

La chimie et la mise en œuvre de la Directive Cadre sur l'Eau

Enjeux liés à la présence de micropolluants dans les écosystèmes aquatiques

Patrick Flammarion est Directeur du département scientifique « Eaux » de l'Institut national de recherche en sciences et technologies pour l'environnement et l'agriculture (Irstea)¹.

1 État de la situation et contexte

Les pollutions chimiques entraînent une dégradation de la qualité des eaux et sont donc susceptibles d'avoir un impact négatif sur la santé publique et les écosystèmes aquatiques. Parmi les pressions qui s'exercent sur l'état des eaux en Europe, celles liées à la qualité chimique sont parmi les plus significatives.

Dans un contexte de changement global, ces pressions sont donc au cœur de la politique publique de préservation des ressources aquatiques, notamment de la Directive européenne Cadre sur l'Eau (DCE), depuis 2000.

La Directive Cadre sur l'Eau se place à « l'aval », pour réglementer et suivre les molécules utilisées une fois qu'elles se retrouvent dans l'environne-

ment. Tandis que la directive REACH² intervient à « l'amont » des activités économiques en réglementant les molécules que l'on peut produire, commercialiser et utiliser dans la fabrication des objets, ainsi que dans les pratiques liées à la consommation.

En cohérence avec les politiques européennes, la France, dans son troisième Plan National Santé-Environnement (2015-2019), a souligné à nouveau la néces-

2. REACH (Registration, Evaluation and Authorization (and Restriction) of Chemicals) : règlement de l'Union européenne sur l'enregistrement, l'évaluation, l'autorisation et les restrictions des substances chimiques, entré en vigueur le 1^{er} juin 2007, qui rationalise et améliore l'ancien cadre réglementaire sur les produits chimiques. Voir le **Chapitre d'I. Rico-Lattes** dans cet ouvrage *Chimie et expertise, santé et environnement*, coordonné par M.-T. Dinh-Audouin, D. Olivier et P. Rigny, EDP Sciences, 2016.

1. www.irstea.fr

sité d'actions pour l'évaluation des risques liés à la présence de micropolluants dans les milieux aquatiques et les eaux destinées à la consommation humaine, avec notamment l'élaboration d'un nouveau plan National Micropolluants.

Ce sont clairement des sujets qui préoccupent les français. La **Figure 1** reprend les résultats d'une enquête du ministère chargé de l'Écologie où l'on voit que la pollution de l'eau fait partie des sujets environnementaux qui préoccupent les français.

Les sources des substances chimiques sont nombreuses, selon les usages industriels, domestiques ou encore les usages liés à l'agriculture. Les substances chimiques que

nous produisons et consommons se retrouvent *in fine* pour la plupart dans les écosystèmes aquatiques : eaux de surface, nappes phréatiques ou eaux souterraines. Il est à noter que l'on a de plus en plus affaire à des sources liées à des **pollutions diffuses**, qu'elles soient d'origine agricole (pesticides, nitrates, etc.), ou liées à la contamination de l'atmosphère, et qui se retrouvent dans les écosystèmes aquatiques. Dans certaines rivières, une proportion significative des pesticides présents vient de l'atmosphère donc de l'extérieur du bassin versant. En somme, on a affaire à une grande complexité des sources de pollution à l'amont des écosystèmes aquatiques.

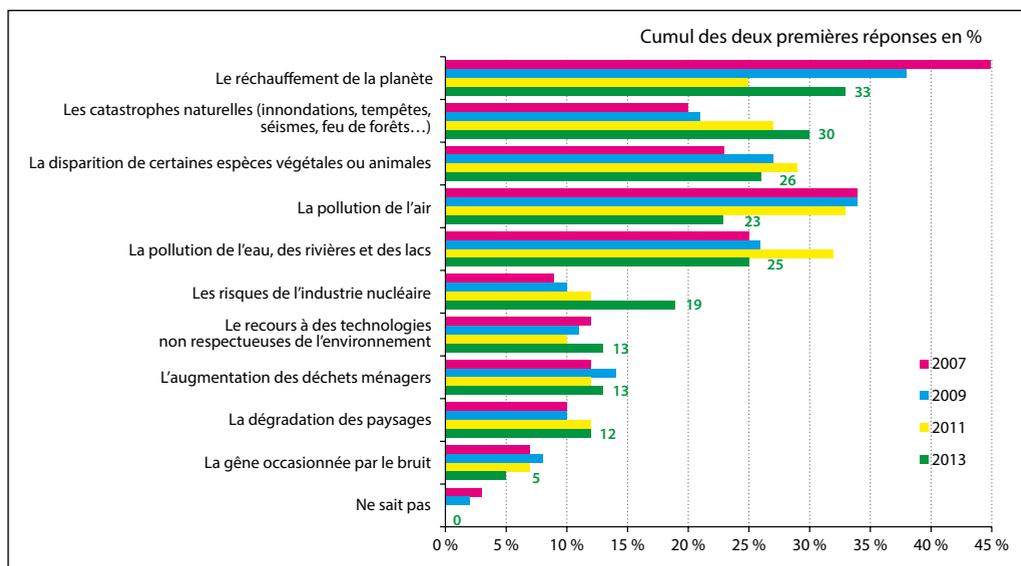


Figure 1

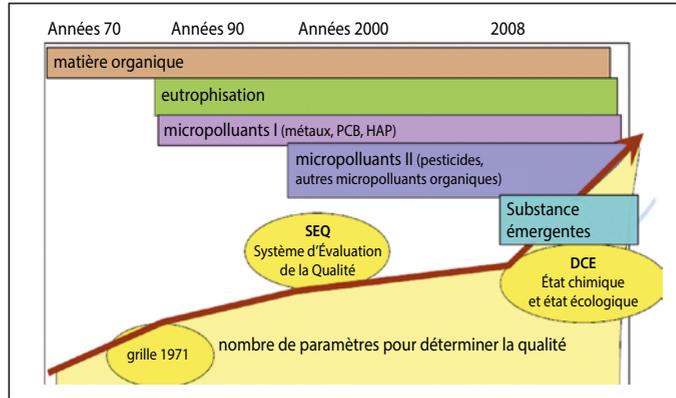
Intérêt des français sur la qualité des eaux : « Parmi les problèmes suivants liés à la dégradation de l'environnement, quels sont les deux qui vous paraissent les plus préoccupants ? ».

Source : Les préoccupations environnementales des Français : Observation et statistiques, 2015 (www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr).

2 Évolution de la façon de mesurer les substances chimiques dans les milieux aquatiques

Notre connaissance, notre perception et notre façon de traiter la pollution aquatique ont beaucoup évolué depuis les années 1970 (Figure 2). Il en est de même de la façon dont les Directives et donc la société la qualifient. On s'est d'abord intéressé à la matière organique, puis à l'eutrophisation, ensuite aux micropolluants, et aujourd'hui aux polluants émergents.

La prise en compte de ces questions n'est pas nouvelle ; les enjeux restent prégnants en France, et plus généralement en Europe. À titre d'exemple, on peut citer les résultats d'une étude sur les pesticides dans les milieux aquatiques continentaux effectuée de 2007 à 2009. Dans 93 % des points suivis, il y a présence de pesticides dans les cours d'eau avec près de 70 % des points qui présentent une concentration totale moyenne inférieure à 0,5 µm/L, qui est la norme de qualité environnementale pour les pesticides. Les trois pesticides les plus détectés en France sont les mêmes depuis 2007 : un métabolite³ de l'herbicide glyphosate, le glyphosate⁴ lui-même, et



l'atrazine déséthyl, qui est une substance de dégradation de l'atrazine⁵ (interdite depuis dix ans).

Figure 2

La manière d'appréhender la qualité de l'eau évolue continuellement.

Source : Prygiel et Halkett (2011).
Agence de l'eau Artois Picardie.

3 Les différentes réglementations

Les pouvoirs nationaux ont lancé de nombreux « plans nationaux » pour préparer des réglementations relatives aux substances chimiques. On en trouvera la liste dans l'**Encart : « Politiques publiques contre la pollution aquatique en France et en Europe »**.

L'harmonisation européenne : la Directive Cadre sur l'Eau

La Directive Cadre sur l'Eau (DCE), adoptée par l'Union Européenne en 2000, combine

3. Métabolite : composé organique intermédiaire ou issu du métabolisme.

4. Glyphosate [N-(phosphonométhyl)glycine] : c'est un désherbant total foliaire systémique, c'est-à-dire un herbicide non sélectif absorbé par les feuilles et ayant une action généralisée, autrefois produit sous brevet, exclusivement

par Monsanto à partir de 1974, sous la marque Roundup. Le brevet est tombé dans le domaine public en 2000, d'autres sociétés produisent désormais du glyphosate.

5. L'atrazine [2-chloro-4-(éthylamine)-6-(isopropylamine)-s-triazine] est la substance active d'un produit phytosanitaire à effet herbicide.

POLITIQUES PUBLIQUES CONTRE LA POLLUTION AQUATIQUE EN FRANCE ET EN EUROPE

Directives et plans nationaux contre la pollution chimique de l'environnement

Mesures prises en France

- Plan National Santé-Environnement 3^e (2015-2019) : actions pour l'évaluation des risques liés à la présence de micropolluants dans les milieux aquatiques et les eaux destinées à la consommation humaine, avec notamment l'élaboration d'un nouveau plan National Micropolluants ;
- Plan ECOPHYTO 2018 ;
- Plan national d'actions sur les PCB (polychlorobiphényles) ;
- Plan National sur les Résidus de Médicaments ;
- Stratégie nationale sur les perturbateurs endocriniens.

Réglementations européennes « Substances »

- Règlement REACH (CE) 1097/2006 ;
- Directive 91/414/CE « produits phytosanitaires » ;
- Directive « biocides » 98/8/CE ;
- Directives 2001/82/CE et 2001/83/CE « médicaments à usages vétérinaires et humains ».

Réglementations européennes « Rejets »

- Directive 2010/75/UE « IED » ;
- Directive 91/676/CEE « nitrates » ;
- Directive 91/271/CEE « eaux résiduaires urbaines ».

Réglementations européennes « Qualité du milieu »

- Directive 2006/11 CE (abrogée par la DCE en 2013) ;
- Directive Cadre sur l'Eau 2000/60/CE et directives filles (2008/105/CE et 2013/39/CE) ;
- Directive 2008/56/CE (DCSMM) ;
- Directive 2006/118/CE (ESO) ;
- Directive 98/83/CE « eau potable » ;
- Directive 76/160/CE « eaux de baignade ».

une vision écologique avec une qualification de bon ou de mauvais de **l'état du point de vue chimique**, qu'on s'attache à évaluer d'après la présence de substances chimiques, qu'elles soient dans les eaux de surface, souterraines ou littorales. **L'innovation de la DCE est l'apport de l'état écologique**, c'est-à-dire que le « juge de paix » est *in fine* l'état écologique, qui englobe

les questions de biodiversité, de fonctionnement des écosystèmes, de services écosystémiques⁶. La **Figure 3** indique comment on caractérise *in fine* l'état des milieux selon la DCE.

6. Les services écosystémiques sont définis comme étant les bénéfices que les êtres humains tirent du fonctionnement des écosystèmes.

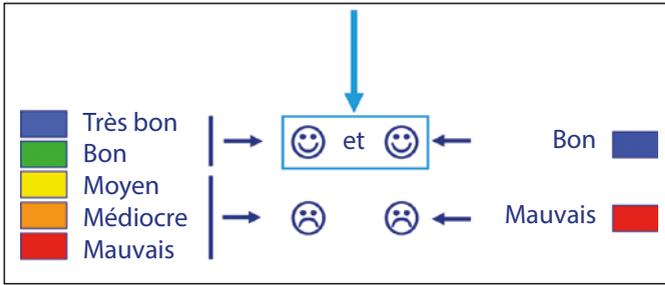


Figure 3

État chimique/état écologique. Les différents aspects de la Directive Cadre sur l'Eau.

État écologique :

- biologie, physico-chimie, hydro-morphologie ;
- polluants spécifiques identifiés au niveau national ;
- NQE fixées dans l'arrêté du 25 janvier 2010 ;
- 5 phytosanitaires, 4 métaux, 1 substance DOM ;
- liste en cours de révision.

État chimique :

- substances prioritaires, substances prioritaires dangereuses (PBT) définies au niveau européen ;
- NQE fixées dans la directive 2008/105/CE (amendée par la dir. 2013/39/CE) ;
- 41 substances existantes + 12 nouvelles substances ;
- liste révisée tous les 4 ans ;
- règle du « one out, all out ».

4 La problématique des substances émergentes

4.1. Nomenclature des types de polluants chimiques

On distingue les **macropolluants** (dont les nitrates font partie), les **micropolluants**, qui peuvent être organiques (substances chimiques médicamenteuses, pesticides, hydrocarbures aromatiques polycycliques) et inorganiques (métaux et les métalloïdes) (**Tableau**).

4.2. Les substances émergentes : identification, dénombrement et suivi

Aujourd'hui on parle beaucoup de « substances émer-

Tableau

Classification des différents types de polluants.

Macropolluants	Nitrates, phosphates...
Micropolluants organiques	Hydrocarbures aromatiques polycycliques (HAP) Phénols Plastifiants Solvants organochlorés Phtalates Détergents Pesticides PCB Substances pharmaceutiques et d'hygiène Hormones Nouveaux composés émergents Nanoparticules
Micropolluants inorganiques	Métaux et métalloïdes : Pb, Hg, Cd, Ni, Cu, Zn, As, Cr, Co, Fe,...

gents ». Ces micropolluants sont dits « émergents » du fait des lacunes dans la connaissance de leur comportement dans l'environnement sur le long terme, de leur impact sur la qualité des écosystèmes et sur la santé humaine.

On vient d'ajouter trois médicaments dans la liste des polluants émergents qui doivent faire l'objet d'une surveillance au niveau européen (Figure 4). C'est le signe d'une préoccupation nouvelle : prendre en compte des produits phar-

maceutiques qui existent depuis des années mais qu'on ne savait pas correctement quantifier dans les milieux aquatiques.

La Figure 5 montre que le nombre de composés chimiques pris en compte dans les études d'environnement est en croissance rapide. Cela correspond autant à la prise en compte nouvelle de molécules existantes que de molécules nouvellement rejetées dans l'environnement.

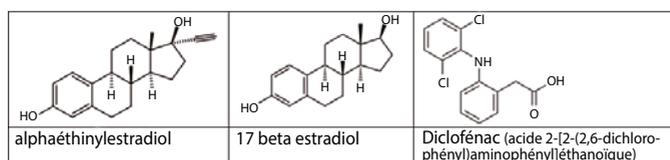


Figure 4

Trois substances pharmaceutiques rejoignent la liste des polluants émergents à surveiller.

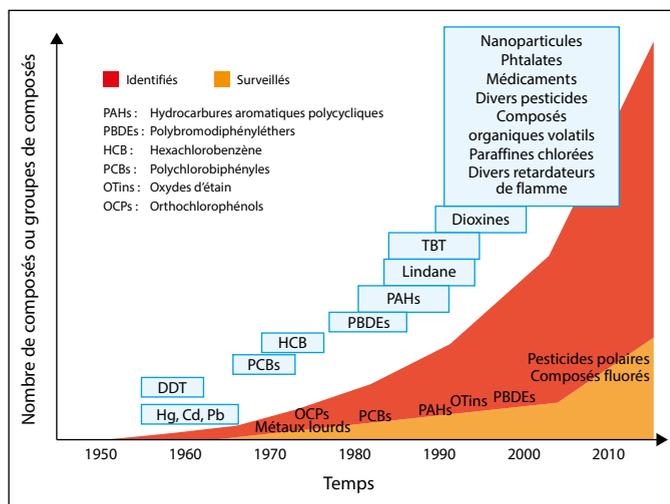


Figure 5

Augmentation du nombre de substances chimiques, identifiées et suivies, dans les écosystèmes aquatiques

Source : d'après Roose et coll., 2011.

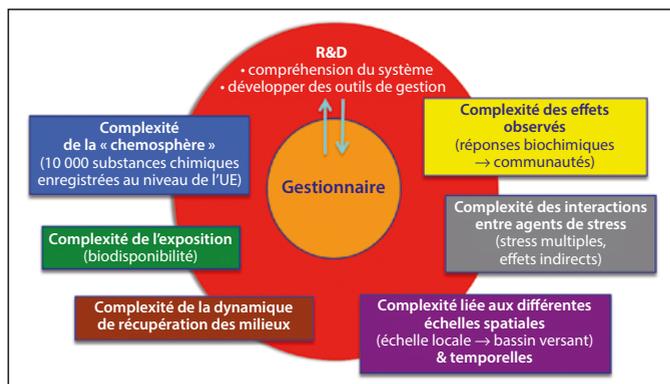


Figure 6

Diagramme représentant la complexité de la gestion opérationnelle des risques induits par la multiplicité des contaminants.

Source : W. Brack, Modelkey Workshop, Leipzig, nov. 2009.

Au-delà de chacune des substances chimiques, il y a lieu de considérer les mélanges de molécules. La situation est complexe car ils ne présentent pas nécessairement les mêmes risques, ni pour l'environnement aquatique ni pour la santé humaine, que leurs composants individuels (quand il y a un effet de synergie on parle d' « effet cocktail ») (Figure 6).

4.3. La complexité des risques écotoxicologiques liés aux substances émergentes...

La gestion opérationnelle des risques induits par cette multiplicité de contaminants pose des questions complexes qui doivent trouver des éléments de réponse grâce à la recherche : comment mesurer des concentrations faibles, prendre en compte des expositions discontinues, prioriser les micropolluants à surveiller et les faire in-

tégrer dans le suivi, quels risques liés aux mélanges de toxiques, quelles cascades d'effets dans les systèmes écologiques (chaînes trophiques, effets intergénérationnels, etc.), comment mieux évaluer les risques associés aux contaminants avec des modes d'action toxique atypiques, quelles technologies et biotechnologies innovantes pour la surveillance des milieux et la réduction des contaminations, quelles valeurs seuils pertinentes d'un point de vue écologique, quelle incidence du changement climatique sur la sensibilité des espèces vis-à-vis des contaminations chimiques ?

D'autres questions venant plus directement du terrain restent largement ouvertes : quelles sont les sources polluantes majoritaires, comment les gérer et à quel coût, quelles gouvernances locales et nationale mettre en œuvre pour la gestion ?

Par exemple, actuellement, les seuils réglementaires sont considérés comme stables, indépendants de la situation écologique éventuellement adaptative des écosystèmes aquatiques dans lequel est présent le poisson, l'invertébré ou le végétal. Mais les situations réelles ne peuvent se contenter de ces réponses trop simples. Ces questions font partie des fronts de sciences actuels, et les gouvernements mettent beaucoup de moyens pour développer la recherche en écotoxicologie⁷, notamment dans le domaine aquatique.

4.4. ... amène une réaction des pouvoirs publics

Au niveau national, les efforts scientifiques déployés sont importants. Ils sont pris en charge par plusieurs institutions : l'Agence Nationale de la Recherche (ANR), plusieurs universités et organismes nationaux de recherche, dont Irstea, l'Inra ou encore l'INERIS⁸, l'Office National de l'Eau et des Milieux Aquatiques

(ONEMA⁹) (*Figure 7*). Ce dernier a récemment lancé un appel à projets demandant aux organismes de recherche, bureaux d'étude et petites entreprises, de construire des projets avec des collectivités, pour éviter de séparer d'un côté la recherche, de l'autre côté l'expertise, et de l'autre les actions concrètes et opérationnelles.

Un autre exemple est donné par le laboratoire AQUAREF¹⁰ qui fédère des acteurs majeurs de la recherche opérationnelle dans le domaine de l'eau. Il élabore des référentiels techniques pour les agences de l'eau en France, et en coordination avec d'autres consortiums équivalents au niveau européen. Le but de ces coordinations est que l'application la Directive Cadre sur l'Eau soit standardisée et homogène d'un pays à l'autre en termes de méthode. Grâce à de tels efforts (*Figure 8*), par exemple, les acteurs de terrain peuvent utiliser des méthodes standardisées, intercomparées et fiables, pour que le 2 µg/L soit comparable avec un 1,5 µg/L ou un 2,5 µg/L dans un autre laboratoire, et que les résultats des mesures soient robustes.

7. L'écotoxicologie est l'étude des conséquences écologiques de la pollution de l'environnement par les substances toxiques.

8. INERIS (Institut National de l'Environnement Industriel et des Risques) : l'INERIS a pour mission d'évaluer et de prévenir les risques accidentels ou chroniques pour l'homme et l'environnement, liés aux installations industrielles, aux substances chimiques et aux exploitations souterraines. Site : www.ineris.fr. Voir les *Chapitres de P. Hubert et É. Thybaud* dans *Chimie et expertise, santé et environnement*, coordonné par M.-T. Dinh-Audouin, D. Olivier et P. Rigny, EDP Sciences, 2016.

9. L'ONEMA (Office national de l'eau et des milieux aquatiques), est un établissement public français de référence, sous tutelle du ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie, créé en 2006 pour accompagner la mise en œuvre de la politique publique de l'eau en France comme l'y engage la Directive Cadre sur l'Eau (DCE). www.onema.fr

10. www.aquaref.fr

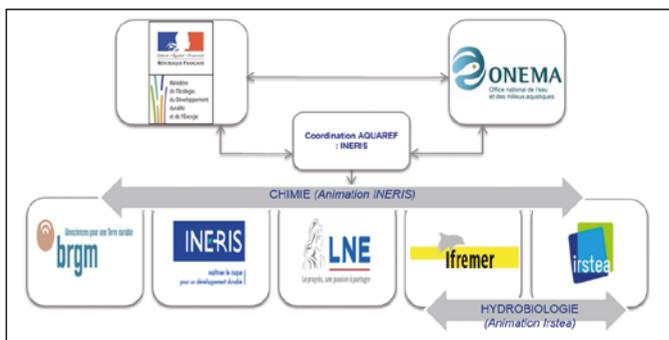


Figure 7

Organigramme représentant le soutien à la R&D par l'ONEMA et le ministère de l'Écologie, du Développement durable et de l'Énergie.

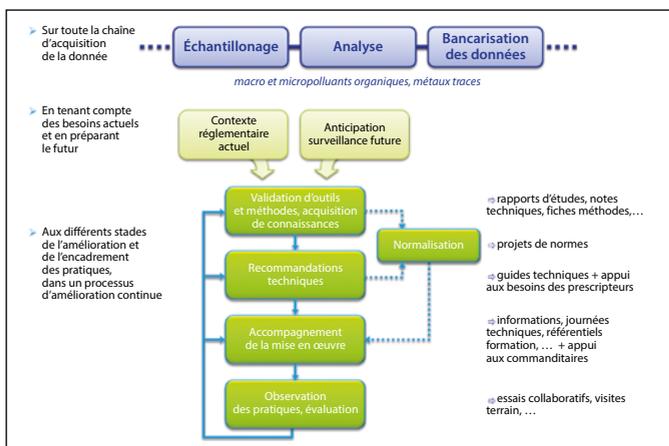


Figure 8

Organigrammes décrivant le fonctionnement de la méthodologie d'AQUAREF.

5 De nouvelles méthodologies d'analyse pour répondre à ces problématiques complexes

5.1. Des campagnes de terrain

En utilisant ces nouvelles méthodologies, des campagnes de terrain prospectives ont

été menées au niveau national (Figures 9 et 10). Elles ont porté sur beaucoup plus de substances que la centaine de substances suivies au plan réglementaire et ont pris comme critère non pas les concentrations chimiques pures mais leur pourcentage par rapport aux seuils de toxicité respectifs, ou plus précisément par rapport aux concentrations à

Figure 9

Carte des prélèvements effectués dans le cadre de l'étude.

Source : Botta et Dulio, 2014. Résultats de l'étude prospective 2012 sur les contaminants émergents dans les eaux de surface de métropole et des DOM. Rapport INERIS.

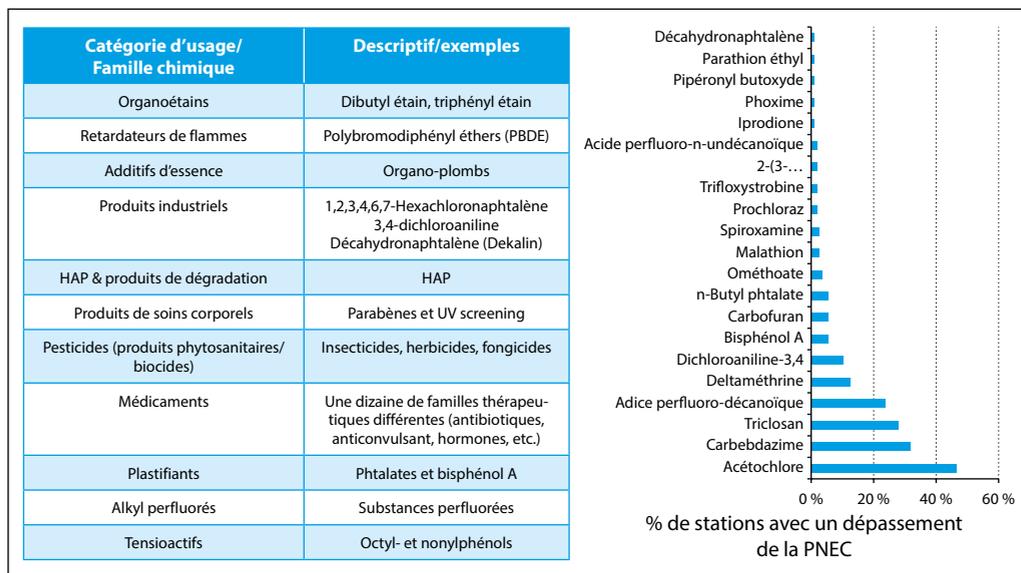
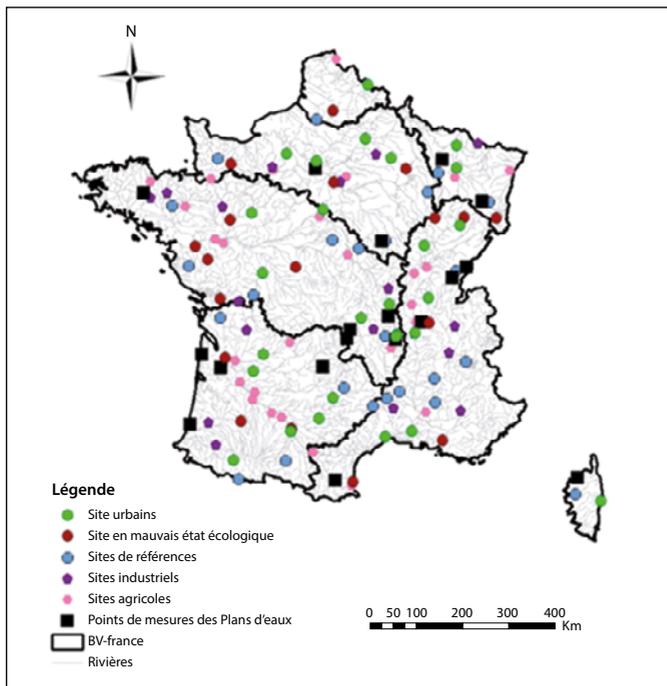


Figure 10

Graphique représentant le pourcentage de stations avec un dépassement de la PNEC (concentration à partir de laquelle on modélise un effet écotoxicologique sur les organismes vivants dans les milieux aquatiques) en fonction des molécules identifiées.

Source : Botta et Dulio, 2014. Résultats de l'étude prospective 2012 sur les contaminants émergents dans les eaux de surface de métropole et des DOM. Rapport INERIS.

partir desquelles on prévoit un effet écotoxicologique sur les organismes vivants dans les milieux aquatiques.

5.2. L'échantillonnage automatisé et l'échantillonnage passif

Devant l'importance des efforts à entreprendre, il est apparu comme nécessaire de développer de nouvelles technologies d'échantillonnage. À titre d'exemple, dans la technique d'échantillonnage automatisé (ou échantillonnage passif), les substances chimiques viennent en continu se faire piéger sur/ dans une membrane physique ou chimie-biologique. En analysant ensuite les composés retenus dans cette membrane, on détermine la moyenne de l'état chimique de la rivière pendant la durée des mesures. Ainsi, plutôt que de réaliser des photographies instantanées, on accède à la moyenne.

5.3. L'utilisation de biomarqueurs pour évaluer la santé de la faune et la flore aquatiques

Parmi les nouvelles méthodes d'évaluation de l'état de l'environnement aquatique, il y a lieu d'insister sur l'utilisation des biomarqueurs¹¹ ; au-delà des paramètres de survie et de reproduction mesurés sur les organismes vivants, les biomarqueurs mesurent des paramètres sublétaux qui peuvent être biochimiques ou biomoléculaires. Les outils

biomarqueurs commencent à être utilisés en Europe, en Amérique du Nord, en France également, mais pas encore de façon systématisée. Des biomarqueurs ont été développés et validés sur le terrain pour détecter la présence et caractériser les effets variés de contaminants chimiques (immunotoxicité, mutagénicité, perturbation endocrine...), etc. Pour contrôler l'état de l'environnement, il est indispensable d'étudier les impacts des molécules dans les milieux naturels. Mais les actions « à la source » des polluants (c'est-à-dire avant leur rejet dans l'environnement) sont aussi une voie essentielle : moins une substance est utilisée, moins elle est rejetée et moins elle se retrouvera *in fine* dans l'environnement. Cela est évidemment très important, tout comme le fait de travailler sur les traitements de ces polluants.

Les stations d'épuration performantes sont une étape clé dans la préservation des milieux aquatiques ; elles permettent d'écranter ou de réduire les contaminants, notamment émergents, qui se retrouvent dans les milieux aquatiques et nuisent aux poissons. À ce niveau aussi, des programmes de recherche se déroulent ou se sont déroulés (on peut citer le programme Ampère, suivi du programme Armistic, puis du programme ECHIBIOTECH).

5.4. L'intérêt des biomarqueurs pour cibler certaines substances

Le nombre de molécules concernées par l'environnement est trop grand pour

11. Biomarqueur : caractéristique biologique mesurable liée à un processus normal ou non.

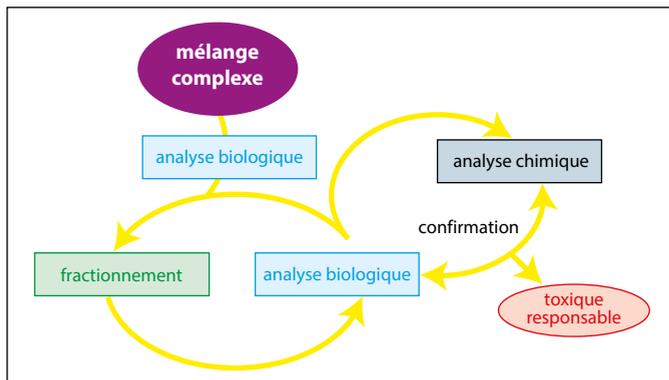


Figure 11

Diagramme expliquant la démarche d'analyse ciblée.

Source : IRSTEA, Brack 2003.

qu'une analyse complète puisse être envisagée de façon réaliste. Une approche efficace consiste à procéder à un « ciblage » préalable à l'analyse. Pour rechercher tel médicament, telle hormone, etc., parmi les cent mille

substances envisageables, on utilise une approche en cycle, résumée sur la **Figure 11**.

Citons un exemple de démarche ciblée : un échantillon complexe est analysé dans sa totalité en termes d'effet biologique, puis on en fait une analyse biologique (par exemple avec des biomarqueurs) fraction par fraction. Cela permet de converger vers les fractions responsables de l'effet biologique. Il s'agira ensuite d'identifier, dans la fraction active, la ou les substances chimiques responsables de l'effet biologique.

L'idée qui sous-tend une telle démarche est d'éviter de mesurer « tout partout et tout le temps », mais d'aller détecter des points noirs particuliers grâce à des méthodes d'ordre biologique, avant d'affiner l'étude d'un point de vue chimique.

Des questions complexes, au-delà de la science

L'identification, la caractérisation et la maîtrise des impacts potentiels ou avérés des micropolluants dans les écosystèmes aquatiques sont des questions très complexes (au sens de la multiplicité des phénomènes et des paramètres, et de la difficulté expérimentale à les atteindre) qui doivent être pris à bras le corps.

Pour autant, la science récente a obtenu des résultats considérables, modifié les points de vue sur les méthodes à mettre en œuvre pour avancer. Elle est aussi force de propositions de programmes de recherche qui nous mettront en mains des connaissances déterminantes

pour la maîtrise des pollutions et des risques associés.

Mais des questions redoutables sont encore posées à la science et à la société : que fera-t-on de toutes les données – on pourrait parler de « Big Data¹² » –, que fera-t-on de tous ces tableaux de chiffres avec des centaines et des milliers de lignes de concentrations chimiques si on n'a pas derrière une véritable compréhension du risque écotoxicologique ou sanitaire que cela peut présenter pour l'environnement et nos sociétés humaines ?

Cela doit nous motiver et nous engager vers un programme collectif qui, au-delà des sciences dites « dures » (physique, chimie, biologie) dont il a été question ici, convoque les sciences sociales, économiques et politiques, parce que toutes ces questions complexes interrogent aussi le modèle de société que nous avons et que nous voulons.

12. Big Data : littéralement les « grosses données », ou mégadonnées, « données massives », désignent des ensembles de données qui deviennent tellement volumineux qu'il en devient difficile de les gérer et de les analyser avec des outils classiques de gestion de base de données ou de gestion de l'information.