Lors de crues ou de tempêtes, les sédiments charriés par le Rhône et ses affluents forment d'importants panaches susceptibles de transporter des contaminants vers la mer.

Des outils pour prévoir la contamination radioactive du milieu marin à long terme

L'accident de Fukushima, au Japon en 2011, le seul à avoir affecté directement le milieu marin, a confirmé que les sédiments représentaient une source de radioactivité importante et persistante. Comment sont contaminés l'eau et les écosystèmes marins - des micro-organismes jusqu'à l'homme ? Comment aider les pouvoirs publics à protéger les populations et l'environnement face à ces répercussions à grande échelle et sur des décennies ?

[CONTEXTE]

Lors d'un accident dans une installation nucléaire, outre les rejets atmosphériques sur lesquels beaucoup de recherches ont été menées en raison de leur fort impact potentiel à court terme, des rejets radioactifs peuvent être émis en mer. Les radionucléides sont alors entraînés par les courants. Certains, dissous, peuvent se disperser sur de grandes distances, d'autres se lier au phytoplancton puis être assimilés par la faune, d'autres encore, se fixer sur les sédiments. Ces derniers constituent un réservoir de contamination.

« *Même si on s'y attendait, c'était une première de constater, après l'accident de Fukushima, que les courbes de concentrations en césium, radionucléide récurrent en situation accidentelle et persistant dans l'environnement, suivaient la même tendance dans les poissons et les sédiments* », se rappelle Sabine Charmasson, chercheuse en radioécologie marine et océanographe à l'ASNR. Malgré la présence du puissant courant marin local Kuroshio, l'équivalent pacifique du Gulf Stream, qui a permis une très forte dilution des rejets, la contamination avait affecté l'ensemble des écosystèmes marins.

« *Cette forte corrélation suggérait que les poissons étaient également contaminés par les sédiments, notamment en ingérant les organismes qui y vivent* », énonce-t-elle. Il est alors apparu essentiel de représenter le devenir en mer de ces particules en suspension au moyen de modèles dits hydrosédimentaires, en particulier dans les zones sous influence des fleuves, où se situent la plupart des centrales nucléaires. Ces sédiments, issus principalement de l'érosion des bassins versants, subissent des phases complexes de dépôt sur les fonds et de remise en suspension successives sous l'effet du vent, des tempêtes, des courants et des marées.

« *L'ASNR étudie depuis longtemps les dépôts sédimentaires liés au Rhône car, dans le monde, c'est l'un des fleuves qui concentre le plus d'installations nucléaires sur ses rives,* précise Sabine Charmasson. *Et nous collaborons avec l'Ifremer et l'université de Toulouse, leaders français sur le sujet, pour développer un modèle hydrosédimentaire dans la zone sous influence de ce fleuve.* »

Le paramétrage d'un modèle hydrosédimentaire se fonde sur la distribution et les concentrations de matières en suspension, ainsi que sur l'estimation des tailles des particules. Ces données proviennent d'images satellites et des nombreuses campagnes de mesure qui permettent de déterminer la granulométrie des fonds marins, les vitesses des particules pour se déposer, les seuils de remise en suspension, la turbidité, etc.

Chaque année, le Rhône déverse plusieurs millions de tonnes de sédiments dans la Méditerranée et en dépose jusqu'à 50 centimètres à l'embouchure, formant un important delta sous-marin. Les sédiments les plus fins sont remis en suspension lors des tempêtes et sont ensuite déplacés vers le plateau continental. « *Le transport de particules est très différent pour la Gironde, que nous étudions également, où un bouchon vaseux se déplace dans l'estuaire avec les marées* », ajoute la chercheuse.

Une nouvelle approche

L'étape suivante nécessite de modéliser la contamination de tous les organismes vivants. « *Au moment de l'accident de Fukushima, les modèles donnaient seulement la possibilité de trouver des concentrations en radionucléides à partir du niveau de contamination dans l'eau pour des grands groupes trophiques tels que le plancton, les mollusques, crustacés, poissons* », se souvient Sabine Charmasson.

Ces modèles simplifiés restent la règle en cas d'accident, pendant la phase de crise : ils

© Licensee MDPI, Basel, Switzerland

permettent d'évaluer rapidement l'évolution de la concentration des radionucléides dans l'eau, les sédiments et les groupes trophiques. Ils s'appuient sur la distribution des espèces, des facteurs de concentration (rapports entre la concentration en radionucléides dans l'organisme et celle dans l'eau) et des demi-vies biologiques (temps nécessaire pour que l'organisme élimine la moitié de la radioactivité accumulée).

« Désormais, nous modélisons aussi les réseaux trophiques [les relations alimentaires entre les différents organismes d'un écosystème, du phytoplancton au zooplancton puis aux plus gros poissons, ndlr] *et les différentes voies de transfert entre espèces »*, explique la scientifique. Une approche encore très peu développée dans le monde. L'objectif, ambitieux, est, à terme, de coupler ces modèles dits écotrophiques avec les modèles hydrosédimentaires. Et comme chaque côte et chaque écosystème a ses propres caractéristiques, des modèles spécifiques doivent être développés.

Ainsi, pendant dix ans, dès 2013, une quinzaine de chercheurs de l'IRSN et de sept partenaires (CNRS-universités de Bordeaux, Toulouse, Toulon, Versailles - Saint - Quentin, CEA, Ifremer, Collecte localisation satellites) ont étudié les processus hydrosédimentaires alors qu'une dizaine d'autres se penchaient sur les réseaux trophiques à Fukushima et sur les côtes françaises. Les modèles hydrosédimentaires développés pour l'instant sur la Gironde, la Manche et le golfe du Lion nécessitent encore des ajustements. Sur cette dernière zone, le modèle écotrophique conçu par un doctorant de l'ASNR, Thomas Seyer, est le premier à prendre en compte la contamination des sédiments, plus précisément par le césium.

« Le modèle est fonctionnel, mais le paramétrage de certains groupes d'espèces ainsi que le comportement des sédiments restent à améliorer », note Sabine Charmasson.

Que connaît-on de la contamination de la faune ? On sait que les poissons dits « pélagiques », ceux qui vivent entre la surface et le fond, sont contaminés au moment du rejet massif de radionucléides. En 2019, Mokrane Belharet, thésard de l'IRSN et de l'université de Toulouse, a modélisé la dispersion des rejets de césium 137 dans l'eau, les phytoplanctons et zooplanctons, puis dans les poissons pélagiques de la côte est du Japon à la suite de l'accident nippon. Il a estimé qu'il fallait cinq ans aux espèces planctonophages pour retrouver les activités radioactives en césium 137 d'avant l'accident et six à quatorze ans pour les espèces carnivores.

Différentes voies de contamination

Quantifier le transfert des radionucléides de l'eau vers le plancton est un défi vu la taille et la diversité des espèces, leur courte durée de vie et leur développement qui dépend des saisons et des aléas subis par la masse d'eau qui les abrite. Mais il est fondamental de s'intéresser à ces organismes car ils sont à la base des chaînes alimentaires. Or leur petite taille leur confère de grandes surfaces d'échange, ce qui conduit une quantité importante de radionucléides, comme le plutonium ou l'américium, à s'y adsorber.

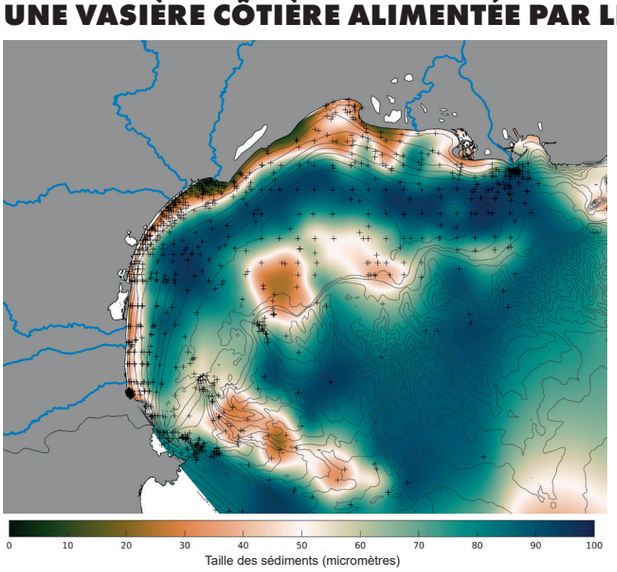
Plus généralement, crustacés et poissons sont plus ou moins contaminés selon l'espèce, leur taille et leur stade de vie, mais aussi selon la température, la saison, la composition chimique de l'eau de mer et la forme physicochimique des radionucléides. À titre d'exemples, l'antimoine et le tritium sont plutôt dissous, alors que le césium, récurrent en situation accidentelle et persistant dans l'environnement, est fortement adsorbé sur les particules en milieu fluvial, mais

Cahier partenaire réalisé avec

ASNR Autorité de sûreté nucléaire et de radioprotection

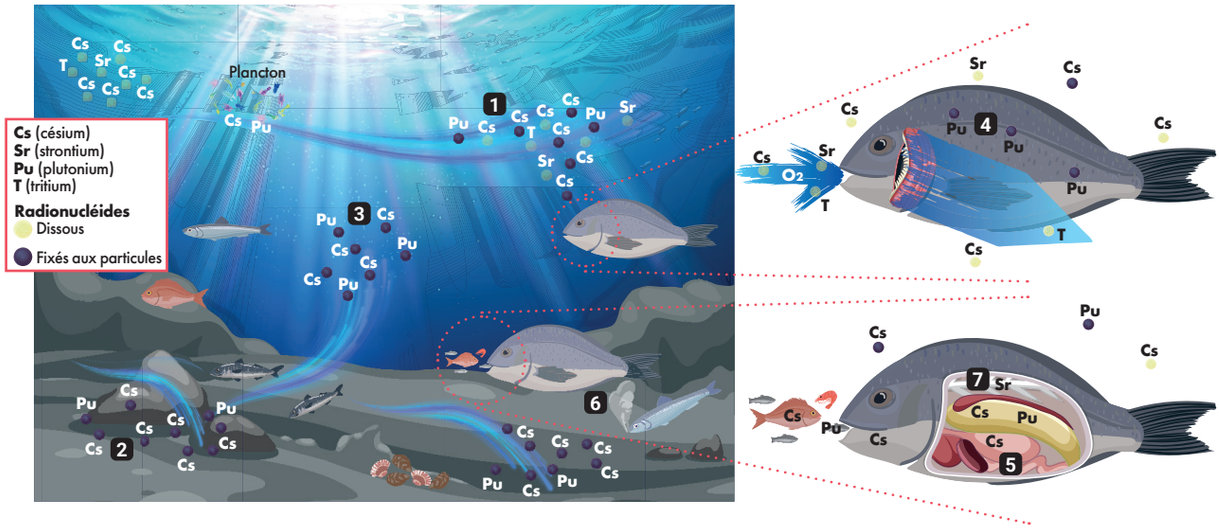
Depuis le 1er janvier 2025, l'Institut de radioprotection et de sûreté nucléaire (IRSN) et l'Autorité de sûreté nucléaire (ASN) se sont réunis pour devenir l'Autorité de sûreté nucléaire et de radioprotection (ASNR).

UNE VASIÈRE CÔTIÈRE ALIMENTÉE PAR LES SÉDIMENTS DU RHÔNE



Outre dans les grands fonds, toujours vaseux, on trouve les sédiments les plus fins (ici inférieurs à 63 micromètres) sur le plateau continental du golfe du Lion entre 40 et 80 mètres de profondeur, de l'embouchure du Rhône jusqu'au cap Creus en Catalogne espagnole. Cette vasière est alimentée, lors des crues et des tempêtes, par les sédiments du Rhône et des petits fleuves côtiers.
Les éléments nutritifs et la matière organique ainsi transportés par les courants d'est en ouest jusqu'au canyon Lacaze-Duthiers, en face de Banyuls-sur-Mer, font de cette zone maritime l'une des plus productives de Méditerranée.
Tous les contaminants associés aux sédiments, radioactifs ou non, sont transportés avec eux.

LA CONTAMINATION DES ORGANISMES MARINS PAR LES RADIONUCLÉIDES



Les radionucléides rejetés en mer sont transportés et dilués par les courants. Selon leurs caractéristiques physicochimiques et celles du milieu marin, certains sont dissous, d'autres fixés sur les particules en suspension (1). Ces particules peuvent se déposer sur le fond (2) puis se remettre en suspension au gré des courants (3). Il est important de connaitre avec précision ces flux qui contaminent les organismes marins via leur peau, l'eau et la nourriture qu'ils ingèrent (zoom). Par exemple, le plutonium est peu susceptible d'être absorbé (à moins de 5%), alors qu'il est facilement adsorbé sur la peau des poissons (4). Le tritium (T) quant à lui s'échange facilement avec les fluides corporels, et est évacué en quelques jours. D'autres radionucléides, tel le césium 137, dont le comportement est analogue au potassium, restent fixés pendant plusieurs semaines sur les muscles et les organes (5).
En se nourrissant de proies ou sur du sédiment contaminé (6), les poissons ingèrent aussi des radionucléides. Certains, comme le césium ou le polonium (radionucléide naturel qui se concentre facilement dans certains organismes marins), sont très facilement absorbés dans l'intestin. Le strontium 90, au comportement physicochimique analogue au calcium, se concentre pour sa part dans le squelette et les écailles et persiste dans les organismes durant des années (7).

se désorbe partiellement en mer. En milieu côtier, il est donc à la fois sous forme particulaire et dissoute, ce qui favorise son transfert vers les organismes marins.
« On distingue deux voies de contamination des organismes marins, plus ou moins importantes selon le radionucléide, détaille Sabine Charmasson *par adsorption à la surface externe des poissons ou par absorption à travers la peau ou encore les branchies ou l'intestin quand l'animal se nourrit d'autres espèces ou de sédiments contaminés».* Concernant l'élimination, outre l'excrétion dans les urines ou les fèces, la persistance des radionucléides dépend de leurs modes de contamination et de leurs caractéristiques physicochimiques.
« Par ailleurs, Fukushima nous a montré que, même si au moment du rejet l'impact est bien plus faible que sur les espèces pélagiques, les organismes benthiques – les invertébrés qui vivent au fond – sont aussi contaminés durablement par l'intermédiaire des sédiments, note la radioécologue. *Mais il existe peu de données les concernant et les mesures sur le terrain sont compliquées. »*
Dans le modèle écotrophique du golfe du Lion, les chercheurs ont modélisé 68 groupes fonctionnels d'espèces benthiques et pélagiques : organismes filtreurs (moules, brouteurs, comme certains poissons ou les oursins), détritivores (qui mangent les détritus dans les sédiments), carnivores, herbivores, ceux qui mangent le plancton, les petits poissons, les gros, etc. La plupart des paramètres à utiliser étaient connus, tirés de la bibliographie, comme l'absorption d'un radionucléide donné par une espèce ou un groupe fonctionnel, son taux d'excrétion, son efficacité d'assimilation... L'ASNR a également précisé le niveau de contamination de certains organismes encore peu étudiés (holothuries, pieuvres, calamars, seiches et crabes) en procédant à des analyses sur des prélèvements effectués par l'Ifremer.
À terme, ce premier modèle, comme ceux qui pourraient être développés sur les onze zones littorales françaises vulnérables aux contaminations radioactives, fournira aux autorités un outil de pilotage de la surveillance et une aide à la décision en cas de contamination. De quoi déterminer où faire les mesures, les organismes à surveiller, les zones de pêche atteintes, prévoir les temps de contamination et les pics de concentration. *« Ces outils constituent de véritables plateformes de modélisation des écosystèmes. Au-delà des radionucléides, ils ouvrent la voie à des études de contamination de l'environnement marin, par d'autres substances comme l'aluminium dans le cadre du développement de l'éolien offshore ou du mercure »,* conclut l'écologue. »

RÉFÉRENCES

- S.Booth *et al.*, An ecopath with Ecosim model for the Pacific coast of eastern Japan : Describing the marine environment and its fisheries prior to the Great East Japan earthquake, *Ecological Modelling*, 2020.
- Thèse M. Belharet, Modélisation numérique du transfert du radiocésium dans les chaînes trophiques pélagiques marines suite à l'accident nucléaire de Fukushima Dai-ichi (côte Pacifique du Japon), 2015.
- Thèse T. Seyer, Modélisation du transfert des radionucléides dans les réseaux trophiques en Méditerranée, 2024.