

Effet du cuivre sur la structure et le fonctionnement des écosystèmes aquatiques

Sandrine Joachim, Anne Morin et Éric Thybaud

Comme annoncé lors du lancement de cette nouvelle rubrique le mois dernier, nous poursuivons la présentation des problématiques liées au règlement REACH en abordant ici la caractérisation du danger environnemental à travers l'étude de l'écotoxicité du cuivre dans le milieu aquatique.

Le cuivre est un métal très employé dans de nombreux secteurs industriels (15 millions de tonnes par an dans le monde). Les câbles électriques et les applications électroniques représentent la majeure partie de son utilisation ($9,75 \times 10^6$ t/an). Les autres secteurs concernés sont la construction, la plomberie, l'équipement, les industries d'alliage, de peinture, de traitement du bois, mais aussi l'agriculture pour laquelle le cuivre sert fréquemment de fongicide, algicide, bactéricide, herbicide et molluscicide dans les milieux aquatiques.

Le cuivre est un métal essentiel, toxique à faible et à forte dose. Sa grande utilisation dans des usages dispersifs et sa toxicité connue pour de nombreux organismes ont tout naturellement conduit l'INERIS à évaluer les risques pour les écosystèmes aquatiques liés à la contamination par ce métal.

Outils utilisés

Une étude en condition semi-naturelle a donc été réalisée à l'aide de rivières expérimentales ou mésocosmes lotiques⁽¹⁾ (voir encadré p. 58). L'intérêt de ces mésocosmes tient essentiellement au fait qu'ils combinent un certain réalisme écologique par la présence des principaux éléments constitutifs des écosystèmes naturels (sédiments, bactéries, champignons, périphyton⁽²⁾, phytoplancton, macrophytes, invertébrés, poissons, etc.) et le contrôle des paramètres

abiotiques et biotiques. Ces installations permettent d'étudier les effets des polluants à différents niveaux d'organisation biologique : organismes, populations, communautés et écosystème.

Pour cette étude, douze rivières artificielles ont été utilisées, chacune de vingt mètres de long et un mètre de large (figure 1). Le cuivre a été administré en continu sous forme de sulfate de cuivre à trois concentrations nominales (5, 25 et 75 $\mu\text{g/L}$ de cuivre dissous) par groupe de trois réplicats. Trois témoins ont également été mis en place.

Les études ont concerné :

- les effets du cuivre sur la structure des communautés de phytoplancton, de périphyton (en collaboration avec l'UMR 5245 « Écologie fonctionnelle » de Toulouse), de macrophytes, de zooplancton, de macroinvertébrés, de champignons aquatiques en collaboration avec l'UMR 5245, ainsi que sur une population de poissons, l'épinoche à trois épines (*Gasterosteus aculeatus*) ;
- les effets sur le fonctionnement de l'écosystème en étudiant les effets du cuivre sur la décomposition des litières (en collaboration avec l'UMR 5245) d'une part, et par une approche par modélisation qualitative des effets indirects du cuivre au sein du réseau trophique de l'écosystème en collaboration avec l'UMR 7625 « Fonctionnement et évolution des écosystèmes » de l'ENS de Paris d'autre part.



Figure 1 - La plateforme mésocosmes de l'INERIS.

Résultats

À partir d'une concentration de 25 $\mu\text{g/L}$, une diminution en abondance a été observée pour plusieurs taxons⁽³⁾ de diatomées (*Cocconeis sp.*, *Gomphonema sp.*), de macrophytes (*Lemna minor*, *Nasturtium officinale*), de champignons aquatiques (*Clavariopsis aquatica*), de zooplancton (*Mytilinia sp.*, *Trichocerca sp.*) et de macroinvertébrés (*Lymnaea sp.*, *Gammarus pulex*). Ces effets « directs » se sont ensuite propagés au sein des communautés auxquelles ces espèces appartiennent, y provoquant des modifications de leur abondance relative. Ainsi, une augmentation en abondance de plusieurs taxons a été constatée (*Nitzschia sp.* chez les diatomées, *Callitriche platycarpa* chez les macrophytes, *Trochosphaerae* chez le zooplancton, *Chironomidae* chez les invertébrés). Pour chaque communauté, l'analyse des modifications structurales a été

existantes (793/93/CE), produits biocides (98/8/CE) et phytosanitaires (91/414/CE) prennent en compte l'ensemble des résultats d'essais d'écotoxicité aquatiques monospécifiques et des études en mésocosmes disponibles pour le cuivre, pour en déduire une PNEC. Les résultats de la présente étude en mésocosme et notamment la NOEAEC ont été utilisés dans la détermination de ces PNEC.

Notes et références

- (1) *Lotique* : désigne le biotope (ou biocénose) des eaux courantes (Parent S., *Dictionnaire de l'environnement*, Broquet, 1990).
- (2) *Périphyton* : ensemble des organismes aquatiques qui vivent fixés à la surface des plantes ou des objets immergés dans les cours d'eau ou dans les lacs (Parent S., *Dictionnaire de l'environnement*, Broquet, 1990).
- (3) *Taxon* : groupe d'organismes vivants qui descendent d'un même ancêtre et qui ont certains caractères communs. Les embranchements, classes, ordres, familles, espèces... sont des taxons (Futura-Sciences.com).
- [1] Van den Brink P.J., Ter Braak C.J.F., Principal response curves: analysis of time-dependent multivariate responses of a biological community to stress, *Environ. Toxicol. Chem.*, 1999, 18, p. 138.
- [2] Roussel H., Ten-Hage L., Le Cohu R., Joachim S., Gauthier L., Bonzom J.-M., A long-term copper exposure on freshwater ecosystem using lotic mesocosms: primary producers community responses, *Aquatic Toxicology*, 2007, 81(2), p. 168.
- [3] Roussel H., Joachim S., Bonzom J.-M., Gauthier L., A long-term copper exposure on freshwater ecosystem using lotic mesocosms: invertebrates community responses, *Aquatic Toxicology* (à paraître).
- [4] Roussel H., Joachim S., Lamothe S., Palluel O., Gauthier L., Bonzom J.-M., A long-term copper exposure on freshwater ecosystem using lotic mesocosms: individual and population responses of three-spined sticklebacks (*Gasterosteus aculeatus*), *Aquatic Toxicology*, 2007, 82(4), p. 272.
- [5] Roussel H., Chauvet E., Bonzom J.-M., Alteration of leaf decomposition process in copper contaminated freshwater mesocosms, *Environ. Toxicol. Chem.*, 2008, 27(3), p. 637.

- [6] Roussel H., Chauvet E., Joachim S., Bonzom J.-M., Structural and functional approaches to assess leaf decomposer communities' responses to copper exposure in experimental stream (soumis au *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*).
- [7] Roussel H., Hulot F., Joachim S., Gauthier L., Bonzom J.-M., Food web model to investigate copper toxicity on freshwater ecosystems (en cours de rédaction).
- [8] *Guidance document on aquatic ecotoxicology in the context of the Directive 91/414/EEC*, European Commission, Health & Consumer Protection Directorate-General, SANCO, Santé des Consommateurs, 2002.



S. Joachim



A. Morin



E. Thybaud

Sandrine Joachim est ingénieur écotoxicologue (Unité Écotoxicologie *in vitro* et *in vivo*, pôle Dangers et Impacts sur le Vivant), **Anne Morin** est coordinatrice des programmes qualité des eaux, et **Éric Thybaud** est responsable du pôle Dangers et Impacts sur le Vivant, à l'INERIS*.

* INERIS, Parc technologique Alata BP 2, 60550 Verneuil-en-Halatte.

Courriels : sandrine.joachim@ineris.fr, anne.morin@ineris.fr, eric.thybaud@ineris.fr.

Les fiches toxicologiques et environnementales de l'INERIS

Les évaluations des risques liés aux substances chimiques, résultant d'expositions longues à faibles doses, qui doivent notamment être réalisées dans le cadre de l'étude des sols pollués ou des études d'impact des installations classées pour l'environnement (ICPE), sont réalisées à partir de données de références physico-chimiques, toxicologiques, écotoxicologiques, analytiques et réglementaires caractérisant les substances chimiques en cause.

C'est dans cette optique que le Ministère en charge des questions relatives à l'écologie et au développement durable a souhaité mettre à disposition des évaluateurs de risques, et plus généralement de tous les acteurs intéressés par l'évaluation de ces risques, un ensemble de « fiches de données toxicologiques et environnementales ». Depuis 1999, l'INERIS est missionné pour fournir cet outil opérationnel rassemblant les données et informations techniques, facilitant ainsi le travail d'évaluation des risques.

Ces fiches de données toxicologiques et environnementales sont principalement réalisées à partir des informations disponibles et reconnues, à caractère scientifique ou réglementaire, telles que les monographies publiées par des organismes de renommée internationale (International Agency for Research on Cancer - IARC, Agency for Toxic Substances and Disease Registry - ATSDR, Organisation mondiale de la Santé - OMS...). Toutefois, des données récentes produites par des auteurs indépendants connus et reconnus sont également utilisées. Elles associent des données de la littérature concernant les propriétés intrinsèques des substances à des outils d'évaluation des risques tels que les concentrations sans effet sur l'environnement (PNEC : « predicted non effect concentration ») et les valeurs toxicologiques de référence (VTR), avec les choix préconisés par l'INERIS. Un programme de révision des fiches a été initié afin de les remettre entièrement à jour dans les années à venir.

À ce jour, 73 fiches sont en libre accès sur le portail chimique du site Internet de l'INERIS* : acénaphthène, acétaldéhyde, acide 2,4,5-trichlorophénoxyacétique, acide fluorhydrique, aldrine, aluminium et dérivés, ammoniac, anthracène, antimoine et dérivés, arsenic et dérivés inorganiques, benzaldéhyde, benzène, benzo[a]pyrène, benzo[b]fluoranthène, benzo[g,h,i]pérylène, benzo[k]fluoranthène, 1,3-butadiène, cadmium et dérivés, chlordane, chlorobenzène, chloroforme, chlorure de méthylène, chlorure de vinyle, chrome et dérivés, chrysène, cyanures et dérivés, cobalt et dérivés, cuivre et dérivés, dibenzo[a,h]anthracène, 3,4-dichloroaniline, 1,4-dichlorobenzène, 1,2-dichloroéthane, 1,1-dichloroéthylène, 1,2-dichloroéthylène, 2,4-dichlorophénol, dieldrine, dioxines, dioxyde de soufre, éthylbenzène, fluoranthène, fluorène, formaldéhyde, hexachlorobenzène, indéno[1,2,3-c,d]pyrène, lindane, manganèse et dérivés, mercure et dérivés, MTBE (éther de méthyle et de butyle tertiaire), naphtalène, nickel et dérivés, oxydes d'azote, oxydes de tributyle étain, ozone, pentachlorophénol, phénanthrène, phénol, platine - sels et complexes, plomb et dérivés, polychlorobiphényles, pyrène, sélénium et dérivés, styrène, sulfure d'hydrogène, 1,1,2,2-tétrachloroéthane, tétrachlorure de carbone, tétrachloroéthylène, toluène, trichlorobenzènes, trichloroéthylène, 2,4,5-trichlorophénol, 2,4,6-trichlorophénol, *o*-, *m*-, *p*-xylènes et leurs mélanges, zinc et dérivés.

Ces fiches sont le fruit de la collaboration d'experts de l'INERIS appartenant à différents domaines (chimie analytique, sites et sols pollués, toxicologues, écotoxicologues) et sont soumis à une validation pour un groupe d'experts externes toxicologues et écotoxicologues, reconnus au niveau national. Cette étape de validation est primordiale pour maintenir la qualité des fiches.

* <http://chimie.ineris.fr/fr/index.php>.

Méthodes classiques de caractérisation des dangers environnementaux des substances chimiques

L'écotoxicité d'une substance chimique peut être évaluée à l'aide de diverses techniques allant du test monospécifique de laboratoire aux études en mésocosmes.

Les bioessais

De nombreuses espèces tant animales que végétales, de nombreux critères d'effets (mortalité, inhibition de croissance, immobilisation...) ont été étudiés par la communauté scientifique. Ces travaux ont conduit à la définition de divers bioessais de laboratoire dont un certain nombre sont maintenant normalisés.

L'objectif d'un bioessai est de déterminer, dans des conditions expérimentales précises, la concentration de toxique ou la durée d'exposition nécessaire pour entraîner un effet déterminé. Ils ont donc pour but de détecter et d'évaluer l'écotoxicité potentielle d'une substance chimique ou de tout autre échantillon vis-à-vis des organismes vivants.

Les essais normalisés, tant au niveau national qu'international (AFNOR, ISO, UE, OCDE), présentent un certain nombre de caractéristiques communes : leur reconnaissance par la communauté scientifique, leur capacité à prédire les effets d'une grande variété de substances sur des organismes différents, leur reproductibilité interlaboratoire, leur sensibilité, et enfin leur facilité de réalisation et leur coût modéré.

Leur réalisme « écologique » est quant à lui beaucoup plus discuté, ces bioessais étant réalisés dans des conditions d'environnement conventionnelles (température constante, photopériode contrôlée, milieu artificiel...) souvent très éloignées des conditions environnementales naturelles.

Compte tenu de la grande diversité des espèces animales et végétales dans les écosystèmes aquatiques et terrestres, les essais d'écotoxicité ont été développés vis-à-vis d'organismes représentant différents niveaux trophiques : producteurs primaires (assurant leur développement à partir du gaz carbonique, de l'eau et des sels minéraux et utilisant la lumière comme source d'énergie), consommateurs primaires (herbivores), secondaires (carnivores) et décomposeurs (utilisant la matière organique morte dont ils assurent une minéralisation progressive).

Les microcosmes

Les micro-écosystèmes ou microcosmes ont pour but de reproduire, à l'échelle du laboratoire, un écosystème naturel simplifié possédant un nombre réduit d'espèces caractéristiques des principaux niveaux trophiques. La complexité et la taille de ces dispositifs peuvent aller de la simple boîte de Petri ou du bécquet jusqu'à l'aquarium de plusieurs centaines de litres.

Ils peuvent être purement aquatiques ou terrestres, ou mixtes. À l'heure actuelle, il n'existe pas de microcosmes « standards » normalisés.

Ces systèmes permettent d'étudier les processus de dégradation des substances chimiques dans l'environnement, leur devenir ou leurs effets écotoxicologiques.

Ceux-ci sont estimés de façon plus réaliste que lors des tests de toxicité car les microcosmes permettent de tenir compte des altérations possibles



Analyse des paramètres dans un mésocosme (INERIS).

du potentiel toxique d'une substance, en particulier des phénomènes d'adsorption ou de biodégradation.

Les mésocosmes

En 1984, Odum fut le premier à proposer le terme mésocosme pour définir les études qui se situaient, au niveau de la taille, entre les études de laboratoire (microcosmes) et celles de terrain (macrocosmes).

Les mésocosmes sont définis comme des écosystèmes artificiels placés dans des conditions environnementales naturelles.

L'utilisation de systèmes expérimentaux de type mésocosmes peut faciliter la mise en place de scénarios beaucoup plus réalistes du point de vue écologique que les systèmes de laboratoire, tout en permettant de mieux connaître, voire de minimiser, les variations de nombreux paramètres, ce qui facilite l'interprétation de l'éventuelle réponse de certains d'entre eux suite à l'introduction de polluants. Ces systèmes peuvent permettre d'évaluer l'impact des perturbations causées par les échantillons testés à la fois sur des paramètres structuraux et sur des paramètres fonctionnels des écosystèmes.

Comparaison des différentes techniques

Les principaux avantages et inconvénients des différentes méthodes d'études en écotoxicologie décrites précédemment sont présentés dans le tableau ci-dessous.

Technique	Avantages	Inconvénients
Tests de toxicité	<ul style="list-style-type: none"> - faible coût - standardisables - réponses quantifiables - simples à utiliser - indispensables pour le screening - répétabilité 	<ul style="list-style-type: none"> - difficulté pour extrapoler les réponses au niveau de l'écosystème - problème du choix de l'espèce test - simplification excessive des conditions environnementales
Microcosmes	<ul style="list-style-type: none"> - possibilités de suivre et de modéliser le devenir, la biodégradation et la bioaccumulation des toxiques - prise en compte des composantes abiotiques (sédiments par exemple) - en cours de standardisation 	<ul style="list-style-type: none"> - reproductibilité limitée - peu utilisables pour les études à long terme
Mésocosmes	<ul style="list-style-type: none"> - réalisme important - étude simultanée du devenir des substances et de leurs effets écotoxicologiques - possibilités de validation pour prédire les effets dans les écosystèmes naturels - contrôle du niveau de contamination - simplification des communautés - validation des modèles prédictifs - possibilités d'études à long terme - mise en évidence des processus écologiques - en cours de standardisation 	<ul style="list-style-type: none"> - coût - peu reproductible - absence de contrôle de certains paramètres - parfois trop grande complexité pour interpréter les résultats - taille limitée