pour réduire la dispersion des polluants qui pénètrent ses eaux côtières. Qui plus est, la construction récente de barrages sur certains grands fleuves a considérablement réduit les écoulements printaniers qui tendent à nettoyer les régions côtières des contaminants déposés.

Outre ces caractéristiques physiques uniques, une grande partie des eaux de la Méditerranée a une teneur très faible en nutriments et recèle généralement une vie marine très pauvre (*voir carte*). Ainsi, toute perturbation importante de sa faible productivité potentielle risquerait de causer des dommages durables à l'écosystème.

Étant donné le contexte géographique particulier de la mer Méditerranée et sa sensibilité potentielle à l'activité humaine, il n'est pas surprenant qu'au cours de la dernière décennie, d'importants efforts aient été consacrés à l'étude de sa structure biogéochimique et de son fonctionnement. De surcroît, les dimensions restreintes de la Méditerranée permettent aux spécialistes du milieu marin d'étudier, sur une échelle réduite, des processus typiques des océans. L'évolution récente de l'océanographie a montré que notre connaissance de ces processus s'améliore considérablement lorsque les questions auxquelles on cherche à répondre sont étudiées de façon multidisciplinaire.

Consciente de ce fait, l'Union européenne a lancé plusieurs grands programmes d'étude multidisciplinaire du milieu

marin, dont plusieurs consacrés à la Méditerranée. Du fait de sa longue expérience de travail en collaboration en mer Méditerranée, le Laboratoire de l'environnement marin (LEM) de l'AIEA, à Monaco, a été invité par plusieurs instituts partenaires de l'Union européenne à contribuer à ces programmes, généralement dans le domaine de l'application des techniques nucléaires à l'étude des processus océaniques clés. Ces programmes parrainés par l'Union européenne ont été essentiels pour élargir la base de financement extrabudgétaire du LEM, base souvent nécessaire pour mener à bien les programmes d'étude du milieu marin approuvés par l'AIEA au titre de son budget ordinaire.

À cet égard, le LEM s'est activement employé, dans les années 90, à étudier les processus océaniques méditerranéens qui jouent un rôle essentiel dans la compréhension du transport et du devenir des radionucléides et d'autres contaminants. Le présent article met en lumière les principales activités entreprises par le LEM dans ce domaine.

## RETRACER L'HISTORIQUE DE LA POLLUTION

Une étude a fait appel à l'expertise du LEM dans le cadre du

---

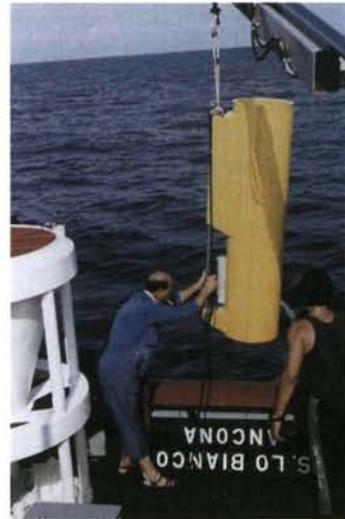
*M. Fowler est directeur du Laboratoire de radioécologie; M. Miquel et Mme Boisson sont employés par ce laboratoire, qui est l'une des sections du Laboratoire de l'environnement marin (LEM) de l'AIEA à Monaco.*

programme ELNA (Limites de l'eutrophisation du nord de l'Adriatique) de l'Union européenne. L'une des tâches du LEM a consisté à établir l'historique de la pollution du nord de l'Adriatique par divers contaminants.

La méthode retenue a consisté à dater des carottes de sédiments à l'aide de techniques nucléaires, puis à établir un rapport entre les taux de sédimentation calculés et les niveaux de contaminants mesurés dans les différentes couches de sédiments déposées dans le temps. La technique nucléaire utilisée le plus souvent dans ce type d'étude géochronologique consiste à suivre la désintégration du plomb 210 atmosphérique après son dépôt dans les sédiments. L'hypothèse primaire sur laquelle repose cette technique est que seule la désintégration radioactive du plomb 210 déposé (demi-vie physique: 25 ans) est responsable de la diminution de sa concentration avec la profondeur. Le plomb 210 présent dans les

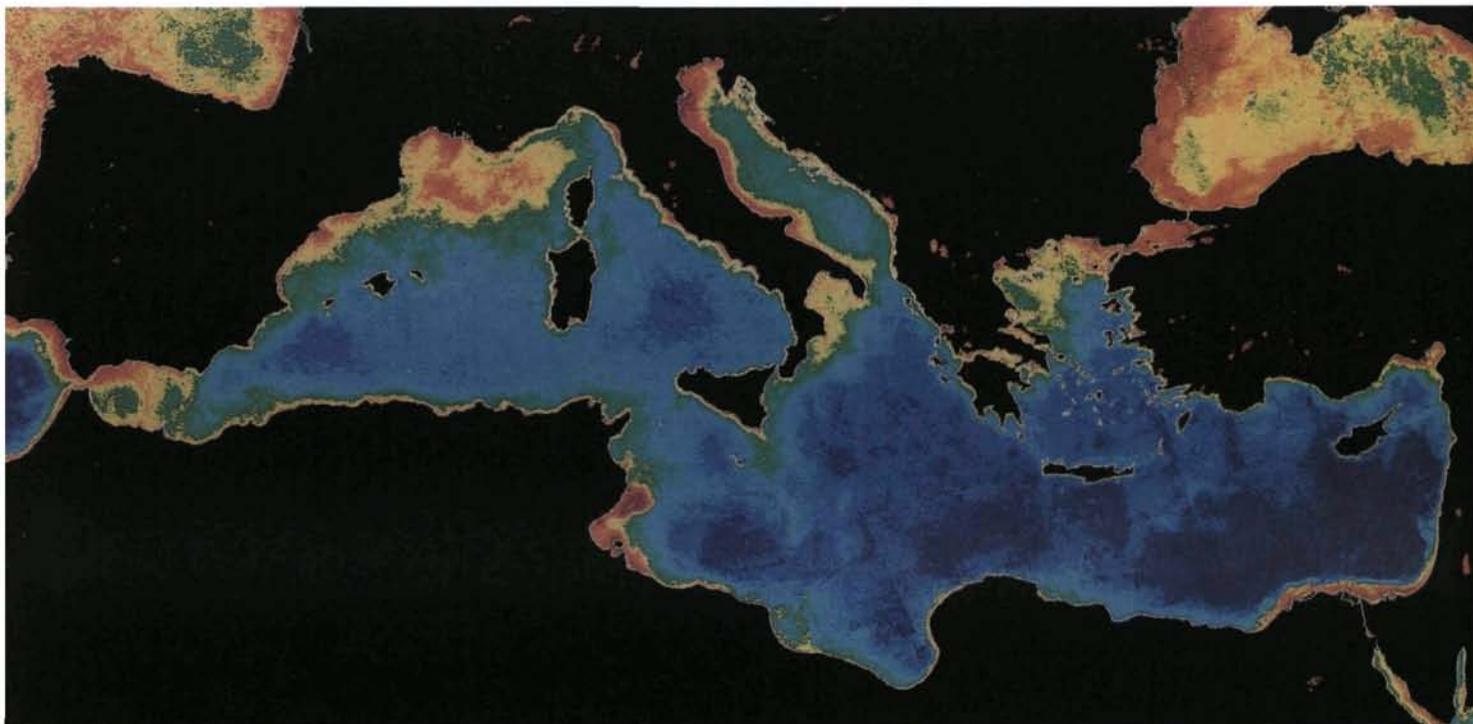
sédiments est en fait calculé en mesurant directement son produit de filiation, le polonium 210. À partir du taux d'accumulation de la masse sèche, on peut calculer, connaissant la porosité et la densité des sédiments, un taux de sédimentation en centimètres par an.

**Mercuré et polychlorobiphényles (PCB).** On a noté, au large de l'embouchure du Pô (Italie), des taux de sédimentation relativement élevés, ce qui est typique de cette région côtière. Les alluvions du Pô étant connus pour être une source importante de contaminants d'origine terrestre polluant le nord de l'Adriatique, la carotte de sédiments prélevée au large du Pô a été analysée pour connaître la concentration de deux polluants clés de la mer Méditerranée: le mercure et les PCB.



Les profils de mélanges de PCB courants montrent que les quantités maximales se sont déposées il y a 20 à 27 ans, ce qui correspond étroitement à la plus

*Photos: ci-dessus, des scientifiques déploient dans la mer Adriatique un piège à sédiments automatique. Ci-dessous, des images scanner en couleurs de la mer Méditerranée indiquent les zones de forte (orange et jaune) et de faible (bleu) productivité printanière. (Crédit: Miquel LEM; NASA Goddard Space Flight Center)*



forte période de vente de PCB, c'est-à-dire 1969-1970. En outre, les PCB ne sont produits commercialement que depuis 1929. Les profils montrent également une diminution rapide des PCB vers 18 à 20 centimètres de profondeur, ce qui correspond étroitement à la période où l'on peut s'attendre à voir ces éléments pénétrer pour la première fois dans l'environnement.

Dans le cas du mercure, la concentration absolue est souvent liée à la composition organique du sédiment. On a établi, pour la même carotte sédimentaire d'alluvions du Pô, un profil de la concentration de méthylmercure normalisée par rapport à la teneur en carbone organique sous forme de particules. Ce type de profil est complexe et difficile à interpréter; toutefois, deux concentrations maximales apparaissent clairement entre 8 et 10 centimètres et entre 20 et 22 centimètres de profondeur.

On manque généralement d'informations sur le méthylmercure présent dans l'Adriatique. Il est intéressant de noter, dans les mesures du LEM, que la concentration totale et celle de méthylmercure atteignent des valeurs maximales à des profondeurs comprises entre 20 et 22 centimètres, ce qui correspond à 77 à 85 ans avant le prélèvement de la carotte. Cette relation donne à penser que les valeurs maximales correspondent étroitement à l'année de production maximale de mercure (1913). À cette date, la mine d'Idria, sur l'Isonzo voisin, a produit deux fois plus de mercure qu'en moyenne les autres années.

Ces études multidisciplinaires, qui portent sur ce qu'on suppose être des sédiments largement non remaniés, montrent que l'horloge physique d'un radionucléide naturel déposé sur le fond de la mer peut être très utile pour étudier l'histoire des polluants

du milieu marin liés aux activités humaines.

## COMPRENDRE LES PROCESSUS MARINS

Depuis 1996, le LEM participe, en Méditerranée orientale, au programme MAST (science et technologie marines) de l'Union européenne intitulé « Flux hydrothermaux et production biologique en mer Égée ».

La mer Égée est une zone de forte activité sismique et géothermique. L'île de Milos est connue pour posséder, dans les eaux peu profondes qui l'entourent, quelque 35 km<sup>2</sup> de fonds géothermiquement actifs d'où s'échappent d'importants volumes de gaz libres, de phosphate et de manganèse.

Le cycle géochimique et la production biologique liés à la chimiosynthèse qui a lieu au niveau de ces événements peu profonds demeurent largement inconnus, notamment le rôle joué par ces événements dans la production et l'exportation de matières organiques sous forme de particules.

L'un des principaux objectifs du LEM a consisté, dans le cadre de ce programme, à caractériser et à quantifier l'exportation de carbone organique sous forme de particules provenant de la zone euphotique proche des événements hydrothermaux. Pour ce faire, on a procédé, sur une longue période de temps, à l'étude des matières sous forme de particules en cours de sédimentation, à des mesures dans la colonne d'eau et à l'analyse de sédiments du fond marin.

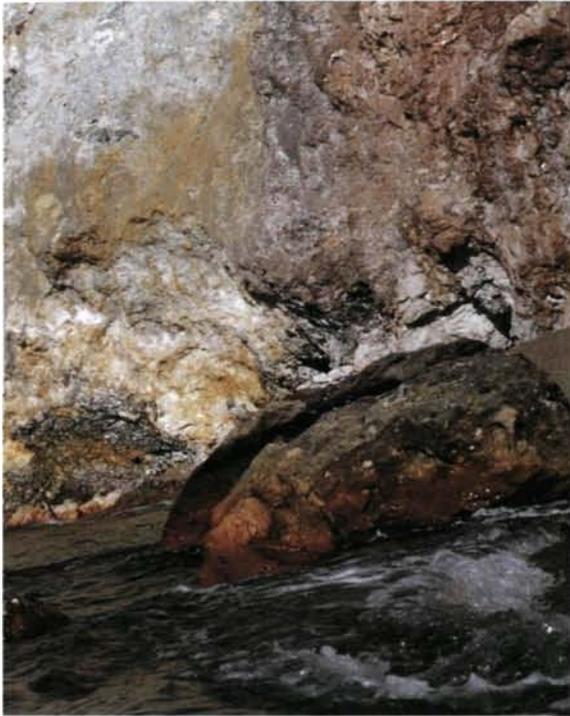
*Voyages d'étude à proximité de l'île de Milos.* En 1996-1997, trois voyages d'étude ont été organisés sur la côte sud de l'île de Milos pour prélever des particules et des sédiments en cours de sédimentation et pour déployer et récupérer des dispositifs mouillés équipés de pièges à sédiments et

de compteurs de courants. Durant l'été, des pièges à sédiments « en chronique » disposés sur trois sites suivant une transversale reliant une zone d'évent et une zone libre de toute influence d'événements ont retenu des particules circulant à une profondeur de 60 mètres.

Sur ces trois sites, huit coupelles d'échantillonnage ont successivement prélevé des particules, chacune pendant une période de 12 jours. À distance du site d'évent, les flux de particules différaient clairement de ceux observés dans la zone d'évent. La plupart du temps, deux à trois fois plus de particules étaient produites et exportées sur le site d'évent que sur les sites de contrôle et intermédiaires. Les flux n'étaient comparables sur tous les sites que pendant une brève période, au milieu de l'été. Pendant les périodes de sédimentation les plus intenses, les matières organiques étaient 30 à 100 fois plus importantes sur le site d'évent.

Pendant l'été 1996, des pièges à sédiments ont été déployés dans un périmètre restreint de 3,5 miles nautiques. Malgré cela, les particules en cours de sédimentation différaient entre les sites non seulement par leur quantité, mais également par leur composition.

La plupart des échantillons étaient essentiellement composés de débris de zooplancton (morceaux de carcasses animales, exosquelettes et une grande variété de pastilles fécales). Cependant, les échantillons de septembre provenant du site d'évent différaient complètement de tous les autres échantillons et étaient composés, en majeure partie, de minuscules pastilles fécales oblongues de couleur marron foncé, très homogènes en taille et en forme. L'échantillon final prélevé était composé presque exclusivement de cette sorte de matière fécale. Des bactéries



marines étaient également présentes dans tous les échantillons, mais en plus grand nombre dans les particules provenant du site d'événement. Leur contribution au flux de carbone était minimale (<1%), sauf au milieu de l'été lorsque les flux de masse étaient très faibles.

Des bactéries thermophiles associées aux événements hydrothermaux n'ont été identifiées par analyse d'ADN que dans les échantillons provenant du site d'événement. Ainsi, la production de carbone et l'exportation subséquente vers les sédiments du site d'événement étaient sensiblement plus importantes que dans les zones échantillonnées environnantes. Les particules étaient essentiellement d'origine pélagique et comportaient un marqueur bactérien d'origine hydrothermale évidente.

**Processus de transport des particules.** Pendant la même série d'expériences effectuées en mer Égée, on a utilisé les variations chimiques du couple de radionucléides naturels

polonium 210/plomb 210 pour étudier les processus de transport des particules dans une zone d'événements hydrothermaux sous-marins peu profonds. Le polonium est présent dans le milieu marin essentiellement du fait de la décomposition du plomb 210 provenant des retombées atmosphériques et du fait des dégagements de radon provenant des sédiments et des formations d'événements sous-marins. Si les événements agissent comme des sources hydrothermales enrichies en polonium 210 et en plomb 210 — son produit de filiation, on peut alors s'attendre à ce que sur le site d'événements les particules soient enrichies en ces mêmes radionucléides. On a donc prélevé, pendant l'été 1996, des particules à faible profondeur (60 mètres) et à quatre moments différents.

Rien n'a prouvé, dans les résultats des prélèvements, que l'environnement riche en soufre observé à proximité des événements avait une incidence sur les concentrations de polonium 210

présentes dans les particules en sédimentation. Ces concentrations étaient du même ordre que celle signalée auparavant pour les matières prélevées par piège à sédiments pendant l'été sur les côtes du nord-ouest de la Méditerranée, loin de toute influence d'événements.

De même, les concentrations de plomb 210 n'étaient pas plus élevées dans les matières sous forme de particules provenant de la zone d'événements. En fait, les particules du « site de contrôle » contenaient généralement plus de

*Photos: le long des côtes de l'île de Milos, des dépôts de fer (marron) et de soufre (jaune) sont visibles dans une zone d'activité géothermique. Sur des sites hydrothermaux peu profonds de la mer Égée, une caméra sous-marine montre aux scientifiques, dans une zone, des anneaux de précipités chimiques et des tapis bactériens et, dans une autre, du gaz (essentiellement du CO<sub>2</sub>) s'échappant des sédiments du fond. (Crédit: Miquel/LEM)*

plomb 210 que celles de la zone d'événements.

Le comportement du polonium 210 dans l'océan diffère de celui du plomb 210 en raison, notamment, de la plus forte affinité du premier avec les matières organiques. Ainsi, la nature et les variations de la proportion relative de fractions organiques et inorganiques de particules coulantes peuvent avoir une plus grande influence sur les niveaux de polonium 210 et de plomb 210 que la dynamique d'évacuation des gaz proprement dite.

On a également comparé les flux verticaux de polonium 210 et de plomb 210 sur les deux sites. Il est évident que les flux verticaux de ces deux radionucléides sous forme de particules sont en moyenne plus élevés dans la zone d'événements. Cela n'est pas dû aux concentrations élevées de radionucléides dans les particules en sédimentation proches des événements, mais plutôt au flux plus élevé de ces particules dans la zone d'événements. Manifestement, la productivité et les retombées consécutives de particules d'origine biologique sont plus élevées à proximité des événements, ce qui, à son tour, accélère le flux de radionucléides vers le fond. Les événements peuvent donc indirectement réguler le flux de radionucléides en modifiant les types et les quantités de particules produites localement, par exemple dans les zones d'événements hydrothermaux.

Dans l'écosystème unique de Milos, les événements se caractérisent par des régimes élevés de réduction et d'oxydation du soufre. Étant donné les analogies chimiques du soufre et du polonium, on pouvait s'attendre à ce que ces événements riches en soufre soient fortement enrichis en polonium, et à ce que cela entraîne une augmentation potentielle des concentrations de

polonium dans le biote qui se nourrit dans les zones voisines.

En fait, des floes de bactéries abondaient autour des événements et l'on a souvent noté que des escargots marins paissaient sur les tapis bactériens blanchâtres présents dans les eaux peu profondes. Les concentrations de polonium 210 et de plomb 210 ont été mesurées dans les parties molles de ces organismes pour déterminer une éventuelle augmentation de leurs niveaux respectifs et pour évaluer le transfert consécutif de ces importants radionucléides naturels dans la chaîne alimentaire marine.

On notera avec intérêt que les teneurs en polonium 210 et en plomb 210 étaient analogues aux valeurs médianes basées sur plusieurs centaines de données concernant des organismes sans rapport avec des événements et que, plus précisément, elles étaient plus faibles que les concentrations mesurées dans des vers d'événements hydrothermaux très profonds qui avaient ingéré des particules minérales sulfurées enrichies en polonium 210. Ainsi, l'ingestion de bactéries associées aux tapis minéraux de Milos ne semble pas avoir d'influence importante sur les concentrations de polonium 210 et de plomb 210 relevées dans ces gastéropodes.

Les études décrites ici représentent les premières tentatives menées en mer Méditerranée pour quantifier les flux verticaux et le cycle des matières ainsi que les radionucléides naturels associés aux sites d'événements hydrothermaux peu profonds.

## ÉVALUER L'IMPACT DE LA POLLUTION

Le LEM a aussi participé activement au projet EROS 2000 (étude des systèmes européens rivières/océans), qui est parrainé par le programme MAST de

l'Union européenne. Ce projet avait pour objet d'évaluer l'impact des sources fluviales et terrestres de pollution sur les écosystèmes du plateau continental européen.

Une campagne de prélèvements a été effectuée à l'aide du navire français *Marion Dufresne* entre la partie centrale du nord-ouest de la Méditerranée et la région située au large de l'Èbre en Espagne. Il s'agissait notamment de mesurer les taux de sédimentation des matières d'origine biologique (carbone, azote, pastilles fécales, organismes intacts) et non biologique (radionucléides, terres rares et autres éléments) à l'aide de pièges à sédiments tant mouillés que flottants. Diverses mesures, y compris de phytoplancton et de zooplancton suspendu, ont également été effectuées dans la colonne d'eau pour établir un rapport entre les échantillons prélevés par les pièges à sédiments et les processus de haute mer qui réglementent le flux vertical et la composition des matières sous forme de particules.

À l'aide de quatre pièges à sédiments automatiques mouillés en haute mer dans le nord-ouest de la Méditerranée à des profondeurs comprises entre 200 et 2000 mètres et en effectuant des prélèvements à intervalles de deux semaines, on a étudié, pendant le mois de mai, la sédimentation d'une efflorescence phytoplanctonique sur les fonds de haute mer. Pendant cette période, on a essentiellement prélevé deux espèces de phytoplancton. Il est très probable que l'efflorescence, qui utilisait des nutriments propulsés vers le haut par de puissants courants vers la mi-avril, s'est sédimentée après l'épuisement de ces nutriments dans les eaux de surface. Les résultats des prélèvements ont montré une sédimentation rapide (>140 mètres/jour) de matières sous forme de particules

## LES AVANTAGES DE LA COOPÉRATION

Le renforcement de la coopération, dans les années 90, entre l'AIEA et l'Union européenne dans le domaine de la recherche marine appliquée à la Méditerranée a été mutuellement bénéfique.

Les chercheurs du LEM ont ainsi pu collaborer étroitement avec des scientifiques de divers États membres dans le cadre de projets multidisciplinaires de grande ampleur. Ces travaux ont porté sur des problèmes d'intérêt mondial et ont fait appel à des instruments et à des moyens de pointe dont le personnel du LEM ne bénéficie généralement pas. C'est particulièrement vrai en ce qui concerne l'accès régulier aux navires océanographiques, qui coûtent cher à louer ou à entretenir. Le libre accès à ces navires et à leur instrumentation s'est révélé indispensable pour mener à bien de façon économiquement rationnelle les programmes de l'AIEA consacrés au milieu marin.

En échange, le LEM a mis à la disposition des autres scientifiques du programme un ensemble perfectionné de techniques nucléaires et isotopiques qui leur a permis de mieux comprendre les processus qui régissent la biogéochimie d'éléments clés de la mer Méditerranée.

La récente installation du LEM dans de nouveaux locaux plus importants sur le port de Monaco lui permettra d'accroître son aide aux scientifiques avec lesquels il coopère dans le domaine tant de la formation à l'analyse que de l'analyse proprement dite des échantillons. On espère donc que la coopération entre l'AIEA et l'Union européenne continuera de se développer au XXI<sup>e</sup> siècle afin que les deux organisations puissent ainsi mieux atteindre leurs objectifs spécifiques de protection des océans. □

riches en carbone à travers la colonne d'eau jusque sur le fond. Pendant cette sédimentation « pulsée » de mai, le flux de particules, à 200 mètres, a été trois à quatre fois plus élevé que dans les périodes précédentes ou suivantes. Cette impulsion s'est encore accentuée en profondeur avec des flux six à dix fois plus élevés pendant la période de sédimentation aiguë, et dix à trente fois plus élevés pour les flux de carbone.

Dans les mêmes prélèvements, on a analysé, à l'aide d'un système informatisé d'analyse d'image, les pastilles fécales de zooplancton, autres véhicules importants. Le nombre de pastilles en sédimentation a commencé à augmenter pendant la période d'abondance maximale du phytoplancton dans la colonne d'eau, mais a atteint son apogée deux semaines plus tard lorsque la biomasse de zooplancton a atteint son maximum. Pendant cette période, on a observé que les fèces de zooplancton produisaient 20 à 40% du carbone en sédimentation. Le délai entre l'abondance maximale du phytoplancton et la sédimentation des matières fécales dépend du cycle de vie des zooplancteurs (crustacés microscopiques, vers et poissons) et de leur interaction dans le réseau alimentaire de haute mer.

On a examiné la teneur en éléments de terres rares (ETR) – dont certains sont des éléments stables ou des analogues de radionucléides artificiels clés – de particules en sédimentation provenant des quatre niveaux de profondeur mesurés à l'aide de pièges à sédiments en chronique.

Pendant l'impulsion de sédimentation, les particules provenant des pièges les plus profonds se caractérisaient par des schémas d'ETR analogues à ceux observés dans les 200 mètres supérieurs. Cela prouvait

qu'il ne se produisait, pendant la phase de sédimentation, aucune élimination ou peu d'élimination d'ETR par les particules. Par contre, après l'impulsion de sédimentation, les particules des eaux profondes présentaient un enrichissement en ETR légers par rapport aux ETR lourds et une anomalie positive de cérium.

On a comparé les schémas d'ETR relevés dans les particules de la colonne d'eau supérieure (200 mètres) à ceux relevés en profondeur (1000 et 2000 mètres) pendant et suivant l'impulsion de sédimentation. Il s'est avéré que le temps est un facteur clé pour déterminer l'élimination des ETR par les particules en sédimentation. Cela vaut en particulier pour l'élimination préférentielle du cérium, qui est très prononcée dans les particules plus fines, coulant lentement et vraisemblablement plus anciennes. Ces observations correspondent aux schémas d'ETR de l'eau de mer du nord-ouest de la Méditerranée, qui se caractérise par une forte anomalie négative de cérium et par un enrichissement progressif en ETR avec l'accroissement du numéro atomique. L'enrichissement des particules des eaux profondes en ETR légers par rapport aux ETR lourds entraîne sur ces particules soit une élimination préférentielle des ETR légers analogue à l'enrichissement en cérium, soit une dissolution sélective des ETR lourds liée à un processus de reminéralisation des particules, soit les deux.

Les connaissances acquises concernant le comportement marin du cérium, de l'euprium et d'autres ETR réactifs aux particules se sont révélées très utiles pour comprendre le cycle et le transport de radionucléides analogues tels que le radiocérium et l'américium 241 dans les systèmes océaniques.