

La pollution chimique marine

Quelles politiques pour une protection durable de l'océan et des mers côtières ?

Michel Marchand

Résumé Le milieu marin côtier présente une certaine spécificité par rapport aux autres milieux aquatiques : il est à la fois le milieu récepteur ultime des pollutions terrestres et la zone la plus riche biologiquement, et le milieu où se développent de nombreuses activités (pêche et cultures marines, saliculture, tourisme, thalassothérapie). La zone côtière littorale est par conséquent vulnérable aux pollutions chimiques chroniques et sa protection nécessite recherche, surveillance et réglementation. Une double stratégie peut être mise en place : une approche préventive pour éviter la mise sur le marché de substances toxiques pour l'Homme et l'environnement, et une approche rétrospective basée sur des politiques publiques pour la protection et la restauration des milieux aquatiques dégradés.

Mots-clés Milieu marin, pollution chimique, recherche, surveillance, réglementation.

Abstract The coastal marine environment presents some specificity compared to other aquatic environments: it is both the receiving end of pollution on land and the most biologically rich marine area, where are developing many uses (fisheries and aquaculture, salt production, tourism, thalassotherapy). The coastal zone is therefore vulnerable to chronic chemical pollution and its protection requires research, monitoring and regulation. A dual strategy can be put into place: a preventive approach to avoid placing on the market of toxic substances to humans and the environment, and a retrospective approach based on public policies for the protection and restoration of degraded aquatic environments.

Keywords Marine environment, chemical pollution, research, monitoring, regulation.

Les écosystèmes des zones côtières produisent près d'un tiers des biens et services d'origine écologique [1]. Ils subissent aussi de fortes pressions anthropiques qui sont de trois ordres : (i) les pressions liées aux changements globaux, notamment climatiques, qui vont induire des modifications sensibles sur le fonctionnement des écosystèmes, (ii) les pressions liées aux activités continentales, notamment par des apports de contaminants chimiques dans les eaux côtières et (iii) les pressions liées aux activités maritimes, dont les pollutions accidentelles.

La vulnérabilité des zones côtières aux pollutions chimiques chroniques

La menace la plus insidieuse de pollution chimique, la plus permanente pour le milieu marin côtier, vient du continent. Les apports d'hydrocarbures vers le milieu marin proviennent pour 80 % des apports telluriques, les pollutions accidentelles ne représentant qu'une faible fraction à l'échelle globale (il n'en demeure pas moins que l'impact local peut être catastrophique lorsque survient l'accident, les exemples de l'*Amoco Cadiz* et de l'*Erika* en sont une triste illustration). Le milieu marin côtier présente une certaine spécificité par rapport à d'autres systèmes aquatiques : il est à la fois le milieu récepteur ultime des pollutions terrestres et la zone la plus riche biologiquement, et le milieu où se développent de nombreuses activités : pêche, conchyliculture (élevage de coquillages), pisciculture marine, saliculture, tourisme, thalassothérapie...

La pollution chimique peut venir de très loin de l'intérieur des terres. Par exemple, la pollution de l'estuaire de la

Gironde par le cadmium résulte des activités minières et de raffinage des minerais de zinc qui s'est maintenue de 1840 à 1993 sur un site minier du bassin de Decazeville, situé à plus de 200 km en amont de la Garonne. Les apports quotidiens de cadmium, sous-produit de l'hydrométallurgie du zinc, ont contaminé le système fluvial du Lot qui agit à présent comme source de contamination secondaire du système fluvial et estuarien [2]. Les niveaux de concentrations de cadmium dans les huîtres prélevées dans l'estuaire de la Gironde ont atteint plus de 100 mg/kg (exprimé par rapport au poids sec de la chair du coquillage) durant les années 80 et se situent à environ 20 mg/kg dans la décennie actuelle. À titre comparatif, dans le bassin d'Arcachon, non influencé par les eaux de la Gironde, les concentrations en cadmium varient entre 1 et 2 mg/kg. La norme sanitaire de cadmium dans les produits comestibles est de 5 mg/kg (poids sec). Cet exemple montre que l'origine d'une pollution marine peut se situer très en amont de la zone côtière et que les conséquences sanitaires peuvent perdurer plusieurs décennies après la fermeture de ce qui en fut la cause.

Autre motif de préoccupation : le fait de retrouver dans les milieux aquatiques des produits pharmaceutiques et cosmétiques. Ils y sont présents *via* l'excrétion humaine et les rejets des stations d'épuration urbaine. Les premiers travaux ont débuté dans les années 90, notamment aux États-Unis [3], et ont permis d'identifier nombre de substances actives dans les rivières, lacs et eaux souterraines. En France, les premiers travaux, menés notamment par l'Université de Bordeaux, ont été réalisés dans les eaux côtières et estuariennes il y a peu de temps [4]. On identifie des produits antibiotiques, anti-inflammatoires, fongicides, antidépresseurs, analgésiques,

anticancéreux, dont il est encore difficile d'évaluer le réel impact sur la faune et la flore aquatiques.

En mer, on pourrait imaginer que la dilution des apports polluants dans l'immensité océanique puisse être la solution naturelle au problème. À ce niveau d'interrogation, il faut distinguer deux groupes de contaminants chimiques : d'une part les substances chimiques de nature hydrophobe (peu solubles), qui ont tendance à s'accumuler dans les organismes aquatiques (par bioaccumulation) et dans le compartiment sédimentaire de la zone côtière (par adsorption sur le substrat solide), et qui se comportent en terme de stockage, et d'autre part les substances hydrophiles (solubles), transportées à l'état dissous, qui se diluent en zone côtière et se comportent en terme de flux. La forte dilution ne signifie pas automatiquement l'absence d'effets. Au niveau de concentration de 20 ng/L, le tributylétain (TBT), substance active rajoutée dans les peintures marines pour empêcher que des salissures (algues, micro-organismes, mollusques) se fixent sur les coques des navires, perturbe considérablement le métabolisme de croissance des huîtres (apparition de chambrage des coquilles d'huîtres) (figure 1). À 2 ng/L, le TBT, perturbateur endocrinien, est capable de modifier le sexe de certains gastéropodes marins (masculinisation des femelles par effet appelé imposex). Ces quelques exemples montrent bien que la protection du milieu marin côtier nécessite recherche, surveillance et réglementation.



Figure 1 - Chambrage d'huîtres soumises à une exposition au TBT (20 ng/L). Source : Ifremer.

Substances chimiques et contaminants chimiques ?

« L'univers chimique » est vaste : plus de 37 millions de substances chimiques sont recensées, pour l'essentiel des substances issues de la biosynthèse. Environ 100 000 substances chimiques sont produites, importées et utilisées sur le marché européen, et 5 000 d'entre elles (5 %) sont considérées comme dangereuses pour l'Homme et l'environnement.

Les **métaux** font l'objet de nombreuses études pour une compréhension suffisante de leur dynamique et de leur toxicité. Les métaux les plus toxiques sont le mercure, le cadmium, le zinc, le nickel, le plomb, le cuivre et le chrome. Les sources de contamination sont multiples et comprennent les activités minières, la sidérurgie, le transport, l'usage des piles et des batteries, l'industrie des peintures et des colorants, ainsi que l'emploi des engrais phosphorés (cadmium).

Compte tenu de la diversité des molécules, l'étude des **contaminants organiques** représente un chantier très

Abréviations

Les abréviations suivies d'un astérisque* dans le texte sont explicitées ci-dessous :

CMR : cancérigènes, mutagènes, reprotoxiques.

DDT : dichlorodiphényltrichloroéthane.

PBDE : polybromodiphényléthers.

PBT : persistant, bioaccumulable, toxique

PCB : polychlorobiphényles.

PCDD : polychlorodibenzo-*p*-dioxines.

RNO : Réseau national d'observation de la qualité du milieu marin.

important. Très schématiquement, on peut distinguer quatre grands groupes de substances : (i) les **hydrocarbures**, dont les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) sont les plus préoccupants pour les milieux aquatiques ; (ii) les **pesticides**, avec quelques 900 matières actives et un usage d'environ 80 000 tonnes épandues chaque année ; (iii) les **biocides**, qui désignent les substances utilisées dans un cadre non phytopharmaceutique, comme les additifs mis dans les peintures antisalissures marines qui provoquent une contamination non négligeable par différentes matières actives métalliques (cuivre), organométalliques (TBT) ou organique (diuron, ou atrazine comme l'Irgarol 1057), et enfin (iv) les autres **substances organiques de synthèse** qui représentent un grand nombre de substances (solvants chlorés, PCB*, retardateurs de flamme, phtalates, détergents, colorants...) qu'il serait vain de vouloir décrire en quelques lignes.

Il est évidemment impossible d'engager des travaux sur 100 000 substances chimiques présentes sur le marché européen, ni même sur 5 000 substances classées comme dangereuses. Les critères de sélection des contaminants chimiques jugés comme prioritaires pour l'environnement sont basés sur trois propriétés : la persistance (P) définissant des substances persistantes dans l'environnement (ex. les polluants organiques persistants (POP), comme le DDT*), la bioaccumulation (B) définissant leur capacité à s'accumuler dans les organismes aquatiques tels les poissons et coquillages, et la toxicité (T). Ces trois propriétés définissent un ensemble de substances que l'on nomme substances PBT*. Il faut y ajouter les substances qui ont des propriétés cancérigènes, mutagènes et des effets sur le système de reproduction que l'on appelle les substances CMR*. On associe également les perturbateurs endocriniens qui induisent des effets sur le système endocrinien. La priorité d'étude se concentre par conséquent sur les substances PBT + substances CMR + perturbateurs endocriniens.

À ce stade, on voit peu à peu apparaître une double stratégie pour la protection des milieux aquatiques dans un contexte de développement durable : (i) une approche préventive, pour éviter la mise sur le marché de substances toxiques pour l'Homme et l'environnement – démarche qui s'appuie sur la législation et la réglementation sur les produits chimiques, (ii) une approche rétrospective, prenant en considération les situations présentes et définissant des politiques publiques pour la protection et la restauration des milieux aquatiques dégradés.

Approche préventive pour la protection des milieux aquatiques

Les incidences à l'exposition aux produits chimiques ne sont pas anodines et nécessitent des actions de prévention. Adoptée il y a quarante ans, la Directive

européenne 67/548/CEE est le premier texte réglementaire significatif qui définit les conditions de classification des substances chimiques et l'étiquetage des substances dangereuses permettant leur circulation. Un travail d'harmonisation à l'échelle mondiale sur la classification des dangers d'une substance a été réalisé par la suite par l'Organisation de coopération et de développement économiques (OCDE) en 1998, suite à l'une des recommandations de la Conférence de Rio de 1992. Les critères de dangers sont définis selon des procédures standardisées relatives à la toxicité aiguë, la toxicité chronique, la bioaccumulation et la biodégradabilité.

L'étape suivante est apparue durant les années 90, avec un ensemble de textes européens (directives et règlements) imposant une obligation d'analyse du risque chimique pour la protection de l'Homme et de l'environnement : produits phytosanitaires, substances existantes (substances utilisées sur le marché européen avant 1981), substances nouvelles, biocides, produits vétérinaires, médicaments humains. Pour les substances nouvelles, existantes et biocides, les principes adoptés pour l'évaluation du risque chimique ont donné lieu à un guide méthodologique, texte de référence européen publié en 1996 : le *Technical Guidance Document* (TGD). Une seconde version a été publiée en 2003 dans laquelle un chapitre spécifique a été réservé pour l'évaluation du risque chimique en milieu marin [5].

La disparité des réglementations a conduit l'Union européenne à engager une réflexion aboutissant à une législation plus uniforme sur les substances chimiques, produites et importées dans l'espace européen. Le résultat est la Directive européenne REACH qui a été votée avec divers amendements en 2006 pour entrer en vigueur en juin 2007. Le système REACH (« Registration, Evaluation and Authorization of CHemicals ») est applicable aux quelques 100 000 substances chimiques utilisées [6]. Il part du constat du lourd déficit des connaissances des effets d'un très grand nombre de substances (86 %), essentiellement organiques. Seulement 3 % des substances ont été correctement testées et des informations minimales existent pour 11 % d'entre elles. Par contre, pour 65 % des substances, on ne dispose que de très peu de données et aucune information n'est disponible pour 21 % des substances.

Le premier objectif est de centraliser les informations nécessaires dans une base de données communautaire pour l'ensemble des substances produites ou importées à plus de 1 t/an, soit 30 000 substances. Le programme d'enregistrement est échelonné sur des périodes variables selon le volume de production : 3 ans pour les substances produites ou importées à plus de 1 000 t/an, 6 ans pour celles se situant entre 100 et 1 000 t/an et 11 ans pour celles comprises entre 1 et 100 t/an. Le second objectif est de procéder à l'évaluation du risque chimique, en inversant la charge de la preuve. Ce n'est plus à l'autorité publique de déterminer si une substance présente un risque pour la santé humaine et l'environnement, mais à l'industriel ou à l'importateur. Enfin, pour les substances « extrêmement préoccupantes » (substances PBT, CMR, perturbateurs endocriniens), la mise sur le marché nécessite une autorisation, fonction des conditions d'utilisation de la substance, et la recherche de nouvelles substances moins préoccupantes (principe de substitution).

La mise en place du système REACH a donné lieu à de vives controverses. On a ainsi pu assister à une forte activité de lobby de la part de l'industrie chimique européenne (Cefic), française (Union des industries chimiques, UIC) et

américaine (American Chemical Council, ACC) pour dénaturer le projet initial. La controverse a porté notamment sur le coût d'un tel programme. La seule industrie chimique française a estimé que REACH coûterait 28 milliards d'euros (Mds €) sur 10 ans et la perte de 360 000 emplois. Le coût global estimé par la Commission européenne est plus modeste : 2,8 Mds € étalé sur 11 ans, soit 0,05 % du chiffre d'affaires de l'industrie chimique européenne (417 Mds €). Le gain en terme de santé publique a été évalué à 50 Mds € sur 30 ans ; le gain pour l'environnement est par contre impossible à chiffrer.

La mise en œuvre du programme REACH, à partir de juin 2007, suscite des réactions très partagées. Le projet initial a été largement modifié, notamment sous la pression de l'industrie chimique, mais le compromis trouvé à ce stade est estimé satisfaisant dans le contexte européen, marqué par la priorité donnée à la compétitivité économique et par la réticence des nouveaux membres de l'Union européenne pour renforcer les normes environnementales.

Approche rétrospective pour la protection des milieux aquatiques

La démarche rétrospective se traduit par une politique volontariste pour restaurer la qualité des milieux aquatiques dégradés. Différentes conventions régionales ont été signées à partir des années 70 pour la protection du milieu marin : Convention d'Helsinki pour la mer Baltique, Convention OSPAR pour l'Atlantique Nord-Est, Convention de Barcelone pour la Méditerranée et Convention de Bucarest pour la mer Noire. Chacune de ces conventions développe différentes stratégies liées aux problèmes rencontrés, mais toutes mettent en œuvre une stratégie « substances dangereuses », ce qui montre bien l'importance accordée aux apports de substances chimiques dangereuses en mer.

Plus en amont, on retrouve les mêmes préoccupations. La Directive européenne 76/464/CEE est le premier texte européen concernant la pollution causée par certaines substances dangereuses déversées dans les milieux aquatiques de la Communauté européenne. Une liste de 132 substances chimiques considérées comme prioritaires a été établie et les États membres devaient prendre les mesures appropriées pour éliminer ou réduire (selon le degré de dangerosité) la pollution des eaux par ces substances.

Mais le texte fondamental actuel est la Directive Cadre sur l'eau (2000/60/CE) qui constitue le cadre réglementaire de la politique de l'eau au niveau communautaire. La Directive concerne l'ensemble des milieux aquatiques : eaux souterraines, eaux de surface continentales (lacs et rivières), eaux de transition (estuaires et lagunes) et eaux marines côtières (s'étendant à 1 mille du trait de côte). Le texte est particulièrement ambitieux ; il impose de préserver les milieux aquatiques non dégradés (milieux de référence) et d'atteindre d'ici 2015 un « bon état » pour les milieux aquatiques moyennement ou fortement dégradés. Le « bon état » englobe l'état écologique et l'état chimique des masses d'eaux (unité élémentaire de surveillance). Le nombre de masses d'eaux pour le territoire métropolitain est de l'ordre de 1 500 pour les eaux continentales et de 200 pour les eaux marines côtières et les eaux de transition. Les paramètres biologiques qui participent à l'évaluation de l'état écologique des masses d'eau côtières sont (i) la composition, l'abondance et la biomasse du phytoplancton ; (ii) la composition et l'abondance de la flore aquatique

(macro-algues, angiospermes); (iii) la composition et l'abondance de la faune benthique invertébrée. Le bon état chimique est défini sur la base du non-dépassement de normes de qualité environnementales, elles-mêmes définies à partir de résultats de tests écotoxicologiques pour la protection de l'environnement (espèces vivant en pleine eau, espèces vivant au contact du sédiment, oiseaux et mammifères pouvant être touchés par l'empoisonnement secondaire lié à l'accumulation de toxiques le long de la chaîne alimentaire) et toxicologiques pour la protection de la santé humaine (consommation des produits comestibles, poissons et coquillages, consommation d'eau potable pour les eaux douces). La valeur la plus contraignante des cinq critères indiqués ci-dessus constitue la norme de qualité environnementale (NQE) qui définit la valeur seuil entre le bon état et le mauvais état chimique [7]. Au total, 41 substances jugées comme prioritaires doivent faire l'objet d'un contrôle dans les masses d'eau pour définir le bon ou le mauvais état chimique. On retrouve différents groupes de contaminants chimiques : métaux, solvants chlorés, hydrocarbures aromatiques, pesticides, biocides, chlorobenzènes, substances diverses (alkylphénols, phtalates, PBDE*, chloroalcanes à chaîne courte, hexachlorobutadiène). Les programmes de surveillance sont en train de se mettre en place, à l'échelle des districts hydrographiques dont la gestion est confiée aux agences de l'eau.

La dernière étape en cours d'élaboration est l'adoption d'une Directive « Stratégie pour le milieu marin ». Cette Directive vise à être le pilier environnemental de la politique maritime européenne des mers d'Europe, divisée en écorégions (figure 2). Les motivations tiennent au constat de la dégradation et de l'appauvrissement considérable de la biodiversité marine, liés à la contamination du milieu marin par des substances dangereuses, aux conséquences de la pêche commerciale et aux effets du changement climatique. La démarche en cours vise à évaluer l'état initial des eaux marines, à définir un bon état écologique et les objectifs environnementaux à atteindre, à mettre en place des programmes de surveillance et de mesures pour restaurer la qualité des milieux dégradés et enfin un calendrier. La stratégie marine européenne est ambitieuse au plan géographique ; elle s'étend jusqu'aux limites des zones économiques exclusives (ZEE) des États, c'est-à-dire à

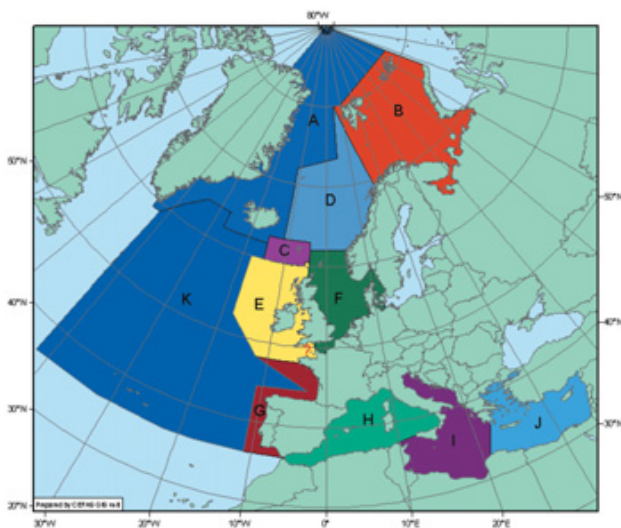


Figure 2 - Écorégions marines définies pour la Directive « Stratégie pour le milieu marin ».

200 milles marins des côtes. La qualification du bon état se réfère à un certain nombre d'éléments physiques, biologiques (pression de la pêche sur les stocks par ex.) et à la contamination chimique qui est un élément parmi d'autres, pouvant être qualifiée par les apports contaminants en provenance de l'atmosphère, du continent (apports telluriques) et de la navigation maritime (risques de pollutions accidentelles, rejets opérationnels des eaux de ballasts ou de nettoyage des cuves).

Surveillance

L'état de la qualité du milieu marin, les résultats attendus du bénéfice des politiques publiques en matière de protection de l'environnement ou de restauration des milieux dégradés nécessitent la mise en place de programmes de surveillance. L'exemple du programme de surveillance RNO*, créé en 1974 par le ministère chargé de l'environnement et coordonné par l'Ifremer (Institut français de recherche pour l'exploitation de la mer), a démontré comment une exigence de qualité pouvait aboutir à l'acquisition de connaissances sur la distribution spatiale des contaminants chimiques dans les zones côtières et sur les évolutions temporelles à long terme [8]. La surveillance des contaminants chimiques concerne les substances bioaccumulables, de nature hydrophobe (métaux, HAP, PCB, insecticides chlorés), mesurées dans des matrices intégratrices (sédiments et coquillages). Les mollusques bivalves, huîtres et moules, répartis sur environ 80 points de prélèvements (dont 8 dans les DOM) sont utilisés comme indicateurs quantitatifs de contamination. Le principe de l'utilisation d'organismes aquatiques bioaccumulateurs remonte aux années 70, avec la mise en place d'un programme de surveillance aux États-Unis, connu sous le nom de « Mussel Watch » [9]. La fiabilité des résultats obtenus est contrôlée par des programmes assurance-qualité, notamment le programme européen QUASIMEME (« Quality assurance for information from marine environmental monitoring in Europe »). Cette exigence permet d'avoir une vision de l'état de la contamination chimique le long du littoral, non seulement à l'échelle nationale, mais également européenne (exemple des PCB sur les figures 3 et 4).

L'analyse des tendances temporelles sur des séries à long terme, acquises directement ou par approche rétrospective sur des échantillons archivés, permet de relier les observations des concentrations à l'évolution des

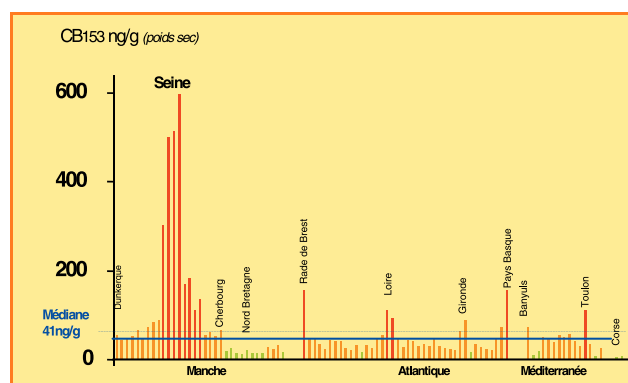


Figure 3 - Contamination du littoral par les PCB (analyses du congénère CB 153 dans les moules et les huîtres).
Source : A. Abarnou, Ifremer.

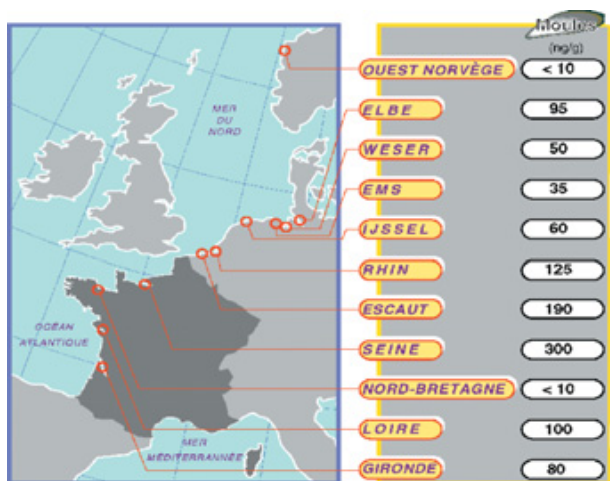


Figure 4 - Contamination des PCB dans les estuaires européens (analyses du congénère CB 153 dans les moules).
Source : A. Abarnou, Ifremer.

apports au gré des changements des pratiques industrielles ou de réglementations publiques. Ces analyses permettent également de mesurer les capacités de restauration naturelle des milieux naturels lorsque les apports contaminants ont cessé ; ces dynamiques de restauration se mesurent en terme de décennies comme cela a pu être constaté par exemple sur la contamination du DDT (interdit depuis 1972) dans le bassin d'Arcachon (figure 5). Dans l'ensemble, on observe une décroissance quasi générale pour l'ensemble des contaminants organiques, exceptée pour les HAP. La similitude des tendances en France et aux États-Unis, issues des programmes RNO et « Mussel Watch », est ainsi observée, que ce soit pour les métaux (principalement le cadmium) ou pour les composés organochlorés comme le DDT et le lindane.

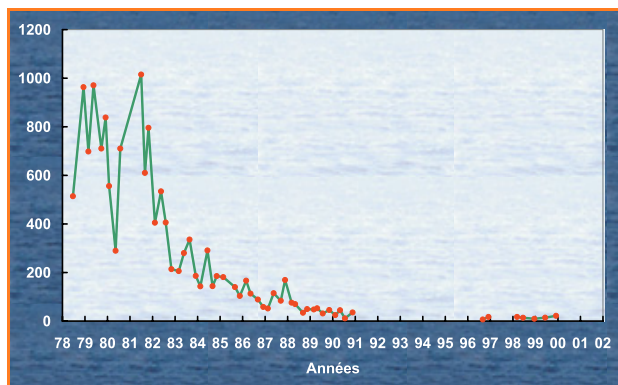


Figure 5 - Évolution des résidus du DDT dans les huîtres du bassin d'Arcachon (concentrations exprimées en ng/g, poids sec).
Source : RNO.

Les nouvelles politiques réglementaires européennes, comme la Directive Cadre sur l'eau (DCE), mettent en place non plus des systèmes de surveillance pérennes de la contamination chimique, mais des dispositifs de contrôle pour évaluer l'état chimique (bon ou mauvais) des masses d'eau, sur la base de valeurs seuils représentant des normes de qualité environnementale. Ce changement d'objectif constitue un tournant pour la surveillance des milieux aquatiques. Il conviendrait de maintenir un réseau pérenne d'observation de l'évolution des niveaux de contamination chimique par rapport aux conséquences de la dérive

climatique qui peut modifier les apports contaminants vers les zones côtières et océaniques.

Recherche

La compréhension de l'impact des contaminants chimiques dans les milieux aquatiques nécessite deux approches simultanées et complémentaires : le devenir des contaminants chimiques et de leurs effets. Le mercure constitue un exemple complexe du devenir d'un contaminant chimique dans l'environnement. La méthylation du mercure dans les milieux aquatiques par des processus naturels bactériens est l'élément clé pour comprendre la bioaccumulation de cet élément le long des chaînes trophiques aquatiques et l'expression de sa toxicité pour l'ensemble des êtres vivants, y compris l'espèce humaine. L'encadré 1 montre l'exemple de la pollution du mercure en Guyane française, liée à l'activité des chercheurs d'or, qui a fait l'objet d'un programme de recherche pluridisciplinaire, lancé conjointement par le CNRS et l'Institut de veille sanitaire (InVS) [10]. Un second exemple de pollution, principalement due à l'activité économique et agricole, est présenté dans l'encadré 2.

La recherche actuelle permet difficilement de répondre avec certitude à la question posée des effets à long terme de la contamination chimique sur les organisations biologiques complexes (populations, communautés, écosystèmes). Elle dégage toutefois des connaissances permettant d'élaborer des outils de gestion des milieux aquatiques. Nous avons vu précédemment que l'évaluation du risque chimique est

Encadré 1

La pollution au mercure en Guyane

Le mercure est un élément naturel qui est présent dans l'environnement essentiellement sous trois formes chimiques : le mercure élémentaire (Hg^0), le mercure inorganique oxydé (Hg^{II}) et différents complexes organomercuriels (R-Hg) dont le méthylmercure (CH_3Hg) est la forme la plus abondante et la plus toxique. La pollution au mercure en Guyane résulte de la recherche de l'or, par les activités d'orpaillage (le mercure élémentaire (Hg^0) est utilisé en tant qu'agent d'amalgamation de l'or) et par une forte érosion des sols alluvionnaires très anciens du bassin amazonien qui sont naturellement riches en mercure inorganique (Hg^{II}). Les travaux réalisés notamment sur des stations localisées en amont et en aval du barrage hydroélectrique de Petit-Saut (360 km^2) montrent des différences de comportement biogéochimique du mercure. En amont du barrage, les concentrations de mercure total dans les eaux sont très faibles : 30 ng/L dans les échantillons non filtrés, 5 ng/L dans la fraction dissoute. La fraction de méthylmercure ne représente qu'environ 1 à 1,7 % du mercure total, soit des valeurs mesurées entre 0,03 et 0,05 ng/L. Sur le site de retenue des eaux du barrage, les conditions anoxiques de la colonne d'eau, au-delà de 4 à 5 m de profondeur, sont à l'origine d'une production beaucoup plus importante de méthylmercure, induite par l'activité des bactéries sulfatoréductrices. Juste en aval du barrage, les concentrations de méthylmercure sont beaucoup plus importantes, en moyenne de $0,5 \text{ ng/L}$, soit 30 % du mercure total. C'est cette fraction, considérée comme la plus biodisponible, qui conduit à la bioamplification du mercure dans les poissons. Le facteur de bioconcentration dans les poissons (exprimé par rapport à leur poids frais) est de l'ordre de 50 000 par rapport au mercure total, et de 5 000 000 s'il est estimé par rapport au seul méthylmercure. Il s'ensuit que les concentrations maximales de mercure dans les poissons des cours d'eau guyanais se situent entre 0,8 et 2,0 mg/kg (poids frais), concentrations qui dépassent la norme sanitaire fixée par l'Organisation mondiale de la santé (OMS) à $0,5 \text{ mg/kg}$. La contamination par voie alimentaire, par la consommation des produits de la pêche, représente une exposition à caractère chronique qui concerne potentiellement l'ensemble de la population guyanaise et plus largement celle du bassin amazonien.

Encadré 2

L'estuaire de la Seine étudié par l'Ifremer

La partie aval de l'estuaire de la Seine, situé à l'exutoire d'un bassin versant, concentre 16 millions d'habitants, 40 % de l'activité économique et 30 % de l'activité agricole [11]. Une telle intensité des activités humaines entraîne de facto une forte contamination de l'estuaire (la plus importante des grands estuaires français) par de nombreuses substances chimiques. Un tel « cocktail » de contaminants chimiques peut avoir des effets multiples sur les organismes aquatiques. Deux types d'effets doivent être soulignés du fait de leurs conséquences : les effets cancérigènes, pouvant induire des mutations sur le matériel génétique, et les effets endocriniens, agissant sur le système hormonal des espèces. C'est dans un tel contexte qu'une étude Ifremer [12] a été réalisée pour tenter de mettre en évidence les effets génotoxiques et cancérigènes chez la limande, poisson plat, soumis à l'exposition de la contamination chimique, notamment par les PCB, dioxines et furanes (PCDD/F) et hydrocarbures polycycliques aromatiques (HAP). Les niveaux de contamination ont été comparés entre la partie aval de l'estuaire de la Seine et la baie de Somme, en différenciant mâles et femelles, adultes et juvéniles. Parallèlement aux analyses chimiques, plusieurs types de lésions à l'ADN ont été mesurés en tant que marqueurs biologiques de l'expression de la génotoxicité : les adduits à l'ADN (fixation à l'ADN d'une molécule chimique) et les cassures de brins de l'ADN. La recherche de tumeurs était également réalisée par examen histopathologique du foie des poissons échantillonnés. Les niveaux de contamination des PCB et PCDD/F sont bien plus élevés en baie de Seine qu'en baie de Somme et se retrouvent dans les tissus des limandes échantillonnées, principalement dans le foie. Contrairement aux autres contaminants mesurés, les HAP sont faiblement détectés dans le poisson, non parce qu'ils sont absents du milieu, mais parce qu'ils sont biotransformés *in vivo* et les métabolites hydroxylés formés se retrouvent dans la bile de poisson [13]. Parallèlement aux analyses chimiques, la présence de différents types de lésions à l'ADN est démontrée, ce qui témoigne de l'exposition des organismes à des substances génotoxiques présentes dans le milieu naturel. Malgré les dommages à l'ADN, le pourcentage d'individus présentant des lésions cancéreuses reste faible (1,2 %). L'analyse statistique des données obtenues en chimie et biologie montre l'existence d'une corrélation positive et significative entre le niveau de cassures de brins de l'ADN et la concentration en PCB et en PCDD/F dans la limande. Le niveau d'adduits à l'ADN est plutôt corrélé avec la présence des HAP, notamment avec la concentration en fluoranthène dans le foie du poisson. Les conséquences à long terme de tels effets sur les populations de limande sont difficilement prévisibles, d'autant que d'autres facteurs de stress, comme les aménagements physiques, une pêche trop intensive ou l'évolution climatique, peuvent également jouer un rôle significatif sur le cycle de vie de l'espèce et donc sur la stabilité ou l'évolution des stocks.

devenue une obligation réglementaire avant la mise sur le marché de substances nouvelles. Le *Technical Guidance Document* (TGD) est le document méthodologique européen de référence, qui a été adopté par la Commission OSPAR comme outil méthodologique pour l'évaluation du risque chimique en milieu marin. Une telle approche méthodologique nécessite d'être validée en milieu naturel pour estimer sa pertinence pour les gestionnaires de l'environnement. Rappelons que l'expertise (et donc ses outils) fait dorénavant partie de la mission des chercheurs dans le cadre de la nouvelle loi sur la recherche. La caractérisation du risque doit pouvoir être confrontée à la vérité terrain, située à deux niveaux, celui de la validation écotoxicologique (santé des individus) et de la validation écologique (santé des écosystèmes). Cette orientation nécessite une forte interaction entre les chercheurs. Les travaux interdisciplinaires sont en même temps un excellent moyen pour faciliter le rapprochement des scientifiques travaillant sur la « biogéochimie » des contaminants et « l'écotoxicologie ».

Conclusions

Compte tenu des incertitudes existantes, la surveillance du milieu marin constitue un enjeu essentiel en matière de gestion des milieux aquatiques. Il convient de distinguer les termes « surveillance » et « contrôle ». La « surveillance » permet d'évaluer l'évolution spatio-temporelle de la contamination chimique et les données acquises sur des séries à long terme d'échantillons (plusieurs décennies) constituent des données à caractère patrimonial, le programme RNO en est un bon exemple. Le « contrôle » se réfère au dépassement ou non d'une valeur seuil (norme de qualité environnementale, NQE) pour qualifier l'état chimique d'une masse d'eau et la mise en œuvre d'un tel programme ne vise pas à connaître *a priori* le niveau réel de la contamination du milieu.

Dans un contexte de développement durable, le préventif doit primer sur le curatif. La protection de l'océan et des mers côtières, comme la protection de la santé humaine, nécessite des politiques préventives ambitieuses dont le système REACH constitue aujourd'hui un jalon essentiel amené à évoluer dans les années futures.

Références

- [1] Costanza *et al.*, The value of the world's ecosystem services and natural capita, *Nature*, **1997**, 387, p. 253.
- [2] Blanc G. *et al.*, Le cadmium dans le Lot et la Garonne : sources et transport, *Hydroécologie appliquée*, **2006**, 15(1-2), p. 19.
- [3] Kolpin D.W. *et al.*, Pharmaceuticals, hormones and other organic wastewater contaminants in US streams, 1999-2000: a national reconnaissance, *Environm. Science and Technology*, **2002**, 36, p. 1202.
- [4] Casellas C., Risques écologiques et sanitaires des résidus de médicaments dans les eaux, Colloque Hydrosociétés, Montpellier, 16-17 juin 2005, Actes du colloque publiés dans *Environnement, Risques & Santé* (ERS), **2006**, 5(4), p. 225.
- [5] Marchand M., Tissier C., *Analyse du risque chimique en milieu marin*, Éditions Ifremer, **2005**.
- [6] Weill C., REACH : enjeux et perspectives, Institut du développement durable et des relations internationales (IDDRI), Synthèses n° 11 (Entreprise et biens publics), **2006**, <http://www.iddri.org>.
- [7] James A. *et al.*, Les normes de qualité environnementale (NQE), outils d'évaluation du bon état chimique, *Bulletin RNO, Surveillance du milieu marin*, Éditions Ifremer et Ministère de l'Écologie et du Développement durable, **2006** (document téléchargeable sur <http://www.ifremer.fr/envlit/surveillance/rnopublis.htm>).
- [8] Claisse D. *et al.*, Lignes de base : les contaminants chimiques dans les huîtres et les moules du littoral français, *Bulletin RNO*, Éditions Ifremer et Ministère de l'Écologie et du Développement durable, **2006** (document téléchargeable sur <http://www.ifremer.fr/envlit/surveillance/rnopublis.htm>).
- [9] Golberg *et al.*, The mussel watch, *Environmental Conservation*, **1978**, 5, p. 101.
- [10] Boudou A. *et al.* : a) Les chercheurs d'or et la pollution par le mercure en Guyane française : conséquences environnementales et sanitaires », *Environnement, Risques & Santé* (ERS), **2006**, 5(3), p. 167 ; b) Chercheurs d'or et contamination par le mercure des systèmes aquatiques continentaux de Guyane – risques à l'égard des populations humaines, *Hydroécologie Appliquée*, **2006**, 15, p. 1.
- [11] Dauvin J.C., L'estuaire de la Seine : un espace fortement aménagé, Estuaires nord-atlantiques : problèmes et perspectives, *Bulletin spécial Seine-Aval*, GIP Seine-Aval, sept. **2006**, p. 27 (<http://ftp-sa.crihan.fr/webGIPSA>).
- [12] Akcha F. *et al.*, Relation entre la contamination chimique de l'estuaire de la Seine et les effets génotoxiques et cancérigènes chez la limande. Étude financée par l'Agence de l'eau Seine Normandie, *Rapport Ifremer*, Centre de Nantes, **2004**.
- [13] Budzinski H. *et al.*, Link between exposure of fish (*Solea solea*) to PAHs and metabolites: application to the Erika oil spill, *Aquatic Living Resources*, **2004**, 17, p. 329.



Michel Marchand

est responsable du Programme « Surveillance et évaluation de l'état des eaux littorales », Ifremer*.

* Centre Ifremer de Nantes, Rue de l'île d'Yeu, BP 21105, 44311 Nantes Cedex. Courriel : michel.marchand@ifremer.fr