



**HAL**  
open science

**Lien entre la toxicité, la contamination des milieux aquatiques mesurés chez *Gammarus fossarum* et la perturbation des communautés biologiques : Indicateurs de la contamination biodisponible des eaux douces.**

Olivier Geffard, Benjamin Alric, André Chandesris, Martial Ferréol, Adeline François, Jeremy Piffady, Bertrand Villeneuve, Arnaud Chaumot

► **To cite this version:**

Olivier Geffard, Benjamin Alric, André Chandesris, Martial Ferréol, Adeline François, et al.. Lien entre la toxicité, la contamination des milieux aquatiques mesurés chez *Gammarus fossarum* et la perturbation des communautés biologiques : Indicateurs de la contamination biodisponible des eaux douces.. [Rapport de recherche] INRAE. 2019. hal-03799780

**HAL Id: hal-03799780**

**<https://hal.inrae.fr/hal-03799780v1>**

Submitted on 6 Oct 2022

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



# **Lien entre la toxicité, la contamination des milieux aquatiques mesurés chez *Gammarus fossarum* et la perturbation des communautés biologiques**

**Indicateurs de la contamination biodisponible des eaux douces.**

**Rapport final**

**Olivier Geffard, Benjamin Alric, André Chandesris, Martial Ferréol Adeline François, Jeremy Piffady, Bertrand Villeneuve, Arnaud Chaumot (Iristea Lyon)**

**Février 2019**



- **AUTEURS**

**Laboratoire d'écotoxicologie, UR RiverLy, Irstea Lyon-Villeurbanne**

**Olivier Geffard**, directeur de recherche (Irstea), olivier.geffard@irstea.fr

**Benjamin Alric**, post-doctorant (Irstea), benjamin.alric@irstea.fr

**Adeline François**, Ingénieur d'étude (Irstea), adeline.francois@irstea.fr

**Arnaud Chaumot**, chargé de recherche (Irstea), arnaud.chaumot@irstea.fr

**Laboratoire d'hydroécologie quantitative, UR RiverLy, Irstea Lyon-Villeurbanne**

**André Chandesris**, IAE (Irstea), andré.chandesris@irstea.fr

**Jeremy Piffady**, IPEF (Irstea), jeremy.piffady@irstea.fr

**Bertrand Villeneuve**, Ingénieur de recherche (Irstea), martial.ferreol@irstea.fr

**Martial Ferréol**, Ingénieur d'étude (Irstea), martial.ferreol@irstea.fr

- **CORRESPONDANTS**

**AFB : Olivier Perceval**, DAST (AFB), olivier.perceval@afb.fr

**Partenaire : Olivier Geffard**, Directeur de recherche (Irstea), olivier.geffard@irstea.fr

**Droits d'usage** : [par ex. accès libre ou accès réservé à XXX]

**Niveau géographique** : [un seul choix entre : mondial, national, régional, départemental, communal]

**Couverture géographique** : [administrative : indiquer le ou les pays, région, département ou commune ; citations locales : indiquer les noms de cours d'eau, plan d'eau, masse d'eau, bassin hydrographique]

**Niveau de lecture** : [plusieurs choix possibles entre : scolaires, citoyens, professionnels, experts]

[Les rubriques propres au partenaire (visa par ex.) peuvent être insérer dans cette page ou ajouter sur une page supplémentaire]



- **RESUME**

Identifier les sources/origines de dégradations des milieux aquatiques, comme la contamination, est un point crucial pour leur gestion et notamment définir des stratégies de restauration adaptées. L'évaluation des impacts écologiques liés à la contamination impose de développer et proposer des outils permettant d'établir des liens entre la contamination chimique et les effets écologiques. La surveillance par biomonitoring actif, à l'aide d'encagement d'organismes contrôlés, est une approche pertinente pour d'une part caractériser et suivre la contamination biodisponible des milieux à l'échelle nationale et d'autre part estimer le danger toxique du milieu pour les populations en place. Dans nos précédents travaux, nous avons montré, au niveau national, qu'il existait un lien entre la contamination biodisponible du milieu, mesurée dans des gammares encagés, et l'abondance de gammares dans les milieux. Ainsi, pour 3 éléments métalliques, il a été possible de construire un lien entre la pression chimique et l'abondance de gammares et ceci à l'échelle nationale. Si ces travaux constituent la preuve de concept qu'il est possible d'établir de tel lien, en revanche ils ne constituent pas, en l'état, une sortie opérationnelle pour la gestion des milieux. Il n'est pas envisageable d'établir ce type de relation pour l'ensemble des contaminants présents ou susceptibles d'être présents dans les milieux aquatiques. Dans la même veine, il n'est pas envisageable de piloter ou gérer la problématique de la contamination chimique des milieux à l'aide d'approches élément par élément. En se basant sur l'encagement de gammares, l'objectif de cette étude est de développer un indicateur multi-contaminants permettant d'évaluer et caractériser la contamination chimique biodisponible des milieux aquatiques. Il s'agit de proposer un indicateur intégrant l'ensemble des composés inorganiques et un indicateur pour l'ensemble des composés organiques, recherchés et quantifiés chez le gammare (notamment dans le cadre des suivis DCE). Pour ceci, nous avons exploité les données acquises dans le cadre de projets antérieurs portés par l'équipe d'écotoxicologie de Irstea-lyon et celles issues de programmes de surveillance mandatés par les agences de l'eau et pour lesquels le protocole développé et utilisé par notre équipe a été mis en place, au travers de travaux confiés au bureau d'étude Biomae. Tout d'abord, un travail de bancarisation a été mené pour construire et valider une base de données sur la contamination des gammares encagés. La construction des indicateurs passe par la détermination d'une valeur de BBAC (Bioavailable Background Assessment Concentration) pour le maximum de composés disponibles, *i.e.* teneur en un composé au-dessus de laquelle une contamination supérieure au niveau bas national est avérée. L'indicateur a pour but d'intégrer les teneurs en contaminant pour lesquelles les valeurs seuils associées sont dépassées, pour définir la pression chimique présente sur chaque site, à partir des contaminants recherchés. Dans cette étude, les indicateurs de la multi-contamination biodisponibles ont été utilisés pour réaliser une cartographie à l'échelle nationale de la qualité chimique, inorganique et organique des sites pour lesquels des données de contamination sur gammares encagés est aujourd'hui disponible. Les travaux menés dans cette étude offrent une méthodologie de calcul comme indicateur pour déterminer le niveau de contamination biodisponible d'un milieu, en intégrant l'ensemble des composés mesurés dans les organismes encagés. Cet outil permet de façon originale de déterminer le niveau de contamination des cours d'eau, ceci à une large échelle spatiale (nationale). La force de disposer d'un indicateur, c'est-à-dire de convertir de nombreuses mesures en une « note », est de pouvoir, au travers d'un système gradué, qualifier les sites les uns par rapport aux autres et identifier les milieux les plus soumis à une contamination biodisponible et/ou les plus vulnérables

- **MOTS CLES (PRESSION CHIMIQUE, INORGANIQUE, ORGANIQUE, BIOMONITORING ACTIF, INDICATEUR DE PRESSION, NATIONAL)**



## RELATIONSHIP BETWEEN TOXICITY, BIOAVAILABLE METALS CONTAMINATION MEASURED IN CAGED *GAMMARUS FOSSARUM* AND DISTURBANCE OF COMMUNITIES

### BIOAVAILABLE CONTAMINATION INDICATORS OF FRESHWATER SYSTEMS

- **ABSTRACT**

Evaluating the effects of contamination in aquatic ecosystems is essential to improve management strategies and requires tools establishing quantitative links between exposure to chemical contaminants and impairments of biological communities. Active biomonitoring (caged organisms transplantation) has been proposed as a relevant approach to both characterize and evaluate the bioavailable contamination levels of aquatic systems and to assess its toxic hazard towards native populations. Recently, the active biomonitoring with caged gammarids has been successfully carried out at the French national scale to disclose the possible link between exposure to three metallic contaminants and native gammarid densities, highlighting the structuring role of a bioavailable chemical contamination towards aquatic populations. Nevertheless, in terms of management, the establishment of such relationships for each contaminant can be inefficient to quantify the link between contamination gradient and ecological degradation as the exposure to multiple contaminants seems to be the rule rather than the exception. In the same vein, the problematic of chemical contamination of aquatic systems should not be conducted using element-by-element approaches. This study aimed at proposing multi-substances indicator, based on the aggregation of concentrations accumulated by caged gammarids biomonitored, to demonstrate their relevance for mapping the contamination level of aquatic systems. This work benefited from caged-gammarid contamination data acquired in the WFD regulatory context by French regional environmental agencies, considering 18 metallic compounds and 43 persistent organic pollutants (POPs) for proposing a metal and an organic multi-substances indicator. For this, bioavailable chemical contamination data (contamination levels in gaged *G. fossarum*) acquired either by French regional environmental agencies in the WFD context, or through additional research programs carried on by our own laboratory have been capitalized. Aiming to represent the global contamination pressure on aquatic ecosystems, indices of integrated bioavailable contamination are proposed, one for metals and one for POPs and calculated for each studied site. Multi-substances indicator takes into account contamination levels observed in caged organisms in regard to a threshold value determined for each compound (BBAC: bioavailable background assessment concentrations), value above which a contamination is significant. Consequently, first the BBACs for all elements considered in the present study were determined with the present national database. From this, the indices computed in a given site consider only compounds whose concentrations recorded in *G. fossarum* exposed in this site significantly exceed their respective BBAC. Thanks to the developed multi-substances indicators, we sought to establish a global snapshot of metallic and POP bioavailable contamination of watercourses at the national scale. This study provides a methodology to propose indicators to assess the bioavailable contamination levels of aquatic systems, at national scale, using all contaminants measured in caged gammarids. An indicator that integrates all contamination data obtained in gammarids caged on one site, through a "score", constitute the opportunity to rank them in regard to their global contamination levels and to identify the most degraded or the most vulnerable of them.

- **KEY WORDS (THEMATIC AND GEOGRAPHICAL AREA)**

- **SYNTHESE POUR L'ACTION OPERATIONNELLE**

### **Contexte général**

Le rejet de contaminants chimiques dans les milieux aquatiques ces dernières années est devenu une préoccupation forte étant donné leur persistance, leur accumulation dans les organismes et leurs effets toxiques potentiels, pouvant compromettre, dans le futur, les services des écosystèmes rendus à l'homme, voire constituer un danger pour lui. Dans ce contexte, la mesure ou le suivi de la contamination chimique dans les organismes vivants s'est montrée plus informative que l'étude des profils de contamination dans l'eau ou les sédiments, car elle renseigne la fraction biodisponible correspondant à la fraction toxique pour les organismes. Récemment, le biomonitoring actif a été proposé pour la surveillance de la contamination chimique des milieux en réponse aux exigences de la DCE. Cette approche assure i) la présence de l'espèce d'intérêt sur n'importe quelle station à suivre, ii) l'utilisation d'organismes tests calibrés selon leur origine, leur espèce, leur taille, leur sexe et leur statut de reproduction et enfin iii) le contrôle de la durée d'exposition, garantissant ainsi un suivi fiable des tendances spatiale et temporelle.

Le gammaré *Gammarus fossarum*, espèce clé des écosystèmes d'eau douce européens et connue pour sa capacité à accumuler les contaminants chimiques, au travers de son utilisation par encagement, est aujourd'hui reconnu comme un outil pertinent pour évaluer la contamination chimique des milieux. L'encagement de gammarés est aujourd'hui inscrit comme outil disponible pour la biosurveillance<sup>1</sup>, et pour lequel une norme est aujourd'hui disponible (XP T 90-721). Toutefois, identifier la contamination chimique comme source/origine de la dégradation et de l'impact observé sur les milieux aquatiques impose de pouvoir établir des liens entre la contamination chimique et les effets écologiques. Plusieurs études ont fait la preuve de concept qu'il était possible d'établir une relation entre le niveau de contamination en un contaminant métallique dans le biote et l'abondance de macroinvertébrés reconnus comme sensibles aux métaux. Ces études se sont intéressées à des bassins hydrographiques précis et des sources de contamination très bien identifiées, comme les rejets miniers. Plus récemment, et à l'aide du biomonitoring actif (encagement de *G. fossarum*), le laboratoire d'écotoxicologie de Irstea-Lyon a montré, pour quelques métaux, qu'il était possible de construire un tel lien entre la pression chimique et l'abondance de gammarés à l'échelle nationale. Si ces travaux mettent clairement en évidence le rôle structurant qu'un contaminant peut avoir sur la diversité / l'abondance d'espèces sensibles, toutefois en terme de gestion et d'évaluation d'impact de la contamination chimique sur les communautés, l'établissement de ce type de relations à partir de contaminants pris individuellement s'avère peu pertinente en terme d'outils d'aide à la gestion des milieux aquatiques.

### **Objectifs**

En se basant sur l'encagement de gammarés, l'objectif de cette étude est de développer un indicateur multi-contaminants permettant d'évaluer et caractériser la pression chimique des milieux aquatiques. Il s'agit de proposer d'une part un indicateur intégrant l'ensemble des composés inorganiques et d'autre part un indicateur pour l'ensemble des composés organiques, recherchés et quantifiés chez le gammaré. Pour ceci, nous avons bénéficié de données acquises dans le cadre de projets antérieurs portés du laboratoire d'écotoxicologie de Irstea-Lyon et de programmes de surveillance mandatés par les agences de l'eau et pour lesquels le protocole développé et utilisé par notre équipe a été mis en place, au travers de travaux confiés au bureau d'étude Biomae. Dans un premier temps, un travail de bancarisation a été mené pour

---

<sup>1</sup> European Commission 2014. Common Implementation Strategy for the Water Framework Directive (2000/60/EC): Guidance Document No. 32 On Biota Monitoring (the implementation of EQS Biota) under the Water Framework Directive. Technical Report - 2014 - 083.

construire et valider une base de données sur la contamination de gammares encagés. Pour la construction des indicateurs, une valeur de BBAC (Bioavailable Background Assessment Concentration) est déterminée pour un maximum de composés mesurés dans les gammares, correspondant à la teneur au-dessus de laquelle une contamination est avérée. Enfin, ces indicateurs de la multi-contamination biodisponibles sont utilisés pour réaliser une cartographie, à l'échelle nationale, de la qualité chimique des sites pour lesquels des données de contamination dans des gammares encagés sont disponibles.

## **Méthodologie**

### Construction de la base de donnée :

La base de données repose sur des encagement de gammares (7 jours) menés entre novembre 2009 et mai 2016 sur 218 stations (à une ou plusieurs dates) réparties au niveau national, donnant lieu à 313 et 196 points d'échantillonnage pour lesquels les teneurs en composés métalliques et/ou organiques ont été mesurées. Ces données proviennent de projets antérieurs portés par l'équipe d'écotoxicologie, Irstea-Lyon, via notamment des financements par l'AFB (fiches actions 25 de 2008 à 2010 et 44 de 2013 à 2015), l'agence de l'eau Seine-Normandie (projet Biomarqu'Indic de 2012 à 2014) et l'ANR (Gamma 2012-2015 et Multistress 2015-2017). Elles proviennent également de programmes de surveillance mis en place par les agences de l'eau (AEAP, AEAG et AERMC) à partir d'encagement de gammares (contrats réalisés par Biomae) entre 2015 et 2016.

### Indicateur multi-contaminants :

Un indicateur a été développé pour les deux grands types de contamination, les métaux et les polluants organiques. Il consiste en l'intégration des teneurs en contaminants observées pour les composés ayant une teneur supérieure à la valeur de BBAC associée.

Par conséquent, la première étape a été de déterminer une valeur de BBAC pour chaque contaminant mesuré dans les gammares lorsque ceci était possible. Une BBAC peut être déterminée lorsqu'un nombre suffisant de valeurs quantifiées par composé est disponible et que celles-ci représentent des situations contaminées et non contaminées. L'approche utilisée pour calculer la BBAC est celle présentée dans Besse et al. (2013). Elle est basée sur l'hypothèse que, pour une substance donnée, les concentrations observées dans les organismes encagés sont distribuées selon une loi normale si les sites d'exposition sont dépourvus de tout apport de contaminations biodisponibles. Succinctement, pour chaque substance, les stations sont classées par niveaux de concentration croissante dans les organismes encagés afin de tester si l'ensemble des données suit une distribution gaussienne, en utilisant le test de normalité de Shapiro-Wilk. Si ce n'est pas le cas, la station la plus contaminée est retirée du jeu de données et la normalité est testée de nouveau. Ce processus itératif est mené jusqu'à l'obtention d'un jeu de données distribuées normalement. La BBAC pour la substance considérée correspond alors au 95<sup>ième</sup> percentile de la distribution gaussienne obtenue. A partir de la base de données nationales constituée pour l'étude, une BBAC a ainsi pu être déterminée pour 18 métaux (Annexe 1) et 43 composés organiques (Annexe 2).

La philosophie pour la construction de l'indicateur est de ne considérer comme contributeurs, pour un site donné, que les composés dont la concentration dépasse significativement la BBAC et de pondérer cette contribution par le niveau de contamination moyen pour le composé considéré, ceci afin d'éviter les effets d'échelle entre composés. L'indicateur multi-contaminant est calculé selon la formule suivante :

$$I = \frac{\sum_{k=1}^n \sqrt{\frac{a_k > BBAC_k}{\varphi_k}}}{n}$$

$a_k$  est la concentration mesurée dans les gammares encagés pour un composé  $k$  et ayant une valeur supérieure à la BBAC.  $\varphi_k$  est la moyenne entre la valeur de BBAC pour ce composé  $k$  et le 90<sup>ième</sup> percentile des concentrations obtenues sur l'ensemble des stations.  $n$  est le nombre total de contaminants intégrés.



## **Principaux résultats acquis**

### Niveaux de contamination des gammars encagés

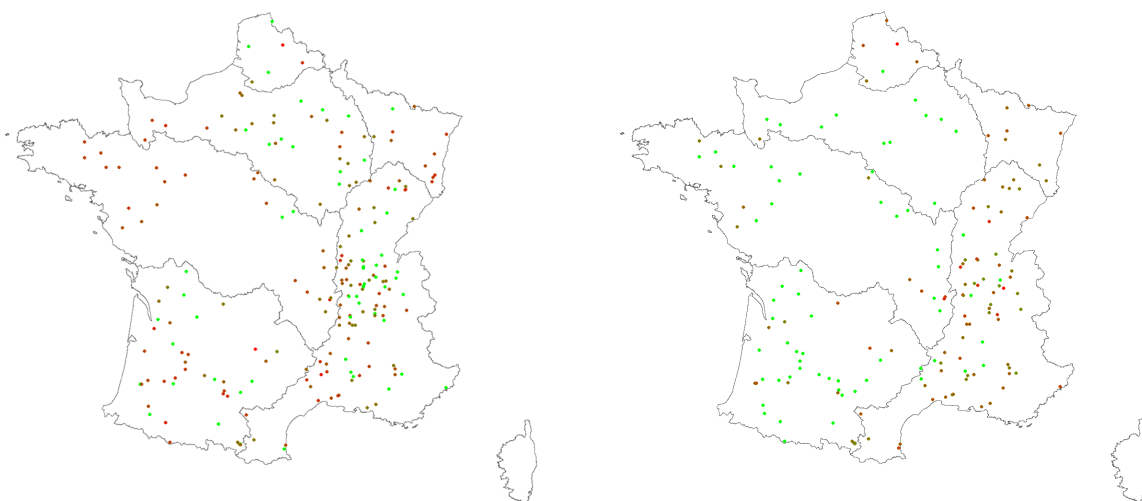
Grace à la mise en place d'une collaboration avec le LDA26, aujourd'hui dix-huit éléments métalliques sont quantifiés dans le gammare. Les limites de quantification proposées aujourd'hui sont similaires à celles obtenues dans nos précédentes études (avec des laboratoires académiques ; Geffard *et al.*, 2014), avec une variabilité inférieure à un facteur 2, excepté pour le Hg où la LQ est 5 fois plus élevée actuellement et pour le Se où à l'inverse elle est de 0.1 µg/g de poids sec contre 2.7 dans nos précédents travaux. Les ratios entre valeurs maximale et minimale sont plus élevés dans cette présente étude montrant que l'enrichissement de notre base de données à partir des travaux récemment mandatés par les agences de l'eau permet de mieux couvrir la diversité de concentrations existantes au niveau national. Enfin, les fréquences de quantification sont comprises entre 90 et 100%, excepté pour le Hg (45 %, en lien avec une LQ élevée).

Pour les polluants organiques, notre expertise / expérience est plus récente que pour les composés métalliques. De façon générale, les LQ de cette présente étude sont 2 à 3 fois supérieures à celles présentées dans nos travaux précédents. Ceci est lié au fait que le laboratoire LDA26 propose pour ces composés organiques des LQ plus élevées que celles proposées par les laboratoires académiques comme le LPTC et le LAMA. Concernant les fréquences de quantification, par rapport à nos travaux antérieurs, une différence est observée seulement pour 2 molécules, le 2,4'-DDT et le 4,4'-DDD ou les fréquences observées sont respectivement de 46% et 14% contre 100% précédemment.

L'indicateur multi-contaminants a été utilisé pour quantifier et qualifier les niveaux de contamination biodisponible en métaux et en composés organiques des diverses stations réparties au niveau national (Figures ci-dessous). Le niveau de contamination est matérialisé à l'aide d'un codage couleur allant du vert au rouge. Ces travaux sont les premiers travaux qui démontrent et proposent l'utilisation d'un indicateur de contamination biodisponible applicable à large échelle et permettant d'intégrer l'ensemble des contaminants mesurés au niveau de la station, ici au travers des gammars encagés. La définition d'un tel indicateur de contamination biodisponible permet de graduer et comparer de façon fiable les niveaux de contamination entre stations et dans le temps, tout en ayant accès à la contribution de chaque contaminant afin de revenir et cibler le ou les éléments problématiques.

Pour les métaux, la représentation cartographique montre une répartition géographique homogène des niveaux de contaminations bas et élevés. Toutefois, pour l'hydro-éco-région (HER) armoricaine (bassin de la Bretagne et le sud du Bassin la Loire de la Maine à la mer), l'ensemble des stations étudiées présente un niveau de contamination métallique biodisponible marqué. Ce résultat peut être mis en regard des caractéristiques physico-chimiques des milieux aquatiques considérés. Cette HER se caractérise par des eaux de surfaces faiblement minéralisées et faiblement calciques. Ainsi, des concentrations métalliques dissoutes mêmes faibles peuvent représenter des contaminations biodisponibles élevées par rapport au niveau bas national. Au travers de cet indicateur, ces travaux mettent en évidence une vulnérabilité de ces milieux à la pression métallique. Des observations similaires peuvent également être faites pour la zone Est de l'HER massif central sud et l'HER des Cévennes. Toutefois, sur le bassin Loire Bretagne, trop peu de stations ont été expérimentées, notamment sur la partie Nord et ouest du massif central, pour conclure sur une empreinte marquée des zones faiblement calciques et donc une vulnérabilité de ces milieux à la contamination métallique.

Pour les composés organiques, les résultats obtenus à l'aide de cet indicateur montrent clairement des niveaux de contamination biodisponibles plus marquées sur l'Est et l'extrême Nord de notre territoire.



Carte des niveaux de contamination biodisponible pour les éléments métalliques évalués à l'aide de l'indicateur multi-contaminants, intégrant les teneurs des 18 métaux mesurés chez les organismes encagés. Le code couleur, gradué du vert au rouge, informe sur l'intensité de la contamination

Carte des niveaux de contamination biodisponible pour les éléments organiques évalués à l'aide de l'indicateur multi-contaminants, intégrant les teneurs des 43 composés organiques mesurés chez les organismes encagés. Le code couleur, gradué du vert au rouge, informe sur l'intensité de la contamination.

### **Pour en savoir plus**

- Besse, J.P., Geffard, O., Coquery, M. 2011. Développement d'une méthodologie pour l'amélioration du suivi chimique des eaux continentales - Etat de l'art sur les approches de biosurveillance et application dans le cadre de la DCE. Cemagref-Irstea, 100 p.
- Besse, J.P., Geffard, O., Coquery, M. 2012. Relevance and applicability of active biomonitoring in continental waters under the Water Framework Directive. *Trends in Analytical Chemistry*, 36: 113-127.
- Besse, J.P., Coquery, M., Lopes, C., Chaumot, A., Budzinski, H., Labadie, P., Geffard O. 2013. Caged *Gammarus fossarum* (crustacea) as a robust tool for the characterization of bioavailable contamination levels in continental waters. Toward the determination of threshold values. *Water Research*, 47: 650-660.
- Ciliberti, A., Chaumot, A., Recoura-Massaquant, R., Chandesris, A., François, A., Coquery, M., Ferréol, M., Geffard, O. 2017. Caged *Gammarus* as biomonitors identifying thresholds of toxic metal bioavailability that affect gammarid densities at the French national scale. *Water Research*. 118:131-140.
- Geffard, O., Besse, J.P., Chaumot, A., Francois, A., Gahou, J., Grisot, G., Lopes, C., Recoura-Massaquant, R., Coquery, M. 2014. Développement d'une méthodologie pour l'amélioration du suivi chimique des eaux continentales. Rapport de synthèse de l'étude pilote : déploiement de l'outil gammare encagé au niveau national, résultats pour les métaux ciblés. 60 p.
- Geffard, O., Ciliberti, A., Chandesris, A., François, A., Coquery, M., Ferrel, M., Chaumot, A. 2018. Lien entre la toxicité, la contamination des milieux aquatiques mesurés chez *Gammarus fossarum* et la perturbation des communautés biologiques. 29p.
- Recour-Massaquant, R., Geffard, O., Besse, J.P., Chaumot, A., Francois, A., Lopes, C., Miege, C., Roussel-Galle, A., Serveto, F., Coquery, M. 2014. Développement d'une méthodologie pour l'amélioration du suivi chimique des eaux continentales. Rapport de synthèse de l'étude pilote : déploiement de l'outil gammare encagé au niveau national, résultats pour les substances organiques ciblées. 66 p.

## **Remerciements**

La réalisation de ce travail a bénéficié de la précieuse collaboration de plusieurs personnes, que nous remercions pour leur grande disponibilité :

Patrice Noury, Laura Garnero, Nicolas Delorme et Hervé Quéau (Ecotox, Irstea Lyon)

Les agences de l'eau Artois-Picardie (Jean Prygiel), Rhône-Méditerranée & Corse (Thomas Pelte) et Rhin Meuse (Miguel Nicolaï) pour l'accès aux données acquises à l'aide d'encagement de gammars et leur participation au comité de pilotage avec également Marina Coquery (Irstea), Dorothée Bolzan (AEAP), Maïa Akopian (AESN), Lionel Navarro (AERM&C), Xavier Bourrain (AELB) et Yorick Reyjol et Olivier Perceval de l'AFB.

- **SOMMAIRE**

|                                                                                                                                  |    |
|----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>1. Introduction</b>                                                                                                           | 12 |
| <b>2. Méthodologie suivie</b>                                                                                                    | 13 |
| 2.1. Construction de la base de données de contamination biodisponible                                                           | 13 |
| 2.2. Indicateur multi-contaminants                                                                                               | 14 |
| 2.2.1. Calcul de la BBAC                                                                                                         | 14 |
| 2.2.2. Calcul de l'indicateur                                                                                                    | 15 |
| <b>3. Résultats et discussion</b>                                                                                                | 15 |
| <b>3.1. Sites d'étude de la base de données</b>                                                                                  | 15 |
| <b>3.2. Niveaux de contamination des gammars engagés</b>                                                                         | 16 |
| 3.2.1. Métaux                                                                                                                    | 16 |
| 3.2.2. Polluants organiques                                                                                                      | 17 |
| <b>3.3. Indicateur multi-contaminants : carte nationale des niveaux de contamination</b>                                         | 19 |
| <b>4. Conclusion</b>                                                                                                             | 21 |
| <b>5. Glossaire</b>                                                                                                              | 22 |
| <b>6. Sigles &amp; Abréviations</b>                                                                                              | 23 |
| <b>7. Bibliographie</b>                                                                                                          | 24 |
| <b>8. Table des illustrations</b>                                                                                                | 26 |
| <b>9. Annexe 1 : Liste des sites intégrés dans la base de données. Localisation, codes masse d'eau et station et coordonnées</b> | 27 |
| <b>10. Annexe 2 : BBAC pour les composés métalliques</b>                                                                         | 33 |
| <b>11. Annexe 3 : BBAC pour les composés organiques</b>                                                                          | 34 |

- **LIEN ENTRE LA TOXICITE, LA CONTAMINATION DES MILIEUX AQUATIQUES MESURES CHEZ *GAMMARUS FOSSARUM* ET LA PERTURBATION DES COMMUNAUTES BIOLOGIQUES – INDICATEURS DE LA CONTAMINATION BIODISPONIBLE DES EAUX DOUCES.**

## 1. Introduction

Si les écosystèmes d'eau douce sont l'un des éléments clés au bien-être humain (Vörösmarty *et al.*, 2005; Rockström *et al.*, 2007), ils sont également vulnérables suite à leur utilisation et leur dégradation liées aux activités humaines (Dudgeon *et al.*, 2006). Le rejet de contaminants chimiques dans les milieux aquatiques ces dernières années est devenu une préoccupation forte étant donné leur persistance, leur accumulation dans les organismes et leurs effets toxiques potentiels (Fleeger *et al.* 2003, Beketov *et al.*, 2013, Birch et Apostolatos, 2013), pouvant compromettre, dans le futur, les services des écosystèmes rendus à l'homme (Kremen, 2005, MEA, 2005, Dodds *et al.*, 2013), voire constituer un danger pour lui. L'eau étant l'une des ressources essentielles à l'homme, la mise en place de plan de gestion pour la préserver et limiter l'impact de la pression chimique sur l'état écologique des milieux aquatiques est devenue indispensable. En Europe, la surveillance de l'état chimique et écologique des masses d'eau de surface est réglementée et s'inscrit dans la directive-cadre sur l'eau (DCE, Conseil européen, 2000). Atteindre les objectifs imposés par cette réglementation nécessite de disposer d'outils permettant d'identifier la présence d'une contamination chimique et d'en évaluer ou prédire ses conséquences ou comment elle affecte les communautés (Schwarzenbach *et al.*, 2006; Busch *et al.*, 2016).

Dans ce contexte, la mesure ou le suivi de la contamination chimique dans les organismes vivants s'est montrée plus informative que l'étude des profils de contamination dans l'eau ou les sédiments (Van Ael *et al.*, 2014). La mesure des contaminants dans la colonne d'eau et/ou les sédiments informe sur le niveau de contamination du système et les sources potentielles en contaminants (Kördel *et al.*, 2013; Roots et Roose, 2013; Vu *et al.*, 2017), mais ne renseigne pas de la fraction biodisponible et bioaccumulable de cette contamination, correspondant à la fraction toxique pour les organismes (Hare, 1992). De plus, l'utilisation du compartiment biologique pour la surveillance (biosurveillance) fournit des mesures d'exposition intégrées dans le temps, favorisant ainsi le suivi des tendances spatiales et temporelles de la contamination des milieux (Andral *et al.*, 2004, Oikari, 2006). Ainsi et comme inscrite aujourd'hui dans la DCE, l'utilisation des organismes vivants pour la surveillance de la contamination chimique des milieux est de plus en plus recommandée et mise en place (Salazar et Salazar, 1997, Solà *et al.*, 2004, Bourgeault *et al.*, 2010, Caçador *et al.*, 2012, Bervoets *et al.*, 2016, Liu *et al.*, 2016, Simpson et Spadaro, 2016). La biosurveillance passive (échantillonnage d'organismes natifs) a été la première approche utilisée, pour la simplicité et la facilité de sa mise en place et le suivi des ressources exploitées par l'homme (Goldberg, 1975, Amiard-Triquet *et al.*, 1999, Belpaire *et al.*, 2008). L'approche active (organismes engagés) a été introduite plus récemment pour répondre à certaines limites de l'approche passive, comme l'effet de facteurs biotiques sur l'accumulation et le niveau de contamination dans les organismes (Besse *et al.*, 2012, Lebrun *et al.*, 2015). L'approche active assure *i*) la présence de l'espèce d'intérêt sur n'importe quelle station à suivre, *ii*) l'utilisation d'organismes tests calibrés selon leur origine, leur espèce, leur taille, leur sexe et leur statut de reproduction et enfin *iii*) le contrôle de la durée d'exposition, garantissant ainsi un suivi fiable des tendances spatiale et temporelle (Besse *et al.*, 2012). Ainsi, le gammare *Gammarus fossarum*, espèce clé des écosystèmes d'eau douces européens (Weiss et Leese, 2016) et connue pour sa capacité à accumuler les contaminants chimiques (Hare, 1992, Rainbow, 2007, Bizzotto *et al.*, 2009), devient au travers de son utilisation par encagement un outil pertinent pour évaluer la contamination chimique des milieux. L'encagement de gammares est aujourd'hui inscrit comme outil disponible pour la biosurveillance<sup>2</sup>, et pour lequel une norme est en cours d'instruction.

Identifier les sources/origines de dégradations des milieux aquatiques est un point crucial pour leur gestion et leur restauration. L'évaluation des effets liés à la contamination impose de proposer des outils permettant d'établir des liens entre la contamination chimique et les effets écologiques (Luoma & Rainbow, 2011, Bervoets *et al.*, 2016). Plusieurs études ont décrit des

---

<sup>2</sup> European Commission 2014. Common Implementation Strategy for the Water Framework Directive (2000/60/EC): Guidance Document No. 32 On Biota Monitoring (the implementation of EQS Biota) under the Water Framework Directive. Technical Report - 2014 - 083.

relations entre le niveau de contamination en métaux dans le biote et l'abondance de macroinvertébrés reconnus comme sensibles aux métaux (De Jonge *et al.*, 2013; Luoma *et al.*, 2009; Rainbow *et al.*, 2012; Solà & Prat, 2006). Ces travaux ont été menés à l'aide de biomonitoring passif et à l'échelle d'un même bassin hydrographique, garantissant des paramètres physico-chimiques similaires entre les sites d'étude. Les études de Luoma *et al.* (2009) et Rainbow *et al.* (2012) se sont intéressées à des bassins hydrographiques particuliers, caractérisés par un rejet minier ponctuel et local, permettant d'expérimenter facilement le long d'un gradient de contamination dans le milieu. Plus récemment et à l'aide du biomonitoring actif (encagement de *G. fossarum*), Geffard *et al.* (2018) et Ciliberti *et al.* (2017) ont montré, pour quelques métaux, qu'il était possible de construire un tel lien entre la pression chimique et l'abondance de gammare à l'échelle nationale. Si ces travaux mettent clairement en évidence le rôle structurant qu'un contaminant peut avoir sur la diversité / l'abondance d'espèces sensibles, toutefois en terme de gestion et d'évaluation d'impact de la contamination chimique sur les communautés, l'établissement de ce type de relations à partir de contaminants pris individuellement peut s'avérer peu pertinent. Les milieux aquatiques se caractérisent par la présence de nombreuses sources de contamination, ainsi la prise en compte et l'intégration des contaminants présents est une étape essentielle pour mieux évaluer/prédire à terme l'impact de cette pression chimique.

En se basant sur l'encagement de gammare, dont la pertinence et l'intérêt ont été démontrés dans nos précédents travaux (Geffard *et al.*, 2014, Recoura-Massaquant *et al.*, 2014, Ciliberti *et al.*, 2017), l'objectif de cette étude est de développer un indicateur multi-contaminants permettant d'évaluer et caractériser la pression chimique des milieux aquatiques. Il s'agit de proposer d'une part un indicateur intégrant l'ensemble des composés inorganiques et d'autre part un indicateur pour l'ensemble des composés organiques, recherchés et quantifiés chez le gammare (notamment dans le cadre des suivis DCE). Pour ceci, nous avons bénéficié de données acquises dans le cadre de projets antérieurs portés par l'équipe (Geffard *et al.*, 2014, Recoura-Massaquant *et al.*, 2014) et de programmes de surveillance mandatés par les agences de l'eau et pour lesquels le protocole développé et utilisé par notre équipe a été mis en place, au travers de travaux confiés au bureau d'étude Biomae. Dans un premier temps, un travail de bancarisation a été mené pour construire et valider une base de données sur la contamination de gammare encagés. Ensuite, pour la construction des indicateurs, nous confirmerons ou proposerons pour l'ensemble des composés disponibles, une valeur de BBAC (Bioavailable Background Assessment Concentration = valeur seuil de contamination), teneur en un composé au-dessus de laquelle une contamination supérieure au niveau bas national est avérée. Pour finir, ces indicateurs de la multi-contamination biodisponibles sont utilisés pour réaliser une cartographie à l'échelle nationale la qualité chimique, inorganique et organique des sites pour lesquels de la donnée de contamination sur gammare encagé est disponible.

## 2. Méthodologie suivie

### 2.1. Construction de la base de données de contamination biodisponible

La base de données repose sur un travail expérimental de terrain (encagement de gammare, 7 jours d'exposition) mené entre novembre 2009 et mai 2016 sur 218 stations (à une ou plusieurs dates) et réparties au niveau national (*Figure 1*), donnant lieu à 313 et 196 points d'échantillonnage pour lesquels les teneurs en composés métalliques et/ou organiques ont été respectivement mesurées. La grande majorité de ces sites font partie des sites sélectionnés par Botta & Dullio (2014) pour la campagne exceptionnelle d'identification des micropolluants présents dans les masses d'eaux nationales. Ces données proviennent de projets antérieurs portés par l'équipe d'écotoxicologie, Irstea-Lyon, via notamment des financements par l'AFB (fiches actions 25 de 2008 à 2010 et 44 de 2013 à 2015), l'agence de l'eau Seine-Normandie (projet Biomarqu'Indic de 2012 à 2014) et l'ANR (Gamma 2012-2015 et Multistress 2015-2017). Enfin, elles proviennent aussi de programmes de surveillance mis en place par les agences de l'eau (AEAP, AEAG et AERMC) à partir d'encagement de gammare (contrats réalisés par Biomae) entre 2015 et 2016.

Figure 1 : Localisation des 218 sites sur lesquels des gammares, *G. fossarum*, ont été encagés sur une durée de 7 jours entre 2009 et 2016 et sur lesquels les teneurs en métaux et/ou composés organiques ont été déterminées.

## 2.2. Indicateur multi-contaminants

Un indicateur multicontaminants a été développé pour les deux grands types de contamination, les métaux et les polluants organiques. L'indicateur consiste en l'intégration des teneurs en contaminants observées dans les gammares encagés, en considérant leur dépassement de la valeur de BBAC associée à chaque contaminant. Par conséquent et pour chacun des composés mesurés dans les gammares, la possibilité de déterminer une valeur de BBAC est une étape indispensable pour son intégration dans l'indice multicontaminants considéré.

### 2.2.1. Calcul de la BBAC

Pour chaque substance, la BBAC correspond à la valeur au-dessus de laquelle une contamination différente du niveau bas national est avérée pour cette substance. L'approche utilisée pour calculer cette valeur de BBAC est basée sur l'hypothèse que pour une substance donnée, les concentrations observées dans les organismes encagés sont distribuées selon une loi normale sur des sites dépourvus de tout apport de contaminations biodisponibles. La méthode est présentée et décrite dans les travaux de Besse *et al.* (2013). Succinctement, pour chaque substance, les stations sont classées par niveaux de concentration croissante dans les organismes encagés afin de tester si l'ensemble des données suit une distribution gaussienne, en utilisant le test de normalité de Shapiro-Wilk. Si ce n'est pas le cas, la station la plus contaminée est retirée du jeu de données et la normalité est testée de nouveau. Ce processus itératif (suppression de la station la plus contaminée, suivi d'un test de normalité) est mené jusqu'à l'obtention d'un jeu de données distribuées normalement. La BBAC pour chaque contaminant correspond alors au 95<sup>ième</sup> percentile de la distribution gaussienne obtenue (*Figure 2*). Cette procédure a été réalisée en utilisant le programme de calcul statistique R. A partir de la base de données nationales constituée pour l'étude, une BBAC a ainsi pu être déterminée pour 18 métaux (Annexe 1) et 43 composés organiques (Annexe 2).

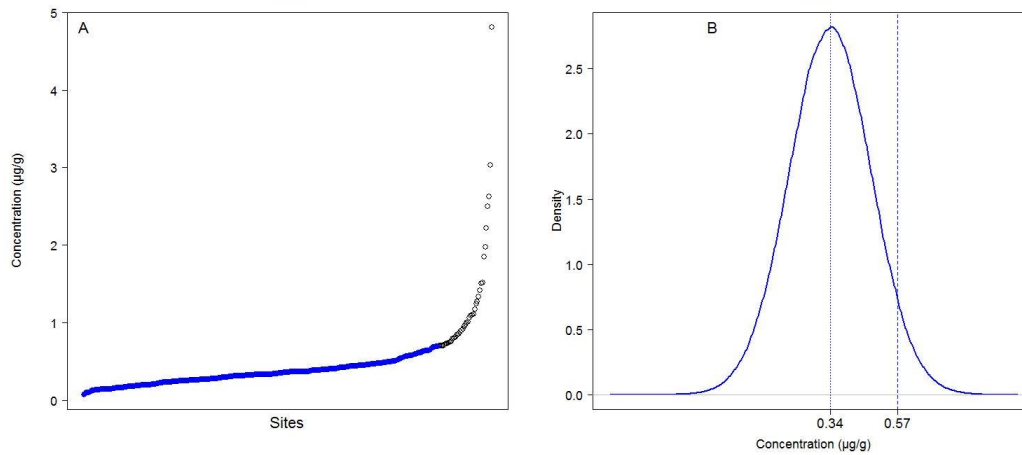


Figure 2 : Exemple de BBAC déterminée pour le cobalt. Sur le schéma de gauche (A) sont présentées les concentrations mesurées pour chaque site, triées par ordre croissant. Les points bleus correspondent au plus grand ensemble de données qui suit une distribution Gaussienne, représentée sur le schéma de droite (B). En tiret : BBAC (95<sup>ième</sup> percentile).

### 2.2.2. Calcul de l'indicateur

La philosophie pour la construction de cet indicateur est de ne considérer comme contributeurs à l'indicateur de contamination pour un site donné que les composés dont la concentration dépasse significativement leur niveau bas national (*i.e.* concentration supérieure à la BBAC), et pour éviter les effets d'échelle entre composés, de pondérer cette contribution par les niveaux de contamination moyens nationaux de chaque composé. Pour cette étude, les composés ont été organisés en deux groupes, les métaux et les polluants organiques. L'indicateur multi-contaminant est calculé selon la formule suivante :

$$I = \frac{\sum_{k=1}^n \sqrt{\frac{a_k > BBAC_k}{\varphi_k}}}{n}$$

$a_k$  est la concentration mesurée dans les gammarets encagés pour un composé  $k$  et ayant une valeur supérieure à la BBAC.  $\varphi_k$  est la moyenne entre la valeur de BBAC pour ce composé  $k$  et le 90<sup>ième</sup> percentile des concentrations obtenues sur l'ensemble des stations.  $n$  est le nombre de contaminants intégrés.

## 3. Résultats et discussion

### 3.1. Sites d'étude de la base de données

Sur les 218 stations échantillonnées et répertoriées dans la base de données, une typologie physico-chimique a pu être attribuée à seulement 215 stations (H1 :  $n = 24$ , H2 :  $n = 71$ , H3 :  $n = 47$ , S1 :  $n = 8$ , S2 :  $n = 23$ , S3 :  $n = 39$ ). Ces 215 stations ont été caractérisées selon leur rang de strahler, la nature géologique ainsi que l'occupation du sol de leur bassin versant respectif. La Figure 3 montre la proportion de stations distribuées dans chacune des classes considérées. La proportion des stations étudiées réparties dans les différentes classes de terres agricoles et de taille des cours d'eau sont conformes à celles calculées sur les sites formant le réseau de contrôle de surveillance (rcs) (taille des cours d'eau :  $\chi^2 = 3.88$ ,  $p$ -value = 0.42 ; territoires agricoles :  $\chi^2 = 0.56$ ,  $p$ -value = 0.76). Pour les territoires artificialisés, la différence entre les proportions des classes d'intensité d'urbanisation dans les stations étudiées et les sites du RCS



était significativement différente ( $\chi^2 = 7.30$ , p-value = 0.03). Les territoires fortement artificialisés sont surreprésentés dans notre base de données (43%) par rapport aux sites du rcs (28%) et à l'inverse les territoires moyennement artificialisés sont sous représentés dans notre base de données (43%) comparer aux sites du rcs (62%). La plus grande divergence a été observée pour la géologie ( $\chi^2 = 18.76$ , p-value =  $8.42 \times 10^{-5}$ ) avec une sous-représentation de la classe mixte dans notre base de données (2%) contre 18% pour les sites rcs, et une surreprésentation de la classe sédimentaire dans notre base de données (80%) par rapport aux sites du rcs (56%). Les résultats montrent que les stations d'étude étaient diverses et étaient représentatives du réseau hydrographique à l'échelle nationale.

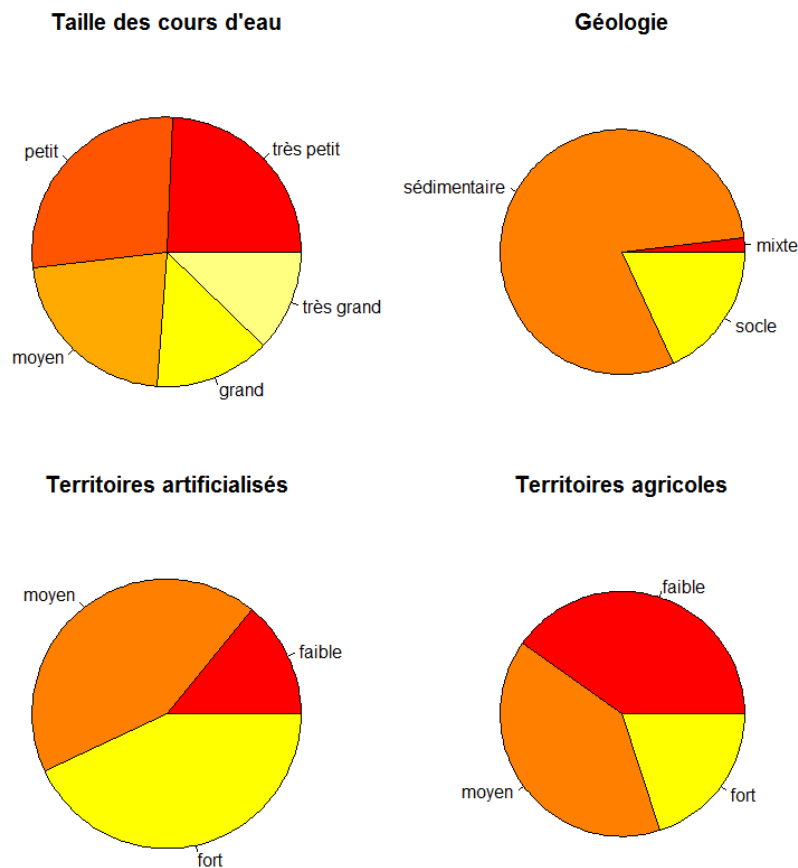


Figure 3 : Distribution des 215 stations de la base de données selon leur rang de strahler, la géologie de leur bassin versant ainsi que quatre types d'occupation du sol répertoriés sur leur bassin versant.

### 3.2. Niveaux de contamination des gammars encagés

Sur les 218 stations échantillonnées, 78% d'entre elles présentaient une survie des gammars encagés > 75%, 17% une survie comprise entre 50% et 75 % et seulement 5% de stations présentaient une survie < 50%.

#### 3.2.1. Métaux

Le *Tableau 1* présente une synthèse des concentrations observées chez les organismes encagés sur les 218 stations étudiées. Il présente la médiane, les valeurs minimale et maximale observées, ainsi que la fréquence de quantification pour chacun des métaux. En comparaison à nos précédents travaux menés au niveau national (Geffard *et al.*, 2014) où 11 éléments métalliques étaient recherchés dans les gammars, aujourd'hui ce sont 18 éléments qui sont mesurés. Cette différence est liée au fait que la majorité des données de contamination dans les gammars encagés ont été acquises au travers d'études mandatées par les agences de l'eau et réalisées par Biomae. Dans le cadre de leur développement, Biomae a engagé il y a plusieurs

années et en collaboration avec La Drome laboratoire (LDA 26), un travail de développement de méthodes analytiques dans le but d'analyser un maximum d'éléments. Pour les substances pour lesquelles la comparaison est possible (Cr, Co, Ni, Cu, Zn, Ag, Cd, Pb, Hg et Se), les limites de quantification proposées aujourd'hui sont similaires à celles obtenues précédemment (Geffard *et al.*, 2014), avec une variabilité inférieure à un facteur 2, excepté pour le Hg où la LQ est 5 fois plus élevée actuellement et pour le Se où à l'inverse elle est de 0.1 µg/g de poids sec contre 2.7 dans nos précédents travaux. Pour ces mêmes éléments, les ratios entre valeurs maximale et minimale sont plus élevés dans cette présente étude montrant que l'enrichissement de notre base de données, à l'aide des études récemment mandatées par les agences de l'eau, permet de mieux couvrir la diversité de concentrations existantes au niveau national. Des ratios supérieurs à 10 ont été observés pour 14 des 18 éléments, à 50 pour 7 d'entre eux et à 1000 pour deux d'entre eux. Des ratios faibles (valeur de 5) ont été obtenus pour le B, le Cu et le Hg. Ces valeurs s'expliquent en partie par une LQ trop élevée pour le Hg et par une forte capacité du gammare à réguler le Cu. Enfin, les fréquences de quantification sont comprises entre 90 et 100%, excepté pour le Hg (45 %, en lien avec une LQ élevée) et sont similaires à celles observées précédemment.

Tableau 1 : Concentrations en métaux (µg/g de poids sec) et fréquence de quantification (% de données > à la LQ) observées chez *Gammarus fossarum* après 7 jours d'exposition *in situ* sur les 218 sites d'étude (313 données). Les limites de Quantification (LQ) sont présentées. Les concentrations et les LQ sont exprimées en µg/g de poids sec. Med, Min et Max sont respectivement les valeurs médiane, maximale et minimale pour chaque élément. \* en considérant la LQ comme valeur minimale.

| Composés | Concentration (µg g <sup>-1</sup> poids sec) |      |       |         | LQ   | Occurrence (%) |
|----------|----------------------------------------------|------|-------|---------|------|----------------|
|          | Med                                          | Min  | Max   | Max/Min |      |                |
| Ag       | 0.14                                         | 0.04 | 1.02  | 25      | 0.02 | 90             |
| Al       | 463                                          | 36.1 | 2311  | 64      | 2.00 | 100            |
| B        | 3.54                                         | <LQ  | 11.5  | 5*      | 2.00 | 92             |
| Ba       | 56.3                                         | 10.7 | 227   | 21      | 1.00 | 100            |
| Cd       | 0.14                                         | <LQ  | 34.9  | 1 800*  | 0.02 | 98             |
| Co       | 0.36                                         | 0.07 | 4.81  | 68      | 0.05 | 100            |
| Cr       | 0.67                                         | 0.15 | 66.1  | 452     | 0.10 | 100            |
| Cu       | 67.9                                         | 25.1 | 139   | 5       | 0.10 | 100            |
| Fe       | 284                                          | 48.6 | 17740 | 36      | 1.00 | 100            |
| Hg       | 0.06                                         | <LQ  | 0.24  | 5*      | 0.05 | 45             |
| Li       | 0.60                                         | 0.16 | 4.55  | 28      | 0.10 | 99             |
| Mn       | 42.1                                         | 8.10 | 550   | 68      | 0.20 | 100            |
| Mo       | 0.33                                         | 0.19 | 6.29  | 33      | 0.10 | 100            |
| Ni       | 0.74                                         | 0.12 | 13.8  | 115     | 0.10 | 90             |
| Pb       | 0.46                                         | <LQ  | 55.8  | 1 100*  | 0.05 | 100            |
| Se       | 1.89                                         | 0.70 | 5.56  | 8       | 0.10 | 99             |
| U        | 0.08                                         | <LQ  | 0.80  | 40*     | 0.02 | 98             |
| Zn       | 67.5                                         | 44.6 | 618   | 14      | 1.00 | 100            |

### 3.2.2. Polluants organiques

Le *Tableau 2* présente la médiane, les valeurs minimale et maximale observées, ainsi que la fréquence de quantification pour chacun des composés organiques recherchés dans le gammare. Pour ces composés, notre expertise / expérience est moins élevée que pour les composés métalliques. Au cours de nos travaux antérieurs, il existe des différences dans les composés recherchés / analysés dans les gammares. Une première étude, réalisée au niveau du bassin RMC sur 27 stations, a été menée en 2009, pour laquelle les substances recherchées étaient principalement des HAPs et des PCBs, analysées par le laboratoire LPTC de l'université de Bordeaux. Une seconde étude, menée au niveau national et sur 120 stations, a ensuite été menée entre 2012 et 2013, étudiant uniquement des PCB, analysés par la laboratoire LAMA de Irstea Lyon. La plus grande partie des données provient des études menées par les agences de l'eau lors d'études et contractualisées avec Biomae. Comme pour les métaux, un programme de

développement a été mené entre Biomae et le LDA 26 dans le but d'élargir le nombre de molécules recherchées chez le gammare, offrant une plus large gamme de molécules recherchées. Le *Tableau 2* présente une synthèse des données utilisées pour construire la base sur laquelle repose ce travail. Seules les substances pour lesquelles une valeur de BBAC (voir 2.2.1) a pu être calculée ont été retenues. De façon générale, les LQ de cette présente étude sont 2 à 3 fois supérieures à celles présentées dans nos travaux précédents. Ceci est lié au fait que le laboratoire LDA26 propose pour ces composés organiques des LQ plus élevées que celles proposées par les laboratoires académiques comme le LPTC et le LAMA. Concernant les fréquences de quantification, pour les 21 substances communes avec l'étude de Besse et al. (2013) en 2009, une différence est observée seulement pour 2 molécules, le 2,4'-DDT et le 4,4'-DDD où les fréquences observées sont respectivement de 46% et 14% contre 100% précédemment. De la même façon pour les 10 substances communes avec l'étude menée en 2012 (Recoura-Massaquant et al., 2014 ; uniquement des PCB), des fréquences de quantification similaires ont été obtenues.

Tableau 2 : Concentrations en polluants organiques (ng/g de poids sec) et fréquence de quantification (% de données > à la LQ) observées chez *Gammarus fossarum* après 7 jours d'exposition *in situ* sur les 196 sites d'étude. Les limites de Quantification (LQ) sont présentées. Les concentrations et les LQ sont exprimées en ng/g de poids sec. Med, Min et Max sont respectivement les valeurs médiane, maximale et minimale pour chaque élément.

| Composés                                     | Concentration (ng g <sup>-1</sup> poids sec) |       |        |         |    | Occurrence (%) |
|----------------------------------------------|----------------------------------------------|-------|--------|---------|----|----------------|
|                                              | Med                                          | Min   | Max    | Max/Min | LQ |                |
| 1,2,3,4,6,7,8,9<br>Octachlorodiben-zodioxine | 12.74                                        | 5.58  | 359.30 | 64.4    | 1  | 56             |
| 2,3,7,8 Tetrachlorodiben-zofurane            | 6.41                                         | 5.21  | 14.71  | 2.8     | 1  | 22             |
| 2,4'-DDT                                     | 2.37                                         | 1.11  | 40.92  | 39.3    | 1  | 14             |
| 4,4'-DDD                                     | 2.56                                         | <LQ   | 43.93  | –       | 1  | 46             |
| 4-4'-DDE                                     | 4.67                                         | 1.06  | 200.28 | 188.9   | 1  | 93             |
| 4-4'-DDT                                     | 7.61                                         | 1.55  | 114.00 | 73.5    | 1  | 51             |
| Anthracene                                   | 3.86                                         | 1.98  | 40.60  | 20.5    | 1  | 80             |
| Anthraquinone                                | 5.02                                         | 1.21  | 23.90  | 19.8    | 1  | 54             |
| Benzo(a)anthracene                           | 3.23                                         | 1.04  | 28.99  | 27.8    | 1  | 80             |
| Benzo(a)pyrene                               | 2.11                                         | 1.01  | 112.77 | 111.6   | 1  | 42             |
| Benzo(b+j) fluoranthene                      | 3.56                                         | <LQ   | 262.41 | –       | 2  | 60             |
| Benzo(e)pyrene                               | 3.46                                         | 1.02  | 149.49 | 146.6   | 1  | 68             |
| Benzo(g,h,i)perylene                         | 2.95                                         | 1.10  | 68.61  | 62.3    | 1  | 90             |
| Benzo(k) fluoranthene                        | 1.65                                         | 1.01  | 91.61  | 90.7    | 1  | 41             |
| Benzyl Butyl Phtalate                        | 7.56                                         | 2.80  | 26.19  | 9.3     | 1  | 62             |
| Chrysene                                     | 1.85                                         | 1.03  | 670.75 | 651.2   | 1  | 29             |
| Dicofol                                      | 3.98                                         | 1.03  | 22.41  | 21.7    | 1  | 37             |
| Fluoranthene                                 | 8.43                                         | 2.01  | 53.82  | 26.6    | 1  | 96             |
| Fluorene                                     | 13.29                                        | 6.88  | 50.22  | 7.3     | 1  | 95             |
| HCH gamma(Lindane)                           | 1.44                                         | 1.01  | 12.67  | 12.5    | 1  | 30             |
| Hexachlorobenzene                            | 1.37                                         | <LQ   | 7.46   | –       | 1  | 52             |
| Hexachlorobutadiene                          | 1.71                                         | 1.00  | 21.50  | 21.5    | 1  | 45             |
| Indeno(1,2,3-cd) pyrene                      | 2.00                                         | 1.00  | 53.43  | 53.4    | 1  | 34             |
| Methyl-2 fluoranthene                        | 1.61                                         | 1.09  | 8.18   | 7.5     | 1  | 61             |
| Methyl-2 naphthalene                         | 25.17                                        | 9.00  | 92.75  | 10.2    | 1  | 68             |
| Naphthalene                                  | 39.76                                        | 29.06 | 118.12 | 4.0     | 1  | 67             |
| PCB 101                                      | 21.01                                        | 1.03  | 519.69 | 504.5   | 1  | 92             |
| PCB 118                                      | 12.22                                        | 1.09  | 93.15  | 85.4    | 1  | 88             |
| PCB 123                                      | 1.38                                         | 1.01  | 7.97   | 7.8     | 1  | 24             |
| PCB 138                                      | 18.54                                        | 1.11  | 156.60 | 141.0   | 1  | 91             |
| PCB 149                                      | 2.84                                         | 1.01  | 15.37  | 15.2    | 1  | 81             |
| PCB 153                                      | 20.60                                        | 1.16  | 322.57 | 278.0   | 1  | 97             |

|                        |       |      |        |       |   |    |
|------------------------|-------|------|--------|-------|---|----|
| PCB 156                | 2.41  | 1.07 | 40.72  | 38.0  | 1 | 33 |
| PCB 167                | 1.60  | <LQ  | 14.67  | –     | 1 | 38 |
| PCB 180                | 6.19  | 1.04 | 219.82 | 211.3 | 1 | 62 |
| PCB 28                 | 3.18  | 1.06 | 45.81  | 43.2  | 1 | 91 |
| PCB 44                 | 2.07  | 1.01 | 12.95  | 12.8  | 1 | 74 |
| Pendimethaline         | 4.02  | 1.61 | 39.35  | 24.4  | 1 | 81 |
| Perylene               | 2.33  | 1.05 | 118.46 | 112.8 | 1 | 30 |
| Phenanthrene           | 33.02 | 1.44 | 103.88 | 72.1  | 1 | 94 |
| Pyrene                 | 8.57  | 1.59 | 47.81  | 30.0  | 1 | 99 |
| Trichlorobenzene 1,2,4 | 3.11  | 1.81 | 29.85  | 16.5  | 1 | 68 |
| Trichlorobezene 1,2,3  | 1.78  | 1.11 | 7.57   | 6.8   | 1 | 62 |

### 3.3. Indicateur multi-contaminants : carte nationale des niveaux de contamination

A partir des jeux de données construits, l'indicateur multi-contaminants a été utilisé pour quantifier et qualifier les niveaux de contamination biodisponible en métaux (*Figure 45*) et en composés organiques (*Figure 56*) des diverses stations réparties au niveau national. Le niveau de contamination est matérialisé à l'aide d'un codage couleur allant du vert au rouge. Ces travaux sont les premiers travaux qui démontrent et proposent l'utilisation d'un indicateur de contamination biodisponible applicable à large échelle et permettant d'intégrer l'ensemble des contaminants mesurés au niveau de la station, ici au travers des gammames encagés. La définition d'un tel indicateur de contamination biodisponible, basé sur l'écart observé entre la teneur mesurée et la valeur seuil associée (BBAC), permet de graduer et comparer de façon fiable les niveaux de contamination entre stations et dans le temps, tout en ayant accès à la contribution de chaque contaminant afin de revenir et cibler le ou les éléments problématiques.

Pour les métaux (*Figure 45*), la représentation cartographique des niveaux de contamination montrent une répartition géographique homogène des niveaux de contaminations bas et élevés. Toutefois, pour l'hydroécocorégion (HER) armoricaine (bassin de la Bretagne et le sud du Bassin la Loire de la Maine à la mer), l'ensemble des stations étudiées présente un niveau de contamination métallique biodisponible marqué. Contrairement au reste du territoire, on observe une pression / contamination métallique biodisponible généralisée sur cette zone géographique. Ce résultat peut être mis en regard des caractéristiques physico-chimiques des milieux aquatiques considérés. En effet cette HER se caractérise par des eaux de surfaces faiblement minéralisées et faiblement calciques. Ainsi, des concentrations métalliques dissoutes mêmes faibles peuvent représenter des contaminations biodisponibles élevées par rapport au niveau bas national. Au travers de cet indicateur, ces travaux mettent en évidence une vulnérabilité de ces milieux à la pression métallique, avec une contamination métallique biodisponible « généralisée », supérieure au niveau bas national. Des observations similaires peuvent également être faites pour la zone Est de l'HER massif central sud et l'HER des Cévennes. Toutefois, sur le bassin Loire Bretagne, trop peu de stations ont été expérimentées, notamment sur la partie Nord et ouest du massif central, pour conclure sur une empreinte marquée des zones faiblement calciques et donc une vulnérabilité de ces milieux à la contamination métallique.

Pour les composés organiques (*Figure 56*), les premiers résultats obtenus à l'aide de cet indicateur montrent clairement des niveaux de contamination biodisponibles plus marquées sur l'Est et l'extrême Nord de notre territoire.

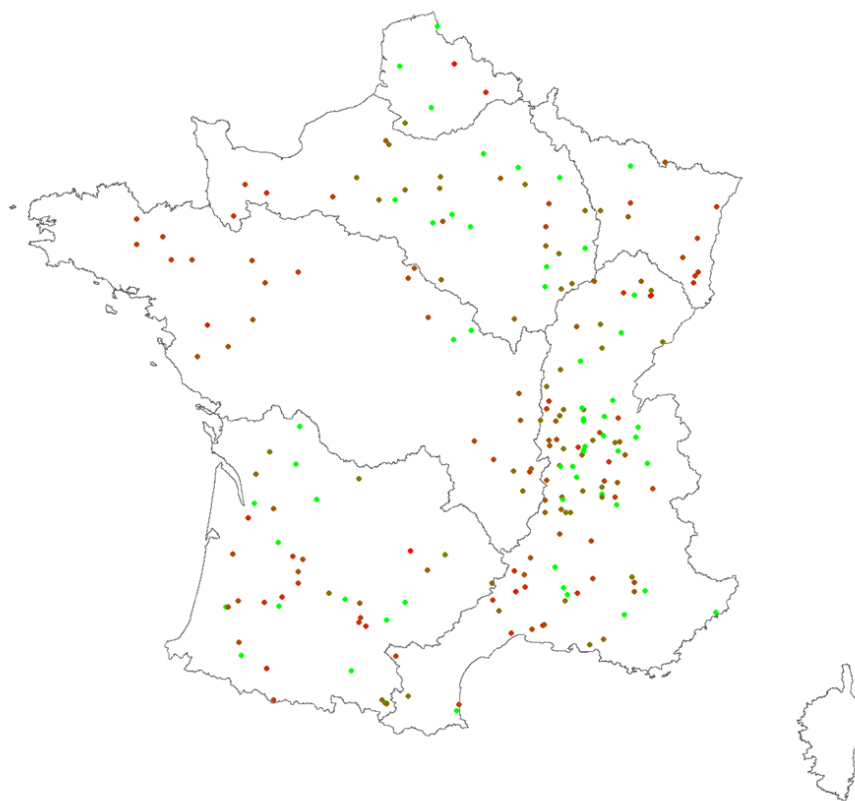


Figure 4 : Carte des niveaux de contamination biodisponible pour les éléments métalliques évalués à l'aide de l'indicateur multi-contaminants, intégrant les teneurs des 18 métaux mesurés chez les organismes encagés. Le code couleur, gradué du vert au rouge, informe sur l'intensité de la contamination.

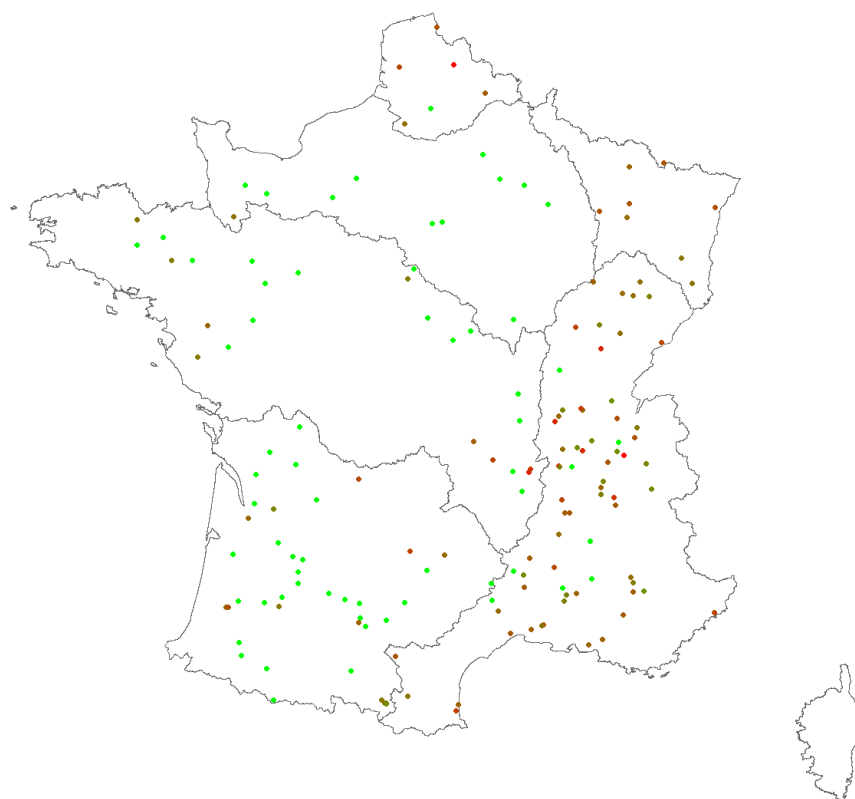


Figure 5 : Carte des niveaux de contamination biodisponible pour les éléments organiques évalués à l'aide de l'indicateur multi-contaminants, intégrant les teneurs des 43 composés organiques mesurés chez

les organismes encagés. Le code couleur, gradué du vert au rouge, informe sur l'intensité de la contamination.

#### 4. Conclusion

Les résultats de ce travail montrent une nouvelle fois l'intérêt de l'encagement de *G. fossarum* pour la surveillance de la contamination chimique des milieux. Le transfert de cette méthodologie et son développement par un prestataire ont permis d'élargir le nombre de molécules mesurées dans les gammars. Son utilisation, par les agences de l'eau notamment, offre aujourd'hui d'une part la possibilité de mettre à disposition des données sur la contamination biodisponible des eaux de surface et d'autre part, constitue une opportunité unique pour ouvrir de nouvelles questions en écotoxicologie, comme comprendre et prédire l'impact sur les communautés des niveaux de contamination et de toxicité observés à l'aide d'espèces sentinelles comme le gammare.

Les travaux menés dans cette étude offrent une méthodologie de calcul comme indicateur pour déterminer le niveau de contamination biodisponible d'un milieu, en intégrant l'ensemble des composés mesurés dans les organismes encagés. Cet outil permet de façon originale de déterminer le niveau de contamination des cours d'eau, ceci à une large échelle spatiale. Enfin, la force de disposer d'un indicateur, c'est-à-dire de convertir de nombreuses mesures en une « note », est de pouvoir, au travers d'un système gradué, qualifier les sites les uns par rapport aux autres et identifier les milieux les plus soumis à une contamination biodisponible et/ou les plus vulnérables. Enfin, la proposition d'un tel indicateur était une étape indispensable pour ouvrir de nouvelles questions sur les liens entre la pression chimique et les réponses des communautés. Pour aborder de telle question la contamination ne peut pas être abordée contaminant par contaminant, la proposition d'un indicateur intégrant l'ensemble des composés mesurés était incontournable.

## 5. Glossaire

**Bioaccumulation:** accumulation nette d'un contaminant dans les tissus ou le corps entier d'un organisme, à partir de l'ensemble des voies d'exposition incluant l'eau, les phases solides (sédiment), ainsi que la nourriture, et qui est la résultante des processus de prise en charge et d'élimination du contaminant

**Biosurveillance (*biomonitoring*):** le terme de biosurveillance recouvre l'ensemble des méthodes utilisées pour détecter et mesurer la concentration des contaminants dans des organismes biologiques, afin de renseigner sur l'état de contamination dans les eaux continentales.

**Biosurveillance active (*caging*):** méthode de biosurveillance reposant sur la transplantation (ou encagement) sur le site d'étude d'organismes provenant d'un site de référence ou d'un élevage

**Valeur seuil de contamination biodisponible (ou Bioavailable Background Assessment Concentration, **BBAC**):** concentration en contaminant en dessous de laquelle il n'est pas possible de conclure à une différence significative avec la concentration de fond définie pour ce même contaminant. Une concentration dans les gammes supérieure à cette valeur seuil signe la présence d'une contamination biodisponible significative pour le site étudié

## 6. Sigles & Abréviations

**BBAC:** Bioavailable Background Assessment Concentration

**DCE:** Directive cadre sur l'eau (Directive 2000/60/CE)

**HAP:** Hydrocarbure Aromatique Polycyclique

**HER:** Hydro-écorégions

**LQ:** Limite de quantification

**NQE:** Norme de Qualité Environnementale

**PCB:** Polychlorobiphényles



## 7. Bibliographie

- Amiard-Triquet, C., Burgeot, T., & Claisse, D. (1999). Biomonitoring of the marine environment quality: experiences of the French National Observation Network (RNO) and the development of biomarkers. *Oceanis*, 25, 651–684.
- Andral, B., Stanisiere, J. Y., Sauzade, D., Damier, E., Thebault, H., Galgani, F., & Boissery, P. (2004). Monitoring chemical contamination levels in the Mediterranean based on the use of mussel caging. *Marine Pollution Bulletin*, 49, 704–712. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2004.05.008>.
- Beketov, M. A., Kefford, B. J., Schäfer, R. B., & Liess, M. (2013). Pesticides reduce regional biodiversity of stream invertebrates. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 110, 11039–11043. <https://doi.org/10.1073/pnas.1305618110>.
- Belpaire, C., Goemans, G., Geeraerts, C., Quataert, P., & Parmentier, K. (2008). Pollution fingerprints in eels as models for the chemical status of rivers. *ICES Journal of Marine Science*, 65, 1483–1491. <https://doi.org/10.1093/icesjms/fsn112>.
- Bervoets, L., De Jonge, M., & Blust, R. (2016). Identification of threshold body burdens of metals for the protection of the aquatic ecological status using two benthic invertebrates. *Environmental Pollution*, 210, 76–84. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2015.12.005>.
- Besse, J. P., Coquery, M., Lopez, C., Chaumot, A., Budzinski, H., Labadie, P., & Geffard, O. (2013). Caged *Gammarus fossarum* (Crustacea) as a robust tool for the characterization of bioavailable contamination levels in continental waters: towards the determination of threshold values. *Water Research*, 47, 650–660. <https://doi.org/10.1016/j.waters.2012.10.024>.
- Besse, J. P., Geffard, O. & Coquery, M. (2012). Relevance and applicability of active biomonitoring in continental waters under the Water Framework Directive. *Trends in Analytical Chemistry*, 36, 113–127. <https://doi.org/10.1016/j.trac.2012.04.004>.
- Birch, G., & Apostolatos, C. (2013). Use of sedimentary metals to predict metal concentrations in black mussel (*Mytilus galloprovincialis*) tissue and risk to human health (Sydney estuary, Australia). *Environmental Science and Pollution Research*, 20, 5481–5491. <https://doi.org/10.1007/s11356-013-1538-8>.
- Bizzotto, E. C., Villa, S., & Vighi, M. (2009). POP bioaccumulation in macroinvertebrates of alpine freshwater systems. *Environmental Pollution*, 157, 3192 – 3198. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2009.06.001>.
- Bourgeault, A., Gourlay-Francé, C., Vincent-Hubert, F., Palais, F., Geffard, A., Biagiante-Risbourg, S., ... Tusseau-Vuillemin, M.H. (2010). Lessons from a transplantation of zebra mussels into a small urban river: an integrated ecotoxicological assessment. *Environmental Toxicology*, 25, 468–478. <https://doi.org/10.1002/tox.20591>.
- Busch, W., Schmidt, S., Kühne, R., Schulze, T., Krauss, M., & Altenburger, R. (2016). Micropollutants in European rivers: a mode of action survey to support the development of effect-based tools for water monitoring. *Environmental Toxicology and Chemistry*, 35, 1887–1899. <https://doi.org/10.1002/etc.3460>.
- Caçador, I., Costa, J. L., Duarte, B., Silva, G., Medeiros, J. P., Azeda, ... Costa, M. J. (2012). Macroinvertebrates and fishes as biomonitors of heavy metal concentration in the Seixal Bay (Tagus estuary): which species perform better? *Ecological Indicators*, 19, 184–190. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2011.09.007>.
- Ciliberti, A., Chaumot, A., Recoura-Massaquant, R., Chandesris, A., François, A., ... Geffard, O. (2017). Caged *Gammarus* as biomonitors identifying thresholds of toxic metal bioavailability that affect gammarid densities at the French national scale. *Water Research*, 118, 131–140. <https://doi.org/10.1016/j.waters.2017.04.031>.
- Dodds, W. K., Perkin, J. S., & Gerken, J. E. (2013). Human impact on freshwater ecosystem services: a global perspectives. *Environmental Science and Technology*, 47, 9061–9068. <https://doi.org/10.1021/es4021052>.
- Dudgeon, D., Arthington, A. H., Gessner, M. O., Kawabata, Z. I., Knowler, D. J., Lévêque, C., ... Stiassny, L. J. (2006). Freshwater biodiversity: importance, threats, status and conservation challenges. *Biological Reviews*, 81, 163–182. <https://doi.org/10.1017/S1464793105006950>.
- Fleeger, J. W., Carman, K. R., & Nisbet, R. M. (2003). Indirect effects of contaminants in aquatic ecosystems. *The Science of the Total Environment*, 317, 207–233. <https://doi.org/10.1016/S0048-9697>.
- Geffard, O., Besse, J.P., Chaumot, A., François, A., Gahou, J., Grisot, G., Lopes, C., Recoura-Massaquant, R., Coquery, M. 2014. Développement d'une méthodologie pour l'amélioration du suivi chimique des eaux continentales. Rapport de synthèse de l'étude pilote : déploiement de l'outil gammare engagé au niveau national, résultats pour les métaux ciblés. Accord-cadre Irstea-Onema - Action n°36 60 p.
- Geffard, O., Ciliberti, A., Chandesris, A., François, A., Coquery, M., Ferréol, M., Chaumot, A. 2018. Lien entre la toxicité, la contamination des milieux aquatiques mesurés chez *Gammarus fossarum* et la perturbation des communautés biologiques. Accord-cadre Irstea-AFB - Action n°48 30p.
- Goldberg, E. D. (1975). The mussel watch. A first step in global marine monitoring. *Marine Pollution Bulletin*, 6, 111–114. [https://doi.org/10.1016/0025-326X\(75\)90271-4](https://doi.org/10.1016/0025-326X(75)90271-4).

- Hare, L. (1992). Aquatic insects and trace metals: bioavailability, bioaccumulation, and toxicity. *Critical Reviews in Toxicology*, 22, 327–369. <https://doi.org/10.3109/10408449209146312>.
- Kördel, W., Garelick, H., Gawlik, B. M., Kandile, N. G., Peijnenburg, W. J. G. M., & Rüdell, H. (2013). Substance-related environmental monitoring strategies regarding soil, groundwater and surface water – an overview. *Environmental Science and Pollution Research*, 20, 2810–2827. <https://doi.org/10.1007/s11356-013-1531-2>.
- Kremen, C. (2005). Managing ecosystem services: what do we need to know about their ecology? *Ecology Letters*, 8, 468–479. <https://doi.org/10.1111/j.1461-0248.2005.00751.x>.
- Lebrun, J., Geffard, O., Urien, N., François, A., Uher, E., & Fechner, L. C. (2015). Seasonal variability and inter-species comparison of metal bioaccumulation in caged gammarids under urban diffuse contamination gradient: implications for biomonitoring investigations. *Science of the Total Environment*, 511, 501–508. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2014.12.078>.
- Liu, W. X., Wang, Y., He, W., Qin, N., Kong, X. Z., He, Q. S., ... Xu, F. L. (2016). Aquatic biota as potential biological indicators of the contamination, bioaccumulation and health risks caused by organochlorine pesticides in a large, shallow Chinese lake (Lake Chaohu). *Ecological Indicators*, 60, 335–345. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2015.06.026>.
- Luoma, S. N., Cain, D. J., & Rainbow, P. S. (2010). Calibrating biomonitors to ecological disturbance : a new technique for explaining metal effects in natural waters. *Integrated Environmental Assessment and Management*, 6, 199–209.
- MEA. (2005). Millenium Ecosystem Assessment. Ecosystems and Human Weill-Being: Synthesis. Island Press, Washigton, DC.
- Oikari, A. (2006). Caging techniques for field exposures of fish to chemical contaminants. *Aquatic Toxicology*, 78, 370–381. <https://doi.org/10.1016/j.aquatox.2006.03.010>.
- Recour-Massaquant, R., Geffard, O., Besse, J.P., Chaumot, A., Francois, A., Lopes, C., Miege, C., Roussel-Galle, A., Serveto, F., Coquery, M. 2014. Développement d'une méthodologie pour l'amélioration du suivi chimique des eaux continentales. Rapport de synthèse de l'étude pilote : déploiement de l'outil gammare engagé au niveau national, résultats pour les substances organiques ciblées. 66 p.
- Rockström, J., Lannerstad, M., & Falkenmark, M. (2007). Assessing the water challenge of a new green revolution in developing countries. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 104, 6253–6260. <https://doi.org/10.1073/pnas.0605739104>.
- Roots, O., & Roose, A. (2013). Hazardous substances in the aquatic environment of Estonia. *Chemosphere*, 93, 196–200. <https://doi.org/10.1016/j.chemosphere.2013.05.036>.
- Salazar, M. H., & Salazar, S. M. (1997). Using caged bivalves to characterize exposure and effects associated with pulp and paper mill effluents. *Water Science and Technology*, 35, 213–220. [https://doi.org/10.1016/S0273-1223\(96\)00933-X](https://doi.org/10.1016/S0273-1223(96)00933-X).
- Schwarzenbarch, R. P., Escher, B. I., Fenner, K., Hofstetter, T. B., Johnson, C. A., von Gunten, U., & Wehrli, B. (2006). The challenge of microplutants in aquatic systems. *Science*, 313, 1072 – 1077. <https://doi.org/10.1126/science.1127291>.
- Simpson, S. L., & Spadaro, D. A. (2016). Bioavailability and chronic toxicity of metal sulfide minerals to benthic marine invertebrates: implications for deep sea exploration, mining and tailings disposal. *Environmental Science and Technology*, 50, 4061–4070. <https://doi.org/10.1021/acs.est.6b00203>.
- Solà, C., Burgos, M., Plazuelo, Á, Toja, J., Plans, M., & Prat, N. (2004). Heavy metal bioaccumulation and macroinvertebrate community changes in a Mediterranean stream affected by acid mine drainage and an accidental spill (Guadamar River, SW Spain). *Science of the Total Environment*, 333, 109–126. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv;2004.05.011>.
- Van Ael, E., Belpaire, C., Breine, J., Geeraerts, C., Van Thuyne, G., Eulaers, R. ... Bervoets, L. (2014). Are persistent organic pollutants and metals in eel muscle predictive for the ecological water quality? *Environmental Pollution*, 186, 165–171. <https://doi.org/10.1016/j.envpol.2013.12.006>.
- Vörösmarty, C.J., Lévêque, C., & Revenga, C. (2005). Fresh water. In Bos R. et al. (Eds.), *Ecosystems and Human Weill-Being: Current States and Trends, Millenium Ecosystem Assessment Report*. (pp 165 – 207), USA: Washigton, DC, Island Press.
- Weiss, M., & Leese, F. (2016). Widely distributed and regionally isolated! Drivers of genetic structure in *Gammarus fossarum* in a human-impacted landscape. *BMC Evolutionary Biology*, 16, 153. <https://doi.org/10.1186/s12862-016-0723-z>.

## 8. Table des illustrations

|                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                                |    |
|------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| Figure 1 : Localisation des 218 sites sur lesquels des gammares, <i>G. fossarum</i> , ont été engagés sur une durée de 7 jours entre 2009 et 2016 et sur lesquels les teneurs en métaux et/ou composés organiques ont été déterminées. ....                                                                                                                                                                                                                                                                                                    | 14 |
| Figure 2 : Exemple de BBAC déterminée pour le cobalt. Sur le schéma de gauche (A) sont présentées les concentrations mesurées pour chaque site, triées par ordre croissant. Les points bleus correspondent au plus grand ensemble de données qui suit une distribution Gaussienne, représentée sur le schéma de droite (B). En tiret : BBAC (95 <sup>ème</sup> percentile).....                                                                                                                                                                | 15 |
| Figure 3 : Distribution des 215 stations de la base de données selon leur rang de strahler, la géologie de leur bassin versant ainsi que quatre types d'occupation du sol répertoriés sur leur bassin versant.....                                                                                                                                                                                                                                                                                                                             | 16 |
| Figure 5 : Carte des niveaux de contamination biodisponible pour les éléments métalliques évalués à l'aide de l'indicateur multi-contaminants, intégrant les teneurs des 18 métaux mesurés chez les organismes engagés. Le code couleur, gradué du vert au rouge, informe sur l'intensité de la contamination.....                                                                                                                                                                                                                             | 20 |
| Figure 6 : Carte des niveaux de contamination biodisponible pour les éléments organiques évalués à l'aide de l'indicateur multi-contaminants, intégrant les teneurs des 43 composés organiques mesurés chez les organismes engagés. Le code couleur, gradué du vert au rouge, informe sur l'intensité de la contamination.....                                                                                                                                                                                                                 | 20 |
| Tableau 1 : Concentrations en métaux ( $\mu\text{g/g}$ de poids sec) et fréquences de quantification (% de données > à la LQ) observées chez <i>Gammarus fossarum</i> après 7 jours d'exposition <i>in situ</i> sur les 218 sites d'étude (313 données). Les limites de Quantification (LQ) sont présentées. Les concentrations et les LQ sont exprimées en $\mu\text{g/g}$ de poids sec. Med, Min et Max sont respectivement les valeurs médiane, maximale et minimale pour chaque élément. * en considérant la LQ comme valeur minimale..... | 17 |
| Tableau 2 : Concentrations en polluants organiques ( $\text{ng/g}$ de poids sec) et fréquences de quantification (% de données > à la LQ) observées chez <i>Gammarus fossarum</i> après 7 jours d'exposition <i>in situ</i> sur les 196 sites d'étude. Les limites de Quantification (LQ) sont présentées. Les concentrations et les LQ sont exprimées en $\text{ng/g}$ de poids sec. Med, Min et Max sont respectivement les valeurs médiane, maximale et minimale pour chaque élément. ....                                                  | 18 |

## 9. Annexe 1 : Liste des sites intégrés dans la base de données. Localisation, codes masse d'eau et station et coordonnées

| Site                             | Bassin-versant  | Code masse d'eau | Code station | Coordonnées (Lambert 93) |            |
|----------------------------------|-----------------|------------------|--------------|--------------------------|------------|
|                                  |                 |                  |              | X                        | Y          |
| La Selle à Montay                | Artois-Picardie | FRAR50           | 1025000      | 738811,34                | 7002574,48 |
| La Deule Canal à Courrière       | Artois-Picardie | FRAR17           | 1078000      | 695879,68                | 7041227,75 |
| L'ysier à Bambecque              | Artois-Picardie | FRAR63           | 1089000      | 673463,36                | 7091737,91 |
| La Créquoise à Beaurainville     | Artois-Picardie | FRAR13           | 1097500      | 622202,51                | 7037533,78 |
| Ancre à Bonnay                   | Artois-Picardie | FRAR16           | 1133000      | 665071,10                | 6981743,60 |
| Les Evoissons à Bergicourt       | Artois-Picardie | FRAR51           | 1138300      | 629546,31                | 6961690,49 |
| Doller à Reiningue               | Rhin-Meuse      | FRCR57           | 2005700      | 1017040,27               | 6746858,19 |
| Thur à Staffelfelden             | Rhin-Meuse      | FRCR69           | 2010000      | 1018957,00               | 6756045,99 |
| Thur à Ensisheim                 | Rhin-Meuse      | FRCR69           | 2011000      | 1024026,00               | 6760841,99 |
| Petite Fecht à Stosswihr         | Rhin-Meuse      | FRCR95           | 2018780      | 1002464,67               | 6780411,97 |
| Liepvrette à Hurst               | Rhin-Meuse      | FRCR117          | 2024000      | 1022148,00               | 6806414,99 |
| Souffel à Mundolsheim            | Rhin-Meuse      | FRCR151          | 2037500      | 1048030,10               | 6848205,38 |
| Madon à Xeulley                  | Rhin-Meuse      | FRCR249          | 2058000      | 929200,52                | 6835115,52 |
| Meurthe à Bouxières              | Rhin-Meuse      | FRCR283          | 2074000      | 932758,16                | 6854239,74 |
| Moselle à Hauconcourt            | Rhin-Meuse      | FRCR213          | 2084000      | 932564,02                | 6903674,46 |
| Rosselle à Petite-Roselle        | Rhin-Meuse      | FRCR457          | 2103800      | 979432,11                | 6908069,06 |
| Méholle à Void                   | Rhin-Meuse      | FRB1R507         | 2107900      | 892257,54                | 6843657,19 |
| Seine à Nod-sur-Seine            | Seine-Normandie | FRHR2A           | 3001000      | 817631,93                | 6741630,01 |
| Groème à Terrefondrée            | Seine-Normandie | FRHR4            | 3006271      | 839784,82                | 6738179,07 |
| Ource à Autricourt               | Seine-Normandie | FRHR6            | 3006590      | 820438,48                | 6767709,30 |
| Méances à Chalmaison             | Seine-Normandie | FRHR39           | 3013345      | 717792,87                | 6821519,76 |
| Aube à Auberive                  | Seine-Normandie | FRHR14           | 3014130      | 853980,31                | 6745471,61 |
| Landion à Argançon               | Seine-Normandie | FRHR18           | 3016840      | 819116,04                | 6795901,73 |
| Aujon à Longchamp-sur-Aujon      | Seine-Normandie | FRHR15           | 3022000      | 836317,15                | 6785129,81 |
| Chavanges à Lentilles            | Seine-Normandie | FRHR21           | 3022718      | 818679,92                | 6821621,93 |
| Trinquelin à Saint-Léger-Vauban  | Seine-Normandie | FRHR52D          | 3032240      | 777033,00                | 6698065,00 |
| Seine à Saint-Fargeau-Ponthierry | Seine-Normandie | FRHR73A          | 3048000      | 666622,00                | 6826460,00 |
| Ru d'Ancoeuil à Moisenay         | Seine-Normandie | FRHR91           | 3051500      | 680887,00                | 6828771,00 |
| Puiseaux à Nogent-sur-Vernisson  | Seine-Normandie | FRHR80           | 3052338      | 678557,95                | 6750732,51 |
| Yerres à Courtomer               | Seine-Normandie | FRHR101          | 3078110      | 692714,92                | 6838698,17 |
| Rognon à Bourdon-sur-Rognon      | Seine-Normandie | FRHR109          | 3093900      | 872019,44                | 6792444,13 |
| Chée à Merlaut                   | Seine-Normandie | FRHR125          | 3096650      | 823504,00                | 6853255,00 |
| Ornain à Girauval                | Seine-Normandie | FRHR122B         | 3099490      | 871434,10                | 6843696,16 |
| Marne à Matougues                | Seine-Normandie | FRHR130A         | 3104000      | 790859,00                | 6878119,00 |
| Marne à Reuil                    | Seine-Normandie | FRHR130B         | 3105500      | 758250,00                | 6887129,00 |
| Beuvronne à Gressy               | Seine-Normandie | FRHR152          | 3120800      | 676075,21                | 6873406,28 |
| Seine à Poissy                   | Seine-Normandie | FRHR230A         | 3125000      | 629586,00                | 6871185,00 |
| Auve à Sainte-Menehould          | Seine-Normandie | FRHR192          | 3145880      | 837823,19                | 6888339,11 |
| Vesle à Taissy                   | Seine-Normandie | FRHR208B         | 3160000      | 781816,31                | 6901312,06 |
| Vesle à Chassemy                 | Seine-Normandie | FRHR209          | 3162000      | 734852,00                | 6919445,99 |
| Launette à Ver-sur-Launette      | Seine-Normandie | FRHR226          | 3167350      | 677226,08                | 6889334,13 |

|                                               |                 |           |         |           |            |
|-----------------------------------------------|-----------------|-----------|---------|-----------|------------|
| Lieutel à Neauphle-le-Vieux                   | Seine-Normandie | FRHR232A  | 3168690 | 616359,00 | 6857613,00 |
| Mesangueville à Dampierre                     | Seine-Normandie | FRHR234   | 3174695 | 603720,44 | 6936994,43 |
| Auchy à Ferrières-en-Bray                     | Seine-Normandie | FRHR234   | 3174825 | 608148,56 | 6932017,34 |
| Vesgre à Saint-Lubin-de-la-Haye               | Seine-Normandie | FRHR257   | 3190735 | 594460,53 | 6858345,58 |
| Iton à Normanville                            | Seine-Normandie | FRHR259   | 3199200 | 564990,00 | 6888284,00 |
| Risle à Ambenay                               | Seine-Normandie | FRHR266   | 3219780 | 532911,00 | 6862280,00 |
| Noireau à Berjou                              | Seine-Normandie | FRHR304   | 3241957 | 444091,00 | 6867577,00 |
| Souleuvre à Carville                          | Seine-Normandie | FRHR315   | 3250430 | 415263,00 | 6878911,00 |
| Airon à Loges-Marchis                         | Seine-Normandie | FRHR347   | 3271965 | 399261,00 | 6835758,00 |
| Loire à Bas-en-Basset                         | Loire-Bretagne  | FRGR0003a | 4004000 | 787624,38 | 6466874,98 |
| Furan à Andrézieux-Bouthéon                   | Loire-Bretagne  | FRGR0168  | 4008000 | 797573,60 | 6492480,00 |
| Loire à Veauchette                            | Loire-Bretagne  | FRGR0004a | 4009000 | 799176,50 | 6496720,00 |
| Mare à Gumières                               | Loire-Bretagne  | FRGR1496  | 4009250 | 775447,49 | 6493314,08 |
| Loire à Briennon                              | Loire-Bretagne  | FRGR0004c | 4015000 | 784705,10 | 6561350,00 |
| Bourbince à Vitry-en-Charolais                | Loire-Bretagne  | FRGR0200  | 4019700 | 782782,10 | 6597430,00 |
| Nièvre à Dompierre-sur-Nièvre                 | Loire-Bretagne  | FRGR0227  | 4025040 | 718939,00 | 6681860,00 |
| Bedat à Saint-Laure                           | Loire-Bretagne  | FRGR0264  | 4034650 | 722875,10 | 6533430,00 |
| Dore à Olliergues                             | Loire-Bretagne  | FRGR0230b | 4037900 | 749056,10 | 6508590,00 |
| Vauvise à Jussy-le-Chaudrier                  | Loire-Bretagne  | FRGR0290  | 4046545 | 694744,10 | 6669900,00 |
| Loire à Jargeau                               | Loire-Bretagne  | FRGR0007b | 4050000 | 634433,90 | 6752518,00 |
| Oussance à Ingrannes                          | Loire-Bretagne  | FRGR0298  | 4050100 | 642369,10 | 6766496,00 |
| Layon à Ivoy-le-Pré                           | Loire-Bretagne  | FRGR2210  | 4068483 | 660697,51 | 6700369,66 |
| Sarthe à Arnage                               | Loire-Bretagne  | FRGR0456  | 4119000 | 486718,60 | 6760810,00 |
| Jouanne à Forcé                               | Loire-Bretagne  | FRGR0516  | 4127000 | 423939,60 | 6776832,00 |
| Layon à Saint-Lambert-du-Lattey               | Loire-Bretagne  | FRGR0527  | 4134000 | 425754,20 | 6696966,00 |
| Boire de la Roche à Saint-Julien-de-Concelles | Loire-Bretagne  | FRGR2243  | 4137050 | 364328,90 | 6690074,00 |
| Rau Vrignon à Saint-Aubin-des-Ormeaux         | Loire-Bretagne  | FRGR1482  | 4140020 | 392166,10 | 6661022,00 |
| Petite boulogne à Saint-Etienne-du-Bois       | Loire-Bretagne  | FRGR0565  | 4150865 | 350827,52 | 6647659,79 |
| Rance à Eréac                                 | Loire-Bretagne  | FRGR0014a | 4164758 | 304456,40 | 6807992,00 |
| Gouet à Saint-Julien                          | Loire-Bretagne  | FRGR0041a | 4170500 | 268937,11 | 6832115,98 |
| Oust à l'aval de Loudéac                      | Loire-Bretagne  | FRGR0126c | 4195690 | 269139,63 | 6797553,54 |
| Aff à Paimpont                                | Loire-Bretagne  | FRGR0128  | 4199370 | 315429,70 | 6777126,00 |
| Vilaine à Guichen                             | Loire-Bretagne  | FRGR0010  | 4209990 | 344193,00 | 6777680,00 |
| Baraize à Saint-Denis-d'Anjou                 | Loire-Bretagne  | FRGR1131  | 4607001 | 441555,00 | 6746734,00 |
| La Seugne à St-Germain de Lusignan            | Adour-Garonne   | FR14      | 5008000 | 429841,39 | 6489327,49 |
| Le Tourtrat au niveau de Reparsac             | Adour-Garonne   | FRR9_2    | 5013150 | 447883,45 | 6518696,17 |
| Les Eaux-Claires à Puymerle                   | Adour-Garonne   | FR687     | 5015320 | 483083,06 | 6502504,35 |
| La Lizonne en aval de Bioussac                | Adour-Garonne   | FRR21_1   | 5023100 | 488328,50 | 6553074,39 |
| Colinet (Soptier) en aval de Cézac            | Adour-Garonne   | FRFR557A  | 5025830 | 427348,50 | 6449524,59 |
| La Dronne à Coutras                           | Adour-Garonne   | FR289B    | 5030000 | 452996,64 | 6442604,05 |
| Isle à Razac                                  | Adour-Garonne   | FRFR288C  | 5039000 | 510934,84 | 6455394,83 |
| Auvézère à Ségur-le-Chateau                   | Adour-Garonne   | FRFR46B   | 5042080 | 567693,37 | 6482460,35 |
| La Jalle de Blanquefort à Bordeaux            | Adour-Garonne   | FRFR51    | 5073800 | 419179,26 | 6430186,69 |
| Dropt à Loubens                               | Adour-Garonne   | FRFR61A   | 5079100 | 459458,91 | 6397156,28 |
| Le Trec à Longueville                         | Adour-Garonne   | FR632     | 5083300 | 479122,90 | 6378723,26 |
| Tolzac à Varès                                | Adour-Garonne   | FRFR58    | 5083585 | 492143,40 | 6374724,75 |

|                                               |                             |             |         |           |            |
|-----------------------------------------------|-----------------------------|-------------|---------|-----------|------------|
| Le Riou Mort en aval de Viviez                | Adour-Garonne               | FR130       | 5093550 | 637362,29 | 6385544,84 |
| La Boralde Flaujaguèse en amont d'Espalion    | Adour-Garonne               | FR127       | 5099170 | 683487,44 | 6381143,66 |
| La Gélise en amont du Rimbez                  | Adour-Garonne               | FR221       | 5106850 | 464841,10 | 6323918,60 |
| La Grande Baise à Bapaume                     | Adour-Garonne               | FR223       | 5107000 | 486844,59 | 6342357,78 |
| Arrats à Saint-Antoine                        | Adour-Garonne               | FRFR213A    | 5118000 | 527865,70 | 6329248,49 |
| Aveyron à Rodez                               | Adour-Garonne               | FRFR201     | 5127000 | 659597,22 | 6360008,53 |
| Le Rieu Tort à Labastide St Pierre            | Adour-Garonne               | FRFR315B_13 | 5129150 | 568562,50 | 6315306,22 |
| L'Agout à Ambrès                              | Adour-Garonne               | FR152A      | 5134000 | 604737,10 | 6292432,24 |
| Tarn à l'aval d'Albi                          | Adour-Garonne               | FRFR314B    | 5142100 | 629763,63 | 6316922,25 |
| Tarnon en amont de Rousses                    | Adour-Garonne               | FRFR305     | 5151100 | 747195,81 | 6342811,13 |
| Gimone à Lafitte                              | Adour-Garonne               | FRFR211     | 5153000 | 549220,08 | 6321073,06 |
| L'Hers mort au niveau de St-Sauveur           | Adour-Garonne               | FRFR164     | 5156950 | 569604,00 | 6295908,17 |
| La Sausse à Toulouse                          | Adour-Garonne               | FR598       | 5157100 | 577589,36 | 6284059,84 |
| L'Aussonnelle à Seilh                         | Adour-Garonne               | FR154       | 5158700 | 567681,71 | 6290109,15 |
| Garonne en aval de Toulouse                   | Adour-Garonne               | FRFR296B    | 5161000 | 486212,14 | 6358047,37 |
| Ariège à Savignac les Ormeaux                 | Adour-Garonne               | FR166       | 5173380 | 603131,50 | 6181593,77 |
| Ariège à Luzenac                              | Adour-Garonne               | FR166       | 5173395 | 598821,35 | 6185486,04 |
| Lauze à Ax-les-Thermes (amont rue de Sorgeat) | Adour-Garonne               | FR577       | 5173410 | 604654,86 | 6180903,76 |
| Témoin amont Sarignier                        | Adour-Garonne               | FR166       | 5173500 | 604648,65 | 6179925,01 |
| Montbrun en amont de Montbrun-Bocage          | Adour-Garonne               | FRFR186_5   | 5176100 | 557215,88 | 6224434,17 |
| La Leyre à Belin Beliet                       | Adour-Garonne               | FR286       | 5191900 | 398305,98 | 6382146,13 |
| Le Luzoué à Monein                            | Adour-Garonne               | FRR431_1    | 5211550 | 409963,75 | 6245762,72 |
| Gave du Pau à Abidos                          | Adour-Garonne               | FRFR277B    | 5212000 | 406382,88 | 6262814,00 |
| Gave du Pau à Rieulhès                        | Adour-Garonne               | FRFR247A    | 5216210 | 444054,88 | 6227685,25 |
| Gave du Pau à Gavarnie                        | Adour-Garonne               | FRFR246     | 5218700 | 453435,77 | 6185820,72 |
| Luzou à Bégaar                                | Adour-Garonne               | FRFR233     | 5223210 | 389539,50 | 6310858,50 |
| Le Retjon à Tartas                            | Adour-Garonne               | FR232       | 5224100 | 392078,12 | 6310392,32 |
| La Midouze à Campagne                         | Adour-Garonne               | FR330B      | 5226000 | 406221,96 | 6318897,95 |
| Bergon au niveau de Réans                     | Adour-Garonne               | FRFR227_2   | 5228500 | 460058,35 | 6311741,49 |
| Le Midour à Lannemaignan                      | Adour-Garonne               | FR228       | 5229100 | 441237,98 | 6316651,96 |
| la Saône à Scey-sur-Saône-et-St-Albin         | Rhône-Méditerranée<br>Corse | FRDR1806a   | 6003600 | 923180,98 | 6733241,92 |
| l'Ognon à Les-Aynans                          | Rhône-Méditerranée<br>Corse | FRDR662     | 6007000 | 959486,41 | 6729316,28 |
| Au val de Gouhenans (Rahin)                   | Rhône-Méditerranée<br>Corse | FRDR661     | 6008000 | 960839,00 | 6730350,00 |
| l'Ognon à Pesmes                              | Rhône-Méditerranée<br>Corse | FRDR656     | 6010000 | 892715,39 | 6690611,71 |
| Ouche à Crimolois                             | Rhône-Méditerranée<br>Corse | FRDR646     | 6016000 | 860089,00 | 6687250,00 |
| Le Doubs à Morteau                            | Rhône-Méditerranée<br>Corse | FRDR638     | 6018500 | 976317,78 | 6667178,66 |
| le Doubs à Thoraise                           | Rhône-Méditerranée<br>Corse | FRDR625     | 6029100 | 919956,84 | 6679085,97 |
| Guyotte à Saint-Bonnet                        | Rhône-Méditerranée<br>Corse | FRDR613     | 6035330 | 865948,00 | 6641525,00 |
| Corne à Saint-Rémy                            | Rhône-Méditerranée<br>Corse | FRDR607     | 6038300 | 839108,00 | 6629175,00 |
| Grosne occidentale à Trades                   | Rhône-Méditerranée<br>Corse | FRDR606     | 6039840 | 819997,00 | 6577455,00 |
| Grosne à Sainte Cécile                        | Rhône-Méditerranée<br>Corse | FRDR606     | 6039960 | 823419,00 | 6587437,00 |
| Guye à Angoin                                 | Rhône-Méditerranée<br>Corse | FRDR604     | 6040400 | 820086,00 | 6606769,00 |
| Reyssouze à Viriat                            | Rhône-Méditerranée<br>Corse | FRDR593a    | 6046000 | 869134,00 | 6575436,00 |
| Veyle à Lent                                  | Rhône-Méditerranée<br>Corse | FRDR587a    | 6048570 | 869769,00 | 6560119,00 |

|                                          |                             |           |         |           |            |
|------------------------------------------|-----------------------------|-----------|---------|-----------|------------|
| la Petite Veyle à Grieges                | Rhône-Méditerranée<br>Corse | FRDR580   | 6049010 | 842595,15 | 6575989,41 |
| Veyle à Servas                           | Rhône-Méditerranée<br>Corse | FRDR587b  | 6049550 | 869164,00 | 6563689,00 |
| Ardières à Saint-Jean-<br>d'Ardières     | Rhône-Méditerranée<br>Corse | FRDR576   | 6051550 | 832172,72 | 6560109,16 |
| Ardières à Saint-Jean-<br>d'Ardières     | Rhône-Méditerranée<br>Corse | FRDR576   | 6051550 | 832479,00 | 6560005,00 |
| Ergues à Poule-les-<br>Echarmeaux        | Rhône-Méditerranée<br>Corse | FRDR572   | 6053500 | 811607,61 | 6560976,20 |
| Turdine à l'Arbresle                     | Rhône-Méditerranée<br>Corse | FRDR569a  | 6057200 | 824332,00 | 6527692,00 |
| La Saône à Lyon                          | Rhône-Méditerranée<br>Corse | FRDR1807b | 6059500 | 842306,74 | 6523577,56 |
| La Semine à Châtillon en<br>Michaille    | Rhône-Méditerranée<br>Corse | FRDR2023  | 6067845 | 916062,33 | 6564950,59 |
| les Usses à Cruseilles                   | Rhône-Méditerranée<br>Corse | FRDR541a  | 6068900 | 943398,24 | 6551660,13 |
| le Rhône à Massignieu-De-<br>Rives       | Rhône-Méditerranée<br>Corse | FRDR2001b | 6069550 | 916441,71 | 6520643,24 |
| Mandorne à Oncieu                        | Rhône-Méditerranée<br>Corse | FRDR11552 | 6069650 | 891477,04 | 6544924,44 |
| le Rhône à Ruffieux                      | Rhône-Méditerranée<br>Corse | FRDR2001a | 6072400 | 917721,43 | 6532071,95 |
| Tillet à Aix-les-Bains                   | Rhône-Méditerranée<br>Corse | FRDR1491  | 6074500 | 925025,00 | 6514593,00 |
| Guiers-Mort à Saint-Laurent-<br>du-Pont  | Rhône-Méditerranée<br>Corse | FRDR517a  | 6078200 | 915573,00 | 6477559,00 |
| le Rhône à Bregnier-Cordon               | Rhône-Méditerranée<br>Corse | FRDR2001c | 6079050 | 903878,15 | 6506129,26 |
| le Rhône à St-Sorlin-en-<br>Bugey        | Rhône-Méditerranée<br>Corse | FRDR2004  | 6080000 | 882021,34 | 6534207,47 |
| Bourbre à Jamezieu                       | Rhône-Méditerranée<br>Corse | FRDR506b  | 6082500 | 867965,39 | 6515181,32 |
| Bourbre à Pont-Cheruy                    | Rhône-Méditerranée<br>Corse | FRDR506c  | 6082850 | 869567,00 | 6519822,00 |
| Bourbre à Chavanoz                       | Rhône-Méditerranée<br>Corse | FRDR506c  | 6083000 | 869892,00 | 6521561,00 |
| la Bienne à Jeurre                       | Rhône-Méditerranée<br>Corse | FRDR498   | 6085500 | 908417,40 | 6588795,44 |
| Ange à Brion                             | Rhône-Méditerranée<br>Corse | FRDR1414  | 6086100 | 897067,00 | 6566834,00 |
| Ain à Saint-Maurice-de-<br>Gourdans      | Rhône-Méditerranée<br>Corse | FRDR484   | 6092000 | 871773,00 | 6526506,00 |
| le Rhône à Jons                          | Rhône-Méditerranée<br>Corse | FRDR2005a | 6092500 | 862358,56 | 6525799,37 |
| Gier à Givors                            | Rhône-Méditerranée<br>Corse | FRDR474   | 6097000 | 837314,00 | 6500197,00 |
| Rhône à Chasse-sur-Rhône                 | Rhône-Méditerranée<br>Corse | FRDR2006  | 6098000 | 838861,00 | 6499536,00 |
| la Sevenne à St-Just-<br>Chaleyssin      | Rhône-Méditerranée<br>Corse | FRDR2017  | 6098700 | 855033,97 | 6499829,63 |
| Cance à Saint-Julien-<br>Vocance         | Rhône-Méditerranée<br>Corse | FRDR461a  | 6101905 | 817898,00 | 6453856,00 |
| Cance à Sarras                           | Rhône-Méditerranée<br>Corse | FRDR460   | 6103500 | 840264,00 | 6457878,00 |
| le Rhône à St-Vallier                    | Rhône-Méditerranée<br>Corse | FRDR2006  | 6104000 | 842195,18 | 6455497,01 |
| Galaveyson à Saint-Clair-<br>sur-Galaure | Rhône-Méditerranée<br>Corse | FRDR11300 | 6104900 | 868463,00 | 6466262,00 |
| Doux à Labathie d'Andorre                | Rhône-Méditerranée<br>Corse | FRDR455   | 6105568 | 817646,00 | 6437780,00 |
| Doux à Saint-Jean-de-<br>Muzols          | Rhône-Méditerranée<br>Corse | FRDR452   | 6106030 | 839966,00 | 6441598,00 |
| le Rhône à La-Roche-de-<br>Gluon         | Rhône-Méditerranée<br>Corse | FRDR2007  | 6106100 | 845732,59 | 6437271,10 |
| Roanne à Saint-Benoît-en-<br>Diois       | Rhône-Méditerranée<br>Corse | FRDR441   | 6107980 | 880001,00 | 6399472,00 |
| le Rhône à Pierrelatte                   | Rhône-Méditerranée<br>Corse | FRDR2007e | 6113500 | 831255,74 | 6364276,39 |
| Meyne à Orange                           | Rhône-Méditerranée<br>Corse | FRDR1251  | 6118000 | 842961,15 | 6336034,16 |
| Luech à Genholac                         | Rhône-Méditerranée<br>Corse | FRDR400c  | 6118550 | 776630,00 | 6358800,00 |
| la Cèze à Robiac-<br>Rochessadoule       | Rhône-Méditerranée<br>Corse | FRDR398   | 6118600 | 789885,47 | 6354306,55 |
| Auzon à Monteux                          | Rhône-Méditerranée<br>Corse | FRDR387b  | 6123250 | 861242,00 | 6328780,00 |
| le Rhône à Avignon                       | Rhône-Méditerranée<br>Corse | FRDR2008a | 6125500 | 844381,20 | 6318516,44 |
| l'Avène à St Privas des                  | Rhône-Méditerranée          | FRDR11390 | 6127900 | 790700,37 | 6337317,63 |

| Vieux                                | Corse              |           |         |            |            |
|--------------------------------------|--------------------|-----------|---------|------------|------------|
| Amous à Générargues                  | Rhône-Méditerranée | FRDR10277 | 6128860 | 778722,00  | 6330924,00 |
| le Petit Rhône à St-Gilles           | Corse              |           |         |            |            |
|                                      | Rhône-Méditerranée | FRDR2009  | 6131900 | 817224,68  | 6286216,52 |
|                                      | Corse              |           |         |            |            |
| le Canal du Rhône à Sète à St-Gilles | Rhône-Méditerranée | FRDR3108a | 6131910 | 815067,63  | 6285512,48 |
| Isère à Gresy-sur-Isère              | Corse              |           |         |            |            |
|                                      | Rhône-Méditerranée | FRDR354b  | 6137200 | 954911,41  | 6503611,14 |
|                                      | Corse              |           |         |            |            |
| l'Arvan à St-Jean-de-Maurienne       | Rhône-Méditerranée | FRDR361c  | 6138870 | 962956,41  | 6469546,44 |
| Canal de la Romanche à Jarrie        | Corse              |           |         |            |            |
|                                      | Rhône-Méditerranée | FRDR3054  | 6144950 | 914171,03  | 6447650,86 |
|                                      | Corse              |           |         |            |            |
| Drac à Fontaine                      | Rhône-Méditerranée | FRDR325   | 6146500 |            |            |
| Canal de la Fure Morge à Polienas    | Corse              |           |         | 912113,00  | 6458377,00 |
|                                      | Rhône-Méditerranée | FRDR322c  | 6147160 | 894919,44  | 6461924,01 |
|                                      | Corse              |           |         |            |            |
| Drevenne à Rovon                     | Rhône-Méditerranée | FRDR10217 | 6147220 | 894287,00  | 6458073,00 |
| l'isère à Châteauneuf-sur-Isère      | Corse              |           |         |            |            |
|                                      | Rhône-Méditerranée | FRDR312   | 6149500 | 852443,77  | 6437329,79 |
| la Duance à Sisteron                 | Corse              |           |         |            |            |
|                                      | Rhône-Méditerranée | FRDR289   | 6153900 | 934479,35  | 6350598,30 |
|                                      | Corse              |           |         |            |            |
| la Durance à Salignac                | Rhône-Méditerranée | FRDR278   | 6156505 | 937396,58  | 6343361,82 |
|                                      | Corse              |           |         |            |            |
| la Bléone à Mallemoisson             | Rhône-Méditerranée | FRDR276a  | 6158000 | 951793,19  | 6331712,75 |
|                                      | Corse              |           |         |            |            |
|                                      | Rhône-Méditerranée | FRDR275   | 6159000 |            |            |
| Durance à Les Mées                   | Corse              |           |         | 937563,00  | 6330720,00 |
| la Durance à Vinon-sur-Verdon        | Rhône-Méditerranée | FRDR267   | 6159800 | 924721,53  | 6299954,81 |
|                                      | Corse              |           |         |            |            |
| Agula à Alenya                       | Rhône-Méditerranée | FRDR233   | 6169050 | 699338,00  | 6170903,00 |
|                                      | Corse              |           |         |            |            |
| Têt à Sainte-Marie-la-Mer            | Rhône-Méditerranée | FRDR223   | 6172100 | 701920,00  | 6179025,00 |
| Rebenty à Cailla                     | Corse              |           |         |            |            |
|                                      | Rhône-Méditerranée | FRDR202   | 6175645 | 634529,38  | 6191111,30 |
|                                      | Corse              |           |         |            |            |
| Tréboul à Castelnaudary              | Rhône-Méditerranée | FRDR196   | 6177910 | 617123,00  | 6244433,00 |
| la Glèpe à Avezé                     | Corse              |           |         |            |            |
|                                      | Rhône-Méditerranée | FRDR11732 | 6181210 | 748045,41  | 6319241,89 |
|                                      | Corse              |           |         |            |            |
| l'Hérault à Brissac                  | Rhône-Méditerranée | FRDR171   | 6182050 | 756446,44  | 6305296,37 |
|                                      | Corse              |           |         |            |            |
|                                      | Rhône-Méditerranée | FRDR142   | 6189500 | 772548,00  | 6275019,00 |
| Lez à Lattes                         | Corse              |           |         |            |            |
| le Vieux Vistre à le Cailar          | Rhône-Méditerranée | FRDR132   | 6193800 | 800260,63  | 6280238,19 |
|                                      | Corse              |           |         |            |            |
|                                      | Rhône-Méditerranée | FRDR11804 | 6194000 |            |            |
| Luynes à Aix-en-Provence             | Corse              |           |         | 896064,00  | 6267461,00 |
| La Cadière à Marignane               | Rhône-Méditerranée | FRDR126b  | 6196950 | 878390,89  | 6259411,32 |
|                                      | Corse              |           |         |            |            |
|                                      | Rhône-Méditerranée | FRDR522b  | 6300000 | 912411,86  | 6531006,70 |
| Séran à Béon                         | Corse              |           |         |            |            |
|                                      | Rhône-Méditerranée | FRDR486   | 6300001 | 896133,00  | 6540654,00 |
| Albarine à Chaley                    | Corse              |           |         |            |            |
| Lanterne à Sainte-Marie-en-Chaux     | Rhône-Méditerranée | FRDR690   | 6404500 | 947397,00  | 6748490,00 |
|                                      | Corse              |           |         |            |            |
| Durgeon à Vesoul                     | Rhône-Méditerranée | FRDR682   | 6416300 | 937751,00  | 6729704,00 |
|                                      | Corse              |           |         |            |            |
| Salon à Chalindrey                   | Rhône-Méditerranée | FRDR674   | 6416550 | 884079,00  | 6747955,00 |
| la Cuisance à Souvans                | Corse              |           |         |            |            |
|                                      | Rhône-Méditerranée | FRDR618   | 6468450 | 894505,50  | 6658531,21 |
|                                      | Corse              |           |         |            |            |
| Valserine à Montanges                | Rhône-Méditerranée | FRDR545   | 6580130 | 916383,44  | 6564994,33 |
|                                      | Corse              |           |         |            |            |
|                                      | Rhône-Méditerranée | FRDR417b  | 6580238 | 798544,00  | 6376728,00 |
| Baume à Rosières                     | Corse              |           |         |            |            |
| le Reyssozue à Attignat              | Rhône-Méditerranée | FRDR593a  | 6580602 | 867903,70  | 6577698,90 |
|                                      | Corse              |           |         |            |            |
| le Paillon à Drap                    | Rhône-Méditerranée | FRDR76b   | 6700415 | 1047477,53 | 6303606,97 |
|                                      | Corse              |           |         |            |            |
| Toulourenc à Saint-Léger-du-Ventoux  | Rhône-Méditerranée | FRDR391   | 6710039 | 882069,00  | 6348202,00 |
| Bras des Armeniers à Sorgues         | Corse              |           |         |            |            |
|                                      | Rhône-Méditerranée | FRDR2007f | 6710043 | 847799,19  | 6326505,31 |
|                                      | Corse              |           |         |            |            |
| Azergues à Legny                     | Rhône-Méditerranée | FRDR568a  | 6800009 | 822646,00  | 6534789,00 |
| la Saône à St-Symphorien-d'Ancelles  | Corse              |           |         |            |            |
| l'Ouvèze à Rompon                    | Rhône-Méditerranée | FRDR1807a | 6810010 | 837552,49  | 6567344,50 |
|                                      | Corse              |           |         |            |            |
|                                      | Rhône-Méditerranée | FRDR1320c | 6820013 | 837258,41  | 6408158,99 |
|                                      | Corse              |           |         |            |            |



|                            |                             |          |         |           |            |
|----------------------------|-----------------------------|----------|---------|-----------|------------|
| Varèze à Cour-et-Buis      | Rhône-Méditerranée<br>Corse | FRDR471  | 6820073 | 859976,00 | 6484614,00 |
| Gier à La-Valla-en-Gier    | Rhône-Méditerranée<br>Corse | FRDR2019 | 6820138 | 820194,67 | 6480468,19 |
| Gier à La-Valla-en-Gier    | Rhône-Méditerranée<br>Corse | FRDR2019 | 6820138 | 820194,67 | 6480468,19 |
| la Fure à Apprieu          | Rhône-Méditerranée<br>Corse | FRDR323a | 6830038 | 897712,76 | 6480121,96 |
| Fure à Tullins - Hurtieres | Rhône-Méditerranée<br>Corse | FRDR323b | 6830055 | 894839,12 | 6471311,95 |
| le Thiou à Cran-Gevrier    | Rhône-Méditerranée<br>Corse | FRDR536  | 6850166 | 940144,97 | 6539144,94 |

---

## 10. Annexe 2 : BBAC pour les composés métalliques

| Compounds | BBAC ( $\mu\text{g g}^{-1}$ ) |
|-----------|-------------------------------|
| Ag        | 0.21                          |
| Al        | 920                           |
| B         | 5.80                          |
| Ba        | 106                           |
| Cd        | 0.21                          |
| Co        | 0.57                          |
| Cr        | 1.10                          |
| Cu        | 84.0                          |
| Fe        | 486                           |
| Hg        | 0.10                          |
| Li        | 1.10                          |
| Mn        | 81.8                          |
| Mo        | 0.50                          |
| Ni        | 1.20                          |
| Pb        | 0.70                          |
| Se        | 2.60                          |
| U         | 0.12                          |
| Zn        | 78.9                          |

## 11. Annexe 3 : BBAC pour les composés organiques

| Compounds                                    | BBAC (ng g <sup>-1</sup> ) |
|----------------------------------------------|----------------------------|
| 1,2,3,4,6,7,8,9<br>Octachlorodiben-zodioxine | 28.4                       |
| 2,3,7,8 Tetrachlorodiben-<br>zofurane        | 8.90                       |
| 2,4'-DDT                                     | 5.40                       |
| 4,4'-DDD                                     | 4.90                       |
| 4-4'-DDE                                     | 3.50                       |
| 4-4'-DDT                                     | 14.7                       |
| Anthracene                                   | 7.30                       |
| Anthraquinone                                | 8.50                       |
| Benzo(a)anthracene                           | 6.40                       |
| Benzo(a)pyrene                               | 3.20                       |
| Benzo(b+j) fluoranthene                      | 4.50                       |
| Benzo(e)pyrene                               | 5.50                       |
| Benzo(g,h,i)perylene                         | 5.00                       |
| Benzo(k) fluoranthene                        | 1.70                       |
| Benzyl Butyl Phtalate                        | 11.9                       |
| Chrysene                                     | 2.10                       |
| Dicofol                                      | 7.29                       |
| Fluoranthene                                 | 18.9                       |
| Fluorene                                     | 21.4                       |
| HCH gamma(Lindane)                           | 1.80                       |
| Hexachlorobenzene                            | 2.00                       |
| Hexachlorobutadiene                          | 2.80                       |
| Indeno(1,2,3-cd) pyrene                      | 3.10                       |
| Methyl-2 fluoranthene                        | 2.60                       |
| Methyl-2 naphtalene                          | 40.1                       |
| Naphthalene                                  | 57.9                       |
| PCB 101                                      | 6.10                       |
| PCB 118                                      | 4.20                       |
| PCB 123                                      | 1.90                       |
| PCB 138                                      | 5.90                       |
| PCB 149                                      | 5.30                       |
| PCB 153                                      | 7.60                       |
| PCB 156                                      | 3.40                       |
| PCB 167                                      | 2.50                       |
| PCB 180                                      | 3.20                       |
| PCB 28                                       | 3.00                       |
| PCB 44                                       | 3.30                       |
| Pendimethaline                               | 7.70                       |
| Perylene                                     | 3.20                       |
| Phenanthrene                                 | 57.7                       |
| Pyrene                                       | 17.2                       |
| Trichlorobenzene 1,2,3                       | 2.40                       |
| Trichlorobezene 1,2,4                        | 4.90                       |

**Irstea**

1, rue Pierre-Gilles de Gennes  
CS 10030  
92761 Antony Cedex

**01 40 96 61 21**

[www.irstea.fr](http://www.irstea.fr)

**Agence Française pour la Biodiversité**

Hall C – Le Nadar  
5, square Félix Nadar  
94300 Vincennes

**01 45 14 36 00**

[www.afbiodiversite.fr](http://www.afbiodiversite.fr)