

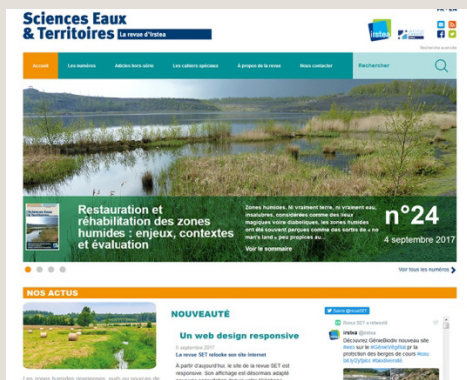
Sciences Eaux & Territoires

Article hors-série numéro 55

Recommandations d'un collectif franco-suisse d'experts pour une meilleure évaluation de la qualité écotoxicologique des sédiments par l'étude des communautés benthiques

Collectif franco-suisse d'acteurs scientifiques, d'opérationnels et de gestionnaires de l'environnement impliqués dans l'évaluation et la gestion de la qualité chimique et écologique des milieux aquatiques

www.set-revue.fr



Sciences Eaux & Territoires, la revue d'Irstea

Article hors-série numéro 55 – 2019

Directeur de la publication : Marc Michel

Directrice éditoriale : Emmanuelle Jannès-Ober

Comité éditorial : Denis Cassard, Nicolas de Menthère, Véronique Gouy, Alain Hénaut, Ghislain Huyghe, Alette Maillard, Isabelle Méhault, Thierry Mougey et Michel Vallance.

Rédactrice en chef : Sabine Arbeille

Secrétariat de rédaction et mise en page : Valérie Pagneux

Infographie : Françoise Peyriguer

Conception de la maquette : CBat

Contact édition et administration : Irstea-DRISE-IE

1 rue Pierre-Gilles de Gennes – CS 10030

92761 Antony Cedex

Tél. : 01 40 96 61 21 – Fax : 01 40 96 61 64

E-mail : set-revue@irstea.fr

Numéro paritaire : 0511 B 07860 – Dépôt légal : à parution – N°ISSN : 2109-3016

Photo de couverture : © M. Brodud (Irstea)



Recommandations d'un collectif franco-suisse d'experts pour une meilleure évaluation de la qualité écotoxicologique des sédiments par l'étude des communautés benthiques

Les sédiments ont un rôle écologique essentiel pour de nombreuses espèces aquatiques. Toutefois, leur capacité à capter les polluants persistants peut participer à long terme à la contamination des milieux aquatiques. Aussi, afin de mieux prendre en compte les impacts écotoxicologiques de la contamination des sédiments et appréhender le risque écologique qui en découle, il est important de disposer de méthodes d'évaluation robustes. Cet article présente la contribution d'un groupe franco-suisse réunissant chercheurs, gestionnaires et représentants de bureaux d'études qui ont travaillé ensemble afin de dresser un état des lieux et formuler des recommandations pour mieux caractériser la contamination des sédiments, les niveaux d'exposition des communautés benthiques et les effets possibles sur ces espèces.

Les sédiments sont une composante essentielle des milieux aquatiques puisqu'ils contribuent à leur fonctionnement écologique et au maintien de la biodiversité, du fait notamment de leur rôle majeur en termes d'habitat et de site de ponte pour de nombreux organismes benthiques (photo 1). Le compartiment sédimentaire joue ainsi un rôle clé pour de nombreuses fonctions écologiques telles que la minéralisation de la matière organique sédimentaire, la dégradation des polluants ou la production de biomasse soutenant les réseaux trophiques aquatiques. Par ailleurs, les sédiments sont des récepteurs naturels pour certains contaminants, en particulier les plus hydrophobes, qui s'y accumulent avec le temps. Certains éléments-traces métalliques, les hydrocarbures aromatiques polycycliques, les polychlorobiphényles, et les pesticides organochlorés constituent des exemples de contaminants qui s'accumulent dans le compartiment sédimentaire. Ce compartiment représente donc un puits naturel de contaminants qui peut se transformer en source lors d'épisodes de remise en suspension des sédiments entraînant la remobilisation des substances accumulées (ex. : crues, chasses, curages) ou en cas de désorption de ces contaminants (ex. : épisodes de variation des conditions redox ou changement d'équilibres entre l'eau et le sédiment).

À l'échelle européenne, le compartiment sédimentaire a longtemps été ignoré dans la directive cadre sur l'eau (DCE ; 2000/60/CE). Plusieurs amendements successifs ont toutefois permis sa prise en compte progressive pour la protection des milieux aquatiques. Parmi ceux-ci, on peut notamment citer l'amendement du 16 décembre 2008 (2008/105/EC), définissant le besoin de « contrôler les sédiments à une fréquence raisonnable afin de fournir des données suffisantes à une analyse de tendance fiable à long terme des substances prioritaires ». Cependant, force est de constater qu'il manque encore, pour ce compartiment, des recommandations sur les méthodes d'évaluation de l'impact écotoxicologique de la contamination des sédiments et du risque environnemental associé, tant au niveau de l'Union européenne (de Deckere *et al.*, 2011) qu'à celui de la Suisse (Flück *et al.*, 2012). Un des moyens de prendre en considération les concepts écologiques dans les approches écotoxicologiques est de privilégier les études à l'échelle des communautés biologiques. En effet, les communautés présentent l'avantage de constituer un niveau intermédiaire entre les populations et les écosystèmes. Elles sont composées de nombreuses espèces présentant des degrés très variables de résistance aux contaminants. Dans les démarches d'évaluation des risques et effets écotoxicologiques, cela offre ainsi la possibilité de considérer la biodiversité, aussi



❶ Sédiments émergés ou affleurant la surface de l'eau dans la rivière Azergues (Rhône).

© B. Motte (Irstea)

bien spécifique que fonctionnelle, ce dernier paramètre étant important en vue d'évaluer l'impact des toxiques sur le niveau d'intégrité fonctionnelle des écosystèmes. De ce fait, l'approche TRIADE, basée sur trois lignes de preuves successives (i.e. analyses chimiques, bioessais sur des organismes modèles et observation de terrain au niveau des communautés) est recommandée pour l'évaluation de la qualité des sédiments. Celle-ci est principalement utilisée pour des problématiques de gestion locale de sédiments fortement contaminés. Cependant, les méthodes classiques d'évaluation des risques et effets écotoxicologiques dans les sédiments se basent encore principalement sur l'utilisation d'organismes modèles, tels que des espèces ou des populations de microorganismes (ex. : *Vibrio fischeri*) et d'invertébrés (ex. : *Chironomus riparius*), dont les réponses aux contaminants sont appréhendées en laboratoire dans des conditions contrôlées ou directement sur le terrain à partir d'organismes engagés. Si ces méthodes sont pertinentes pour évaluer la toxicité et/ou le risque écotoxicologique induits par une contamination des sédiments sur certaines espèces, elles ne permettent pas de connaître les effets de cette contamination sur les communautés benthiques qui sont exposées en permanence à cette contamination dans le milieu. Dans ce contexte, il apparaît nécessaire d'appliquer et perfectionner les méthodes existantes prenant en considération les communautés benthiques (microorganismes et invertébrés) et d'en développer de nouvelles afin d'améliorer les procédures d'évaluation de la qualité écotoxicologique des milieux aquatiques.

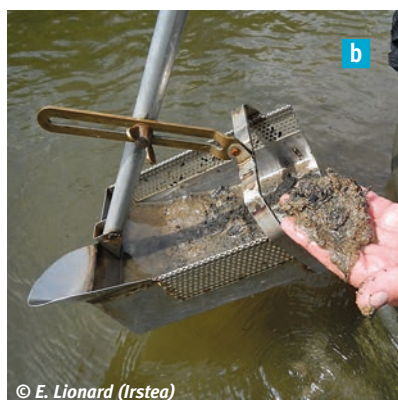
Un collectif franco-suisse de gestionnaires et de chercheurs réuni pour dresser un état des lieux des besoins et formuler des recommandations

Pour élaborer des recommandations à visée opérationnelle dans le but d'améliorer la prise en compte des sédiments dans l'évaluation de la qualité écologique et écotoxicologique des milieux aquatiques il est nécessaire :

- de dresser un état des lieux des besoins des gestionnaires de l'environnement autour de cette problématique ;
- d'identifier les expertises, outils et approches disponibles ou à développer pour répondre à ces besoins.

C'est dans ce but qu'a eu lieu en avril 2017 le séminaire franco-suisse SédiCommuTOX. Organisé à l'initiative de Stéphane Pesce (Irstea) et Benoît Ferrari (Centre Ecotox), il a ainsi rassemblé pendant deux jours :

- des experts (écologues, écotoxicologues, chimistes) venus de différents établissements scientifiques des cantons de Genève, Vaud et Zurich et des régions Auvergne-Rhône-Alpes et Bourgogne Franche Comté ;
- des représentants des établissements publics en charge de l'environnement et de la biodiversité et des structures en charge de la gestion des milieux aquatiques (Agence française pour la biodiversité – AFB, ex-Onema, l'Office fédéral de l'environnement – OFEV, la plateforme « qualité de l'eau » de l'Association suisse des professionnels de la protection des eaux – VSA et des services cantonaux suisses de protection de l'environnement) ;



② Sédiments de surface prélevés en rivière à l'aide d'une drague à main (a, b) et en lac à l'aide d'une benne Ekman (c, d).

- des acteurs du monde économique (start-up et bureaux d'études impliqués dans le domaine de l'environnement).

Les recommandations formulées dans cet article sont le fruit des échanges qui ont eu lieu durant ce séminaire. Elles concernent deux enjeux indissociables pour améliorer l'évaluation de la qualité écotoxicologique des sédiments, à savoir une meilleure caractérisation :

- de la contamination des sédiments et des niveaux d'exposition des communautés naturelles qui y sont associées ;
- des effets induits par cette exposition sur les communautés benthiques pour mieux les intégrer dans l'évaluation de la qualité et la gestion des milieux aquatiques.

Comment mieux caractériser la contamination et les niveaux d'exposition des communautés benthiques associées aux sédiments ?

Définir une stratégie d'échantillonnage appropriée et adaptée aux objectifs visés

Le compartiment sédimentaire est un milieu complexe qui présente une forte hétérogénéité verticale et horizontale conditionnée par de nombreux critères physiques (ex. : granulométrie, flux souterrains et de surface des eaux), chimiques (ex. : quantité et qualité de la matière organique) ou biologiques (ex. : activités des communautés benthiques, comme la bioturbation et la biodégradation).

De plus, il est soumis à des fluctuations spatio-temporelles plus ou moins marquées, selon le type d'écosystème (ex. : lac ou rivière) et les pressions environnementales d'origine naturelle (ex. : régimes hydro-climatiques) ou anthropique (ex. : chasses de barrage) qu'il subit. Compte tenu de cette complexité, il est donc important de définir une stratégie d'échantillonnage adaptée aux objectifs visés.

En France, le laboratoire national de référence pour la surveillance des milieux aquatiques AQUAREF a élaboré un guide technique décrivant les opérations d'échantillonnage de sédiments de surface en milieu continental pour répondre aux objectifs fixés dans le cadre des programmes de surveillance DCE¹. En Suisse, le Centre Ecotox travaille avec l'Eawag, l'OFEV et le VSA à l'élaboration d'une stratégie d'évaluation de la qualité des sédiments dans le cadre du système modulaire gradué (SMG) qui a été conçu pour l'étude et l'appréciation de l'état des cours d'eau suisses. Cette stratégie comprendra une méthode harmonisée pour le prélèvement (photo ②) et la préparation des échantillons, ainsi qu'un système d'évaluation de la qualité des sédiments inspiré de la procédure de classification utilisée actuellement dans le système modulaire gradué².

L'ensemble de ces démarches s'inscrit dans un cadre réglementaire qui vise pour l'instant principalement à évaluer les sédiments à partir de critères de qualité chimique. Pour répondre à des besoins de recherche, d'expertise ou d'évaluation plus spécifiques, il peut être nécessaire d'adapter la stratégie d'échantillonnage en considérant notamment :

- le choix de l'échelle spatiale, en fonction du degré de représentativité souhaité à différentes échelles (bassin versant, sous-bassin, tronçon, station, faciès d'écoulement ou autre strate de mésohabitat pertinent), et temporelle (alternance jour/nuit, phénologie annuelle, variations inter-annuelles), en tenant compte de la dynamique du sédiment et de l'hydrologie ;
- la distribution des contaminants dans le profil vertical et transversal (ex. : d'une berge à l'autre d'une rivière) du sédiment, en tenant compte de différents facteurs tels que la profondeur, la granulométrie ou la teneur et la nature de la matière organique ;
- les types de contaminants ciblés et les sources de contamination connues, qu'elles soient d'origine anthropique ou naturelle (ex. : apport de métaux issus du fond géochimique).

Identifier la fraction biodisponible et intégrer la diversité des substances

Dans le compartiment sédimentaire, les contaminants peuvent être inclus ou fixés à des particules minérales réfractaires ou des particules organiques plus dégradables, réduisant ou augmentant le risque de contact avec les organismes biologiques présents dans ce milieu. La biodisponibilité d'un contaminant, qui désigne sa capacité à interagir avec les organismes vivants, dépend ainsi fortement de la forme sous laquelle il est présent (sous forme méthylée ou non, faiblement adsorbée à des particules, liée à la matière organique, etc.) et des

1. https://www.aquaref.fr/system/files/AQUAREF_2017_Guide_Echantillonnage_SED_VF.pdf

2. http://www.centreecotox.ch/media/100653/2015_modsed_fact_fr.pdf

conditions physico-chimiques du sédiment et du contaminant lui-même. Cette biodisponibilité peut changer rapidement, en fonction de l'évolution de différents paramètres, tels que la teneur en matière organique, le pH, le potentiel d'oxydo-réduction ou encore des activités biologiques (ex. : bioturbation) qui peuvent engendrer une modification de la structure et des propriétés du sédiment.

Évaluer les niveaux d'exposition des communautés aux contaminants dans le sédiment nécessite donc de caractériser plus spécifiquement la fraction biodisponible. Une telle caractérisation n'est pas triviale d'autant que la biodisponibilité est également variable en fonction de la nature des communautés benthiques (endofaune, qui vit et se déplace parmi les particules de sédiments vs épifaune, qui vit à la surface des sédiments), de leur niveau de mobilité et de leur mode d'alimentation (suspensivores vs détritivores) qui conditionnent l'exposition aux contaminants (par contact et/ou ingestion). Un débat subsiste donc quant aux choix des méthodes les plus pertinentes pour parvenir à caractériser la biodisponibilité des contaminants dans les sédiments. De manière générale, celles-ci peuvent être regroupées en trois catégories :

- la première consiste à réaliser un prélèvement ponctuel de sédiment et une analyse chimique des différentes formes (faiblement adsorbé, lié à la matière organique, etc.) sous lesquelles se trouvent les contaminants (via par exemple des extractions chimiques séquentielles pour les métaux). Couplée à une caractérisation de la granulométrie et de la matière organique présente dans les sédiments, ce type d'approche permet d'émettre des hypothèses, d'une fiabilité variable, quant à la biodisponibilité de chacune de ces formes ;
- la deuxième consiste à utiliser des systèmes d'échantillonnage passif qui peuvent être immergés dans les sédiments pendant plusieurs jours à plusieurs semaines afin de fixer et concentrer les contaminants aussi bien présents dans l'eau interstitielle que ceux faiblement fixés à la phase solide du sédiment. Simples d'utilisation, ces systèmes présentent l'avantage de donner une « image » approchée d'une fraction considérée comme « disponible » à l'échelle de l'outil utilisé et donc comme potentiellement « biodisponible » dans le cadre d'une exposition par contact puisqu'ils ne piègent que les contaminants libres ou faiblement liés aux sédiments. Cependant, la compréhension des quantités fixées sur ces systèmes en fonction des concentrations présentes dans le compartiment sédimentaire nécessite de bien connaître les paramètres qui gouvernent les échanges et leur cinétique ainsi que les équilibres permettant la fixation des contaminants des sédiments vers l'échantillonneur. De plus, la plupart des échantillonneurs passifs sont spécifiques à une famille de contaminants (par exemple les DGT, « *diffusive gradients in thin films* », pour les métaux), et l'utilisation exclusive de ces dispositifs ne permet pas d'appréhender l'ensemble de la fraction biodisponible dans le cadre d'une exposition par ingestion ;
- enfin, la troisième consiste à mesurer les concentrations accumulées dans des organismes exposés par contact et/ou ingestion aux contaminants présents dans les sédiments. Ces organismes peuvent être pré-

sents naturellement dans ce milieu (auquel cas la durée d'exposition n'est pas connue précisément) ou exposés spécifiquement à partir d'approches d'encagement (permettant ainsi d'utiliser une procédure plus standardisée, mais moins représentative de la réalité).

Ces différentes catégories de méthodes, qui sont relativement complémentaires, présentent toutes des avantages et des inconvénients. À ce stade, il apparaît donc nécessaire de dresser un état des lieux complet à ce sujet, à l'instar du travail réalisé en 2013 par l'Agence européenne des produits chimiques (ECHA, 2014), afin de proposer une stratégie permettant de caractériser au mieux la biodisponibilité des contaminants dans les sédiments pour estimer l'exposition réelle des communautés qui s'y trouvent. Cette stratégie doit idéalement inclure une description des méthodes les plus pertinentes, un logigramme permettant de choisir celles qui sont les plus adaptées à la problématique abordée (en fonction du type de site, des objectifs, etc.) ainsi que des recommandations concernant les analyses complémentaires à mettre en œuvre (ex. : granulométrie, dosage et caractérisation de la matière organique, mesure de la température, de l'oxygénation, du pH, etc.).

Sur la base de ce travail, il serait important d'initier des démarches de standardisation (voire de normalisation) des méthodes recommandées, mais également d'identifier les manques afin de proposer le développement d'outils innovants (ex. : échantillonneurs passifs présentant une affinité pour un large spectre de contaminants). Ceux-ci doivent notamment viser à mieux intégrer la diversité des substances (et de leurs produits de transformation abiotique et biotique) présentes dans le compartiment sédimentaire pour tendre vers une caractérisation de « l'exposome ». Ce concept récent fait référence à la totalité des expositions à des facteurs environnementaux que subit un organisme au cours de sa vie.

Développer et valider des modèles prédictifs de contamination et d'exposition

Les modèles prédictifs sont aujourd'hui considérés comme des outils essentiels pour permettre une gestion plus efficace de la qualité écologique des écosystèmes. Par exemple, dans le cadre de la réglementation REACH (*Registration, Evaluation, Authorisation and Restriction of Chemicals*), adoptée par l'Union européenne pour mieux protéger la santé humaine et l'environnement contre les risques liés aux substances chimiques, la prédiction des risques concernant les sédiments s'appuie en partie sur une modélisation basée sur l'hypothèse du partage à l'équilibre entre l'eau et le substrat solide (*Equilibrium Partitioning Method*, EPM ; ECHA, 2014).

Les besoins de modélisation doivent viser :

- à mieux décrire et/ou simuler le transfert des contaminants du compartiment sédimentaire vers le biote inféodé au sédiment ;
- à apprécier la bio-accessibilité et la biodisponibilité des substances chimiques pour les organismes ;
- à identifier les sources des polluants se retrouvant dans les sédiments.

Ce dernier point est important en vue de pouvoir distinguer la contamination d'origine naturelle (ex. : pollution métallique issue des fonds géochimiques) et celle d'ori-

▶ gine anthropique sur laquelle il est possible d'intervenir au moyen de diverses mesures de gestion environnementale. Cependant, la qualité de la prédiction dépend directement de la qualité des données qui alimentent ces modèles, et nécessite absolument une estimation du coefficient de variation (i.e. « incertitude » au sens statistique du terme) associée au résultat final.

L'élaboration de modèles prédictifs robustes concernant la contamination des sédiments et les niveaux d'exposition des communautés naturelles qui s'y trouvent nécessite par ailleurs le développement de plateformes ouvertes de partages des résultats et des méthodes, qui permettraient de sauvegarder les données ainsi que les métadonnées associées (description des méthodes d'acquisition des données, description des sites de prélèvements et des paramètres environnementaux mesurés, etc.). En parallèle, un effort doit être fourni afin de développer des stratégies permettant de valider ces prédictions, en intégrant des données collectées à différentes échelles et en mettant en œuvre des méthodes adaptées (ex. : utilisation de méthodes isotopiques pour tracer l'origine et le devenir des contaminants).

Comment mieux caractériser les effets de l'exposition aux contaminants sur les communautés benthiques associées aux sédiments afin de mieux les prendre en compte dans l'évaluation de la qualité et la gestion des milieux aquatiques ?

Développer et mettre en œuvre des méthodes pertinentes pour évaluer les liens entre exposition et effets à l'échelle des communautés benthiques

Les travaux visant à développer des méthodes permettant d'évaluer la qualité écotoxicologique des sédiments à partir de l'étude des communautés benthiques restent relativement rares. Parmi les méthodes les plus utilisées, citons l'Indice oligochètes de bioindication des sédiments (IOBS) normalisé en France en 2012 et mis à jour en 2016 (AFNOR NFT 90-393). Cet indice vise à évaluer la qualité biologique des sédiments fins de cours d'eau à partir de l'étude de la composition des communautés formées par ces vers qui comprennent un grand nombre d'espèces allant de résistantes à très sensibles aux pollutions chimiques (type micropolluants et macropolluants). Utilisant cet indice pour évaluer la qualité des sédiments d'un grand nombre de sites situés en France et en Suisse, Vivien *et al.* (2014) ont établi et proposé des seuils de toxicité basés sur les concentrations en métaux dans le sédiment. Des approches similaires ont été mises en œuvre avec d'autres communautés d'invertébrés comme par exemple les nématodes ou les chironomides. Un intérêt plus récent s'est également porté sur les communautés microbiennes benthiques qui présentent une grande diversité spécifique et fonctionnelle qui leur confère un rôle écologique majeur dans les sédiments, ainsi qu'une large gamme de sensibilité et un fort pouvoir adaptatif aux contaminants.

L'essor récent des approches de biologie moléculaires permettant de caractériser les organismes présents dans l'environnement par séquençage de l'ADN a permis

ces dernières années de conduire des recherches s'affranchissant des contraintes associées aux démarches d'identification taxonomique à partir d'observations microscopiques, généralement très chronophages et nécessitant un niveau d'expertise élevé (et de plus en plus rare). Elle s'affranchit totalement du prélèvement des organismes vivants (et des difficultés d'échantillonnage et/ou de conservation associées) et se concentre uniquement sur les fragments d'ADN présents dans le milieu. Elle présente donc un très fort potentiel pour l'analyse des communautés biologiques benthiques. Ce type d'approche utilisée pour étudier la diversité d'une communauté environnementale (ex. : communauté de bactéries ou communauté d'oligochètes) est généralement appelée « *metabarcoding* » (encadré 1). Elle fait partie des approches innovantes en cours de développement et qui doivent être validées par confrontation aux méthodes existantes qui ont fait leurs preuves (ex. : *barcoding* vs détermination taxonomique).

Ce type d'approche, normalisable (voir pour exemple la norme ISO 21286 « *Soil quality – Identification of ecotoxicological test species by DNA barcoding* »), s'inscrit dans le champ des « omiques » (ou « OMICs » en version internationale) qui désignent les nouvelles sciences biologiques explorant un grand groupe de molécules dans des échantillons biologiques, à différents niveaux (ex. : acides nucléiques, protéines, métabolites formés), en couplant des technologies de biologie moléculaire ou d'analyse chimique à des méthodes poussées de bioinformatique et de biostatistique. Si elles restent peu exploitées à ce jour dans le domaine de l'écotoxicologie, elles font partie des pistes intéressantes à explorer dans un futur proche pour développer des méthodes innovantes destinées à évaluer les risques et impacts structurels et fonctionnels sur les communautés benthiques (*via* par exemple des approches d'écotoxicogénomique qui pourraient permettre d'identifier de nouveaux marqueurs moléculaires d'effets, applicables à l'échelle des communautés environnementales).

Une autre piste qui semble particulièrement pertinente concerne le développement des approches PICT (« *Pollution Induced Community Tolerance* », encadré 2) et leur application au compartiment sédimentaire à partir de l'étude des communautés benthiques de microorganismes et d'invertébrés. En effet, ces approches qui sont basées sur l'étude du niveau de sensibilité des communautés à la toxicité des contaminants auxquelles elles sont exposées *in situ*, permettent d'établir plus spécifiquement un lien de causalité entre le niveau de tolérance mesuré au laboratoire et le niveau d'exposition antérieur dans le milieu, qui conditionne la distribution entre les organismes sensibles et les organismes tolérants au sein d'une communauté naturelle. Si la pertinence de ces approches et leur potentiel opérationnel a pu être démontrée à partir d'études de cas (Tlili *et al.*, 2016), celles-ci concernent principalement les eaux de surface. Il est donc nécessaire de tester ces outils dans le compartiment sédimentaire et d'optimiser les protocoles afin de faciliter leur mise en pratique, en proposant notamment une méthode d'interprétation des résultats qui inclurait la définition de seuils de référence.

À ce jour, il serait donc judicieux de réaliser une méta-analyse des outils existants ou en cours de développement et d'évaluer leur niveau actuel de développement normatif. Ce travail devra inclure la question de l'échantillonnage et il devra appréhender le degré de spécificité des réponses observées en lien avec les métadonnées renseignant sur le contexte de la contamination et d'identifier, le cas échéant, les principaux facteurs environnementaux confondants (i.e. qui peuvent influencer ces réponses) afin d'évaluer la robustesse des interprétations qui en découlent. Cela permettrait ainsi de classer les outils existants en fonction de leur signification écologique et de leur robustesse pour établir les liens de causalité dans un contexte d'évaluation et gestion de la qualité écotoxicologique des sédiments. Il est également nécessaire de tenir compte dans cette analyse de la finalité des outils (ex. : outils de diagnostic, de mesure d'effets, de gestion...), mais aussi de leur caractère opérationnel en tenant compte des notions de facilité de mise en œuvre, de coût analytique, de robustesse et de répétabilité.

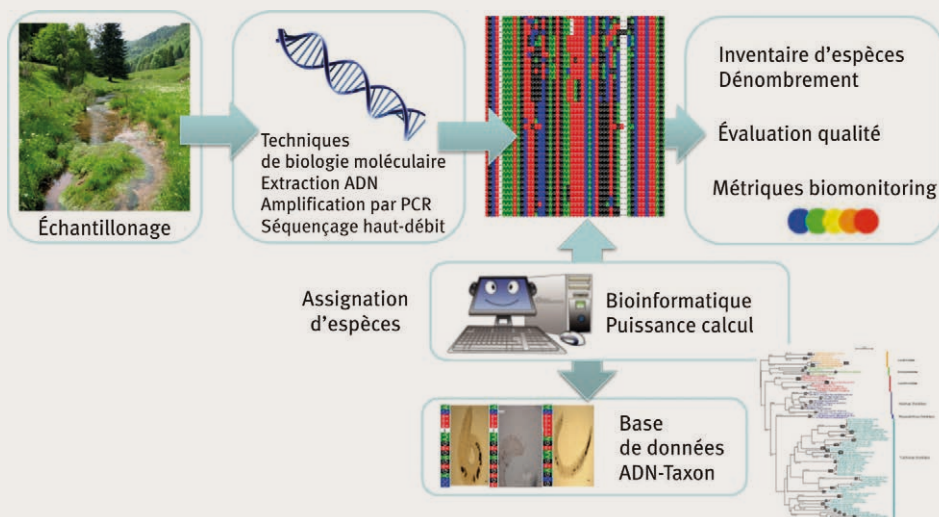
Proposer des référentiels et des indicateurs de qualité et de bon fonctionnement du compartiment sédimentaire

Pouvoir utiliser les communautés benthiques comme des bioindicateurs visant à diagnostiquer la qualité écotoxicologique des sédiments nécessite une validation et une harmonisation des méthodes utilisées, depuis l'échantillonnage jusqu'à l'interprétation des données. Cette dernière étape est particulièrement importante pour rendre ces approches opérationnelles auprès des gestionnaires. Elle implique la définition au préalable de seuils adaptés au type de bioindicateur visé (ex. : seuil d'exposition ou seuil de toxicité et d'effets sur les communautés) et idéalement, de critères de qualité, qui pourraient éventuellement être adaptés en fonction des caractéristiques locales ou régionales (en intégrant, par exemple, les niveaux de contamination naturelle à l'échelle d'un bassin versant ou d'une région) comme cela peut-être fait avec les hydroécotémoins pour le suivi de la qualité écologique des eaux superficielles dans le cadre de la DCE.

1 L'APPROCHE METABARCODING

La surveillance biologique des écosystèmes repose traditionnellement sur l'identification morphologique d'espèces indicatrices dont la présence renseigne sur l'état écologique de leur environnement. Au lieu de se fier aux caractéristiques morphologiques (taille, forme, etc.) pour identifier les espèces, ce qui exige des connaissances spécialisées sur les groupes taxonomiques, de petits fragments d'ADN – environ 300 paires de bases en longueur – appelés code-barres ADN peuvent être utilisés. Cette approche d'identification innovante appelée « barcoding » repose sur des bases de données de référence associant un nom de taxon à un code-barre ADN. Bien que le « barcoding » soit utile pour identifier les spécimens individuellement, son application aux échantillons de communautés biologiques naturelles est difficile parce qu'il nécessite de traiter une à une les multiples espèces d'une communauté (tri ou isolement de spécimens). Ce défi a été surmonté grâce à une méthode de métagénomique appelée « metabarcoding », qui permet la détection et l'identification dans un même échantillon environnemental de toutes les espèces d'un groupe taxonomique donné directement à partir de leurs séquences de code-barres ADN en une seule analyse. L'ADN environnemental est extrait directement de l'échantillon, suivi de l'amplification et du séquençage des code-barres ADN. À l'aide d'outils bioinformatiques puissants, les code-barres ADN séquencés sont comparés à ceux contenus dans une base de données de référence pour identifier la composition taxonomique de l'échantillon. Associé à la technologie de séquençage haut-débit, le metabarcoding permet d'analyser simultanément un grand nombre d'échantillons environnementaux (de plusieurs dizaines à plusieurs centaines).

L'analyse de l'ADN environnemental par des techniques de metabarcoding ouvre donc de nouveaux horizons dans le domaine de la bioindication. C'est dans ce contexte que le projet Interreg france-suisse « SYNergie transfrontalière pour la bio-surveillance et la préservation des écosystèmes AQUatiques » (SYNAQUA) a été initié en 2017 (<https://www6.inra.fr/synaqua>) pour contribuer au développement et à l'application de deux outils génétiques permettant une surveillance environnementale à haut-débit, l'un basé sur l'étude des communautés de diatomées (Indice moléculaire diatomées) et l'autre sur l'étude des communautés d'oligochètes (Indice moléculaire oligochètes).



La définition de seuils et de critères de qualité nécessite l'acquisition de jeux de données de taille importantes et leur modélisation à partir d'études réalisées sur des sites présentant différents niveaux de contamination. Ces sites doivent inclure un maximum de stations d'échantillonnage caractérisées par des sédiments non contaminés, afin de permettre l'élaboration de référentiels traduisant des conditions non impactées par les contaminants. Ce travail pourrait être facilité par une mise en réseau des acteurs impliqués *via* notamment la création et le partage de bases de données, et la mise en œuvre d'une démarche collective à large échelle spatiale (multi-sites, multi-hydrosystèmes) et temporelle (en s'inspirant par exemple de la démarche entreprise dans le cadre du Réseau de mesures de la qualité des sols, RMQS³), afin notamment de valider les référentiels proposés. Outre l'élaboration d'indicateurs d'exposition et d'effets sur les communautés benthiques associées aux sédiments, il est important de tendre vers l'élaboration

d'indicateurs d'évaluation ou de restauration du fonctionnement des écosystèmes aquatiques, *via* l'évaluation de l'impact écotoxicologique causé par l'exposition aux contaminants sur les fonctions écologiques et les services écosystémiques remplis par ces communautés.

Enfin, il est primordial de tenir compte tant que possible de la notion de transfert opérationnel de ces outils de diagnostic. En effet, si ces recommandations font état d'un besoin important de recherches appliquées, elles ne doivent pas éluder le besoin de fournir dès que possible aux gestionnaires et acteurs de terrain des outils applicables permettant de mieux prendre en compte le rôle écologique du compartiment sédimentaire dans les démarches de suivi de la qualité écotoxicologique des écosystèmes aquatiques. Une première étape pourrait consister à identifier parmi les méthodes disponibles celles qui présentent un fort potentiel opérationnel (en estimant notamment leur coût et leur degré de facilité de mise en œuvre) et d'initier une démarche de standardisation et de définition de seuils et de critères de qualité. Pour ce faire, il serait judicieux de créer un réseau interdisciplinaire composé entre autres de chimistes,

3. <https://www.gissol.fr/le-gis/programmes/rmqs-34>

2 L'APPROCHE PICT

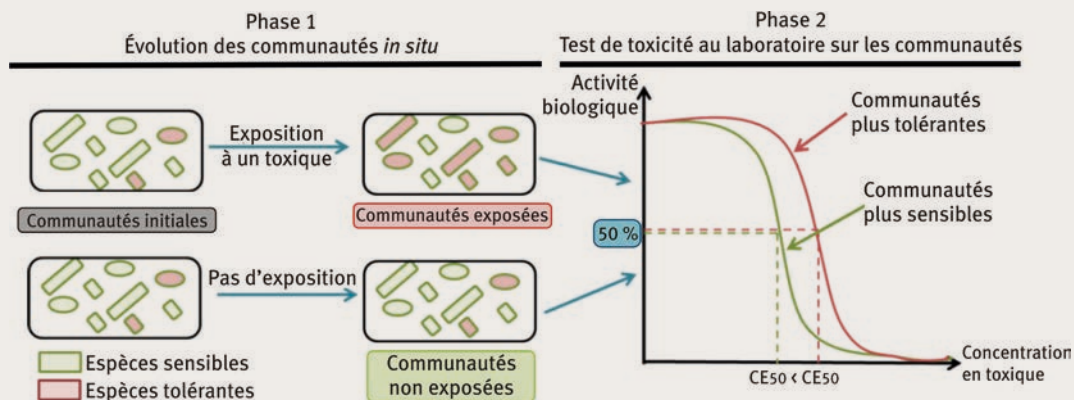
Le concept PICT (*Pollution Induced Community Tolerance*) repose sur le principe qu'une communauté biologique naturelle est constituée de différentes entités (populations, espèces, souches) ayant des sensibilités variables vis-à-vis d'un toxique donné ou d'une famille de toxiques présentant un mode d'action similaire. L'exposition chronique d'une communauté à ce toxique se traduira donc généralement par la sélection des organismes les plus tolérants, accompagnée éventuellement par la mise en place de mécanismes de résistance chez certaines espèces. La communauté résultant de ces changements présentera alors, dans son ensemble, une tolérance à ce toxique plus importante qu'une communauté n'ayant pas subi de pression de sélection par ce toxique.

Cette acquisition de tolérance peut être mise en évidence à l'aide de tests de toxicité aigüe réalisés au laboratoire sur les communautés directement issues du milieu naturel. Ces tests permettent d'obtenir des courbes dose-réponse servant à déterminer des valeurs seuils telles que la CE_{50} (concentration en toxique pour laquelle on observe une diminution de 50 % de l'activité mesurée). Elles permettent de comparer les tolérances des communautés au toxique testé. Une tolérance accrue vis-à-vis d'un toxique révèle donc une adaptation induite par une exposition préalable à celui-ci (ou à un toxique présentant un mode d'action similaire) dans le milieu.

L'approche PICT est donc un outil particulièrement intéressant pour établir un lien de causalité entre la réponse biologique observée à l'échelle des communautés et leur niveau d'exposition en contaminants dans le milieu. Un collectif européen de chercheurs a récemment mis en avant le potentiel des approches PICT pour contribuer à l'évaluation de la qualité écologique des milieux aquatiques dans un contexte de contamination chimique (Tlili *et al.*, 2016).

Cependant, leur mise en œuvre opérationnelle implique un besoin de standardisation/normatisation des protocoles utilisés ainsi que la définition de seuils de tolérance qui permettrait de détecter le dépassement des niveaux de tolérance basale.

De récents travaux menés par l'équipe « Écotoxicologie microbienne aquatique » du centre Irstea de Lyon-Villeurbanne dans le cadre de la fiche action n° 46 de l'accord cadre Irstea-AFB (« Validation et application d'approches PICT pour évaluer l'impact écotoxicologique des contaminants dans le sédiment ») ont démontré que l'approche PICT était applicable dans le compartiment sédimentaire à partir de l'étude des communautés microbiennes. Elle doit pouvoir également être mise en œuvre à partir de l'étude des communautés d'invertébrés benthiques.



d'écotoxicologues, d'écologues, de modélisateurs, et qui impliqueraient nécessairement des gestionnaires et des opérateurs, afin de répondre au mieux à leurs attentes. Une telle démarche pourrait être initiée à l'échelle franco-suisse, par exemple sous l'égide de l'AFB et des autorités fédérales et cantonales suisses, en s'appuyant notamment sur le travail initié par AQUAREF et le Centre Ecotox concernant la surveillance de la qualité des sédiments dans le cadre respectif de la DCE pour la France et du SMG pour la Suisse.

Conclusions

Les recommandations formulées dans cet article font état du besoin d'une méta-analyse des outils existants ou en cours de développement pour caractériser les niveaux d'exposition aux contaminants des communautés benthiques associées aux sédiments et évaluer les effets écotoxicologiques qui en découlent sur ces communautés. Associée à une évaluation du niveau actuel ou du potentiel de développement normatif de ces outils et à une implication forte de gestionnaires et de porteurs d'enjeux dans le domaine de l'évaluation et la gestion de la qualité écologique des milieux aquatiques, ce travail pourrait ainsi permettre d'initier des programmes de recherche appliquée ayant pour but de tester les outils les plus pertinents et d'initier leur transfert opérationnel. Ces programmes pourraient notamment s'appuyer sur les démarches engagées en France dans le cadre d'AQUAREF pour répondre aux objectifs de la DCE et en Suisse dans celui de la stratégie d'évaluation de la qualité des sédiments qui vise à compléter le SMG. ■

Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier la Région Auvergne-Rhône-Alpes, Irstea et le Centre Ecotox Eawag-EPFL pour le financement du séminaire SediCommuTOX ainsi que la commune de Villié-Morgon pour la mise à disposition gratuite des locaux municipaux à cette occasion. Biochem-Env et GenoSol sont des services de l'infrastructure nationale AnaEE-France, bénéficiant d'une aide de l'État français gérée par l'Agence nationale de la recherche au titre du programme « Investissements d'avenir » portant la référence ANR-11-INBS-0001.

Les auteurs

Liste des membres du collectif impliqués dans l'élaboration des recommandations et la rédaction de l'article

Stéphane PESCE¹, Benoît JD FERRARI², Chloé BONNINEAU¹, Carmen CASADO², Laure APOTHELOZ-PERRET-GENTIL³, Agnès BOUCHEZ⁴, Nathalie CHEVIRON⁵, Marina COQUERY¹, Aymeric DABRIN¹, Silwan DAOUK⁶, Luiz FELIPPE DE ALENCASTRO⁷, Davide DEGLI-ESPOSTI¹, Nathalie DUBOIS⁸, Émilie EGEE⁹, Élise FOLLY¹⁰, Arnaud FOULQUIER¹¹, David GATEUILLE¹², Véronique GOUY¹, Michel LAFONT¹³, Mélanie LALUC¹⁴, Brigitte LODS-CROZET¹⁵, Jean-Luc LOIZEAU¹⁶, Émilie LYAUTEY^{1,17}, Fabrice MARTIN-LAURENT¹⁸, Matthieu MASSON¹, Clara MENDOZA-LERA¹, Samuel MONDY¹⁹, Jean-Michel MONIER²⁰, Bernard MONTUELLE⁴, Christian MOUGIN⁵, Pascal MULATTIERI²¹, Emmanuel NAFFRECHOUX¹², Marc NEYRA¹, Olivier PERCEVAL²², Yorick REYJOL²², Magali ROSSI²⁴, Sergio SANTIAGO²⁴, Vera SLAVEYKOVA¹⁶, Pierre-François STAUB²², Ahmed TLILLI²³, Régis VIVIEN², Christiane WERMEILLE²⁶, Anice YARI¹

1. Irstea, UR RiverLy, Lyon-Villeurbanne, France.
2. Centre Ecotox Eawag-EPFL, Lausanne, Suisse.
3. Université de Genève/ID-Gene, Genève, Suisse.
4. INRA UMR CARRTEL, Thonon-les-bains, France.
5. Plateforme Biochem-Env, UMR ECOSYS, INRA, AgroParisTech, Université Paris-Saclay, Versailles, France.
6. VSA-Plateforme Qualité de l'eau, Dübendorf-Lausanne, Suisse.
7. EPFL- Laboratoire de chimie analytique environnementale, Lausanne, Suisse.
8. EPFZ, Département des Sciences de la Terre, Zurich, Suisse & EAWAG, Département des Eaux de Surface, Dübendorf, Suisse.
9. Fondation Rovaltain, Alixan, France.
10. Service de l'environnement, Canton de Fribourg, Suisse.
11. Université Grenoble Alpes, Laboratoire d'Écologie Alpine, UMR CNRS-UGA-USMB 5553, Grenoble, France.
12. Université Savoie Mont Blanc, LCME, Le Bourget du Lac, France.
13. LEHNA-UCBL1/Auto-entreprise, Lyon-Villeurbanne, France.
14. BURGEAP (groupe GINGER), Lyon, France.
15. Direction générale de l'Environnement, Division Protection des eaux, canton de Vaud, Epalinges-Lausanne, Suisse.
16. Université de Genève, Département F.A. Forel des sciences de l'environnement et de l'eau, Genève, Suisse.
17. Université Savoie Mont Blanc UMR CARRTEL, Le Bourget du Lac, France.
18. Agroécologie, INRA, AgroSup Dijon, Université de Bourgogne, Université Bourgogne Franche-Comté, UMR Agroécologie, Dijon, France.
19. Plateforme GenoSol, INRA, AgroSup Dijon, Université Bourgogne Franche-Comté, UMR Agroécologie, Dijon, France.
20. ENOVEO, Lyon, France.
21. Bio'Eau Sàrl, Bernex, Suisse.
22. Agence Française pour la Biodiversité (AFB), Vincennes, France.
23. Université Savoie Mont Blanc, EDYTEM, Le Bourget du Lac, France.
24. Soluval Santiago, Couvet, Suisse.
25. EAWAG, Département d'écotoxicologie environnementale, Dübendorf, Suisse.
26. Office fédéral de l'environnement (OFEV), Division Sols et biotechnologie, section Sites contaminés, Berne, Suisse.

EN SAVOIR PLUS...

- DE DECKERE, E., DE COOMAN, W., LELOUP, V., MEIRE, P., SCHMITT, C., VON DER OHE, P.C., 2011, Development of sediment quality guidelines for freshwater ecosystems, *J. Soil. Sed.*, n° 11, p. 504-17.
- ECHA (EUROPEAN CHEMICALS AGENCY), 2014, *Principles for Environmental Risk Assessment of the Sediment Compartment: Proceedings of the Topical Scientific workshop*, Editors : TARAZONA, J.V. et al., ECHA-14-R-13-EN, 82 p.
- FLÜCK, R., CAMPICHE, S., DE ALENCASTRO, L.F., ROSSI, L., FERRARI, B.J.D., SANTIAGO, S., WERNER, I., CHÈVRE, N., 2012, Surveillance de la qualité des sédiments. État actuel des méthodes disponibles et mise en place de recommandations, *Aqua & Gas*, n° 92, p. 18-22.
- TLILI, A., BÉRARD, A., BLANCK, H., BOUCHEZ, A., CASSIO, F., ERIKSSON, M., MORIN, S., MONTUELLE, B., NAVARRO, E., PASCOAL, C., PESCE, S., SCHMITT-JANSEN, M., BEHRA, R., 2016, Pollution Induced Community Tolerance (PICT): Towards an ecologically relevant risk assessment of chemicals in aquatic systems, *Freshwater Biol.*, n° 61, p. 2141-2151.
- VIVIEN, R., TIXIER, G., LAFONT, M., 2014, Use of oligochaete communities for assessing the quality of sediments in watercourses of the Geneva area (Switzerland) and Artois-Picardie basin (France): Proposition of heavy metal toxicity thresholds, *Ecotoxicol. Environ. Biol.*, n° 14, p. 142-151.