

Note

Potentiels d'utilisation des macrophytes pour réduire l'impact des industries sur les milieux aquatiques européens

Les macrophytes sont de plus en plus exploités pour atteindre les bons états chimique et écologique recommandés des masses d'eau européennes. Mais quelles sont les particularités des macrophytes en tant qu'outil de bio-surveillance ? Et quelles nouvelles informations sont apportées par la recherche quant à leur potentiel de réduction d'écotoxicité ?

Durant le vingtième siècle, la pression anthropique sur les cours d'eau a augmenté de façon drastique sur l'ensemble du territoire des États membres de l'Union européenne, avec l'expansion des industries conduisant à l'augmentation de la contamination de l'eau et des sédiments. Pour être en accord avec la réglementation, les États membres doivent mettre en œuvre les mesures adéquates pour l'atteinte des bons états chimique et écologique des masses d'eau d'ici 2015. Les effluents industriels sont caractérisés comme étant des mélanges complexes de contaminants aux concentrations variables, et ces dernières décennies, des progrès importants ont été réalisés pour leur traitement au moyen de systèmes physico-chimiques ou biologiques.

Il apparaît néanmoins que ces systèmes ne sont pas toujours suffisants pour permettre d'atteindre les objectifs de bons états des masses d'eau lorsqu'elles sont localisées à l'aval des bassins versants industrialisés. En effet, dans un mélange de xénobiotiques, même si les teneurs en polluants prises individuellement respectent les seuils réglementaires, la conjugaison de chacun de ces contaminants peut aboutir à une toxicité pour les organismes présents dans le milieu. De nouveaux outils et critères restent à concevoir et définir pour renforcer la gestion des eaux au niveau des bassins versants industrialisés afin de réduire l'impact des contaminants sur la biodiversité et les fonctionnalités écologiques des écosystèmes aquatiques. Il s'agit d'une part, de compléter l'approche chimique avec une approche écotoxicologique afin d'améliorer l'évaluation de la qualité des effluents rejetés au milieu et d'autre part, d'affiner le traitement des effluents industriels quand cela s'avère nécessaire.

Les macrophytes possèdent des capacités de bio-indication et de phytoremédiation prometteuses pour ces deux types d'application et il revient aux chercheurs de proposer des outils opérationnels dans les années à venir.

Potentiel d'utilisation des macrophytes en tant qu'outils de bio-surveillance des effluents industriels

À ce jour, les industries des États membres ne réalisent pas un suivi de la qualité écologique des effluents qu'ils rejettent au milieu naturel, car il n'existe pas d'outil à la fois fiable et simple d'utilisation. Aux États-Unis, l'Agence de protection de l'environnement (US EPA) a conçu les méthodes de test WET (*Whole Effluent Toxicity*) qui permettent d'estimer la toxicité aiguë ou chronique des effluents. Ces tests consistent à mesurer les effets biologiques (ex. : survie, croissance, reproduction) sur des organismes aquatiques exposés à des effluents, mais requièrent des équipements de laboratoire et des expérimentations *ex situ*. Par ailleurs, en Europe, plusieurs organismes tels que les macro-invertébrés, les bryophytes, les moules, les daphnies, les lichens, les micro-algues, les poissons, les bactéries ou les hélophytes, ont déjà été utilisés comme outils de bio-surveillance au sein des masses d'eau. Parmi ces organismes, les plantes aquatiques sont utilisées depuis des décennies dans l'évaluation de la qualité de l'eau en milieu naturel, notamment sous forme d'indices basés sur les communautés naturelles de macrophytes (ex. : IBMR, indice biologique macrophytique en rivière).

L'utilisation des macrophytes en tant que bio-indicateurs en contexte industriel s'avère également appropriée,



❶ Assainissement non collectif par filtre planté de macrophytes près de l'Isle sur la Sorgue mis en place par la société Recycl'eau (avril 2011) : filtre horizontal utilisant une diversité d'hélophytes en aval d'un filtre planté vertical.

d'une part, car les plantes intègrent les données temporelles, spatiales, chimiques, physiques et biologiques de l'environnement et d'autre part, car de simples mesures basées sur des observations morphologiques et/ou physiologiques peuvent retranscrire les effets délétères liés à l'exposition à des contaminants. Il a notamment été montré que les macrophytes présentaient des réponses multi-facettes en présence de mélanges de polluants qui dépendent de l'espèce exposée et des caractéristiques de l'effluent (la concentration en polluants, leur type chimique et les interactions potentielles). Ainsi, les macrophytes sont des organismes adaptés pour renseigner sur la qualité écologique des effluents rejetés dans les milieux où ils se développent naturellement, de la même manière que les plantes alimentaires telles que *Lactuca sativa* ou *Allium cepa* le sont pour renseigner sur l'écotoxicité des sols agricoles.

Dans ce contexte, un nouvel outil – dénommé « index de développement des hélophytes » (IDH) – a été mis au point (en conditions contrôlées), afin de suivre l'écotoxicité des effluents industriels contenant des mélanges de micropolluants organiques (hydrocarbures, détergents, etc.) et de métaux (arsenic, cadmium, cuivre, plomb, zinc, etc.). Cet outil utilise cinq espèces d'hélophytes communément rencontrées dans les milieux aquatiques européens (*Alisma lanceolatum*, *Carex cuprina*, *Epi-lobium hirsutum*, *Iris pseudacorus*, *Juncus inflexus*) et nécessite l'implantation de trois bassins (d'environ 1 m² chacun) sur le site industriel. Cet outil présente l'avantage d'être utilisable en routine car le suivi des plantes

peut être réalisé par un non-spécialiste formé à son utilisation. Néanmoins, avant sa généralisation, il est nécessaire d'accumuler des données *in situ* pour valider la méthode sous diverses conditions environnementales et de contamination.

Potentiel d'utilisation des macrophytes pour le traitement des effluents industriels

Les filtres plantés sont des systèmes d'ingénierie écologique conçus pour exploiter les processus naturels impliquant la végétation et les communautés de micro-organismes associés pour traiter les eaux usées (photo ❶). Depuis plusieurs années, des recherches sont notamment menées sur l'accumulation des métaux lourds par les macrophytes. Certains de ces végétaux possèdent d'intéressantes capacités de bioaccumulation parmi lesquels des plantes flottantes comme la fougère asiatique *Azolla pinnata*, la jacinthe d'eau *Eichhornia crassipes*, les deux lentilles cosmopolites *Lemna minor* et *Spirodela poly-rhiza*, la laitue d'eau tropicale *Pistia stratiotes* et la salvinie sud-américaine *Salvinia herzogii*. De même, parmi les bioaccumulateurs aquatiques sont retrouvés le roseau hélophyte *Typha latifolia* des régions tempérées, et des hydrophytes cosmopolites comme le cornifle *Ceratophyllum demersum*, *Hydrilla verticillata* et les potamo-*Potamogeton crispus* et *Potamogeton pectinatus*. De nombreux métaux peuvent être accumulés par ces macrophytes comme le baryum, le cadmium, le chrome, le cobalt, le cuivre, le fer, le manganèse, le mercure, le nickel, le plomb, le titane et le zinc.

▶ Néanmoins, la plupart de ces macrophytes sont exotiques, peuvent présenter un caractère invasif et ne pourraient faire l'objet d'une utilisation à proximité des écosystèmes aquatiques européens au risque de modifier les communautés de plantes natives. Étant donné que la conservation de la biodiversité est devenue une priorité, il est important de porter les efforts sur l'évaluation des capacités phytoremédiatrices des macrophytes autochtones des milieux aquatiques européens afin de combiner objectifs de phytoremédiation et conservation de la biodiversité. Afin d'évaluer les capacités de bioaccumulation d'un macrophyte (photo 2), il est nécessaire d'en déterminer son facteur de bioconcentration (rapport de la teneur en éléments métalliques dans le végétal sur celle de l'eau). Pour certains métaux, lorsque cet indice dépasse la valeur de 1 000, la plante peut être considérée comme hyper-accumulatrice. De grandes disparités existent selon l'élément métallique et le macrophyte

2 Prélèvements sur le bassin autoroutier de Grans : des échantillons d'eau, de sédiments et de macrophytes sont collectés pour évaluer la bioaccumulation de ces macrophytes en déterminant leur facteur de bioconcentration, c'est-à-dire le rapport de la teneur en éléments métalliques dans le végétal sur celle de l'eau ou du sédiment.



considérés. Au sein d'une même espèce, des différences peuvent également être notées entre les populations (écotypes, variétés, etc.). À titre d'exemple pour le cadmium (métal extrêmement toxique pour le règne du vivant), cet indice est variable chez *H. verticillata* et dépendant de la teneur en métal dans son environnement immédiat : il atteint un maximum de 3 281 en présence de 1 mg.L⁻¹ de cadmium. De même, chez *Hydrocotyle umbellata*, celui-ci atteint 7 173 en présence de 0,2 mg.L⁻¹ de cadmium. Chez cette espèce, des différences sont observées selon la nature du métal avec un facteur de bioconcentration vingt-neuf fois supérieur pour le cuivre que pour le cadmium. À l'inverse, *E. crassipes* accumule trois à quatre fois plus de cadmium que de cuivre. Plus récemment, des facteurs de bioconcentration importants ont été mesurés en France chez une espèce autochtone, *Myriophyllum alterniflorum* : 10 377 pour le cadmium et 226 024 pour le cuivre. Ces valeurs d'indice sont proches de celles mesurées chez l'exotique *P. stratiotes*, utilisée en Amérique du Nord dans les eaux courantes pour la phytoextraction d'éléments contaminants. Après sélection du génotype sauvage le plus bioaccumulateur chez *M. alterniflorum*, la micro-propagation (multiplication végétative *in vitro*) de cette souche a été mise au point afin de réintroduire *in situ* des herbiers d'une centaine de clones (à l'instar de carrés de pelouse) pour réaliser efficacement la phytoremédiation de sites pollués tout en prenant en compte la biodiversité locale.

Parmi les études sur la bioaccumulation des plantes aquatiques, il est important de rappeler que la plupart furent menées en laboratoire en utilisant des milieux de culture enrichis en métaux (jusqu'à plusieurs mg.L⁻¹). Les résultats issus de ces expérimentations sont généralement très impressionnants avec de hauts niveaux d'absorption en métaux (de 71 à 95 % des métaux environnants pour des teneurs de 2 mg.L⁻¹ en cadmium, chrome, cuivre, fer et zinc avec *E. crassipes*, *P. stratiotes* et *S. polyrrhiza* en une dizaine de jours). En conditions *in situ*, ces capacités phytoremédiatrices et dépolluantes sont toujours observées, mais sont plus ténues car les apports métalliques sont moindres et les conditions nutritionnelles moins favorables. Par leur rôle d'extraction de polluants, ces macrophytes stockent en grandes proportions dans leurs tissus certains métaux lourds, qui pourraient être valorisés ultérieurement une fois les individus récoltés. En tant que voie d'avenir, le traitement de cette biomasse végétale dans l'industrie du recyclage permettrait de récupérer les métaux immobilisés.

Les systèmes de phytoépuration des eaux véhiculant une pollution d'origine industrielle (eaux de process, eaux pluviales, etc.), bien que basés sur la reproduction de processus naturels, demeurent des systèmes d'assainissement (que l'on peut qualifier de technotopes) devant être suivis et gérés comme tels. Au fil du temps, les métaux s'accumulent dans le substrat par des phénomènes d'ordres chimique, physique et mécanique, jusqu'à ce que ce dernier soit saturé. À ce stade, le substrat devra être excavé et remplacé afin de renouveler sa capacité de rétention des métaux. Le faucardage ou l'arrachage régulier des plantes accumulatrices de métaux peut accroître la longévité du substrat. Ces opérations peuvent être facilitées par la compartimentation du système (e.g. un bassin conçu spécifiquement pour le traitement des

métaux, un autre pour le traitement des micropolluants organiques) et par la prise en compte des contraintes de suivi et de gestion du substrat et des plantes dès la phase de conception (e.g. plantation d'espèces bioindicatrices, mise en place de puits de mesures, utilisation de tapis flottants plantés d'hélophytes permettant l'export de la biomasse totale, etc.). Les plantes et substrat contaminés devront cependant être gérés comme des déchets et évacués dans des centres de traitement de déchets, à moins de pouvoir trouver des débouchés économiquement viables de valorisation ou de recyclage.

Conclusion

Dans le cadre de la directive cadre sur l'eau, et afin de contribuer à atteindre ou à maintenir le bon état écologique des masses d'eau, l'utilisation des macrophytes autochtones à la fois pour l'évaluation *in situ* de l'éco-toxicité des effluents industriels mais aussi pour réduire la concentration en métaux de ces derniers, est donc fort prometteuse. Il appartient aux scientifiques de poursuivre les expérimentations et les recherches en ce sens et de travailler en collaboration avec les bureaux d'études et gestionnaires à l'obtention d'outils adaptés et simples d'utilisation. Enfin, il est nécessaire de souligner que les performances des macrophytes sont d'autant plus intéressantes que la dégradation des écosystèmes aquatiques est un problème généralisé et que les traitements physico-chimiques pour dépolluer les eaux courantes ne peuvent être appliqués sur de grandes surfaces en aval des zones industrielles. ■

Les auteurs

Anna GUITTONNY-PHILIPPE

Institut méditerranéen de biodiversité et d'écologie marine et continentale (IMBE)
Aix Marseille Université-CNRS-IRD-Avignon Université
Campus Saint Charles – Case 4 – Bât. Sciences Naturelles
3 place Victor Hugo – F-13331 Marseille Cedex 03 – France

ECO-MED SARL – Tour Méditerranée
65 Avenue Jules Cantini
F-13298 Marseille Cedex 20 – France

✉ anna.philippe@imbe.fr

Véronique MASOTTI et Isabelle LAFFONT-SCHWOB

Institut méditerranéen de biodiversité et d'écologie marine et continentale (IMBE)
Aix Marseille Université-CNRS-IRD-Avignon Université
Campus Saint Charles – Case 4 – Bât. Sciences Naturelles
3 place Victor Hugo – F-13331 Marseille Cedex 03 – France

✉ veronique.masotti@imbe.fr

✉ isabelle.laffont-schwob@imbe.fr

David DELMAIL

Université de Rennes 1 (Université européenne de Bretagne)
CNRS UMR 6226 – Institut des sciences chimiques de Rennes (ISCR)

2 av. du Pr. Léon Bernard
F-35043 Rennes Cedex – France

✉ david.demail@univ-rennes1.fr

Julien VIGLIONE

ECO-MED SARL – Tour Méditerranée
65 Avenue Jules Cantini
F-13298 Marseille Cedex 20 – France

✉ j.viglione@ecommed.fr

EN SAVOIR PLUS...

- ✉ **BAE, M.J., PARK, Y.S.**, 2014, Biological early warning system based on the responses of aquatic organisms to disturbances: A review, *Science of the Total Environment*, n° 466-467, p. 635-649.
- ✉ **DELMAIL, D., LABROUSSE, P., HOURDIN, P., LARCHER, L., MOESCH, C., BOTINEAU, M.**, 2013, Micropropagation of *Myriophyllum alterniflorum* (Haloragaceae) for stream rehabilitation: first in vitro culture and reintroduction assays of a heavy-metal hyperaccumulator immersed macrophyte, *International Journal of Phytoremediation*, n° 15, p. 647-662.
- ✉ **GUITTONNY-PHILIPPE, A., MASOTTI, V., HÖHENER, P., BOUDENNE, J.L., VIGLIONE, J., LAFFONT-SCHWOB, I.**, 2014, Constructed wetlands to reduce metal pollution from industrial catchments in aquatic Mediterranean ecosystems: A review to overcome obstacles and suggest potential solutions, *Environment International*, n° 64, p. 1-16.
- ✉ **MENDONÇA, E., PICADO, A., PAIXÃO, S.M., SILVA, L., CUNHA, M.A., LEITÃO, S., MOURAB, I., CORTEZ, C., BRITO, F.**, 2009, Ecotoxicity tests in the environmental analysis of wastewater treatment plants: Case study in Portugal, *Journal of Hazardous Materials*, n° 163, p. 665-670.
- ✉ **MUNARON, D., HUBERT, M., GONZALEZ, J.-L., TAPIE, N., BUDZINSKI, H., GUYOMARCH, J., ANDRAL, B.**, 2013, *PEPS LAG : Projet échantillonneurs passifs pour la surveillance de la contamination chimique des lagunes méditerranéennes*, Rapport Ifremer RST/LER/LR 13-01, février 2013, 79 p., disponible sur : <http://archimer.ifremer.fr/doc/00134/24495/22522.pdf> (consulté le 3/12/2013).
- ✉ **ZHOU, Q., ZHANG, J., FU, J., SHI, J., JIANG, G.**, 2008, Biomonitoring: An appealing tool for assessment of metal pollution in the aquatic ecosystem, *Analytica Chimica Acta*, n° 606, p. 135-150.