



LES

Rencontres

DE L'ONEMA

Synthèse

La contamination chimique des milieux aquatiques

Outils et méthodes
pour le diagnostic et l'action

SYNTHÈSE DU SÉMINAIRE SURVEILLER,
ÉVALUER ET RÉDUIRE LES CONTAMINATIONS
CHIMIQUES DES MILIEUX AQUATIQUES
DES 17 ET 18 JUIN 2013

Laurent Basilico, Pierre-François Staub et Olivier Perceval

La contamination chimique des milieux aquatiques

Outils et méthodes pour le diagnostic et l'action

*SYNTHÈSE DU SÉMINAIRE SURVEILLER,
ÉVALUER ET RÉDUIRE LES CONTAMINATIONS
CHIMIQUES DES MILIEUX AQUATIQUES
DES 17 ET 18 JUIN 2013*

Laurent Basilico
Pierre-François Staub
et Olivier Perceval



Le séminaire Surveiller, évaluer et réduire les contaminations chimiques des milieux aquatiques a été organisé par l'Onema et l'Ineris. Il s'est tenu à Paris, 17 et 18 juin 2013.

Cette synthèse est consultable sur le site de l'Onema (www.onema.fr, rubrique Publications) et sur le site de l'Ineris (www.ineris.fr). Elle est référencée sur le portail national Les documents techniques sur l'eau (www.documentation.eaufrance.fr).

Contacts

*Pierre-François Staub,
Chargé de mission chimie des milieux aquatique
Direction de l'action scientifique et technique
Onema
pierre-francois.staub@onema.fr*

*Christine Feray
Responsable de la mission Eau
Ineris
christine.feray@ineris.fr*

Eaux usées des collectivités, rejets des installations industrielles ou de l'agriculture intensive... chaque jour, les activités humaines dispersent une grande variété de contaminants chimiques dans les milieux naturels. Les eaux de surface et les nappes phréatiques sont particulièrement affectées par ces pollutions ponctuelles ou diffuses. Au cours des dernières décennies, et plus encore depuis la mise en œuvre de la directive cadre sur l'eau de 2000, la surveillance, l'évaluation et la réduction de la contamination chimique des eaux se sont imposées en Europe comme des enjeux majeurs en vue de la préservation des écosystèmes aquatiques et de la santé humaine.

Face à la multiplicité des substances polluantes, face à la complexité de leurs effets sur les écosystèmes et le vivant, gestionnaires et acteurs de l'eau expriment un besoin croissant de connaissances, d'outils et de méthodes opérationnelles : Comment mieux identifier les sources polluantes, comment réduire leurs émissions ? Comment relier la présence des polluants aux impacts écologiques constatés, et améliorer le diagnostic de l'état des eaux ? Enfin, comment identifier les substances «émergentes» les plus préoccupantes pour œuvrer, dès aujourd'hui, à leur encadrement et à l'atténuation de leurs impacts ?

En France, depuis cinq ans, ces questions ont fait l'objet d'un effort R&D sans précédent à la faveur du plan national *Micropolluants 2010-2013* et de plusieurs plans d'action ciblés : PCB, produits phytosanitaires, résidus de médicaments, assainissement collectif... Organisé par l'Onema et l'Ineris, le séminaire national des 17 et 18 juin 2013 a permis une large restitution de ces travaux. Il a rassemblé à Paris plus de 200 participants – gestionnaires, scientifiques, élus, associations, experts, animateurs de contrats de rivière... – pour un état des lieux des méthodes et outils disponibles, des actions en cours et des enjeux de recherche actuels. Le présent document en livre une synthèse.

Sommaire

Introduction	06
Éclairage - <i>Connaissances et outils existants : l'information en quelques clics</i>	10
I – Connaissance et réduction des pollutions : agir à la source, maîtriser les transferts de micropolluants	
1.1 – Des pollutions multi-sources : indispensable priorisation.....	14
1.2 – Transferts d'eaux polluées au sein de l'espace urbain : beaucoup reste à faire.....	16
1.3 – Eaux usées des collectivités : des leviers pour un meilleur assainissement	19
1.4 – Rejets aqueux des sites industriels : une vigilance accrue.....	22
2 – Contamination des milieux et impacts : améliorer le diagnostic	
2.1 – Mesurer les concentrations : l'apport des échantillonneurs passifs ...	28
2.2 – De la contamination aux impacts : vers des valeurs seuils plus représentatives	31
2.3 – Contaminants métalliques : cibler la part biodisponible	34
2.4 – Contamination par les PCB : des connaissances nouvelles.....	38
Éclairage - <i>Eaux souterraines et salinisation : un impact limité</i>	43
3 – Nouvelles substances, nouveaux outils : préparer l'avenir	
3.1 – Identifier et surveiller les substances à enjeux : une démarche itérative.....	46
3.2 – Substances émergentes dans les masses d'eau : premier état des lieux	48
3.3 – Des outils biologiques novateurs pour la surveillance et le diagnostic	53
Éclairage - <i>Identification des perturbateurs endocriniens : une méthode bio-analytique</i>	63
Conclusion	64
Références bibliographiques	68

Introduction

Depuis le milieu du XIX^e siècle, les activités humaines ont produit une très grande variété de molécules chimiques, utilisées pour l'industrie, l'agriculture, la métallurgie, les transports, les biens de consommation, la médecine, la construction ou encore l'électronique. À l'échelle mondiale, près de 65 millions de substances sont enregistrées dans la base de données de l'*American Chemical Society*, et 100 000 d'entre elles sont ou ont été produites de manière industrielle. Libérées dans l'atmosphère ou les sols, transportées par les réseaux d'assainissement, ces substances et leurs dérivés se retrouvent pour bonne part, ou par ruissellement ou infiltration, dans les cours d'eau, les nappes phréatiques, jusqu'aux eaux littorales.

Une présence généralisée des micropolluants dans les eaux françaises

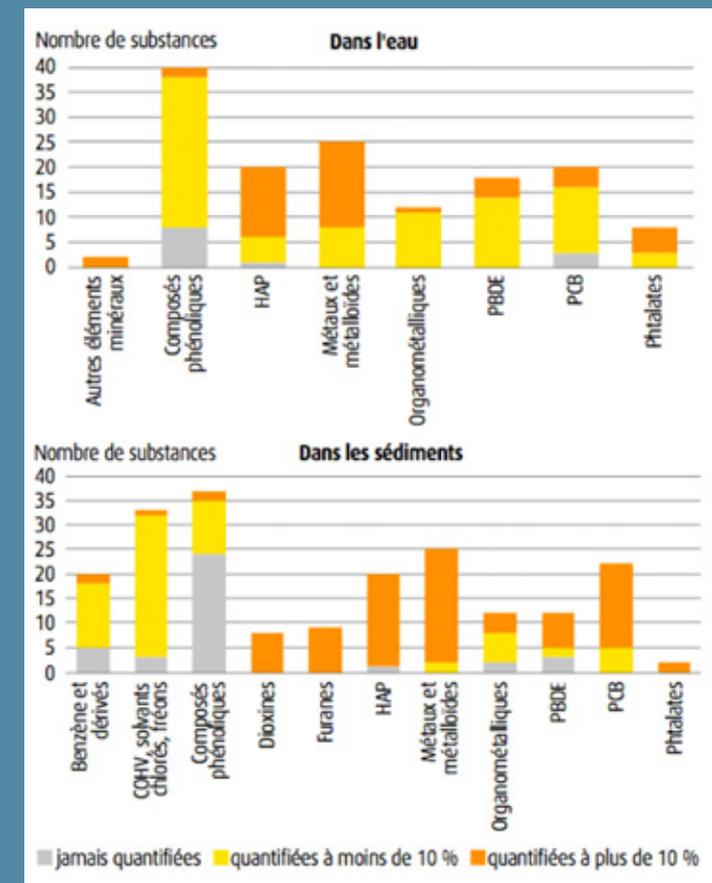
En France, le *bilan de présence des micropolluants dans les milieux aquatiques*, publié en 2009 par le Ministère en charge de l'écologie, fait état d'une présence quasi-généralisée des micropolluants recherchés dans les eaux douces de métropole et d'outre-mer. Au cours des années 2007-2009, près de 950 micropolluants ont été recherchés dans quelques 2 880 stations de suivi réparties sur le territoire national :

cours d'eau, plans d'eau, eaux souterraines. Les contaminants étaient également recherchés dans les sédiments des eaux superficielles. Des pesticides ont ainsi été détectés dans 91% des points de suivi en cours d'eau (et dans 21% à des concentrations totales supérieures à 0,5 µg/l). Sur les 516 pesticides recherchés, 413 molécules ont été retrouvées au moins une fois dans les cours d'eau. Les plus fréquemment rencontrés sont le glyphosate, un herbicide d'usage très répandu, et l'AMPA, son produit de dégradation, présents respectivement dans le quart et la moitié des points de mesure en cours d'eau. Des pesticides ont aussi été retrouvés dans 75% des points de suivi en plan d'eau et dans 70% des points de suivi des eaux souterraines. Hors pesticides, plus de 400 contaminants, répartis dans une vingtaine de familles, ont été recherchés dans les eaux superficielles et 300 dans les eaux souterraines. La présence de métaux et de métalloïdes, d'origine en partie naturelle, est généralisée. Les hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP), générés lors de diverses combustions (transports, incinération, chauffage) sont fréquemment retrouvés dans les cours d'eau de métropole. Des polluants persistants tels que les polybromodiphényl-éthers (PBDE), utilisés dans l'industrie comme retardateurs de flamme, ou les polychlorobiphényles (PCB),

produits de 1930 à 1970 pour diverses applications en électricité, sont présents dans les sédiments de nombreux cours d'eau. Ces derniers contiennent également des composés phénoliques, des dioxines et des furanes, ou encore des

phtalates. La contamination des nappes souterraines, moins importante en valeur absolue, est marquée par la présence régulière de solvants chlorés et d'hydrocarbures dissous.

Figure 1.
Nombre de substances quantifiées et non quantifiées, hors pesticides, dans les cours d'eau de métropole. (Source : Agences de l'eau, 2010 ; traitement SOEs, 2011)



Tous ces contaminants chimiques, également désignés sous le terme de «micropolluants», sont susceptibles d'avoir des effets toxiques ou d'engendrer des nuisances dans les milieux aquatiques, même à de très faibles concentrations dans l'eau ou les sédiments – de l'ordre du µg/l ou du ng/l. Leur présence diffuse ou ponctuelle dans les rivières, les plans d'eau ou les eaux souterraines, constitue une pression majeure pour ces milieux : elle entraîne des conséquences parfois spectaculaires sur la biodiversité aquatique et affecte la qualité de la ressource en eau, induisant un risque pour la santé humaine.

Une prise en compte croissante par les politiques européennes et nationales

Depuis les épisodes de mortalités piscicoles aigües observés sur nombre de cours d'eau européens pendant les années 1970 et 1980, une prise de conscience s'est manifestée dans les opinions publiques quant à la nécessité de reconquérir et de préserver la santé des milieux aquatiques. La prise en compte de cet impératif par les politiques publiques européennes s'est traduite par l'adoption de la directive cadre sur l'eau et de ses directives filles, qui structurent depuis 2000 l'effort communautaire de **surveillance et de protection des milieux aquatiques**. Celle-ci a notamment introduit la notion de «bon état» chimique et écologique des masses d'eau, et fait de son atteinte un objectif réglementaire. Sa mise en œuvre exige,

dans les États-membres, un effort de R&D soutenu dans de nombreux domaines : de la chimie environnementale à la modélisation des transferts dans les bassins versants, de l'écotoxicologie à l'ingénierie de l'assainissement. L'évaluation de l'état chimique des masses d'eau repose en particulier sur la recherche et la quantification systématiques, dans toutes les stations des réseaux de surveillance, des «substances prioritaires» (liste étendue de 33 à 45 substances en avril 2013, dont 21 sont identifiées comme «substances dangereuses prioritaires»).

Cet effort de surveillance et de restauration de l'état chimique des milieux est complété par un dispositif visant à **encadrer la mise sur le marché des substances**. Le règlement européen REACH organise depuis 2006 l'évaluation du risque et l'autorisation – ou la restriction – de tous les produits chimiques fabriqués ou utilisés dans l'Union. Des réglementations ciblées ont également été adoptées sur les produits phytosanitaires (1107/2009/UE), les biocides (528/2012/UE) et les médicaments vétérinaires ou humains (Directives 2001/82 et 2001/83/CE).

Le troisième pilier de la politique communautaire concerne enfin **la prévention et la réduction des pollutions**. Il est notamment porté par la directive (2010/75/UE) «relative aux émissions industrielles» et par le règlement 166/2006 qui impose aux exploitants des installations concernées (sites industriels, stations de traitement des eaux usées) la déclaration annuelle de leurs émissions polluantes et déchets.

L'ensemble de ces dispositions, doublées au cours des trois dernières décennies de politiques volontaristes de la part de divers secteurs de l'économie (industrie, agriculture, collectivités) et de la prise de conscience citoyenne, ont d'ores et déjà produit des résultats visibles. C'est le cas notamment en termes de réduction des apports au milieu de certains contaminants (anciens pesticides comme le DDT, les triazines ou le Lindane; PCB; polluants raréfiés du fait de l'utilisation de technologies propres dans l'industrie ou de la mise au norme des stations d'épuration urbaines, etc...).

Un effort de recherche sans précédent en France

En France, au cours des cinq dernières années, plusieurs plans d'action complémentaires ont été lancés par les pouvoirs publics, en lien avec le calendrier de la DCE mais avec des objectifs qui dépassent souvent l'impératif réglementaire. Le Plan d'action national pour lutter contre la pollution des milieux aquatiques, ou **Plan micropolluants 2010-2013**, piloté et financé par le Ministère en charge de l'écologie, a impulsé 22 actions opérationnelles et de recherche, selon trois grands axes de travail : réduire les émissions à la source, améliorer le diagnostic de l'état des eaux et enfin acquérir de nouvelles connaissances scientifiques, notamment sur les polluants dits «émergents». Sa mise en œuvre a associé étroitement l'Onema et les agences de l'eau, avec l'appui scientifique et technique de l'Ineris, d'Irstea, de l'Ifremer et du BRGM. Ce plan transverse, qui concerne

toutes les masses d'eau (superficielles, littorales, souterraines, pour la métropole et l'outre-mer) et tous les polluants (hors pesticides) est complété par plusieurs plans de recherche et développement sectoriels, pour la plupart en cours :

- le plan *Écophyto 2018*, lancé en 2008, visant à réduire l'usage des pesticides et leurs impacts environnementaux.
- le *plan national sur les résidus de médicaments dans les eaux* (2011-2015) pour améliorer l'évaluation et la gestion des substances médicamenteuses dans les milieux aquatiques et dans l'eau potable ;
- le *plan national d'actions sur les PCB* (2008-2010), qui a généré un ensemble d'avancées pour la compréhension des transferts de PCB des sédiments aux poissons, et pour la connaissance du niveau d'exposition des consommateurs ;

Le plan micropolluants.



- enfin le plan d'actions 2012-2018 *pour une politique d'assainissement contribuant aux objectifs de qualité des milieux aquatiques*.

À l'issue du plan Micropolluants 2010-2013, et alors que nombre d'actions de R&D complémentaires se poursuivent dans le cadre des plans d'actions sectoriels, un ensemble de connaissances, de méthodes et d'outils nouveaux sont disponibles pour les gestionnaires et acteurs de l'eau. Leur restitution a fait l'objet du séminaire national organisé par l'Onema et l'Ineris, les 17 et 18 juin 2013 à Paris en présence de plus de 200 participants. Le présent document propose une synthèse

des avancées scientifiques et opérationnelles présentées au cours de ces deux journées, abordant successivement les trois grands axes de travail du plan Micropolluants 2010-2013 : la connaissance et la maîtrise des sources de pollution, l'amélioration du diagnostic de l'état des milieux aquatiques, et enfin les travaux relatifs aux nouvelles substances et aux nouveaux outils biologiques pour le diagnostic et l'action.

Eclairage

Connaissances et outils existants : l'information en quelques clics

Au cœur de la politique française de l'eau, la thématique des contaminants chimiques des milieux aquatiques fait l'objet une abondante production documentaire : textes réglementaires, synthèses scientifiques, données spatialisées, guides opérationnels, informations de référence sur les substances... Nombre de ces documents sont accessibles en ligne : un panorama des différentes plates-formes de mise à disposition a été présenté (P-F. Staub, Onema ; Christine Féray, Ineris) lors du séminaire.

- Une introduction aux **réglementations et politiques nationales** est disponible sur le site du ministère en charge de l'écologie (www.developpement-durable.gouv.fr), dans les onglets «eau et biodiversité» et «prévention des risques» : du fonctionnement de la directive cadre sur l'eau ou de la réglementation européenne REACH (enregistrement et évaluation des substances chimiques) à la présentation des plans d'action nationaux.

- Le site de l'Onema (www.onema.fr/contaminants-et-pollutions-aquatiques) permet d'accéder à de nombreuses **synthèses de connaissances scientifiques et techniques**. Les pages «contaminants et pollution» comprennent trois entrées : surveiller (techniques de prélèvement et d'analyses, résultats

de terrain, priorisation des substances à l'échelle nationale...) ; *qualifier l'état et évaluer les risques* (construction des normes de qualité environnementales, liens pression-impact et effets de l'exposition aux substances sur les organismes...) ; enfin *maîtriser* (documentation sur les sources possibles des pollutions, les rejets des stations de traitement, les technologies d'assainissement...).

- Un ensemble de **synthèses spatialisées sur la contamination des eaux**, par type de masse d'eau, par type de polluants et/ou par zone géographique, est disponible sur le site du commissariat général au développement durable (www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr), dans l'onglet «l'essentiel sur...». C'est le cas notamment du «bilan de présence des micropolluants dans les milieux aquatiques 2007-2009», mentionné en introduction du présent document.

- Des **bilans de présence des micropolluants par bassin hydrographique** sont également proposés par les agences de l'eau : voir notamment le *bilan 2010 de la surveillance de l'état des eaux du Bassin Seine-Normandie*, accessible sur le site de l'AESN (www.eau-seine-normandie.fr) ou *Les micropolluants dans les eaux littorales du bassin Artois-Picardie, données 2009*, sur le site de l'AEAP (www.eau-artois-picardie.fr).

- Un ensemble de **guides de bonnes pratiques** destinés aux acteurs de l'eau pour lutter contre les pollutions (domestiques, industrielles, agricoles...) est proposé par l'agence de l'eau Rhône-Méditerranée et Corse (www.eaurmc.fr), sous l'onglet «guides acteurs de l'eau».

- Des **guides opérationnels pour la surveillance chimique des eaux** sont mis en ligne sur le site du consortium Aquaref (www.aquaref.fr/tous-les-produits). En particulier, plusieurs dizaines de fiches méthodologiques décrivent les méthodes validées, au niveau national, pour le prélèvement d'échantillons et la quantification des substances chimiques dans l'eau, les sédiments ou les tissus vivants.

- Une **information de référence sur les substances** est disponible via le «portail substances chimiques» de l'Ineris (www.ineris.fr/substances/fr/). Pour chacune des substances répertoriées, celui-ci fournit des grandeurs caractéristiques disponibles en écotoxicologie et toxicologie, ainsi que de données technico-économiques. Le portail permet de générer un fichier unique reprenant l'ensemble des informations disponibles pour une substance donnée.

- Enfin, le portail documentaire *Les documents technique sur l'eau* (www.documentation.eaufrance.fr) propose de retrouver l'intégralité des documents présents sur ces sites, et sur quelques autres, au moyen d'une **recherche par mots-clés**. Ainsi, une recherche sur les ouvrages publiés en 2008-2013 avec le seul mot-clé «substances» dans leurs intitulés délivre pas moins de 61 références.

1

Connaissance et réduction des pollutions :

agir à la source, maîtriser les transferts de micropolluants



© Eric Sabot - Onema

Améliorer l'état chimique des milieux aquatiques, c'est d'abord agir sur les sources de pollution qui les affectent : rejets ponctuels des sites industriels et autres installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE), pollution diffuse d'origine agricole (nitrates et pesticides), ruissellement urbain par temps de pluie, rejets des stations de traitement des eaux usées des collectivités (STEU).

L'identification de ces sources à l'échelle d'un bassin, la caractérisation de leurs émissions et l'adoption de mesures pour réduire les rejets et leur transfert vers les milieux (substitution de procédés industriels, ingénierie du traitement des effluents) constituent l'un des trois grands axes de travail du plan Micropolluants 2010-2013. Un ensemble d'actions de recherche et développement a été présenté lors du séminaire de juin 2013 pour chaque type de sources polluantes (hors agriculture), et fait l'objet de cette première partie.

1.1 – Des pollutions multi-sources : indispensable priorisation

À l'échelle d'un territoire, de multiples sources polluantes (Figure 2) sont susceptibles d'affecter la qualité chimique des eaux... à des degrés très divers. Il est souvent estimé qu'1 % des points de rejet représentent 90 % des rejets totaux. Ainsi l'identification des sources, des activités et des voies de transfert les plus contributrices s'impose-t-elle comme condition d'une action priorisée de préservation ou de reconquête de l'état chimique des eaux. Dans cette optique, l'Onema a soutenu l'Ineris depuis 2010 en vue de structurer une méthodologie simplifiée d'établissement des inventaires d'émissions vers les eaux de surface, d'abord destinée

à être utilisée par les agences de l'eau. Cette méthode (A. Gouzy, Ineris) permet de produire des inventaires d'émissions substance par substance, exprimés en flux annuel. Elle consiste à sommer, à l'échelle d'un territoire, deux types de valeurs d'émissions :
 - les émissions pour lesquelles des valeurs mesurées sont disponibles. c'est le cas pour une majorité des émissions ponctuelles considérées (industries non raccordées ou STEU), via l'auto-déclaration dans le cadre du règlement européen 166/2006 ou à la suite des analyses menées lors de campagnes ciblées (voir section 1.3). Ces données sont rassemblées et compilées ;

Figure 2. Représentation schématique des différentes voies d'apport de micro-polluants aux eaux de surface (Source : A. Gouzy, Ineris, schéma modifié d'après <http://weiss.vmm.be>)

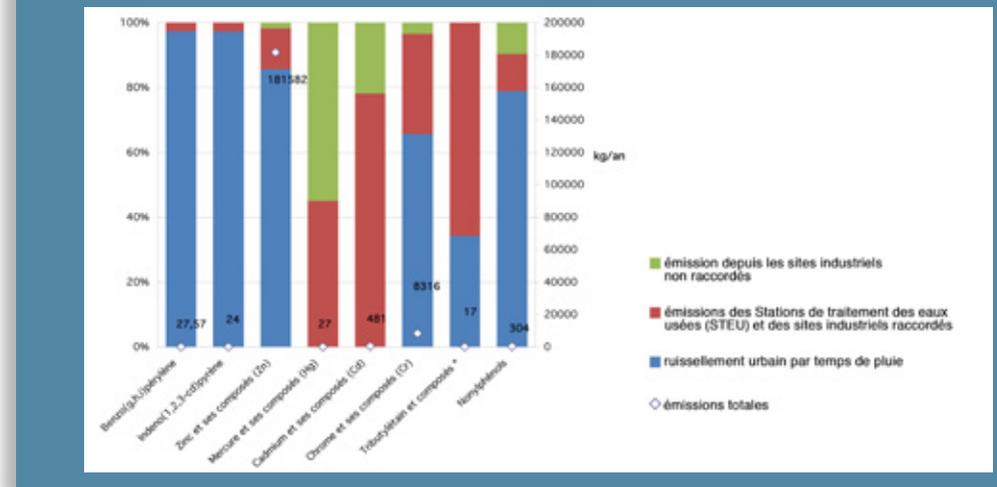
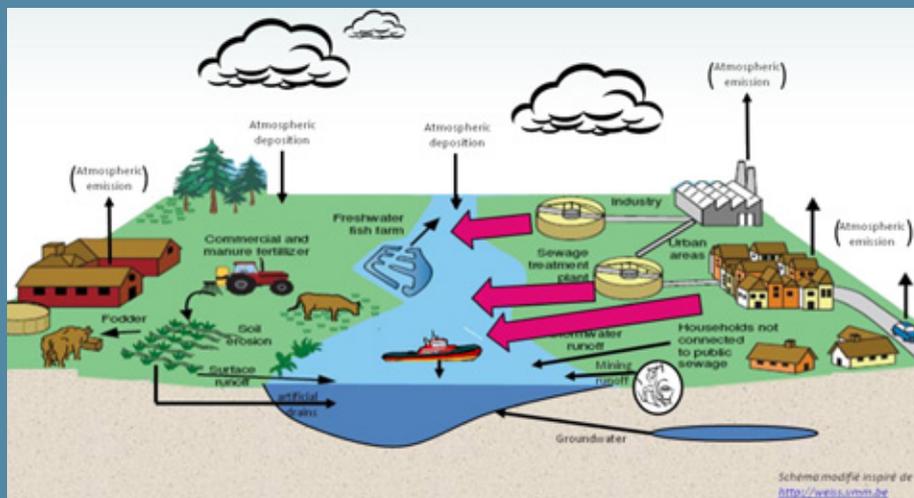


Figure 3. Exemple d'application de la méthode d'inventaire d'émission développée par l'Ineris. Sources des émissions dans le bassin de la Saône, pour huit contaminants. (A. Gouzy, Ineris)

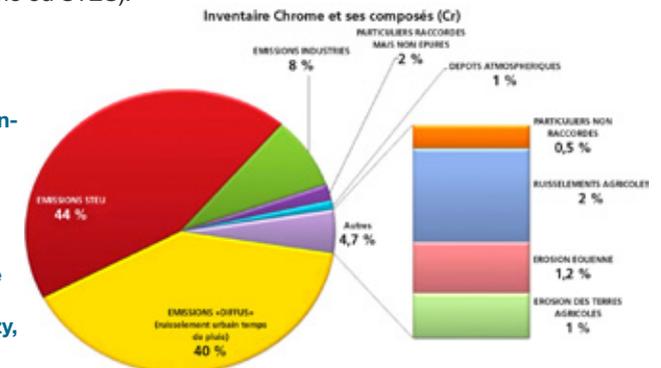
Les émissions non caractérisées par des mesures in-situ sont estimées :

- soit au moyen d'une approche très globale (par exemple pour les eaux pluviales de ruissellement, on exploite les quantités d'eau de ruissellement et les concentrations médianes de polluants observées dans ce type d'échantillons) ;
- soit au moyen de corrélations statistiques (appelées «équations d'émissions») permettant d'afficher un flux de substances à partir d'une donnée d'émission connue (par exemple une valeur de matières en suspension dans un rejet ponctuel) pour un site considéré (industrie ou STEU).

L'ensemble de la démarche ainsi que ses limites inhérentes sont détaillées dans un rapport technique publié par l'INERIS en avril 2012.

Basée en partie sur un traitement statistique des rejets, une telle méthode doit être appliquée à des échelles géographiques suffisamment étendues (districts hydrographiques ou grands bassins versants par exemple). Quelques exemples d'utilisation, à l'échelle du bassin de la Saône, ont été présentés lors du séminaire – voir les figures 3 et 4.

Figure 4. Exemple d'application de la méthode d'inventaire d'émission développée par l'Ineris. Origine des émissions de chrome et de ses composés dans le bassin versant de la Saône. (A. Gouzy, Ineris)



À ce stade de son développement, l'outil est opérationnel : les premiers inventaires sont en cours de calcul par les agences, et nourriront à terme leurs stratégies de réduction des déchets. En parallèle, des améliorations méthodologiques sont à l'étude. Elles porteront notamment

sur une prise en compte plus fine des sources diffuses notamment via la source pluviale, sur l'affinage des équations d'émissions, et sur l'intégration de nouvelles sources : ruissellement des eaux pluviales en zone non urbanisée, érosion des sols, rejets domestiques non épurés, ...

1.2 – Transferts d'eaux polluées au sein de l'espace urbain : beaucoup reste à faire

Activités des ménages, transports, établissements hospitaliers, industries, artisanat... les zones urbanisées concentrent un grand nombre d'activités humaines – et autant de sources potentielles de pollution chimique. Des matières organiques aux métaux lourds, des plastifiants aux hydrocarbures, une grande variété de substances sont émises dans l'atmosphère de la ville ou se déposent sur ses sols, ses routes et ses toits : lors des épisodes de pluie, les molécules sont très rapidement entraînées par ruissellement, puis généralement évacuées dans le réseau où elles sont mélangées aux eaux usées dans le cas des réseaux de type unitaire. En cas d'événements pluvieux intenses, cette charge polluante excédentaire composée d'un mélange d'eaux usées et d'eaux pluviales, provoque une saturation des réseaux et des stations de traitement, qui la transmettent par «surverse» aux milieux aquatiques sans

traitement : elle peut alors constituer une source majeure de pollution des eaux, comme le montrent par exemple les calculs d'inventaire présentés pour le bassin versant de la Saône dans la section 1.1.

Enjeu majeur de préservation des milieux aquatiques, la maîtrise des rejets urbains est encadrée depuis mai 1991 par la directive n° 91/271/CEE «relative au traitement des eaux urbaines résiduaires» (DERU), qui impose notamment la mise en place de traitements rigoureux pour les agglomérations de plus de 10 000 équivalents-habitants rejetant dans une zone sensible (déliimitées par l'arrêté du 31 août 1999) ; et d'un traitement secondaire ou approprié pour les autres agglomérations. Sa mise en œuvre mobilise depuis 1992 près de la moitié des aides accordées chaque année par les agences de l'eau (source : ministère en charge de l'écologie). Ce dispositif, qui porte sur la pollution carbonée,

l'azote et le phosphore, ne concerne pas directement les micropolluants mais permet toutefois l'élimination de certaines molécules simultanément. Toutefois, beaucoup reste à faire pour mieux identifier les différentes sources de contaminants chimiques en zone urbaine, leurs voies de transfert vers les milieux naturels et – surtout – les leviers techniques et politiques pour améliorer leur gestion.

Rejets de l'artisanat : une campagne in situ

Dans le cadre du plan Micropolluants 2010-2013, une étude du Centre national d'innovation pour le développement durable et l'environnement dans les petites entreprises (CNIDEP) a cherché à caractériser les émissions de substances dangereuses par le secteur de l'artisanat. Initié fin 2011, ce travail (*M-P. Fischer, CNIDEP*) se concentre sur dix métiers, sélectionnés en lien avec les agences de l'eau : la mécanique automobile, l'imprimerie, la peinture en bâtiment, le pressing, le carénage, les prothésistes dentaires, la coiffure et le toilettage, le nettoyage de locaux, le nettoyage et le décapage de façades, et enfin les métiers du bois. Il consiste en une recherche *in situ* de 68 substances dangereuses dans les rejets d'un panel d'entreprises «représentatives» de chaque métier. Les analyses sont financées par l'Onema.

Un bilan de la première phase, portant sur les quatre premiers métiers cités, a été présenté lors du séminaire. Ainsi, pour les artisans de la mécanique et de la carrosserie automobile, des prélèvements ponctuels ont réalisés dans les eaux de lavage des sols, les eaux de lavage des voitures, les eaux ou les solvants de nettoyage des pistolets à peinture de quatre garages. Dans l'imprimerie, six PME ont été auditées – certaines équipées d'unités prépresse sans chimie, d'autres avec des unités à «basse chimie» ou à «haute chimie». Les prélèvements concernaient cette fois les eaux de lavage des sols, les eaux de prépresse et les eaux de mouillage.

Au total, pour cette première phase, 22 sociétés ont été auditées ; 52 prélèvements ont été réalisés, dont 41 avaient été analysés lors du séminaire. Les premiers résultats livrent des constatations utiles. Sur les 68 substances recherchées, une cinquantaine ont été quantifiées à des concentrations supérieures à dix fois la limite de quantification. Des hydrocarbures ont été quantifiés dans 97% des échantillons. Parmi les substances les plus fréquemment quantifiées se retrouvent également les phénols (84% des échantillons), les phtalates (79%) et les organohalogénés (76%). Une trentaine de substances a été quantifiée à au moins cent fois la limite de

quantification. L'étude, qui se poursuit en 2013 pour les six autres secteurs d'activité, fera l'objet d'un rapport complet prévu début 2014.

Un appel à projet lancé en 2013

Au-delà de cette étude ciblée, un effort global doit être mené pour identifier et prioriser les micropolluants à enjeux dans les eaux urbaines, mais aussi pour construire les solutions qui permettront d'éviter ou de réduire leurs déversements dans les réseaux collectifs et les effets induits sur les ressources aquatiques. Tel est l'enjeu de l'appel à projets *innovations et changement de pratiques*, lancé conjointement par l'Onema et les agences de l'eau en juin 2013 (P-F. Staub, Onema). Dotée d'un financement pouvant se monter à 10 millions d'euros,

cette initiative vise à développer une dynamique de réseau à l'échelle nationale, par la constitution de consortiums «projets» pouvant associer localement, pour des durées atteignant cinq ans, des acteurs variés : collectivités, industriels, artisans, laboratoires, bureaux d'étude, pôles de compétitivité et autres structures d'aide au montage... Les solutions recherchées couvrent toutes les facettes de la thématique : des changements de pratiques des usagers et des professionnels aux aménagements urbains pour la gestion du ruissellement pluvial, des méthodes de mesure des flux de micropolluants à la proposition de produits de substitution. L'échéancier et le dossier de candidature sont disponibles sur le site de l'Onema (www.onema.fr/Appel-a-projets-Micropolluants-dans-les-milieux-aquatiques).

L'appel à projets en ligne sur le site de l'Onema.



1.3 – Eaux usées des collectivités : des leviers pour un meilleur assainissement

Environ 18 600 stations de traitement des eaux usées (STEU) sont recensées en France. Celles-ci ont traité en 2008 plus de 7 milliards de mètres cubes d'eaux usées : eaux usées brutes domestiques, effluents des sites industriels raccordés, ruissellement pluvial (chiffres SOeS, 2008). Après traitement, 88% de ce volume d'eau sont rejetés dans les eaux superficielles : la caractérisation des rejets polluants associés et l'amélioration des performances du dispositif d'épuration constituent donc un levier majeur pour réduire la pollution des milieux aquatiques : elles font l'objet en France d'un important effort de R&D publique, mené notamment par Irstea. Un panorama de ces travaux, présenté lors du séminaire, est synthétisé dans cette section.

Une élimination très incomplète des micropolluants

Construites pour la plupart après 1970, et pour plus de la moitié d'entre elles après 1995, les STEU françaises diffèrent par leur capacité de traitement : 6% d'entre elles ont une capacité de plus de 10 000 équivalents-habitants (EH) et traitent à elles seules plus de 80% de la pollution produite ; à l'inverse, plus de 50% des stations ont une capacité

inférieure à 500 EH. De conceptions variées, elles peuvent intégrer différents niveaux de traitement. Le traitement primaire vise à éliminer mécaniquement (par filtrage ou décantation) certaines matières en suspension et les huiles ; les traitements secondaires (biologiques ou physico-chimiques) permettent un abatement supplémentaire des matières organiques et des substances minérales en suspension dans l'eau ; enfin les traitements tertiaires peuvent mettre en œuvre divers procédés plus ou moins avancés : filtration sur sable, lagunage, ozonation, filtration sur charbons actifs, «osmose inverse»...

Conçues pour traiter les macropolluants (azote, phosphore...), les stations actuelles n'éliminent que très variablement les micropolluants. L'étude Amperes, menée par Irstea et Suez-environnement en 2007 et 2008, s'est ainsi intéressée aux performances d'élimination de 127 substances (prioritaires DCE ou émergentes) par 21 stations d'épuration de conceptions différentes. Les résultats sont disponibles sur un site Internet dédié (<https://projetampere.cemagref.fr/>). Globalement 50% des substances quantifiées en entrée sont éliminées à plus de 70% par les procédés secondaires

(notamment métaux, hormones, antalgiques, HAP). En revanche, d'autres substances – pesticides polaires, certains produits pharmaceutiques, acide nonylphénoxyacétique... – ne sont pas affectés par les traitements classiques. Des rendements supérieurs à 70% sont cependant obtenus pour certaines substances réfractaires par des traitements complémentaires avancés tels l'ozonation, la filtration sur charbon actif et l'osmose inverse. Lancé à la suite de l'étude Ampères, le projet national ARMISTIQ (M. Coquery, Irstea) vise à évaluer et à améliorer la maîtrise de technologies de traitement des substances - prioritaires ou émergentes - présentes dans les eaux usées et les boues issues des stations. Ce programme partenarial, financé par l'Onema, coordonné par Irstea, qui associe l'université de Bordeaux 1 et Suez-Environnement, repose sur l'évaluation des performances d'élimination de micropolluants par des installations « pilotes » installées dans les stations, ou bien par des installations en taille réelle. Plusieurs axes de travail sont développés : étude *in situ* ou en laboratoire de différentes combinaisons de **traitements tertiaires avancés «intensifs»** (filtres à sables, charbons actifs et ozone ; oxydation avancée ; filtres à sable et oxydation...) ou **«extensifs»** (zones de rejet végétalisées, filtration sur matériaux adsorbants) ; optimisation de traitements existants pour la **filière des boues**

activées ; enfin, évaluation de différents **procédés de réduction de micropolluants hydrophobes dans les boues**, en vue de la valorisation agricole de ces dernières.

Ce projet majeur a débouché sur de nombreuses avancées méthodologiques, technologiques et scientifiques. Deux thèses sont notamment en cours, divers articles scientifiques et techniques ont été soumis à publication, un colloque de restitution est programmé le 6 février 2014 à Lyon et des ouvrages de valorisation sont prévus. Toutes les actions engagées, les méthodes mise en œuvre et les communications produites sont détaillées sur un site internet dédié (<http://armistiq.irstea.fr/armistiq/>).

Irstea travaille à l'adaptation des traitements d'épuration avancés pour le contexte des DOM. Ici, mise en œuvre d'un filtre planté de roseaux à la station de traitement des eaux usées de Macouria (Guyane).



outre-mer, assainissement non collectif : des travaux ciblés

Outre le projet ARMISTIQ, un ensemble d'études (C. Boutin, Irstea) est mené pour caractériser la qualité des eaux usées brutes, évaluer l'efficacité de différents traitements existants et développer des procédés adaptés à des situations variées. Le cas des petites et moyennes collectivités, dont les stations sont souvent moins performantes, fait l'objet d'une attention particulière. Une étude s'est notamment intéressée à la qualité des eaux usées brutes des collectivités de moins de 2 000 équivalents habitants (83% des STEU). Sur la base de 20 000 données fournies par les agences de l'eau, une analyse statistique a montré que celles-ci présen-

tent de fortes amplitudes de variation, tant en composition qu'en qualité. Le groupe de travail sur l'évaluation des procédés nouveaux d'assainissement des petites et moyennes collectivités (EPNAC), en réponse à la multiplication des procédés de traitement innovants proposés à ces collectivités, s'emploie à encadrer le développement de ces filières nouvelles par la diffusion de documents ressources en matière de traitement des eaux et des boues. L'ensemble de ces productions est accessible en ligne (<http://epnac.irstea.fr/>).

D'autres travaux ont permis d'apporter des améliorations aux procédés de lits de séchages plantés de roseaux, utilisés depuis 1990 pour le traitement des boues biologiques. Ceux-ci ont été adaptés au traitement des matières de vidange par la mise

en œuvre et le suivi, six années durant, de pilotes semi-industriels (Vincent, 2011). Une étude s'est également intéressée aux possibilités de mise en œuvre de ces procédés dans le contexte spécifique des départements d'outre-mer, caractérisés par leur topographie et leur climat particuliers, la sensibilité de leurs écosystèmes – et d'importants retards dans la mise en œuvre des politiques européennes sur les eaux usées. Un ensemble de choix techniques a été validé au moyen de dispositifs de suivi *in situ*, à taille réelle. Le cas de l'assainissement non collectif – qui concerne en 2008 plus d'un tiers des communes françaises pour un total de 5 millions de logements – fait également l'objet de travaux spécifiques (Portier *et al.*, 2012),

visant au transfert et à l'adaptation des connaissances issues de l'assainissement collectif. Un réseau de partenaires dédiés à cette thématique a été mis en place, réunissant le service public d'assainissement non collectif (SPANC), les agences de l'eau et des conseils généraux ; ses travaux alimenteront à terme un guide de comparaison des filières autorisées.

À noter enfin que les habitations ne disposant d'aucun dispositif d'assainissement – et dont les eaux usées sont rejetées directement dans l'environnement – ont pratiquement disparu en France : elles ne représentaient plus qu'1% de la population en 2008, contre 17% en 1998 (Source SOeS).

substances dangereuses dans l'eau (RSDE). Une première campagne nationale de cinq années (RSDE1), lancée par les pouvoirs publics en 2002, a consisté à rechercher 106 substances ou familles de substances chimiques dans les effluents de plus de 3 000 établissements. Elle a permis une amélioration des pratiques des laboratoires d'analyses pour les substances concernées, et débouché sur une meilleure connaissance des sources d'émission ponctuelles, notamment par l'identification des

principaux secteurs émetteurs pour chaque substance. Le rapport d'étude, publié en janvier 2008, est accessible sur le site dédié à l'action RSDE : www.ineris.fr/rsde/

Dans le cadre du plan Micropolluants 2010-2013, cet effort est poursuivi et amplifié. L'action dite «RSDE2», conduite avec l'Ineris pour le compte du ministère en charge de l'écologie, étudie de près les rejets ponctuels de substances chimiques de quelque 3 500 sites industriels – précisément, des installations classées pour la protection de l'environnement (ICPE) soumises à autorisation. Une quarantaine de sous-secteurs d'activité sont concernés, dans des domaines très variés : agro-alimentaire, chimie, métallurgie, papeterie, traitement des déchets, industrie verrière, industrie pharmaceutique, centrales thermiques de production d'électricité... La démarche comprend trois étapes. La «surveillance initiale» est constituée de six campagnes de mesures, à pas de temps mensuel, portant sur une liste de substances fixées a priori selon l'activité de l'établissement. Elle peut déboucher sur une «surveillance pérenne» : une mesure est réalisée chaque trimestre pour les substances réellement détectées dans les rejets du site. Si les flux sont jugés significatifs, un programme d'actions visant la réduction des émissions, appuyé, si besoin sur une étude technico-économique est engagé.

Un bilan d'étape de cette action a été présenté lors du séminaire (E. Ughetto, Ineris). En mars 2013, 3 077 établissements avaient fait l'objet de la surveillance initiale (sur 3 492 arrêtés préfectoraux prescrits) – soit 22 239 prélèvements, pour environ 600 000 analyses effectuées par 147 laboratoires. Tous secteurs industriels confondus, 35 substances ont été quantifiées dans plus de 25% des établissements (dont 8 substances dangereuses prioritaires et 11 substances prioritaires au sens de la DCE) (Figure 5 page suivante). Des nonylphénols ont notamment été quantifiés dans les rejets de plus de 90% des établissements. Du fluoranthène, du naphthalène ou du chloroforme ont été quantifiés dans au moins 60% des cas.

À ce stade, le nombre d'établissements placés à priori en surveillance pérenne pour au moins une substance est très variable selon les secteurs d'activité : par exemple, 54% des sites audités dans le secteur de la fabrication des papiers/cartons ; 35 % pour les industries du traitement et du revêtement de surfaces, seulement 4% pour les activités viticoles... Pour ces mêmes secteurs, le pourcentage de sites concernés à priori par une étude de réduction est respectivement de 28%, 17% et 2% des cas.

Les bénéfices attendus de cette action sont nombreux et importants. En chiffrant au niveau national la

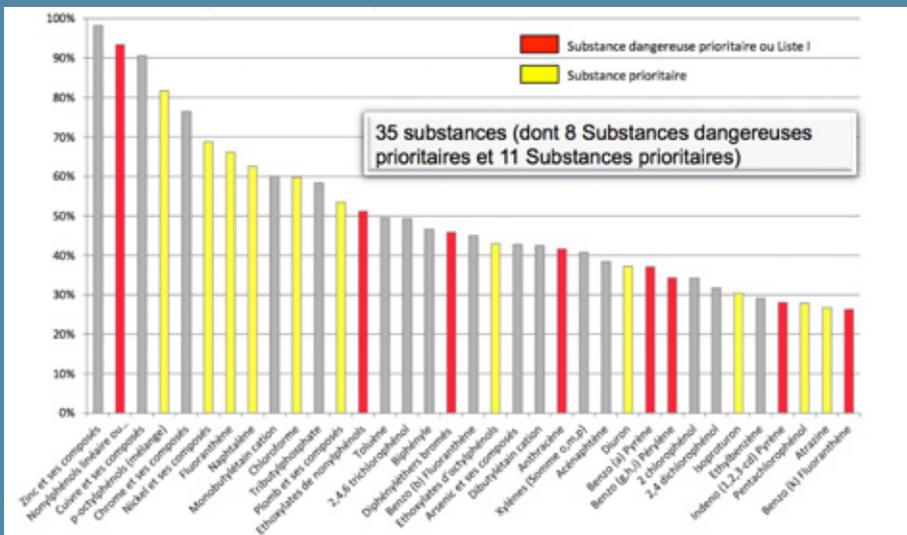


Figure 5. Résultats provisoires de la surveillance initiale de l'action RSDE2 – substances quantifiées dans plus de 25% des établissements audités, tous secteurs confondus (E.Ughetto, Ineris).

contribution par secteur industriel, elle permettra de prioriser les efforts de réduction des émissions, à l'échelle des bassins et à l'échelle nationale. Les progrès réalisés en parallèle en termes de caractérisation des contributions hors ICPE, permettront également la priorisation des actions.» (notion de part relative des contributeurs aux émissions vers le milieu, qui renvoie à la partie «inventaires d'émissions» traitées plus haut). Plus directement, les études de réduction des rejets, dont la prescription est encadrée par la note ministérielle du 27/04/2011, et la mise en oeuvre des programmes d'actions qui en découlent, pourraient permettre

«d'éviter» aux milieux aquatiques des quantités significatives de polluants. Par exemple, pour l'un des secteurs, le flux de métaux (Zn, Ni, Cu, Cr) évité serait de l'ordre de 8,5 kg/jour. Pour ce même secteur, 16 kg de rejets quotidiens de substances organiques (majoritairement chlorure de méthylène) seraient épargnés au milieu (résultats obtenus par estimation uniquement).

Des études de branches, menées par secteur industriel (par les fédérations professionnelles et/ou centres techniques), visent à identifier les procédés à l'origine des différents rejets quantifiés et à explorer des

procédés pour les réduire ou les supprimer – notamment par l'adoption de procédés de substitution. L'objectif est de donner des éléments d'analyse à chaque industriel du secteur qui devra mener une étude technico-économique. Un travail de ce type est par exemple mené par le centre technique des industries mécaniques (CETIM) pour deux sous-secteurs d'activité : l'industrie du travail mécanique des métaux et l'industrie du traitement et des revêtement de surface. Cofinancée par les agences de l'eau, cette étude (P. Sire, J. Kirmann, CETIM) se base sur les données de la surveillance initiale RSDE ainsi que sur les réponses apportées à un questionnaire par près de 500 industriels. Elle a permis l'identification de 150 corrélations entre les activités

des établissements et le rejet de substances. Par exemple, pour le nickel, plusieurs procédés de préparation de surfaces apparaissent responsables de rejets : dégraissage en milieux aqueux par voie chimique (milieu acide) ; décapage chimique à base de HF, HF- NO3 ; préparation par tribofinition ou vibroabrasion ; usinage non conventionnel avec produits connexes.

Certaines de ces corrélations seront validées par l'interrogation complémentaire des industriels et de leurs fournisseurs, d'autre nécessiteront une étude de cas *in situ* – à l'instar de celles déjà engagées dans sept sites pour préciser les raisons de rejets quantifiés de chloroforme, de nonylphénols ou d'octylphénols. ■

Papeterie Descartes, Indre-et-Loire (37)



© Michel Bramard - Onema

2

Contamination des milieux et impacts :

améliorer le diagnostic



© Franck Weingertner - Onema

Les efforts entrepris pour agir, en amont, sur les sources de pollution, sont indissociables d'une connaissance fine de la présence des micropolluants dans les eaux, de leur devenir au sein des écosystèmes et des impacts qu'ils entraînent sur les milieux aquatiques, les espèces qui en dépendent et la santé humaine.

Depuis une décennie, la mise en œuvre de la directive cadre sur l'eau a permis de réaliser d'importants progrès en la matière. Le dispositif réglementaire d'évaluation de l'état chimique des masses d'eau repose sur la recherche systématique, dans les stations des réseaux de surveillance, d'un ensemble de substances dont la liste (annexe X de la DCE et directives filles) est révisée périodiquement – la dernière révision en date a été actée mi-2013.

Pour la France, l'effort se concentre sur 53 substances ou familles de substances : 21 substances dangereuses prioritaires au sens de la DCE, pour lesquels les rejets doivent être supprimés à l'horizon 2018 ou 2021 ; 24 substances prioritaires pour lesquels les rejets doivent être réduits (d'abord de 30% en 2015, par rapport à 2004) ; enfin huit substances dites «Annexe I» pour lesquelles les émissions doivent être réduites de 50% à l'échéance 2015. Par ailleurs, au plan national, neuf «polluants spécifiques de l'état écologique» font également l'objet d'un suivi systématique.

Ce dispositif de surveillance systématique mobilise, au fil de ses mises à jour, un important effort scientifique et technique : développement de protocoles terrain et de méthodes d'analyse, avancées pour la compréhension des effets des substances sur les milieux, construction des «normes de qualité environnementale» (concentrations

dans l'eau, le sédiment ou le biote ne devant pas être dépassées afin de protéger la santé humaine et l'environnement., voir section 2.2)... L'amélioration du diagnostic de l'état des eaux est un travail de longue haleine : des avancées récentes dans ce domaine, présentées lors du séminaire, font l'objet de cette seconde partie.

2.1 – Mesurer les concentrations : l'apport des échantillonneurs passifs

Le premier défi de l'évaluation de l'état chimique des masses d'eau réside dans la mesure des concentrations de chaque substance – dans l'eau, mais aussi, selon les cas, dans les sédiments ou les tissus des êtres vivants (le «biote»). Avec la directive cadre sur l'eau, cette surveillance est menée sur différents réseaux de stations réparties sur l'ensemble du territoire, pour les eaux de surface (cours d'eau, plans d'eau), les eaux souterraines et les eaux littorales. En France, on distingue ainsi deux réseaux complémentaires pour les eaux de surface et côtières : le Réseau de contrôle et de surveillance (RCS), qui compte plus de 1 900 stations au total, fournit une image de l'état général des eaux, tandis que le réseau de contrôle opérationnel (RCO), qui regroupe 4 553 stations pour lesquels l'objectif de bon état risque de ne pas être atteint, permet un suivi de l'état des masses d'eau à risque et de l'efficacité des actions mises en œuvre. De même, pour les

eaux souterraines, le RCS compte 1 800 points et le RCO en compte 1 500 (dont 860 communs aux deux réseaux), auxquels s'ajoutent 1 700 points de suivi quantitatif (des capteurs piézométrique).

La mesure des concentrations de l'ensemble des substances recherchées, reconduite périodiquement sur l'ensemble de ces points de surveillance, implique pour les gestionnaires un effort considérable d'échantillonnage et d'analyse. Dans ce contexte, l'obtention de données de qualité, à un coût acceptable «en routine», constitue un défi de taille. Les méthodes d'analyse traditionnelles, basées sur des échantillonnages ponctuels, peuvent pâtir d'un manque de fiabilité du fait de la forte variabilité temporelle des concentrations de certaines substances : pour une station donnée, les résultats seront par exemple différents selon que la campagne de mesure a eu lieu la veille d'un orage ayant entraîné un

fort ruissellement urbain, ou le lendemain. De même, en contexte agricole, les concentrations en pesticides dans les milieux aquatiques sont très liées au calendrier des pulvérisations.

Face à cette difficulté, l'utilisation d'échantillonneurs dits «passifs», intégrant les concentrations en contaminants – même à l'état de traces – sur une période donnée, peut constituer une solution pertinente pour une utilisation dans le cadre des réseaux de surveillance. Plusieurs de ces techniques sont utilisées depuis longtemps pour des programmes de recherche spécifiques. Entre 2008 et 2012, l'Ifremer a testé leur potentiel dans le cadre de campagnes DCE à grande échelle dans les milieux côtiers de la façade méditerranéenne, de Corse et des départements d'outre mer (J-L. Gonzalez, Ifremer). Trois techniques complémentaires ont été utilisées. Les capteurs **POCIS (polar organic**

chemical integrative sampler), développés à l'origine par US Geological Survey et adaptés par l'université de Bordeaux I, reposent sur l'adsorption des polluants dans une membrane microporeuse ; immergés dans le milieu, ils permettent une mesure intégrée dans le temps des contaminants organiques hydrophiles (certains pesticides, des composés pharmaceutiques ou vétérinaires...). Les contaminants organiques hydrophobes (HAP, PCB, PBDE, certains pesticides...) étaient quant à eux mesurés en laboratoire par la technique **SBSE (stir bar sorptive extraction)** : les molécules dissoutes sont extraites par un barreau magnétique recouvert d'un polymère. Enfin, les concentrations en métaux «traces» (cadmium, cobalt, cuivre, nickel, plomb, zinc...) ont été mesurées par la technique du «gradient de diffusion dans les films minces» (DGT).

Les techniques d'échantillonnage passif consistent à plonger dans la colonne d'eau des supports sur lesquels les micropolluants viennent se piéger, durant des périodes allant de plusieurs jours à plusieurs semaines. Ces dispositifs sont ensuite rapportés au laboratoire et leur analyse permet d'apprécier un niveau de contamination du milieu plus représentatif que ne le permet un simple échantillonnage ponctuel.



Les campagnes menées de 2008 à 2012, associant ces trois techniques, ont permis de mesurer les concentrations en contaminants hydrophiles et hydrophobes et en métaux traces dans plus de 200 masses d'eau différentes du littoral méditerranéen, de la Réunion, de Mayotte, de Guyane et de la Martinique. Étaient recherchés les contaminants de l'état chimique et de l'état écologique au sens de la DCE, mais aussi d'autres métaux et contaminants organiques (médicaments, PCB, substances émergentes...), soit quelque 140 substances au total. Les résultats obtenus ont notamment mis en évidence, pour la première fois en milieu côtier et lagunaire, la présence de certains herbicides, fongicides, produits pharmaceutiques ou encore alkylphénols. Des métaux et des composés organiques ont pu être mesurés à de très faibles concentrations, de l'ordre du ng/L. Par exemple, l'utili-

sation de capteurs SBSE sur le pourtour méditerranéen a révélé que pour pratiquement toutes les stations, le naphthalène (issu principalement du chauffage au bois ou des feux de forêt) représente l'essentiel des HAP mesurés, et qu'aucun dépassement des normes de qualité n'était à déplorer pour cette famille de substances. En revanche, la moitié des masses d'eau prospectées présente des concentrations en isomères de l'hexachlorocyclohexane qui dépassent la norme de qualité (NQE), soit 2 ng/L (Figure 6). Les teneurs en endosulfan dépassent aussi la NQE dans 14 stations sur 34. Plus généralement, la plupart des risques de déclassement de ces masses d'eau étaient liés à quatre types de contaminants : le cuivre, l'endosulfan, les insecticides cyclodiènes et les isomères du lindane. Les résultats des campagnes menées en 2012 sont en cours de synthèse.

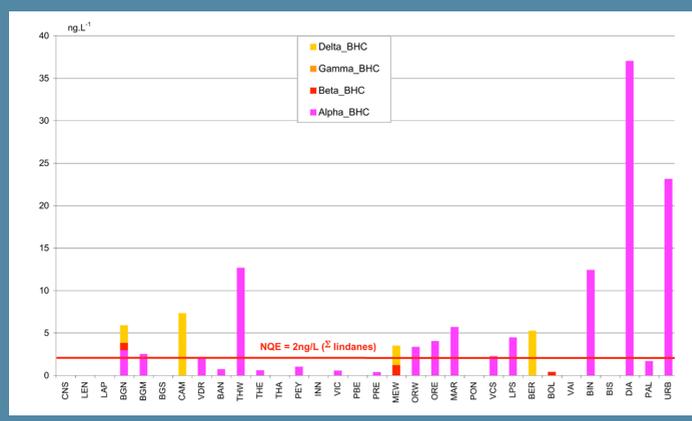


Figure 6. Exemple de résultats issus des campagnes de mesures de l'Ifremer utilisant des échantillonneurs passifs : concentrations en hexachlorocyclohexane dans les lagunes du pourtour méditerranéen (J-L. Gonzalez, Ifremer).

Au plan méthodologique, ces travaux confirment l'intérêt d'approfondir la faisabilité technico-économique d'une utilisation des échantillonneurs passifs pour la surveillance de routine, notamment dans le cadre des réseaux DCE. Adaptées aux milieux d'eau douce comme aux milieux marins, ces techniques font cependant l'objet de développements complémentaires pour faciliter leur utilisation sur le terrain, limiter certains biais et progresser vers une au-

tomatisation partielle du traitement analytique. Un effort doit également être mené pour élargir le nombre de contaminants mesurables – en particulier parmi les substances prioritaires : quantification du mercure par DGT et/ou SBSE, du tributylétain par SBSE... Enfin, un enjeu important concerne l'extension de l'utilisation de ces échantillonneurs à la recherche de polluants dans d'autres milieux que l'eau – à commencer par les sédiments.

2.2 – Interpréter les données de surveillance : vers des valeurs seuils plus représentatives

À partir de quelles concentrations dans l'eau, ou dans les sédiments, la présence d'une substance donnée – ou d'un groupe de substances – représente-t-elle un risque pour la santé des milieux aquatiques ou la santé humaine ? Plus largement, comment interpréter les données de surveillance collectées sur les masses d'eau pour évaluer leur état chimique ? Pour les eaux superficielles, la directive cadre sur l'eau a fait des normes de qualité environnementale (NQE) la clé de voûte de cette évaluation. Ces valeurs-seuils, à portée réglementaire, sont définies comme la «concentration d'un polluant ou d'un groupe de polluant dans l'eau, les sédiments ou le biote qui ne doit pas être dépassée, afin de pro-

téger la santé humaine et l'environnement». Élaborées selon des règles fixées à l'échelon communautaire (voir le *Document guide technique européen pour la détermination des NQE dans le cadre de la DCE*, 2011), les NQE sont déterminées au niveau national et soumises à des révisions régulières. La NQE pour une substance donnée répond à cinq objectifs de protection :

- la protection des organismes pélagiques (vivant en pleine eau), associée à une concentration limite acceptable dans l'eau, obtenue par des tests d'écotoxicité ;
- la protection des organismes benthiques vivant dans et sur les sédiments, associée à une concentration limite acceptable dans ce comparti-

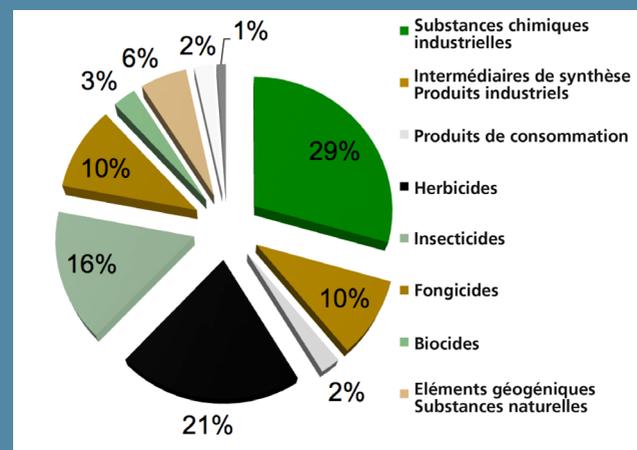
ment. Celle-ci est obtenue par des tests d'écotoxicité ou des approches de modélisation à l'aide du coefficient de partage à l'équilibre d'une substance entre phase solide et phase dissoute ;

- la protection des prédateurs supérieurs vis-à-vis de «l'empoisonnement secondaire» (par consommation d'organismes contaminés), qui correspond à une concentration limite dans les proies de ces animaux ;
- la protection de la santé humaine vis-à-vis de la consommation des produits de la pêche, qui correspond à une (autre) concentration limite dans les chairs des animaux ;
- enfin, la protection de la santé humaine vis-à-vis de la consommation

d'eau, associée à des normes de potabilité.

Pour chacun de ces cinq objectifs de protection, les concentrations limites obtenues par les données d'effet sont minorées par un facteur d'extrapolation, venant compenser l'absence de connaissances sur l'écotoxicité de la substance concernée : effets toxiques sur le long terme, effets toxiques sur d'autres espèces potentiellement plus sensibles, extrapolation des effets en milieu naturel à partir des données acquises en laboratoire, absence d'information sur l'ensemble du réseau trophique, etc. La NQE retenue correspond alors à la plus faible de ces cinq valeurs de concentration limite.

Figure 7. Répartition par type d'usage de l'ensemble des valeurs guides environnementales (VGE) proposées par l'INERIS à ce jour pour des substances chimiques d'intérêt national.



Sur cette base, l'évaluation de l'état chimique des eaux superficielle s'effectue selon un principe d'exclusion : il suffit que la NQE soit dépassée dans le cas d'une substance pour que la masse d'eau soit considérée en «mauvais état» (règle du *one out – all out*). Le dispositif diffère dans le cas des eaux souterraines : les valeurs seuils par substance sont cette fois définies au niveau national, et s'appuient sur les normes réglementaires de potabilité, ou à défaut sur les normes de l'Organisation mondiale de la santé.

Établir des NQE plus pertinentes

En France, les NQE en vigueur sont listées par l'arrêté ministériel du 8 juillet 2010 pour les substances prioritaires, et par l'arrêté ministériel du 25 janvier 2010 pour les polluants spécifiques de l'état écologique. Toutes les valeurs validées sont disponibles sur le portail Internet «substances chimiques» de l'Ineris, sous l'onglet «environnement». Mais le dispositif de surveillance est en perpétuelle évolution. Les listes de substances à surveiller et les méthodes d'évaluation sont soumises à des mises à jour régulières, tandis que des actions de recherche sont menées pour améliorer la compréhension des effets des substances sur les écosystèmes et les organismes, et *in fine* aboutir à des NQE plus pertinentes. Pour la période

2008-2013, l'Ineris a ainsi produit pour l'Onema 181 propositions de NQE (S. Andres, Ineris). Ces propositions sont appelées «valeurs guides environnementales» lorsqu'elles n'ont pas, ou pas encore, de valeur réglementaire. Validées par des groupes d'experts, elles correspondent à des substances dont la surveillance est jugée pertinente pour la France (listées notamment par l'arrêté du 30 juin 2005 «relatif au programme national d'action contre la pollution des milieux aquatiques par certaines substances dangereuses»).

Parmi les principaux axes de travail visant à améliorer la pertinence des NQE, **la conversion des valeurs-seuils d'une matrice à l'autre** (eau-biote ou sédiment-biote par exemple) constitue un enjeu de gestion important, et un défi scientifique complexe. Comment relier la concentration mesurée d'une substance dans les sédiments à sa teneur dans la chair musculaire des poissons ? À partir de quelle concentration dans les sédiments y-a-t-il un risque de dépassement des seuils sanitaires en vigueur pour la consommation des poissons par l'Homme ? Des avancées ont été réalisées sur ce thème dans le cadre du plan national d'actions sur les PCB, et sont présentée dans la section 2.4.

D'autres travaux menés par l'Ineris visent à une prise en compte plus

fine du risque toxique induit par certains métaux dissous dans les milieux aquatiques. Ceux-ci sont présents sous différentes formes dans l'eau, selon les conditions physico-chimiques du milieu, et seules certaines d'entre elles sont capables d'exercer une toxicité envers les organismes : il s'agit donc pour ces métaux de construire des NQE représentatives de cette «fraction biodisponible» – et non plus de la concentration totale en métaux dissous. Ces travaux sont abordés dans la section 2.3.

Enfin, un axe de travail essentiel, bien qu'encore émergent, concerne la prise en compte de **l'effet de la combinaison de substances chimiques présentes sous forme de mélanges dans l'environnement** sur les milieux et les organismes. Alors que les NQE

actuelles prennent généralement en compte les effets d'une substance prise isolément, il est désormais consensuel de considérer que les effets toxiques des contaminants ne s'exercent pas indépendamment les uns des autres mais par le biais de nombreuses interactions et synergies : c'est la notion d'effet «cocktail». Pour progresser dans sa prise en compte, l'Ineris construit des valeurs guides (propositions de NQE) pour des familles de substances chimiques, ainsi que pour des métabolites (produits de la dégradation des substances dans les milieux) notamment de pesticides. Des outils intégrateurs, bioessais ou biomarqueur, sont également développés (voir la section 3.3) pour caractériser les effets sur le vivant des mélanges chimiques.

nentes pour les éléments-traces métalliques fait donc face à une double difficulté (*L. Geoffroy, Ineris*) : elle doit prendre en compte le **fonds géochimique** (la présence naturelle des métaux dans l'environnement), et cibler leur **fraction biodisponible** (la part de la concentration totale susceptible d'avoir un impact toxique).

Depuis cinq ans, l'Onema a coordonné et financé plusieurs actions de recherche sur ces deux axes. Le BRGM a notamment développé une méthodologie d'estimation du fonds géochimique en métaux-trace pour les eaux souterraines de métropole. L'Ifremer a mené des campagnes de mesures dans les eaux côtières des départements d'Outre-Mer, débouchant sur une détermination des valeurs de «bruit de fond» pour les

quatre métaux prioritaires de la DCE : cadmium, plomb, nickel et mercure. Enfin Irstea s'est récemment attaché à évaluer qualitativement l'impact du fond géochimique sur la qualité des masses d'eau de surface continentales en métropole (Figure 8).

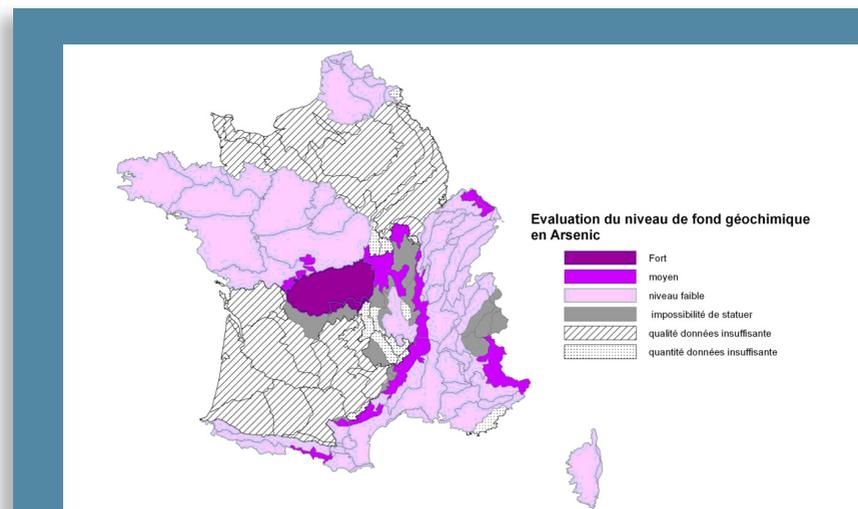
En parallèle, un nouveau cadre réglementaire a été adopté à l'échelle européenne pour ne prendre en compte que la fraction biodisponible des éléments-traces. De nouvelles NQE «génériques», correspondant à une biodisponibilité élevée, ont ainsi été validées (directive 2013/39) pour le nickel et le plomb : les valeurs seuils ont ainsi été ramenées de 20 µg/L à 4 µg/L pour le nickel, et de 7,2 µg/L à 1,2 µg/L pour le plomb. Ces valeurs fixes ne sont toutefois pas suffisantes pour une évaluation

2.3 – Contaminants métalliques : cibler la fraction biodisponible

Cadmium, chrome, cuivre, plomb, zinc, nickel, étain, mercure... Les éléments-traces métalliques sont présents naturellement, à l'état de traces, dans la croûte terrestre et les milieux naturels. Nombre d'entre eux sont indispensables à certains processus biologiques, à l'image du fer, composant de l'hémoglobine. Mais ces éléments, massivement dispersés dans l'environnement par les ac-

tivités humaines, ont également des effets néfastes sur les organismes : sous certaines formes, ils peuvent être assimilés par les êtres vivants et avoir sur ceux-ci un impact toxique. Le chrome hexavalent et le chrome trivalent sont par exemple bien plus toxiques que d'autres formes de cet élément. Dans une perspective d'évaluation de l'état chimique des milieux, l'élaboration de NQE perti-

Figure 8 : Carte de niveaux de fond géochimique, cas de l'Arsenic. (A.Chandesris *et al.*, Irstea-Onema 2013).



fine de la contamination des milieux aquatiques par ces éléments, car la biodisponibilité d'un métal-trace pour les organismes aquatiques (algues, petits crustacés pélagiques et poissons) et sa toxicité varient localement selon différents paramètres physico-chimiques. Pour certains métaux, la prise en compte de la biodisponibilité se fait via des modèles dits «BLM simplifiés» (Figure 8) (BLM signifiant «modèle du ligand biotique») intégrant des informations sur la spéciation du métal en solution et sa réaction à la surface des membranes biologiques (par ex. les branchies) pour prédire la toxicité du métal. Dans le cas du nickel, du zinc et du cuivre (Figure 9), ces outils permettent de calculer l'écotoxicité à partir du pH, du carbone organique dissous (COD) et de la concentration en calcium (Figure 10) (du fait de phénomènes d'interaction compétitive à la surface des branchies)... Dans le cas du plomb, elle peut être approchée à partir du seul carbone organique dissous. Pour d'autres métaux comme le chrome, aucun modèle de ce type n'est disponible en raison de la complexité des phénomènes mis en œuvre.

Le nouveau cadre réglementaire ouvre la possibilité, pour les États-membres, d'adopter une démarche graduée pour l'évaluation de l'état des eaux vis-à-vis de ces métaux :

lorsque la comparaison des données de surveillance aux NQE «génériques» indique un dépassement, les modèles BLM peuvent être utilisés pour affiner le diagnostic en prenant en compte l'influence des conditions physico-chimiques du milieu (qui peuvent, dans une certaine mesure, atténuer la toxicité du métal : effet protecteur du COD, du calcium et des protons H⁺). En cas de dépassement avéré, des mesures de restauration doivent être engagées.

Pour préparer la mise en œuvre de cette démarche graduée en France, l'Ineris a produit une synthèse bibliographique sur les différents modèles BLM existants, et testé depuis 2008 leur application aux données nationales de surveillance. Un document-guide a été tiré de ces travaux : il détaille les bonnes pratiques et les évolutions de l'effort de surveillance qu'implique l'utilisation de ces modèles en routine. Par exemple, la mesure des paramètres nécessaires à leur fonctionnement (carbone organique dissous, pH, calcium) devra être réalisée à une fréquence plus élevée, et synchronisée avec la recherche des métaux-traces. Cette évolution se traduira par une meilleure pertinence de la surveillance de l'état des eaux : les métaux-traces pour lesquels des modèles sont disponibles (zinc, cuivre, nickel) sont pour l'heure parmi ceux qui entraînent le plus de déclassements de masses d'eau.

Figure 9. Prédiction de la variation de la toxicité du cuivre (PNEC : concentration prédite sans effet, mg Cu/l) en fonction du pH et du carbone organique dissous (COD) dans des eaux douces. Plus la PNEC est élevée, moins le potentiel écotoxique de la substance concernée est élevé (L. Geoffroy, Ineris).

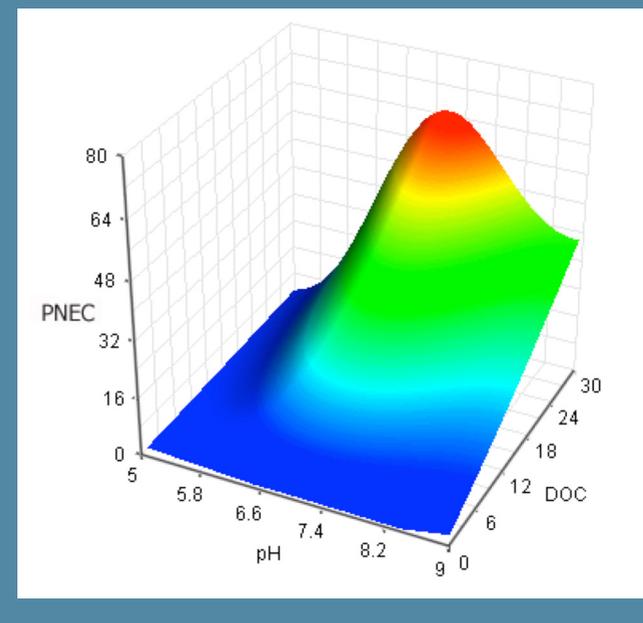
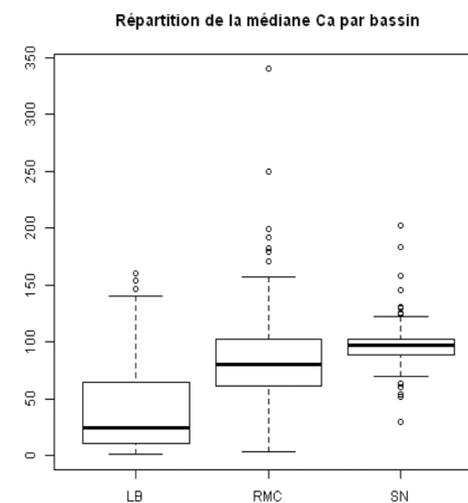


Figure 10. Les modèles BLM (modèles du ligand biotique) permettent la prise en compte de paramètres protecteurs variables selon les contextes hydrochimiques, tel le Calcium dissous dont la teneur est plus ou moins forte selon la typologie géologique des bassins. Dans ce graphique la prépondérance des contextes sédimentaires sur le bassin Seine-Normandie (SN) se traduit par des hautes teneurs en Calcium, à l'opposé du bassin Loire-Bretagne (LB) où des contextes de socle sont plus représentés.



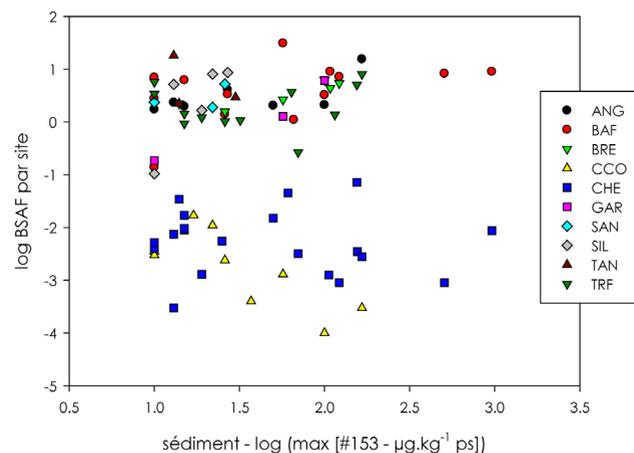
2.4 – Interpréter les données de surveillance : vers des valeurs seuils plus représentatives

Interdits en France depuis plus de deux décennies, les PCB (polychlorobiphényles, utilisés pour diverses applications industrielles jusqu'aux années 1980) sont encore présents dans les sédiments de nombreux cours d'eau. Ces polluants organiques persistants, aux effets cancérogènes et endocriniens avérés, contaminent les organismes essentiellement par voie trophique. Lancé en 2008 suite à l'adoption par l'Union européenne de nouvelles normes sanitaires sur la consommation des poissons d'eau douce, le Plan national d'actions sur les PCB a permis

des avancées majeures pour la compréhension des liens entre contamination des sédiments et contamination des poissons, et du niveau de risque induit pour les consommateurs humains.

L'un des objectifs majeurs du plan visait la proposition de concentrations seuils de PCB dans les sédiments, au-delà desquelles les produits de la pêche ne doivent plus être consommés. Les résultats de plusieurs études, conduites dans cette optique par Irstea, ont été présentés lors du séminaire (M. Babut, Irstea).

Figure 11 : Valeurs des facteurs de bioaccumulation sédiment-biote (BSAF) par espèce de poisson d'eau douce et par site en fonction des concentrations en PCB 153 mesurées dans les sédiments. Les espèces fortement bio-accumulatrices sont représentées par l'anguille (ANG) et le barbeau fluviatile (BAF), et les espèces faiblement bio-accumulatrices par le chevesne (CHE) et la carpe commune (CCO).



Facteurs de bioaccumulation sédiments-biote : un taux d'erreurs élevé

Entre 2008 et 2010, 2 300 lots de poissons d'eau douce ont été prélevés sur 300 sites français : pour chaque spécimen, les concentrations de 18 congénères de PCB ont été mesurées. Cet état des lieux, le plus complet mené à ce jour en France, a confirmé une contamination généralisée des poissons par les PCB : ceux-ci ont été détectés dans la totalité des échantillons. Les concentrations présentent cependant de fortes variations d'un site à l'autre, et d'une espèce à l'autre. Certains poissons possèdent un fort potentiel d'accumulation (anguille, silure, brème, barbeau) tandis que d'autres sont moins accumulateurs (sandre, brochet, gardon, chevesne). Sur la base de ces données, une première approche à large échelle a cherché à relier la concentration en PCB des sédiments à la concentration mesurée dans les chairs des poissons, au moyen de facteurs de bioaccumulation biote-sédiment (notés BSAF) (Figure 11). Définis comme le ratio entre la concentration du contaminant dans le biote (normalisée par le taux de lipides dans les tissus biologiques) et celle dans les sédiments (normalisée par la concentration en carbone organique total), ils ont été calculés pour chaque espèce et chaque site.

Une distribution des valeurs de BSAF a ainsi été obtenue pour chaque espèce de poissons. Cette approche simple a été utilisée pour proposer (à partir du troisième quartile du BSAF du barbeau, tous sites confondus), un seuil de concentration-limite dans les sédiments correspondant aux valeurs réglementaires dans le biote. La méthode a été appliquée à la base de données nationale sur la contamination des poissons d'eau douce par les PCB : elle n'a permis de prédire correctement la «comestibilité» que pour 55% des poissons à partir d'une valeur seuil de PCB dans les sédiments égale à 50 ng/g (en poids sec) pour la somme des PCB. Quelques leviers méthodologiques existent pour abaisser ces taux d'erreurs mais il apparaît *in fine* peu probable de construire des valeurs seuils fiables au plan sanitaire par cette approche.

Des approches concluantes en modélisation

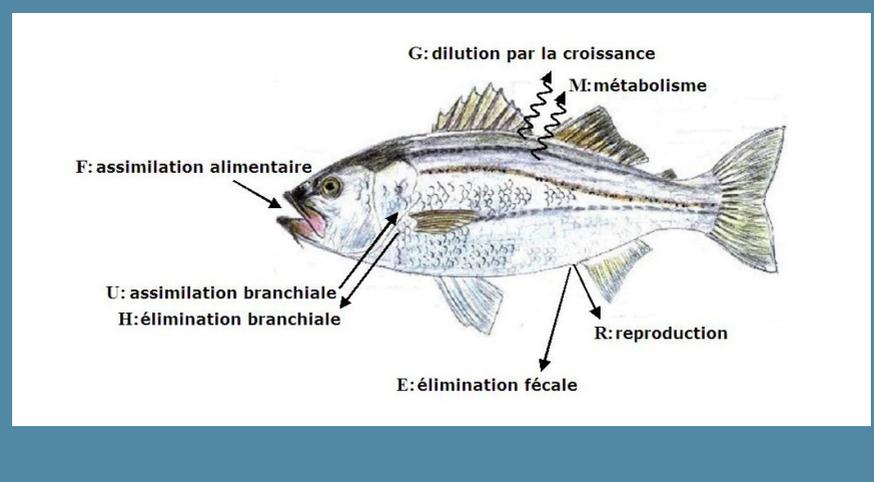
Une autre étude menée par Irstea, soutenue notamment par l'Onema et l'agence de l'eau Rhône Méditerranée-Corse dans le cadre du Plan Rhône, s'est basée sur l'analyse de la contamination de 135 poissons appartenant à trois espèces (brème, barbeau, chevesne) et de carottages de sédiments issus de trois sites du fleuve Rhône. Deux approches complémentaires ont été adoptées. D'une

part, une modélisation statistique a cherché à relier la contamination des poissons à différentes variables descriptives : taille, masse, sexe et âge du poisson, pourcentage de matière grasse dans ses chairs, proportion du carbone détritique dans son alimentation, et enfin teneur maximale en PCB dans les sédiments à laquelle le poisson a été exposé au cours de sa vie. L'exploitation de ces données a montré que 78% de la variabilité totale pouvait être expliquée par seulement trois variables : la taille, la proportion du carbone détritique dans l'alimentation, et la teneur maximale en PCB dans les sédiments. Cette approche a permis le rétro-calcul, pour chaque poisson, d'une concentration maximale dans les sédiments compatible avec le seuil réglementaire de

consommation. Sur cette base, des valeurs guides ont été proposées : par exemple, si l'on décide qu'au moins 75% des poissons doivent être conformes au seuil réglementaire de consommation, il ne faudrait pas dépasser 12,7 ng/g (en poids sec) pour la somme des PCB indicateurs dans les sédiments ; pour protéger 90% des poissons il ne faut pas dépasser 5,9 ng/g.

Parallèlement, à partir des mêmes données de terrain, les équipes ont développé un modèle d'accumulation des PCB à base physiologique (Figure 12). Ce travail visait à décrire les processus en jeu dans la bioaccumulation pour comprendre pourquoi, sur un même site, des poissons d'une même espèce présentaient des taux de contamination aux PCB différents.

Figure 12. Modèle physiologique d'accumulation des PCB – représentation schématique des mécanismes (M. Babut, Irstea).



L'équation du modèle a été formulée de façon à calculer une concentration en PCB à ne pas dépasser dans les sédiments pour qu'aucun poisson ne dépasse, à aucun moment, le seuil réglementaire. Selon le site et l'espèce considérés, les seuils obtenus varient entre 2,6 et 14 ng/g de poids sec.

Vers des valeurs utilisables par les gestionnaires

Les travaux menés dans le cadre du plan PCB, selon trois approches différentes, ont permis de proposer un ensemble de valeurs seuils pour la concentration de PCB maximale dans les sédiments au regard des normes de consommation des produits de la pêche. Quelques valeurs sont données pour mémoire dans le tableau 1.

L'approche simplifiée basée sur les facteurs BSAF apparaît entachée d'un taux d'erreurs de type II (dépassements non prédits) préjudiciable. Les deux autres méthodes (statistique et physiologique) livrent des valeurs seuils cohérentes entre elles. Elles fournissent des éléments précieux en vue de la mise en place de NQE «sédiments», utilisable par les gestionnaires. Dans cette optique, elles doivent cependant être testées avec d'autres jeux de données, et étendues à d'autres espèces et d'autres bassins versants.

Remobilisation par dragage : un impact limité

Outre la thématique de la conversion sédiments-biote, le plan national PCB a généré des avancées sur différents axes. Une étude de

Tableau 1. Quelques valeurs-seuils «sédiments» obtenues dans le cadre du plan national PCB (M. Babut, Irstea).

Approche	Seuil sédiments obtenu (µg PCB/kg de poids sec)	Remarque
Modèle statistique	5,9 (pour 90% de non dépassement) 12,7 (pour 75% de non dépassement)	Erreur de type II admise 10% Erreur de type II admise 25%
Modèle à base physiologique	2,6	Contrainte de non dépassement en tout temps
Facteur de bioaccumulation (BSAF) – bassin Rhône-Méditerranée	26,6	62% de prédictions correctes. Taux d'erreur de type II élevé
Facteurs de bioaccumulation (BSAF) – Etude base nationale	50	55% de prédictions correctes. Taux d'erreur de type II élevé

l'Agence nationale de sécurité sanitaire de l'alimentation, de l'environnement et du travail (Anses), en collaboration avec l'institut de veille sanitaire (INVS), a notamment permis de préciser le niveau d'imprégnation sanguine aux PCB des consommateurs adultes de poissons de rivière afin d'identifier les déterminants prédominants de cette imprégnation. À Lyon, le pôle de compétitivité Axelera a travaillé sur le traitement et la valorisation à terre des sédiments contaminés aux PCB : un séminaire de restitution technique a été organisé le 2 juillet 2012. Une autre étude (*F. Rebischung, Ineris*), non centrée sur les PCB, s'est intéressée aux effets des opérations de dragage en cours d'eau ou en canal. Ces opérations, nécessaires pour remédier à l'accumulation des sédiments entravant la navigation, peuvent également constituer une option pour améliorer l'état du milieu aquatique lorsque les sédiments sont contaminés. Ils sont cependant susceptibles d'entraîner des effets néfastes, par remobilisation des substances toxiques présentes dans les sédiments. Pour évaluer l'impact des opérations de dragage mécanique sur la qualité des eaux de surface, un suivi *in situ* a été mené, pendant l'été 2010, lors d'opérations de dragage réalisées sur le canal de Lens. Un ensemble de paramètres physico-chimiques a

été mesuré à différentes distances (de 0 à 3000m) à l'aval des travaux : turbidité, pH, matières en suspension. Les concentrations en huit métaux-traces ont été recherchées, ainsi que deux familles de polluants émergents : les DEHP et les PBDE. Les résultats révèlent un impact limité des opérations : les teneurs en matières en suspension et contaminants augmentent sensiblement (jusque 20 fois les niveaux initiaux) à faible distance du curage, sans toutefois entraîner de dépassement des NQE. Les concentrations décroissent rapidement à l'aval des opérations, avec la redéposition sur le fond des matières en suspension : à un kilomètre du curage, les valeurs ont retrouvé le niveau moyen du canal. Bien que ponctuelle dans le temps et dans l'espace, cette étude suggère que les risques de pollution induits par le curage ou le dragage pourraient être assez limités au regard des bénéfices potentiels, pour l'état chimique des milieux, du retrait des sédiments contaminés. ■

Eclairage

Eaux souterraines et salinisation : un impact limité

L'évaluation de l'état qualitatif des eaux souterraines dans le cadre de la DCE prend en compte, en sus des micropolluants organiques, un ensemble de paramètres physico-chimiques : du pH à la concentrations en ions (Cl^- , Ca^{2+} , Mg^{2+} ...), des matières en suspension à la turbidité. La salinisation des nappes, cause majeure de dégradation de la qualité des eaux dans le monde, fait l'objet d'une attention particulière. Les mécanismes naturels à l'origine de ce phénomène (intrusions marines, précipitations et infiltrations en milieux côtiers...) peuvent être amplifiés ou modifiés par les activités humaines : pompage, résidus miniers, salage des routes, exploitations géothermique, infiltrations agricoles... Une étude (*W. Kloppmann, BRGM*), cofinancée par l'Onema, a dressé un état des lieux des aquifères en France métropolitaine sur la base des données centralisées par la banque ADES entre 2005 et 2010. Il ressort de ce bilan (Figure 13) que seules 22 masses d'eau de métropole (sur 594 utilisées pour la fourniture d'eau potable, soit moins de 4%) sont concernées par une salinisation préoccupante – c'est-à-dire présentant plus de 7 forages d'une chlorinité supérieure à 100 mg/L sur la période étudiée. Parmi celles-ci, 15 sont en contexte continental, loin du biseau salé : leur salinité peut être liée à la dissolution d'évaporites dans les bassins sédimentaires ; à la conservation d'eau de mer ou de saumure anciennes ; à des sources industrielles ponctuelles ou à d'autres sources anthropiques. Pour ces masses d'eau, des outils de diagnostic géochimique (méthodes isotopiques, datation radiocarbone...) ont été utilisés afin de définir la géométrie de la salinisation, d'établir la structure des âges des eaux salines et douces dans l'aquifère, et d'en conclure des hypothèses quant aux causes (naturelles ou anthropiques) de la salinité. L'étude a enfin proposé une méthodologie opérationnelle de diagnostic de la salinisation, débouchant le cas échéant sur des mesures de gestion. Elle a débouché sur trois rapports détaillés, disponibles sur le site de l'Onema.

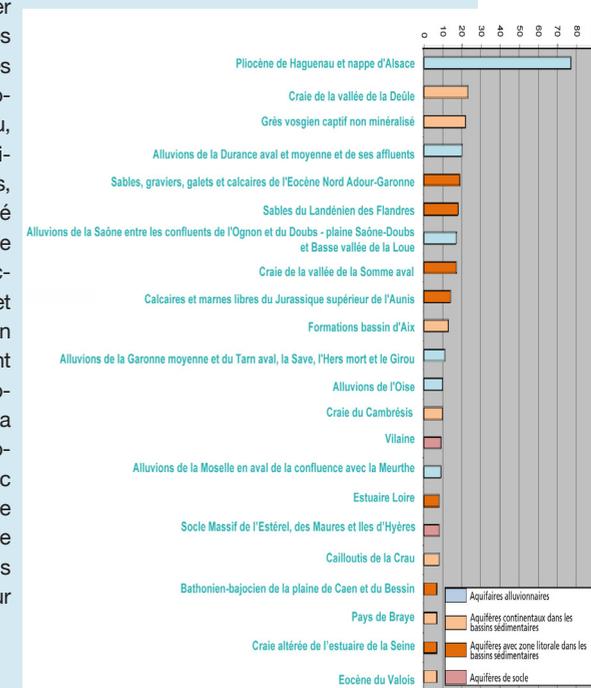
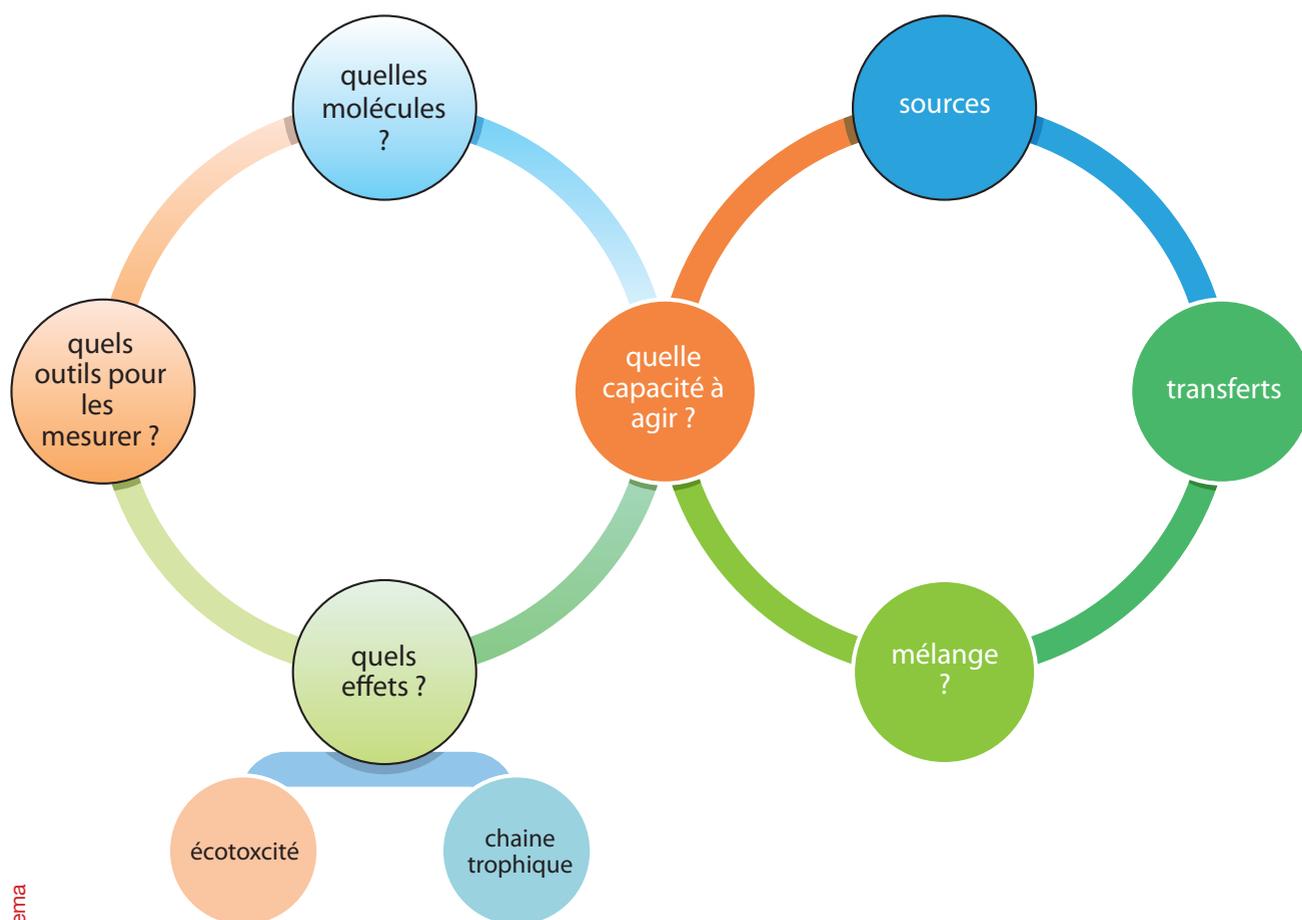


Figure 13. Les 22 nappes concernées par une salinisation préoccupante en France métropolitaine (W. Kloppmann, BRGM).



À la faveur de la directive cadre sur l'eau, les États-membres ont déployé depuis dix ans un effort notable de surveillance systématique des substances chimiques dans les milieux aquatiques. Mais ce dispositif réglementaire est nécessairement concentré, au plan technique et économique, sur un certain nombre de contaminants prioritaires – en France et pour les eaux de surface il concerne désormais 53 substances.

La révision périodique des listes est le fruit d'un difficile travail de priorisation à l'échelle européenne : plus de 50% des substances candidates ont ainsi été mises de côté lors du dernier exercice de sélection au niveau communautaire, souvent par manque d'information sur leurs effets, ou de données d'exposition suffisamment significatives.

Par contraste, plus de 100 000 molécules distinctes ont été produites à ce jour, de par le monde, à échelle industrielle. L'Europe produit aujourd'hui 30% des substances chimiques mondiales, et plus de 3 800 nouvelles substances ont été enregistrées depuis 1981 dans l'Inventaire européen des substances chimiques existantes commercialisées (EIECCS).

Face aux menaces sur la biodiversité, à l'augmentation de nombre de cancers, du diabète, des troubles du comportement ou des perturbations endocrines, observée depuis 40 ans, une vigilance croissante est portée aux substances dites « émergentes » ou « d'intérêt émergent ». Ces notions, relativement ambiguës, peuvent désigner des réalités très différentes : il peut s'agir de substances présentes de longue date dans l'environnement mais pour lesquelles les méthodes analytiques ne sont ou n'étaient pas disponibles (par exemple les PBDE ou les phtalates) ; de substances chimiques nouvellement synthétisées – notamment en remplacement de substances interdites ; et/ou de substances dont les impacts environnementaux ou sanitaires font l'objet d'une inquiétude nouvelle (nanoparticules, résidus médicamenteux, composés perfluorés, biocides chlorés...).

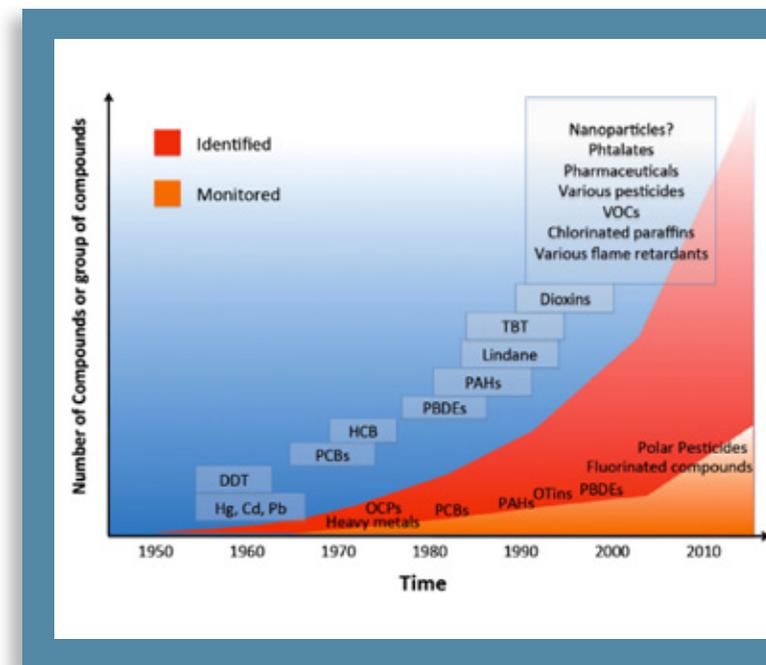
En France, au cours des cinq dernières années, la prise de conscience croissante des risques liés à ces diverses substances pour la santé humaine et les milieux aquatiques s'est traduite par une activité de recherche soutenue, dont les résultats sont présentés dans cette troisième partie. Un comité d'experts national a été constitué pour identifier, au moyen d'une méthode itérative, les substances émergentes sur lesquelles doit se porter l'effort en priorité. Des campagnes exceptionnelles ont été menées pour rechercher, pour la première fois à aussi large échelle, des dizaines de substances nouvelles dans les eaux continentales. En parallèle, une palette d'outils biologiques novateurs – biomarqueurs et bio-essais – sont développés et mis en œuvre pour évaluer les effets des substances, isolément ou en mélange, sur les organismes et les écosystèmes.

3.1 – Identifier et surveiller les substances à enjeux : une démarche itérative

Pour un contaminant donné, l'acquisition de connaissances scientifiques sur son comportement et ses effets potentiels dans l'environnement est une condition préalable à la mise en place d'une réglementation, pouvant déboucher sur des restrictions d'émissions et une stratégie de surveillance.

Mais dans un contexte de ressources limitées, et au regard du nombre de substances chimiques susceptibles d'affecter les milieux aquatiques, l'effort de recherche doit être mené d'abord pour les substances présentant les plus forts enjeux sanitaires et environnementaux (figure 14).

Figure 14. Évolution dans le temps du nombre de substances faisant l'objet d'une surveillance, comparé au nombre de polluants identifiés (O. Perceval, Onema, d'après Marine Board-ESF).



À l'échelle européenne, le réseau NORMAN (www.norman-network.net) assure depuis 2005 une mission de veille et de priorisation sur les contaminants chimiques. Regroupant 46 laboratoires de référence issus de 19 pays, il assure une mission d'échange d'informations par la mise en place de bases de connaissances partagées ou l'organisation d'ateliers, et veille à l'harmonisation des données et des méthodes utilisées.

Son pendant français a été créé en 2010, sous l'impulsion du plan Micropolluants 2009-2013 : le Comité

d'experts en priorisation (CEP), structure nationale pour la hiérarchisation des enjeux liés aux micropolluants aquatiques, réunit notamment l'Ineris, l'Onema, le BRGM, Irstea, l'Ifremer, l'Anses, l'Université de Bordeaux, les ministères en charge de l'écologie et de l'agriculture. Il a en particulier publié, en avril 2013, une méthode de mise à jour des listes de substances (Figure 15 page suivante) pour lesquelles des actions de surveillance sont requises à l'échelle nationale avant de pouvoir examiner leur possible contribution à l'évaluation DCE de l'état des eaux (V. Dulio, Ineris).

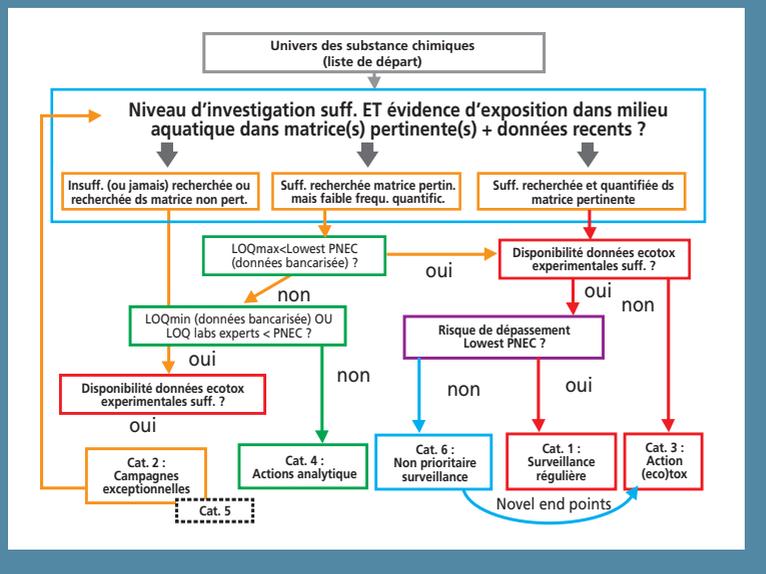


Figure 15. Le comité d'experts en priorisation développe un processus de mise à jour des listes de substances pour lesquelles des actions de recherche doivent être entreprises. (CEP)

Ce processus aboutit à une catégorisation des substances selon les manques de connaissances actuels. Six cas de figure sont distingués. La catégorie 1 (exposition avérée des milieux aquatiques et risques connus) rassemble en particulier les substances pour lesquelles un contrôle permanent doit être mis en œuvre – par exemple au titre des contaminants spécifiques de l'état écologique, dont la liste est définie au niveau national. La catégorie 2 regroupe les substances d'intérêt au regard de risques polluants potentiels mais pour lesquelles la présence dans les milieux aquatiques n'est pas connue précisément, alors que les techniques analytiques sont dispo-

nibles : des campagnes de mesure exploratoires doivent alors être engagées pour caractériser le niveau d'exposition des milieux. La catégorie 4 concerne quant à elle les substances pour lesquelles le niveau d'exposition des milieux aquatiques n'est pas connu précisément, fautes de moyens de mesure adaptés : l'effort doit alors s'orienter vers l'amélioration des techniques analytiques.

Itérative, cette méthode a notamment permis au CEP de produire en 2011 la liste des substances qui a servi de base pour l'étude prospective 2012 (voir section 3.2) : les résultats de cette campagne de mesure serviront à leur tour pour la définition

des substances pertinentes à surveiller (catégorie 1). Ce processus transparent, auquel des améliorations seront progressivement apportées,

fait office de modèle européen pour l'amélioration des connaissances sur les contaminants émergents et l'anticipation de la future surveillance.

3.2 – Substances émergentes dans les masses d'eau : premier état des lieux

La connaissance de l'état chimique des eaux, au-delà de la surveillance réglementaire, a réalisé en France une avancée majeure avec la réalisation, en 2011 puis en 2012, de deux campagnes à l'échelle nationale visant à établir un bilan de la présence de substances émergentes pour tous les types de masses d'eau – superficielles et souterraines. La **Campagne exceptionnelle 2011**, dont la maîtrise d'ouvrage a été confiée aux six agences de l'eau par le ministère en charge de l'écologie, a concerné les eaux souterraines : 411 substances émergentes ont été recherchées, avec l'appui technique du BRGM et de l'Ineris, dans 494 points de prélèvement répartis dans les aquifères de métropole. Au total, plus de 393 000 résultats d'analyse exploitables ont été fournis par les laboratoires prestataires – le taux de réalisation des analyses a atteint 96%.

L'année suivante, l'**Étude prospective 2012** s'est intéressée aux eaux superficielles de métropole et d'outre-mer, ainsi qu'aux eaux souterraines d'outre-mer. Coordonnée

par l'Ineris sous maîtrise d'ouvrage de l'Onema, elle a permis, pour la première fois, la recherche de nombreux contaminants émergents dans l'eau (82 substances recherchées en métropole) mais aussi dans les sédiments (134 substances recherchées) – des additifs d'essence aux plastifiants, des médicaments aux produits de soin corporels. Tous les types de masses d'eau superficielles étaient concernés : cours d'eau (115 points de prélèvement), plans d'eau (18 points) et eaux littorales (20 points). Plus de 50 000 résultats exploitables ont été fournis par les laboratoires universitaires associés. S'y ajoutent près de 30 000 résultats pour les cinq départements d'outre-mer, eaux de surface et souterraines confondues – 20 stations littorales ayant notamment été échantillonnées par les techniques POCIS et SBSE (voir section 2.1). Les résultats de ces deux campagnes volontaristes, en cours d'exploitation, ont fait l'objet d'une première présentation (F. Botta, Ineris) lors du séminaire.

Enseignements pour les eaux souterraines

Les 411 substances émergentes recherchées dans les eaux souterraines de métropole se répartissaient dans cinq catégories d'usage : produits pharmaceutiques (133 molécules), phytosanitaires (101), substances industrielles (127), produits domestiques (24) et usages multiples (26). Le premier enseignement – rassurant – est que 56% de ces substances n'ont été quantifiées dans aucun prélèvement. Les substances les plus quantifiées en métropole sont des produits pharmaceutiques (61 substances), devant les substances industrielles (48) et les produits phytosanitaires (41).

Pour les départements d'outre-mer, le taux de substances jamais quantifiées atteint 59 % (112 substances sur

189 recherchées). Les plus quantifiées sont cette fois les produits phytosanitaires, devant les produits pharmaceutiques. L'analyse des résultats par types d'usages, en cours, livre ses premiers enseignements qualitatifs, résumés par la figure 16.

Les résultats sont également exploités pour identifier les types de substances les plus fréquemment quantifiées selon le type d'environnement – et donc la pression dominante – au point de prélèvement : agricole, industriel, urbain/domestique ou milieu de référence (faiblement anthropisé). Par exemple, les substances industrielles sont quantifiées à parts presque égales en milieu à dominante agricole, industrielle ou urbaine. En comparaison, les phytosanitaires sont retrouvés essentiellement en milieu agricole, et dans une moindre mesure en milieu urbain.

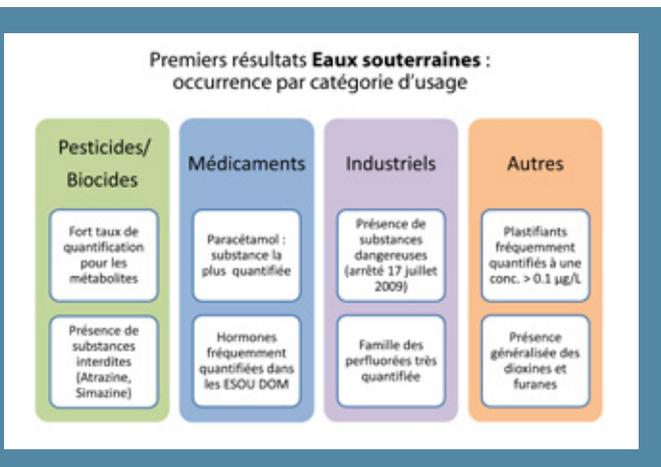


Figure 16. substances émergentes quantifiées dans les eaux souterraines, par catégorie d'usage. Premiers enseignements qualitatifs. (F. Botta, Ineris)

Enseignements pour les eaux superficielles

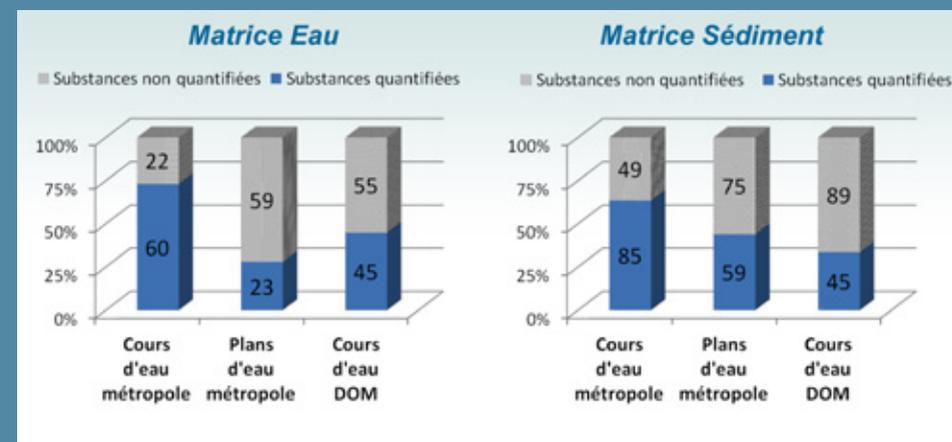
Dans les eaux de surface, les taux de quantification des substances émergentes diffèrent sensiblement selon la matrice étudiée (eau ou sédiments) et le type de masse d'eau (cours d'eau, plans d'eau, eaux côtières). De manière générale, c'est dans les cours d'eau de métropole que le nombre de molécules quantifiées apparaît le plus important (Figure 17).

Là encore, l'exploitation des données, en cours, permettra d'identifier les substances émergentes les plus fréquemment quantifiées selon le type de pression dominante dans

l'environnement du prélèvement – agricole, industriel, urbain/domestique ou milieu de référence.

À ce stade, certaines substances apparaissent étroitement liées à une pression donnée (ainsi le métolachlore, métabolite d'herbicide, est beaucoup plus souvent retrouvé en contexte agricole que dans les autres milieux), tandis que d'autres substances, qualifiées d'ubiquistes, se retrouvent indifféremment dans tous les milieux. C'est le cas par exemple du carbofuran : cet insecticide, d'usage interdit, est détecté à l'état de traces – quelques ng/L – dans tous les échantillons, y compris dans les milieux de référence.

Figure 17. Occurrence des molécules émergentes dans les eaux de surface selon la matrice considérée. (F. Botta, Ineris)



D'autres enseignements qualitatifs sés, par catégorie d'usage, dans la de la campagne 2012 sont synthéti- figure 18.

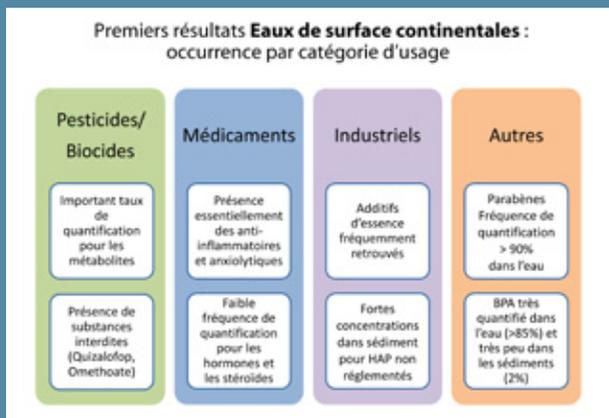


Figure 18. substances émergentes quantifiées dans les eaux de surface, par catégorie d'usage. Premiers enseignements qualitatifs. (F. Botta, Ineris)

De manière générale, ces deux campagnes de recherche, sans équivalent en Europe par la variété de molécules et le nombre de masses d'eau échantillonnées, constituent une base d'informations précieuses pour comprendre les origines et les sources des substances émergentes dans les milieux aquatiques. Dans le cadre de la démarche itérative mise en œuvre à l'échelle nationale (voir section 3.1), elles contribuent à l'identification des substances à enjeu en matière de développement de connaissances toxicologiques et écotoxicologiques ou de techniques analytiques. Elles seront notamment exploitées pour la mise à jour de la liste des substances devant

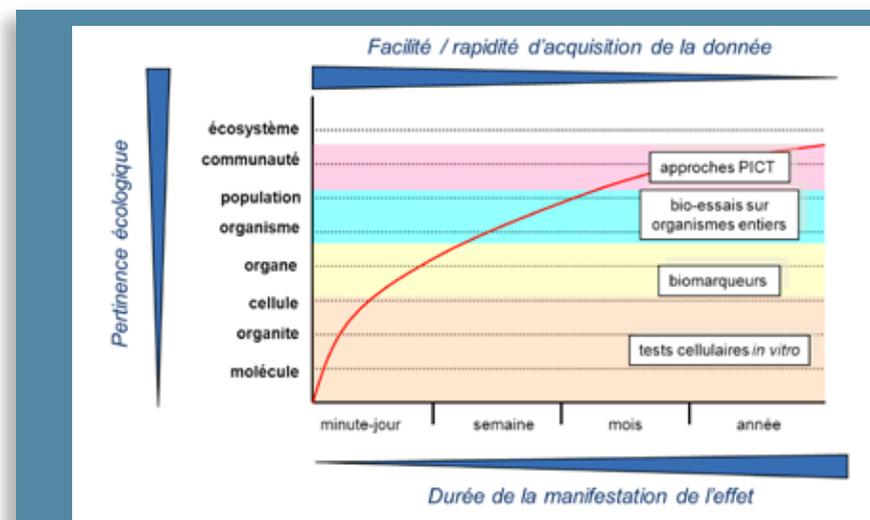
faire l'objet d'une surveillance dans les milieux aquatiques (retenues pour le programme de surveillance lancé en 2014), et de la liste des substances à surveiller dans les eaux souterraines (en vue du cycle de gestion 2015-2021 de la DCE). Leurs résultats permettront en outre de formuler des recommandations précises pour l'organisation de campagnes ultérieures : le ministère prévoit de reconduire ce type d'étude à une fréquence de six années, correspondant aux cycles de gestion de la DCE. Enfin, les résultats de la campagne exceptionnelle 2011 et de l'étude prospective 2012 feront l'objet en 2014 de rapports détaillés et d'une communication au grand public.

3.3 – Des outils biologiques novateurs pour la surveillance et le diagnostic

Au-delà de la quantification des nouvelles substances dans les milieux aquatiques, le diagnostic du risque environnemental qu'elles induisent constitue un défi scientifique complexe. La contamination chimique, aiguë ou chronique, est susceptible d'affecter différentes fonctions biologiques des organismes exposés : effets toxiques sur la reproduction, sur la transmission de l'influx nerveux, perturbations endocriniennes, effets mutagènes ou immunotoxiques. Il apparaît essentiel de mieux appréhender les effets toxiques des mélanges de contaminants : ceux-ci ne

sont que peu pris en compte à l'heure actuelle par la réglementation, alors que de nombreuses études montrent l'impact des cocktails de substances interagissant entre elles, même à de très faibles concentrations individuelles. La nécessité de sortir d'une évaluation des risques «substance par substance» est désormais largement admise par la communauté scientifique. Dans cette optique, différents outils biologiques (Figure 19), développés ces vingt dernières années, peuvent constituer des options pertinentes pour contribuer à un diagnostic intégré de la qualité chimique

Figure 19. Typologie d'outils biologiques disponibles pour le diagnostic de la contamination chimique des milieux aquatiques. (O.Perceval, Onema, adapté de Braunbeck 1993, et Kase et al. 2009)



des milieux aquatiques : surveillance *in situ* des contaminants dans les tissus d'organismes (sélectionnés pour leur caractère bio-accumulateur) ; utilisation de biomarqueurs (réponses biologiques mesurables à l'échelle infra-populationnelle pour mettre en évidence l'exposition des organismes à des polluants présents dans l'environnement et, dans certains cas, d'en caractériser les effets) ou de bioessais (étude sur des organismes vivants pour mesurer l'effet de substances ou de groupes de substances) ; mise en œuvre d'indicateurs écologiques (traduisant les effets des contaminants à l'échelle de communautés vivantes).

Ces outils intégratifs, qui peuvent pâtir d'une interprétation encore peu standardisée, constituent des approches pertinentes en complément des analyses chimiques traditionnelles (O. Perceval, Onema). Exploités en conditions contrôlées (tests cellulaires *in vitro* ou bio-essais) et/ou dans l'environnement naturel (biomarqueurs, indicateurs écologiques), ils permettent de prendre en compte les fractions bio-disponibles et actives des contaminants. Leur mise en œuvre en batterie ouvre en outre la possibilité de caractériser les effets d'une large gamme de contaminants présents dans le milieu, ainsi que les effets combinés d'un mélange de contaminants. Les biomarqueurs, spécifiques à un contaminant donné,

renseignent également sur les liens entre exposition et effets.

Utilisées de longue date pour des recherches ciblées, de telles approches apporteront, demain, des contributions précieuses au diagnostic de l'état des eaux : identification de substances responsables des effets observés dans le milieu, évaluation des effets de mélanges représentatifs, signaux d'alarmes quant à une pollution nouvelle (dans le cas des biomarqueurs dits «précoces»), et plus largement, support à l'évaluation de l'état chimique. Plusieurs réalisations existantes, présentées dans cette section, illustrent la pertinence – et la faisabilité – de la mise en œuvre de ces outils dans une perspective de gestion.

Polluants émergents sur le littoral : les mollusques parlent

L'Ifremer déploie depuis 1979 une surveillance pérenne de la pollution du littoral français dans le cadre du Réseau d'observation de la contamination chimique (ROCCH). Ce dispositif est l'un des rares en Europe à comporter un suivi, réalisé en routine depuis 2008, des concentrations en contaminants dans le biote des moules et d'huîtres – espèces dont le caractère intégrateur de la pollution est avéré, et caractérisé par des cinétiques d'accumulation rapides.

Dans les chairs de ces mollusques, échantillonnés annuellement sur 25 sites des façades françaises de la Manche, de l'Atlantique et de Méditerranée, sont recherchés des polluants organohalogénés (molécules chlorées, bromées, fluorées) caractérisés par leur toxicité et leur persistance élevées ; à titre d'exemples des polluants organiques persistants tels que les PBDE, ainsi que différents contaminants émergents pour lesquels très peu de données sont encore disponibles pour les côtes françaises. Le suivi réalisé permet de caractériser la distribution géographique de ces substances sur le littoral (C. Munsch, Ifremer). Les tendances temporelles sont également étudiées, par l'exploitation des échantillons archivés dans la «mythothèque» de l'Ifremer depuis 1981.

Les résultats obtenus pour le PBDE-47 donnent un exemple de l'intérêt des suivis dans le biote pour la surveillance de l'état chimique des milieux (Figure 20).

Ce retardateur de flamme bromé, réglementé en Europe, a vu ses émissions décroître fortement à partir de 1995. Ses concentrations moyennes dans les tissus des mollusques apparaissent nettement plus élevées à proximité des secteurs industrialisés tels que l'estuaire de la Seine ou celui de la Nivelle (Pyrénées-Atlantiques). Mais les tendances temporelles suivent de près l'évolution des émissions : en forte croissance entre 1975 et 1995, les concentrations dans le biote montrent depuis un repli marqué, suggérant une quasi-disparition du polluant sur les côtes françaises en 2015 (Figure 21, page suivante).

Figure 20. Concentrations moyennes (2010) en PBDE-47 dans les chairs d'huîtres et de moules sur le littoral français. (C. Munsch, Ifremer)

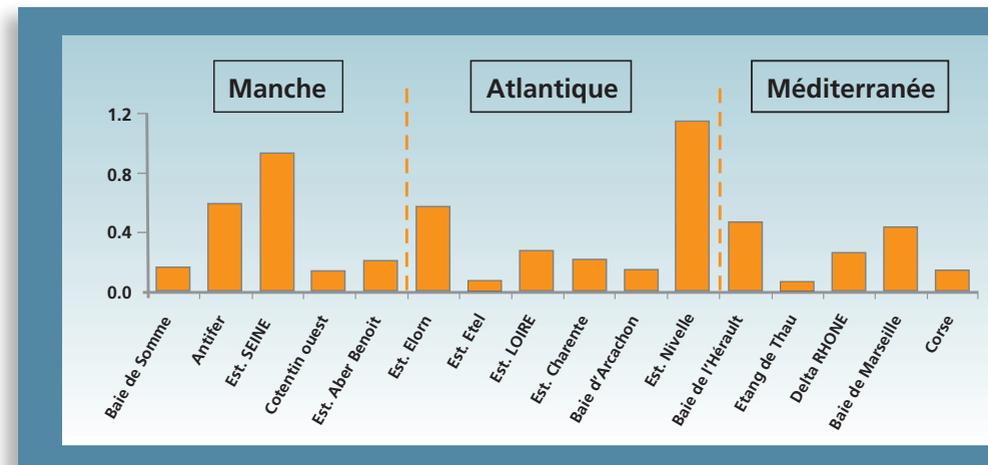
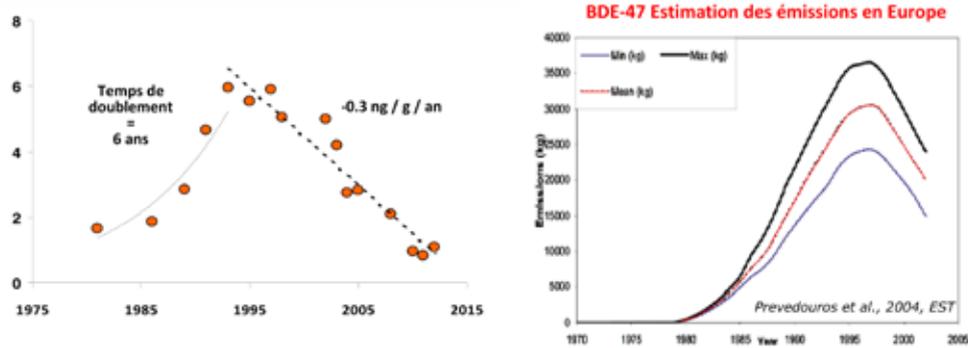


Figure 21. Évolution temporelle des concentrations du PBDE-47 mesurées dans les chairs d'huîtres et de moules de l'estuaire de la Seine (ng/g de poids sec), miroir de l'évolution des émissions estimées en Europe. (C. Munsch, Ifremer)



En comparaison, les résultats obtenus pour l'hexabromocyclododécane (HBCDD), un retardateur de flamme

non réglementé, montrent une répartition géographique similaire... mais aucune inflexion temporelle (Figure 22).

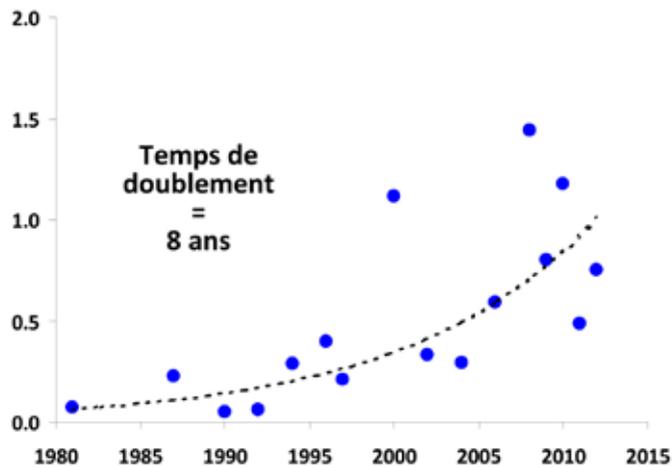


Figure 22. Évolution temporelle des concentrations en HBCD mesurées dans les chairs d'huîtres et de moules de l'estuaire de la Seine (ng/g de poids sec). (C. Munsch, Ifremer)

Ces constatations confirment les effets rapides des restrictions d'émissions, pour certaines substances, sur la contamination des organismes vivants. Au plan méthodologique, elles illustrent la pertinence et la faisabilité de la recherche des substances émergentes dans le biote, y compris en routine, pour la surveillance de l'état des milieux et le suivi de l'efficacité des mesures de restriction des émissions polluantes. Cette approche à grande échelle, soutenue par l'Onema, a fait l'objet de publications récentes et de présentations lors de colloques internationaux. Elle a notamment nourri le rapport *Niveaux de présence de contaminants émergents dans le milieu marin - PCDD/F, PBDE, HBCD dans les mollusques marins*, disponible sur le site de l'Onema.

Biomarqueurs et bioessais : des méthodes validées en milieu côtier

À l'échelle européenne, la mise au point des indicateurs écotoxicologiques pour le diagnostic et la surveillance de la pollution chimique a enregistré des avancées importantes à la faveur de la convention OSPAR. Ce mécanisme de coopération intergouvernemental pour la protection du milieu marin de l'Atlantique du Nord-est, initié en 1992, a impulsé la validation méthodologique, sur un

réseau de sites ateliers (dont l'estuaire de la Seine en France), d'un ensemble de bio-essais et de biomarqueurs. L'effort de recherche et développement, mené par l'Ifremer au niveau national, a conduit jusqu'ici à la validation de 19 biomarqueurs et de 4 bioessais standardisés (*T. Burgeot, Ifremer*). Pour chaque indicateur – par exemple, la stabilité de la membrane lysosomale chez la moule, ou le taux de vitellogénine chez le flet et le cabillaud – des seuils d'interprétation quantitatifs ont été déterminés par des groupes d'experts. Dans la plupart des cas, deux seuils distincts ont été fixés (pour une espèce et un secteur géographique donnés) : l'un correspond à une réponse de base (« sans effet ») du biomarqueur ou du bioessai (BAC) déterminée à partir des séries de données obtenues sur des sites peu contaminés, l'autre à un seuil « avec effet » calculé à partir de sites contaminés. La description des indicateurs et des seuils d'interprétation associés est donnée dans le rapport de recherches *Integrated marine environmental monitoring of chemicals and their effects* (ICES 2012).

Validés par les suivis de long terme réalisés sur les sites ateliers, ces outils sont désormais opérationnels en vue d'une utilisation en routine dans le cadre des réseaux de surveillance de la DCSMM –

directive cadre stratégie pour le milieu marin (2008/56/CE), équivalent de la DCE pour les eaux marines. Ainsi, en France, l'arrêté ministériel du 17 septembre 2012 a-t-il retenu cinq

biomarqueurs ou bio-essais pour la description quantitative de la présence des contaminants chimiques dans les milieux côtiers. Ceux-ci sont listés sur le tableau 2.

Tableau 2.
Biomarqueurs et bio-essais retenus en France pour la surveillance des milieux côtiers (DCSMM), et effets biologiques associés.
(T. Burgeot, Ifremer)

Type d'effet biologique	Biomarqueurs & Bioessais
1. Indice de stress général chez la moule et le poisson	Stabilité de la membrane lysosomale
2. Génotoxicité chez la moule et le poisson	Induction des micronoyaux et altérations de l'ADN (test comet)
3. Embryotoxicité chez l'huître creuse et reprotoxicité des poissons	Anomalies des larves d'huîtres et des gonades de poissons
4. Imposéx des gastéropodes	Index VDS (Vas Deferens Sequence)
5. Pathologies poissons	Indice de pathologies hépatiques et de pathologies externes

Le gammare, révélateur de pressions en eaux douces

Pour les eaux continentales, l'utilisation de biomarqueurs et de bioessais standardisés est bien sûr tout aussi pertinente qu'en milieu côtier, bien que leur déploiement ne bénéficie pas d'un cadre aussi structurant que celui offert par la convention Opar. Des outils prometteurs sont cependant disponibles. En France, l'une des réalisations les plus avancées est l'outil Gammare, du nom de ces petites crevettes d'eau douce, abondantes et communes dans la plupart des rivières de métropole. Développé

par Irstea, l'outil repose sur l'utilisation de gammare encagés *in situ* comme indicateurs de la contamination du milieu par des substances toxiques (O. Geffard, Irstea). Sur un site donné, six à huit chambres contenant chacune 20 gammare mâles sont immergées deux à quatre semaines durant dans le milieu. Après exposition, des mesures de contamination sont réalisées sur les organismes et différentes réponses biologiques sont mesurées, correspondant à différents types d'action toxique. La mesure de l'acétylcholinestérase, enzyme impliquée dans la transmission de l'influx nerveux,

renseigne par exemple sur le caractère neurotoxique du mélange chimique présent dans le milieu. La mesure de la vitellogénine (protéine normalement synthétisée par les femelles) chez les gammare mâles renseigne quant à elle sur la présence de perturbateurs endocriniens. L'action génotoxique (impactant le matériel génétique) des contaminants présents dans le milieu peut de même être quantifiée au moyen d'un test visuel très simple, baptisé «test des comètes» : il consiste à estimer au microscope le taux de cellules endommagées – pour lesquelles l'ADN fragmenté prend une forme de comète caractéristique. Les chercheurs observent également les traits de vie des gammare (taux d'alimentation, fécondité, fertilité), qui fournissent d'autres indices pour identifier les perturbations des fonctions physiologiques de l'organisme en réponse à une exposition à des toxiques présents localement. Toutes ces réponses biologiques sont appréhendées de manière quantitative par des mesures relativement simples : observation binoculaire, analyse d'images ou analyses moléculaires au spectrophotomètre. Pour chaque paramètre, les chercheurs ont proposé des valeurs seuils standardisées en vue d'une utilisation de cet outil dans les réseaux de surveillance DCE.



Avec le bioindicateur Gammare, est développée une méthode basée sur l'encagement d'organismes *in situ* comme indicateurs de la toxicité des milieux.

Tableau 3. Biomarqueurs développés sur le modèle poisson par l'INERIS et mesurés dans le cadre de l'enquête sur les mortalités piscicoles de la Loue.

Fonction physiologique	Biomarqueur	Organe support	Méthode utilisée
Etat de santé général	Stabilité lysosomale	Rate	Cytométrie
	Lipoperoxydation	Foie	Fluorimétrie
Gestion de l'énergie	Facteur de condition		Biométrie
Altérations neurotoxiques	Acétylcholinestérase	Muscle	Colorimétrie
Immunité	Phagocytose	Rate	Cytométrie
	Flambée oxydative	Rate	Cytométrie
	Formule leucocytaire	Rate	Cytométrie
Reproduction	Indice gonado-somatique (IGS)	Gonades	Biométrie
	Vitellogénine	Sang	ELISA
	Epaisseur épithélium rénal	Rein	Histologie
	Intersexualité	Gonades	Histologie
Défense vis-à-vis des polluants (biotransformation)	EROD	Foie	Fluorimétrie
	CYP3A	Foie	Fluorimétrie
	Glutathion-S-transférase	Foie	Colorimétrie
Atteintes génotoxiques	Dommages chromosomiques	Sang	Cytométrie

Outre l'outil Gammarex, d'autres approches de type biomarqueur en eau douce sont également développées par l'Ineris (W. Sanchez) à partir de l'observation de poissons sauvages – épioche et gardon en particulier (Tableau 3). L'observation du foie, de la rate ou des gonades, la mesure de la vitellogénine ou de l'acétylcholine, fournissent autant d'indices sur la pression toxique du milieu. Ces approches sont destinées à nourrir des investigations environnementales, pour caractériser les effets toxiques autour d'un site industriel, ou pour identifier les causes des perturbations observées localement sur les populations

de poissons. Elle seront notamment utilisées dans le cadre d'un diagnostic approfondi sur la rivière Loue, marquée depuis plusieurs années par de profonds dysfonctionnements écologiques.

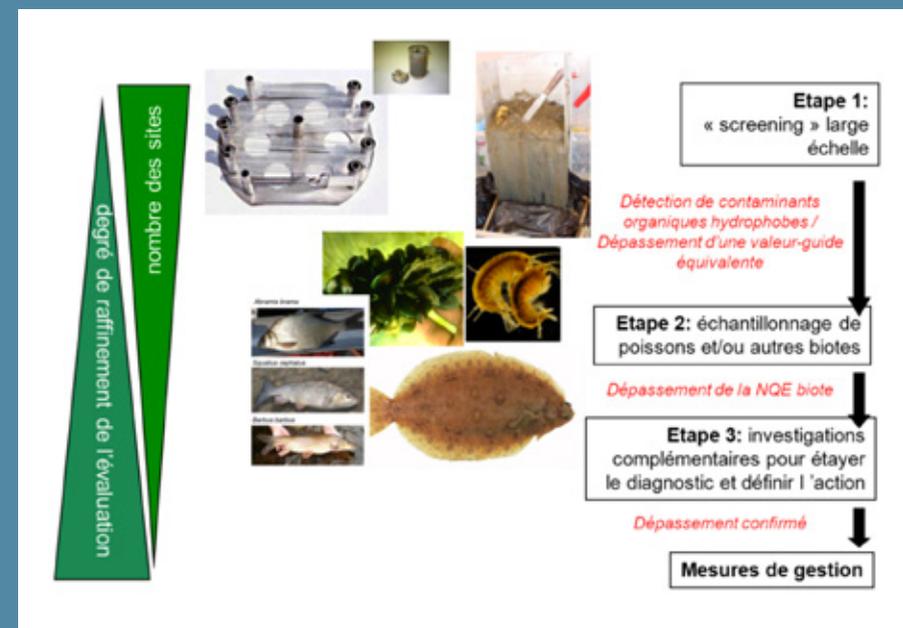
Vers des stratégies graduées d'évaluation

Enjeu majeur pour la gestion, le développement des outils biologiques ouvre la voie à la mise en œuvre de stratégies graduées d'évaluation, associant analyses chimiques et approches biologiques regroupés au sein d'une boîte à outils (O. Perceval, Onema) (Figure 23). Ce type de

stratégies, dont l'intérêt est reconnu par de nombreux acteurs de l'eau publics ou privés, s'inscrit dans la logique de priorisation qui gouverne aujourd'hui tout le dispositif de surveillance et de diagnostic de l'état chimique des milieux : la surveillance de routine, acquisition de données rapide et peu coûteuse, débouche là où c'est nécessaire sur des examens complémentaires. Pour les sites où est confirmée une perturbation significative,

une investigation environnementale poussée conduit à l'identification des sources polluantes et à la mise en œuvre de mesures de restriction appropriées. ■

Figure 23 : Représentation schématique de stratégie d'évaluation graduée pour l'évaluation de la contamination par les contaminants hydrophobes. (O. Perceval, Onema)



Identification des perturbateurs endocriniens : une méthode bio-analytique

Les perturbateurs endocriniens, issus de diverses familles chimiques associées à des usages très variés (chimie, médicaments et substances vétérinaires, cosmétique, agro-alimentaire...), agissent dans les milieux sous forme d'un mélange complexe à des concentrations très faibles.

Produisant sur les organismes des effets individuels mais aussi populationnels (impacts sur la reproduction et le développement, féminisation des populations), ils sont susceptibles d'impacts majeurs sur les écosystèmes. L'évaluation de ces effets et l'identification des polluants incriminés constituent un enjeu de recherche majeur.

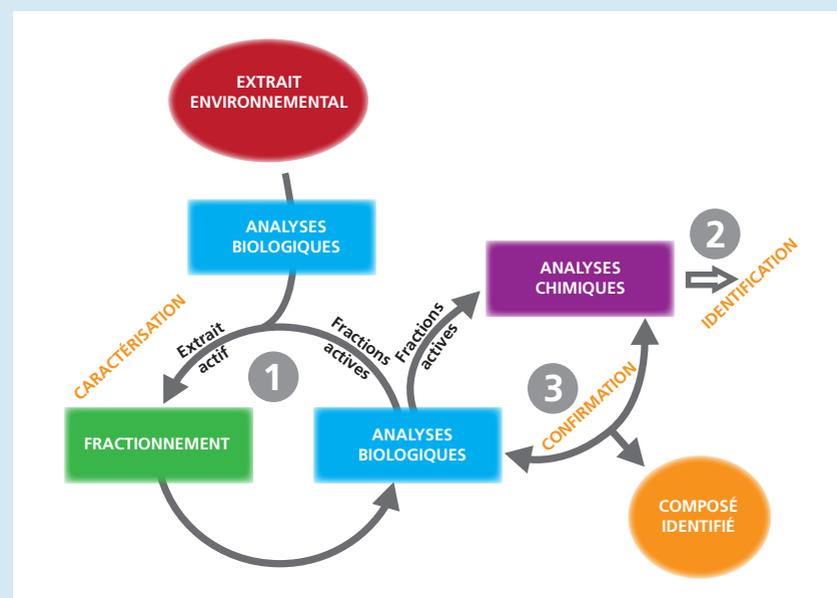
L'Ineris développe dans cette perspective une approche bio-analytique (Figure 24) en trois étapes (N. Creusot et S. Aït-Aïssa, Ineris), associant bio-essais et analyses chimiques selon le principe de l'EDA (*effect-directed analysis*). À partir des échantillons (extraits d'échantillonneurs passifs ou de sédiments) prélevés dans le milieu étudié, une batterie de tests cellulaires *in vitro* permet d'identifier les mécanismes d'action à l'œuvre dans le milieu, et de poser un diagnostic a priori quant aux propriétés chimiques des molécules associées. Par exemple, un profil mixte associant xénobiotiques et stéroïdes suggère la présence de composés pharmaceutiques. La seconde étape consiste à quantifier, par des analyses chimiques ciblées, la contribution de divers polluants connus aux activités biologiques mesurées. Enfin, si les polluants recherchés n'expliquent que partiellement ces activités, un fractionnement de l'échantillon est réalisé afin d'isoler puis d'identifier par des analyses chimiques poussées les composés actifs non ciblés initialement.

Cette méthode d'analyse novatrice a notamment été utilisée lors de l'Étude prospective 2012 (voir section 3.2) pour le profilage toxicologique et la priorisation des sites d'étude, ainsi que lors d'enquêtes

environnementales ciblées – par exemple pour identifier les composés responsables de perturbations endocrines visibles chez des poissons (hypertrophie des gonades, intersexualité) en aval d'une installation industrielle. En plus des cibles stéroïdiennes, ce type d'approche permet également de caractériser la contamination du milieu par des composés de type dioxine..

Si elles restent aujourd'hui relativement lourdes à mettre en œuvre, ces méthodes font l'objet de programmes européens visant à les standardiser en vue d'une utilisation plus large.

Figure 24. Principe de l'approche EDA (*effect-directed analysis*).
(N. Creusot, Ineris, d'après Brack, 2003)



À l'issue de cinq années de recherche et développement, le plan «Micropolluants 2009-2013» et plusieurs plans nationaux ciblés – sur les PCB, les résidus de médicaments dans les eaux, l'assainissement collectif – ont généré de nombreuses connaissances scientifiques et avancées opérationnelles pour la surveillance et la réduction des contaminations chimiques dans les milieux aquatiques. Les stratégies de réduction des émissions polluantes, condition première de restauration de la qualité des eaux, ont été étayées à la faveur d'un ensemble d'actions finalisées, qui ont notamment mobilisé des équipes des acteurs publics de la politique de l'eau.

La connaissance des sources polluantes industrielles s'est améliorée dans le cadre de l'action nationale de Recherche des substances dangereuses dans l'eau. Des mesures d'émissions ont été réalisées dans des milliers d'établissements, parmi lesquels un certain nombre font désormais l'objet d'études de réduction des rejets (par modification de procédés ou substitution) : ces travaux permettront d'éviter aux milieux aquatiques des flux polluants parfois très significatifs. D'autres études, plus ciblées, ont livré des connaissances nouvelles sur les contaminants émis par différents domaines d'activité comme la métallurgie ou différents secteurs artisanaux. Plus largement, l'ensemble de ces connaissances contribue à l'identification des sources de pollution les plus impactantes pour les milieux. Elles alimentent en particulier l'exercice d'inventaire des sources prescrit par la DCE, dans une logique de priorisation des actions correctives par grand bassin hydrographique. Cet effort d'identification et de réduction des émissions polluantes s'inscrit dans la durée, et des marges de progression importantes existent encore. C'est le cas en particulier du ruissellement urbain par temps de pluie, qui constitue aujourd'hui une contribution majeure – mais difficilement quantifiable – à la pression chimique exercée sur les milieux aquatiques.

Quels changements de pratiques chez les usagers professionnels ou de produits domestiques et de santé permettraient de réduire et/ou de mieux gérer ces rejets urbains? Quels aménagements urbains pourraient concourir à une telle meilleure gestion? C'est l'objet d'un appel à projet lancé en 2013 par l'Onema et les agences de l'eau.

Dans le domaine du traitement des eaux usées, plusieurs programmes de recherche partenariaux ont permis d'évaluer et d'améliorer diverses techniques d'épuration. Ces travaux contribueront significativement à l'amélioration des performances d'abatement du système d'assainissement collectif pour certains micropolluants.

En parallèle, la surveillance systématique et le diagnostic de l'état chimique des masses d'eau, impulsée depuis une décennie par la directive cadre sur l'eau, continue à progresser à la faveur du développement de nouveaux outils utilisables à grande échelle. La recherche et la quantification des contaminants dans l'eau bénéficie désormais de l'apport des techniques de type «échantillonneurs passifs», potentiellement plus représentatifs que les échantillonnages ponctuels. Ces méthodes intégratrices, utilisées notamment par l'Ifremer pour la surveillance chimique des eaux côtières, sont désormais disponibles à un coût abordable et leurs potentialités de mise en œuvre en routine sont à l'étude, pour les réseaux de surveillance de la directive cadre sur l'eau. La mesure des contaminants dans les tissus d'animaux intégrateurs de pollution – comme les moules et les huîtres, également utilisées en routine par l'Ifremer – ou encore les gammars d'eau douce, livre une information complémentaire, prenant en compte la physiologie des organismes et la biodisponibilité des substances.

Les normes de qualité environnementale, outil central de l'interprétation des données de surveillance et du diagnostic de l'état chimique des masses d'eau, font l'objet en Europe d'un effort constant de recherche et développement. De nombreuses actions ont été menées en France, depuis cinq ans, pour améliorer la compréhension de l'effet des substances sur les organismes et la santé humaine, et proposer des valeurs seuils de concentrations des polluants dans les milieux toujours plus pertinentes. Ainsi, dans le cas des éléments-traces métalliques, les travaux soutenus par l'Onema s'attachent à une meilleure prise en compte du fonds géochimique (la présence naturelle des métaux) dans l'évaluation. Des modèles opérationnels sont mis en œuvre pour évaluer la fraction biodisponible des métaux en fonction des paramètres environnementaux : utilisés dans le cadre de stratégies graduées d'évaluation, ils permettront d'appréhender plus finement les impacts de ces

contaminants en cas de dépassement des valeurs-seuils génériques et d'identifier les sites où le risque est réel, et les actions correctives doivent être menées en priorité. La conversion des NQE d'une matrice à l'autre – eau, sédiments, biote – est un autre axe de travail majeur. À l'issue du plan national d'actions sur les PCB, des équivalences entre valeurs seuils «sédiments» et concentrations limites dans la chair des poissons ont notamment été mises à disposition des gestionnaires. D'autres travaux visent à une meilleure prise en compte des effets toxiques des mélanges de substances.

Au-delà de la surveillance réglementaire, les pouvoirs publics et la communauté scientifique se sont fortement mobilisés sur la thématique cruciale des substances émergentes ou d'intérêt émergent – molécules nouvellement synthétisées, résidus de médicaments, perturbateurs endocriniens... L'identification des substances les plus préoccupantes, la compréhension de leur comportement dans l'environnement sont des conditions essentielles à la mise en œuvre d'une surveillance régulière pour ces contaminants. En France, le Comité d'experts en priorisation, créé à cette fin en 2010, a publié une méthode de catégorisation des substances, identifiant pour chacune les connaissances à acquérir en priorité. Les travaux de ces experts ont notamment contribué à l'élaboration de deux campagnes de recherche de contaminants émergents d'une ampleur sans précédente – l'une pour les eaux superficielles, l'autre pour les eaux souterraines. Les résultats, en cours d'analyse, livrent déjà des enseignements précieux ; ils seront rendus publics en 2014. En parallèle, la volonté partagée d'enrichir l'évaluation des risques en dépassant la simple approche «substance par substance» se traduit par le développement d'outils biologiques *in vitro* ou *in vivo*. Les bio-essais et les biomarqueurs ouvrent des possibilités reconnues pour la compréhension des effets toxiques des mélanges de substances, et de leurs différents modes d'action – perturbations endocrines, effets mutagène, neurotoxique... Utilisés de longue date dans des programmes de recherche, ils font aujourd'hui l'objet d'une mise en œuvre à des fins plus opérationnelles qui permettra après un retour d'expérience leur exploitation pour le diagnostic et la gestion. De tels outils sont déjà intégrés dans la démarche de surveillance des eaux côtières sur une base volontaire (dans le cadre d'OSPAR), et le seront dans le contexte de la Directive

cadre stratégie pour le milieu marin. D'autres, à l'image de l'outil Gammarex, basé sur l'étude des réponses biologiques de gammarex encagés *in situ*, sont également disponibles pour les milieux d'eau douce. Des approches novatrices, associant outils biologiques et techniques analytiques, ouvrent la possibilité d'identifier les composants impliqués localement dans un effet toxique donné (par exemple les perturbations endocrines), et donc de remonter à leurs sources.

L'essor de ces outils biologiques amorce une évolution du dispositif de diagnostic des masses d'eau, par la mise en œuvre de stratégies d'évaluation graduées – des données d'observation préliminaires pouvant déboucher sur des examens complémentaires exploitant les outils biologiques, et au besoin sur une investigation environnementale poussée. Cette tendance préfigure la surveillance de demain, vers une démarche intégrant davantage chimie et biologie.

Les avancées et les résultats obtenus, cinq années durant, pour l'identification et la réduction des sources de pollution et l'amélioration de l'état chimique des eaux, sont le fruit d'une dynamique collective associant étroitement scientifiques et gestionnaires, publics ou privés, acteurs nationaux et locaux, données de terrain et recherches en laboratoire. Cette dynamique volontariste doit être maintenue sur le long terme. Nombre de travaux se poursuivent, notamment dans le cadre des plans d'action sur les résidus de médicament dans les eaux, l'assainissement collectif ou sur la thématique des eaux de ruissellement urbain. En parallèle, l'appropriation des outils disponibles par les gestionnaires et acteurs de l'eau, publics ou privés, constitue un enjeu majeur. Le transfert technique doit se doubler d'un transfert politique, à la faveur d'un éclairage socio-économique encore insuffisant aujourd'hui sur des questions essentielles : comment relier le coût des programmes de surveillance à leurs bénéfices, pour l'environnement et la santé publique ? Quels sont les leviers existants pour faire évoluer les pratiques des collectivités, des industriels et des particuliers ? Plus largement, l'appropriation de ces enjeux par la société conditionne notre capacité à agir collectivement, demain, au service de la qualité de l'eau et de la préservation des milieux aquatiques.

Références bibliographiques

Introduction aux réglementations et politiques nationales

www.developpement-durable.gouv.fr

Voir notamment :

- Plan Micropolluants 2010-2013
www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/plan_micropolluants_dv.pdf
- Plan d'action 2012-2018 « pour une politique d'assainissement contribuant aux objectifs de qualité des milieux aquatiques »
www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/2011_09_27_Plan_daction_assainissement_version_finale.pdf
- Plan national d'actions sur les PCB
www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/plan_PCB.pdf
- Plan national sur les résidus de médicaments dans les eaux
www.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/PNRM-2.pdf
- Plan Écophyto
www.agriculture.gouv.fr/IMG/pdf/PLAN_ECOPHYTO_2018-2-2-2_cle8935ee.pdf

Synthèses de connaissances scientifiques et techniques

www.onema.fr

Voir notamment :

- Appel à projets «Micropolluants des eaux urbaines»
www.onema.fr/Appel-a-projets-Micropolluants-dans-les-milieux-aquatiques
- Construction de Normes de qualité environnementale
www.onema.fr/QUALIFIER-Normes-Qualite-Environnementales
- Autres indicateurs de qualité, indicateurs de tendances
www.onema.fr/QUALIFIER-Autres-indicateurs-qualite-tendance
- Rapport d'études «Salinisation des masses d'eau en France : du constat au diagnostic»
www.onema.fr/IMG/pdf/2011_031.pdf
- Salinisation des masses d'eaux en France métropolitaine et dans l'Outre-mer, Rapport final
www.onema.fr/IMG/pdf/2010_057.pdf

Synthèses spatialisées sur la contamination des eaux

www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr

Voir notamment :

- Bilan de présence des micropolluants dans les milieux aquatiques continentaux 2007-2009
www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/publications/p/1808/1108/bilan-presence-micropolluants-milieux-aquatiques.html
- Les micropolluants dans les eaux du bassin Artois-Picardie (2009)
www.eau-artois-picardie.fr/Les-micropolluants-des-eaux.html
- Bilan 2010 de la surveillance de l'état des eaux du bassin Seine-Normandie
http://www.eau-seine-normandie.fr/fileadmin/mediatheque/Expert/Etat_des_Lieux/Bilan_2010_de_surveillance_qualite_des_eaux_AESN.pdf

Guides opérationnels pour la surveillance

www.aquaref.fr

Information de référence sur les substances chimiques

www.ineris.fr/substances/fr/

Recherche par mots-clés sur l'ensemble de la documentation accessible en ligne

www.eaufrance.fr

Voir notamment :

- Méthodologie d'établissement des inventaires d'émissions, rejets et pertes de substances chimiques en France : http://www.reseau.eaufrance.fr/webfm_send/2782
- Données du plan national d'actions PCB : <http://www.pollutions.eaufrance.fr/pcb/>

Autres liens utiles...

... sur l'assainissement collectif

- Projet AMPERES
<https://projetamperes.cemagref.fr/>
- Projet ARMISTIQU
<http://armistiq.irstea.fr/armistiq/>
- Groupe de travail EPNAC (évaluation des procédés nouveaux d'assainissement des petites et moyennes collectivités)
<http://epnac.irstea.fr/>

... sur les rejets industriels

- Bilan de l'action nationale RSDE 1 (2008)
<http://www.ineris.fr/rsde/doc/docs%20rsde/DRC-07-82615-13836C.pdf>

... sur les substances émergentes

- Réseau européen NORMAN
www.norman-network.net
- Niveaux de présence de contaminants émergents dans le milieu marin, PCDD/F, PBDE, HBCD dans les mollusques marins - Rapport final
www.onema.fr/IMG/pdf/2010_B004.pdf

... sur les nouveaux outils pour la surveillance

- Outils bio-analytiques in vitro : principe et apports pour la surveillance des contaminants organiques dans le milieu aquatique
http://www.ineris.fr/centredoc/R_08_16732A_Action28_final.pdf

Rédaction

Laurent Basilico (journaliste),
Pierre-François Staub (Onema/Dast)
et Olivier Perceval (Onema/Dast)

Edition

Véronique Barre (Onema/Dast)

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier
l'ensemble des intervenants et participants
pour leur contribution lors du colloque.
Merci également à tous ceux qui ont fourni
gracieusement des photos et illustrations.

**La collection « Les rencontres-synthèses »,
destinée à un public technique
ou intéressé, présente les principaux résultats
de séminaires organisés, ou co-organisés, par l'Onema.**

*Changement climatique :
impacts sur les milieux aquatiques
et conséquences pour la gestion (février et août 2010)*

*Les mésocosmes :
des outils pour les gestionnaires
de la qualité des milieux aquatiques ? (mars 2011)*

*Quel(s) rôle(s) pour les instruments économique
dans la gestion des ressources en eau en Europe ?
Enjeux politiques et questions de recherche (juin 2011)*

*Captages d'eau potable et pollutions diffuses :
quelles réponses opérationnelles à l'heure
des aires d'alimentation de captage «grenelle» ? (août 2011)*

*Plan de sauvegarde de l'anguille.
Quelles solutions pour optimiser la conception
et la gestion des ouvrages (novembre 2012)*

*Mise en oeuvre de la directive cadre sur l'eau.
Quand les services écosystémiques entrent en jeu (février 2013)*

*Bioindication :
des outils pour évaluer l'état écologique
des milieux aquatiques (avril 2013)*

*Biodiversité aquatique :
du diagnostic à la restauration (septembre 2013)*

*Les invasions d'écrevisses exotiques.
Impacts écologiques et pistes pour la gestion (octobre 2013)*

*La contamination chimique des milieux aquatiques
Outils et méthodes pour le diagnostic et l'action (Mars 2014)*

ISBN : 979-10-91047-30-2

Création graphique : Inzemoon
Réalisation : Bluelife (09 66 82 33 55)

Imprimé sur papier issu de forêts gérées durablement par :
IME

Mars 2014
IMPRIMÉ EN FRANCE



