

Les macrophytes sont-ils de bons candidats pour l'évaluation du succès d'une restauration ? L'exemple des anciens bras du Rhin reconnectés

Lors d'opérations de restauration comme celle menée dans la plaine d'Alsace pour reconnecter d'anciens bras latéraux du Rhin au cours principal, il convient de vérifier comment ces modifications affectent la biodiversité et fonctionnalité des milieux aquatiques. Pour cela, l'étude des macrophytes peut être tout à fait pertinente.



Les nombreux travaux d'aménagement hydraulique menés sur la plupart des grands fleuves européens ont fortement modifié et altéré la structure des habitats alluviaux et le fonctionnement hydro-géomorphologique du fleuve et de sa vallée avec la suppression des champs d'inondation, la déconnexion des bras latéraux et/ou des annexes hydrauliques du fleuve, la modification du pouvoir épurateur des zones alluviales, la diminution de la diversité des habitats et des espèces et par conséquent la perte de services écosystémiques. Or, depuis une trentaine d'années, la prise de conscience de l'ampleur de ces impacts négatifs a conduit les pays riverains des grands fleuves, comme le Rhin, à prendre une série de décisions dans le but de préserver et de restaurer la biodiversité de l'hydro-système fluvial tout en maintenant la possibilité pour les générations futures de bénéficier des apports de la nature et du capital naturel constitué par les milieux fluviaux. Ces décisions ont été concrétisées par la mise en place sur le Rhin de programmes d'action et de recherche, comme le programme d'action Rhin (1987-2000), IRMA (*Interreg Rhine-Meuse Activities*) et le programme Life-Nature « Rhin Vivant » (2002-2006). Ce dernier a permis, outre la définition d'« un référentiel des habitats naturels reconnus d'intérêt communautaire de la bande rhénane » (CSA¹ et ONF², 2004), la reconnexion de nombreux bras au cours principal.

Les objectifs des projets de restauration d'écosystèmes dégradés sont de reconstituer la structure et les processus qui leur permettent de retrouver leur fonctionnalité. Sur les grands fleuves, les projets ont souvent pour but de restaurer la connectivité longitudinale et latérale du corridor fluvial. Les suivis de sites restaurés, lorsqu'ils existent, montrent que les restaurations ont pu être des succès mais aussi des échecs. La question posée ici est : com-

ment évaluer le succès d'une opération de restauration ? Existe-t-il des indicateurs plus pertinents que d'autres ?

De nombreux groupes taxonomiques et syntaxonomiques ont été suivis dans le but d'évaluer les changements écologiques survenant après des travaux de restauration d'écosystèmes aquatiques, comme les macro-invertébrés, les poissons, les oiseaux et les communautés végétales. Les communautés végétales font partie des trois groupes syntaxonomiques privilégiés dans l'évaluation du succès de projets de restauration. L'intérêt de suivre les communautés végétales aquatiques réside dans le fait qu'elles participent à certaines fonctions écologiques, comme la rétention des nutriments et de sédiments, qu'elles ne sont pas mobiles, et qu'elles répondent à de nombreux facteurs locaux tels que la nature du substrat, la vitesse du courant, la lumière et la teneur de l'eau. Ces réponses justifient de leur rôle bio-indicateur du niveau trophique et/ou de la pollution organique de l'eau.

Dans la plaine du Rhin en Alsace, d'anciens bras du Rhin ont été reconnectés au cours principal. Les recherches se sont focalisées sur l'étude et l'analyse des processus de recolonisation et de la dynamique de la biodiversité dans ces bras restaurés. Elles ont débuté par une évaluation de l'état écologique avant la restauration de certains de ces bras (Trémolières, 2004). Elles se sont poursuivies par une analyse de l'efficacité et de la réussite des opérations de restauration au travers de l'indicateur « macrophytes aquatiques » (Meyer, 2012), avec l'objectif de montrer non seulement l'état instantané de la colonisation végétale, mais aussi la dynamique d'évolution des communautés de macrophytes.

1. CSA : Conservatoire des sites alsaciens.

2. ONF : Office national des forêts.

Ces travaux sur la restauration des bras morts du Rhin nous ont conduits à poser la question suivante : les macrophytes, déjà utilisés en bio-indication de la qualité de l'eau et du fonctionnement hydraulique, peuvent-

ils être des indicateurs du succès de la restauration ? La réponse à cette question s'appuie sur les recherches et observations de terrain menées dans le cadre des travaux cités précédemment.

1 MÉTHODOLOGIE

Des suivis de la végétation aquatique (identification des espèces et de leur abondance) ont été menés dans douze anciens bras du Rhin dans la plaine d'Alsace : neuf bras reconnectés au fleuve entre 1998 et 2006, et trois bras dits de référence, c'est-à-dire d'anciens bras du Rhin n'ayant jamais été déconnectés du cours principal (photo 1).

Des relevés phytosociologiques ont été effectués sur cinq transects transversaux situés dans les 200 premiers mètres après la connexion (figure 1), entre 2007 et 2011, et couplés à des mesures hydro-géomorphologiques (largeur et profondeur du bras, identification et cartographie des substrats, mesures du débit et de la vitesse du courant).

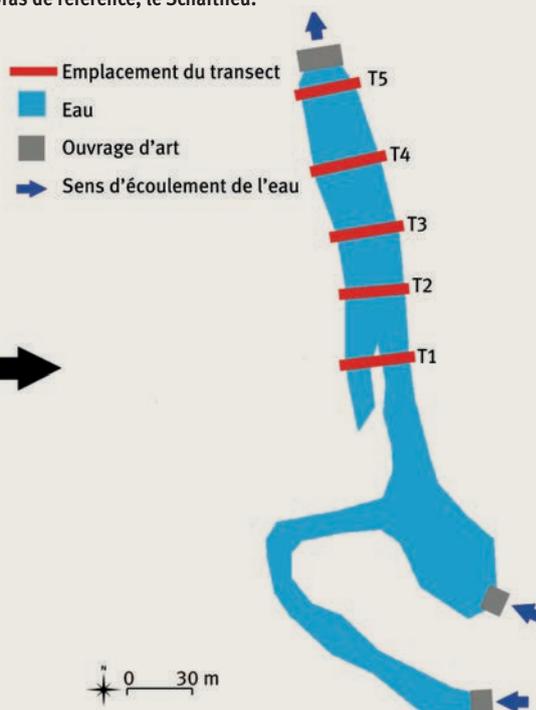
Les relations existant entre les compartiments eau-sédiment-plantes et l'influence de ces relations sur la recolonisation par les macrophytes ont été analysées au travers des mesures des teneurs en nutriments (P phosphore et N azote) dans l'eau, le sédiment et les principales espèces de macrophytes.

Nous avons aussi étudié les flux de diaspores (graines, rhizomes, fragments, bulbes, bourgeons, turions, etc.) dans les bras, flux pouvant ainsi participer à la recolonisation. Les stratégies de recolonisation ont été analysées au travers de treize traits biologiques : quatre traits morphologiques, comme la taille potentielle, la forme de croissance (non ancrée, ancrée avec feuilles flottantes, ancrée avec tissus de soutien...), cinq traits écologiques comme la tolérance aux variations d'humidité (résistance à l'exondation) ou le niveau trophique des espèces, et quatre traits liés à la reproduction et à la dispersion. L'évolution temporelle de ces traits dans les communautés de macrophytes a été suivie en couplant tableau de traits par espèce et composition floristique des communautés.



1 Le Schaftheu, un des trois bras de référence, situé sur l'île de Rhinau.

1 Localisation générale et emplacement des transects sur un des bras de référence, le Schaftheu.



Communautés végétales et dynamique de recolonisation

En 2011, après quatre années de suivi, trois communautés végétales ont été recensées dans les douze bras étudiés (figure 2). Deux de ces communautés sont caractérisées, l'une par des espèces eutrophes (*Elodea nuttallii*, *Ceratophyllum demersum*, *Myriophyllum spicatum*, *Potamogeton pectinatus* et *P. perfoliatus*), et l'autre par des espèces mésotrophes (*Berula erecta*, *Callitriche obtusangula* et *Sparganium emersum*). Elles ont été recensées à la fois dans les bras restaurés et dans les bras de référence. Trois bras se sont différenciés des autres, par l'installation d'une communauté d'espèces préférant des vitesses de courant fortes, indépendamment de leur statut trophique (*Ranunculus fluitans*, *Fontinalis antipyretica* et *Hildenbrandia rivularis*).

Ainsi un tiers des bras restaurés présente une communauté différente de celles retrouvées dans les bras de référence. La comparaison avec les sites de référence ne permet donc pas de conclure au succès de la restauration sur cette seule base.

Par ailleurs, le temps écoulé depuis le début de la restauration influence la phase de recolonisation, c'est-à-dire celle durant laquelle la communauté se reconstitue. Après cette phase, la communauté se stabilise et devient indépendante du temps écoulé depuis la restauration. La phase de recolonisation des bras restaurés par la végétation aquatique est un phénomène rapide, en particulier lorsque les conditions sont optimales (présence de

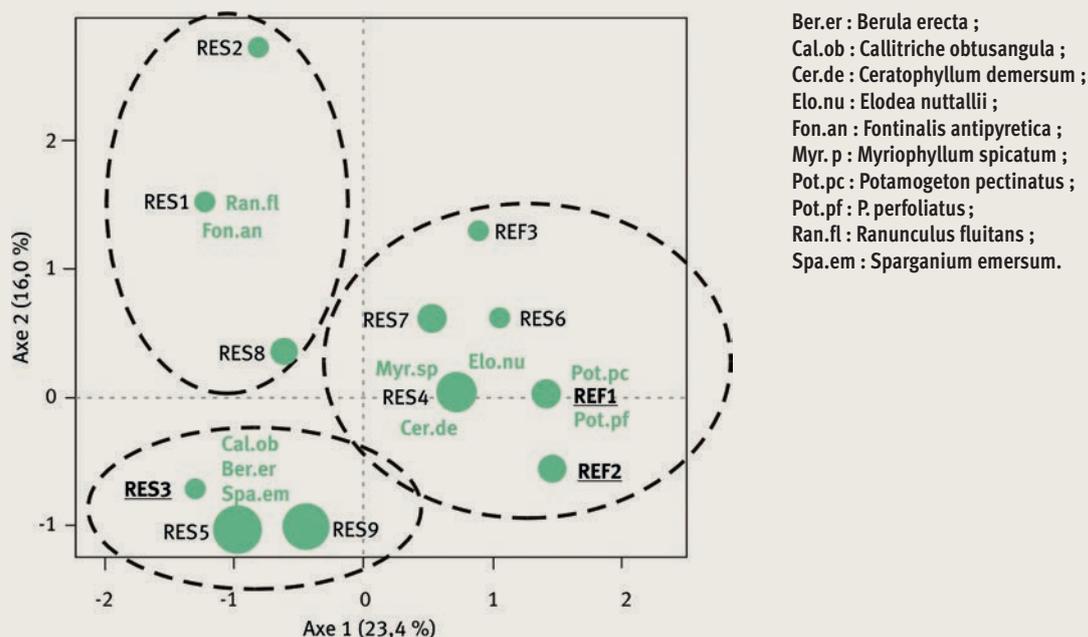
substrats adaptés, diaspores abondantes) et dure vraisemblablement moins de trois ans en moyenne. Ainsi Henry *et al.* (2002) ont montré que la reconnexion des bras du Rhône a provoqué une augmentation rapide de la richesse spécifique et du recouvrement végétal des macrophytes, ceci en moins de quatre ans après les travaux de restauration. L'utilisation des macrophytes comme un outil indicateur dans le cadre d'une comparaison avec des communautés de référence nécessite donc *a minima* un délai de trois ans.

Les macrophytes indicateurs de la trophie

La restauration d'une rivière peut provoquer des modifications du niveau trophique. Toutefois, on a vu que les communautés nouvellement installées ne répondaient pas uniquement aux variations du niveau trophique de l'eau. L'évaluation du niveau trophique réel nécessite de prendre en compte les trois compartiments : l'eau qui véhicule des nutriments solubles, le sédiment réservoir de nutriments et la plante bio-accumulatrice qui absorbe à partir de l'eau et/ou du sédiment et relargue ces éléments par décomposition et minéralisation de la matière organique.

La déconnexion des bras latéraux provoque généralement une oligotrophisation de l'eau par des apports d'eau souterraine pauvre en nutriments et la reconnexion assure un retour d'eau eutrophe en provenance du fleuve. La déconnexion a pu alors favoriser le développement des espèces mésotrophes (Henry *et al.*, 2002), alors que

2 Distribution des espèces (en vert foncé) et des bras (en gris et noir – REF bras de référence, RES bras restauré) dans le plan factoriel F1 x F2 d'une analyse des correspondances réalisée sur les données floristiques. La surface des points indique la richesse spécifique de chaque bras.



la reconnexion devrait provoquer le retour des espèces eutrophes. Dans les bras reconnectés au Rhin, le niveau trophique de l'eau varie faiblement, de mésotrophe à eutrophe selon les bras. En revanche on a observé une différence significative d'accumulation de nutriments dans les sédiments en lien avec la diversité des substrats selon les bras étudiés : un sédiment fin, argilo-limoneux, contient plus de nutriments susceptibles d'être relargués dans l'eau et/ou de matières organiques. Les bras aux sédiments riches en nutriments sont aussi les bras au couvert végétal et/ou à la richesse spécifique les plus élevés. Les espèces les plus abondantes, comme *Elodea nuttallii* et *Myriophyllum spicatum*, privilégient des sédiments fins propices à leur enracinement et riches en nutriments. D'autres macrophytes comme *Callitriche obtusangula* ralentissent la vitesse du courant et accentuent encore les dépôts de sédiments fins. Les interactions sédiments fins/macrophytes expliquent probablement les relations étroites observées entre les teneurs en nutriments dans le sédiment et celles des plantes, alors qu'elles n'existent pas ou peu entre eau et plante. Ainsi les teneurs en phosphore des plantes sont directement liées au phosphore biodisponible du sédiment.

On peut se poser la question du lien entre la capacité d'une espèce à accumuler des nutriments et sa vitesse de recolonisation. Aucune relation significative entre la teneur en nutriments de la plante et son recouvrement n'a pu être observée. Néanmoins, si on étudie le rapport N/P, on constate que les espèces aux rapports N/P les plus faibles sont les espèces les plus abondantes. Un rapport faible, inférieur à 10, indiquerait que l'azote est le facteur limitant de la croissance des macrophytes. Ainsi les espèces qui peuvent croître avec un rapport N/P faible seraient favorisées lorsque l'azote devient limitant.

Les macrophytes indicateurs des caractéristiques hydro-morphologiques

Alors que le niveau trophique des eaux est relativement comparable dans tous les bras, trois communautés différentes ont été observées dont deux se distinguent par l'exigence trophique des espèces. En fait, on a constaté que la communauté « eutrophe » colonise les bras larges et profonds avec une faible vitesse du courant, la communauté « rhéophile » occupe des bras peu profonds et étroits, avec une granulométrie grossière, une vitesse du courant forte et un ombrage important, tandis que la communauté « mésotrophe » colonise les bras présentant globalement des caractéristiques intermédiaires : ce sont des cours d'eau étroits et profonds avec une vitesse du courant moyenne, un ombrage fort, et une granulométrie plutôt grossière. Il apparaît que ce sont prioritairement les caractéristiques physiques des bras qui contrôlent la distribution des communautés.

L'influence des paramètres hydro-morphologiques sur la composition des communautés végétales nécessite de prendre en compte ces paramètres lors des projets de restauration dans les systèmes fluviaux. Quel que soit l'indicateur utilisé, une augmentation de l'hétérogénéité des habitats conduit à l'augmentation du nombre d'habitats, et donc de la richesse spécifique globale du système fluvial. Ainsi des rivières re-méandrées aux Pays-Bas et au Danemark présentent après une dizaine d'années

une richesse taxonomique et une abondance accrues des macro-invertébrés et/ou des macrophytes, richesse expliquée par une hétérogénéité (recréée) des substrats plus importante que celle de rivières similaires non restaurées (Lorenz *et al.*, 2009 ; Pedersen *et al.*, 2007).

Dispersion et propagation des diaspores

Outre les facteurs physico-chimiques, les facteurs biologiques tels que les apports de diaspores *via* la reconnexion pourraient faciliter la recolonisation du site nouvellement créé. On a donc vérifié si la composition des communautés pouvait être liée à la composition des flux de diaspores.

Les espèces non ancrées, telles que les lentilles d'eau (des Lemnides) et la fougère *Azolla filiculoides*, sont les espèces ayant la plus forte quantité de diaspores en dérive (84 % de l'ensemble des flux de diaspores). On a ensuite recensé quatre espèces bien représentées sur les sites étudiés, *Ranunculus fluitans*, *Elodea canadensis*, *E. nuttallii* et *Callitriche obtusangula*, avec une quantité élevée de diaspores en dérive (jusqu'à 25 000 diaspores/jour/tronçon), alors que cinq autres espèces également fréquentes, *Potamogeton berchtoldii*, *P. pectinatus*, *Ceratophyllum demersum*, *Myriophyllum spicatum*, *Cladophora* sp., ne présentent qu'une quantité moyenne à faible de diaspores en dérive (moins de 5 000 diaspores/jour/tronçon). Les espèces restantes ont des flux totaux inférieurs à 1 000 diaspores/jour/tronçon. Les bras avec les flux les plus importants sont aussi les bras avec la plus grande richesse spécifique de diaspores. On a noté que les flux amont et aval ont des compositions floristiques plus proches entre eux qu'avec la végétation établie. Par ailleurs, on a constaté que si la composition floristique des flux amont influence peu la composition des communautés, cette dernière influence la composition des flux aval. La végétation établie participe donc à la composition et à l'abondance des diaspores dans le flux aval. L'étude des flux de diaspores immédiatement après les travaux de reconnexion donne une indication des espèces de macrophytes susceptibles de recoloniser le nouveau milieu. En couplant l'étude des flux avec les caractéristiques hydro-morphologiques du bras restauré, il devient possible de modéliser et donc de prédire la communauté qui recolonisera le bras restauré.

Le rôle des banques de diaspores contenues dans les sédiments apparaît négligeable dans la recolonisation par rapport à celui des flux de diaspores transportées par l'eau. Néanmoins, des diaspores végétatives persistent au niveau du sédiment (rhizomes, bulbes) et participent ensuite à la stabilisation de la communauté « recolonisante ».

Les assemblages de traits biologiques

Les traits biologiques sont un outil de plus en plus privilégié dans l'étude des communautés. Ainsi certains traits biologiques sont maintenant intégrés dans le calcul d'un indice d'évaluation de l'état écologique des cours d'eau fondé sur les macro-invertébrés (nouvel indice I2M2). Les études des traits biologiques des macrophytes sont plus rares, et inexistantes dans les suivis post-restauration. L'analyse des assemblages de traits dans les bras permet

► de vérifier si la reconnexion peut favoriser certains traits biologiques au cours de la recolonisation végétale des bras restaurés, et de préciser les facteurs en cause.

Les espèces identifiées dans les communautés forment, à partir de leurs traits biologiques, quatre groupes d'espèces qui se différencient essentiellement par leur forme de croissance : héliophytes, hydrophytes strictes, amphiphytes et pleustophytes. Les quatre groupes sont présents dans tous les bras, mais l'abondance de chaque groupe dépend des caractéristiques hydro-morphologiques de ces bras. Ainsi, les bras de référence présentent trois assemblages distincts. Globalement les bras restaurés ont des assemblages de traits similaires à ceux des bras de référence. Cependant des assemblages originaux liés à une surabondance occasionnelle de certaines formes de croissance peuvent être observés. Par exemple, certains bras présentent certaines années une abondance accrue de pleustophytes, signe éventuel de l'absence de dynamique fluviale liée à des variations du débit et du niveau d'eau dans ces bras durant ces années. *A contrario*, la fréquence du trait de résistance aux exondations augmente dans les bras où des fluctuations de débit sont observées. L'étude des assemblages de traits biologiques au sein des communautés de macrophytes est une approche novatrice qui permet de définir des références, voire des objectifs de restauration, autrement que par la seule définition d'une liste d'espèces-cibles. De plus, les traits biologiques donnent des informations supplémentaires sur le retour des fonctions écologiques. Néanmoins, l'apport des traits biologiques dans des suivis post-restauration et/ou dans des calculs d'indice nécessiterait la mise en place d'une banque de données, à l'instar des banques créées pour les espèces terrestres, banque établissant les liens existants entre traits biologiques et fonctions écologiques.

Les macrophytes : des indicateurs de la restauration de la fonctionnalité écologique

La reconnexion de bras morts au fleuve est une modalité de restauration pour retrouver la continuité écologique au sein de l'hydrosystème fluvial. La fonctionnalité écologique s'évalue, dans ce contexte, par la reprise de la dynamique fluviale, la réinitialisation des transferts avec le cours actif, l'adaptation et/ou la recolonisation des espèces végétales et animales et des communautés proches des communautés-cibles.

Sur une période courte après la restauration, nous avons montré que les bras reconnectés au Rhin sont colonisés par des communautés de macrophytes relativement stables, proches des communautés-cibles définies dans les bras de référence. De plus la richesse spécifique des bras restaurés est comparable, voire dans certains cas, supérieure à celle des bras de référence. Les dynamiques saisonnières des nutriments dans les compartiments eau, sédiment et plantes, ainsi que les flux de diaspores, s'avèrent également similaires entre bras restaurés et bras de référence. Ces résultats révèlent une réinitialisation des transferts depuis le chenal actif. La reprise d'une dynamique fluviale liée à des variations du débit et du niveau d'eau est observée dans certains bras à travers l'évolution des assemblages de traits biologiques mais est peu efficace, les débits d'entrée étant encore trop faibles. Certaines fonctions n'ont pas été encore totalement rétablies, notamment la dynamique hydro-géomorphologique. La reconnexion a ainsi participé au rétablissement de quelques fonctions écologiques d'un système « endommagé ». Elle constitue une première étape dans l'amélioration de l'état écologique des systèmes fluviaux. Les macrophytes, du fait de leur rapidité d'installation, de leurs stratégies adaptatives développées au cours de la recolonisation et de leur capacité intégrative vis-à-vis des facteurs du milieu, notamment la dynamique de l'eau et des nutriments, semblent de bons candidats pour une évaluation du succès de l'opération de reconnexion des bras latéraux dans les hydrosystèmes fluviaux. ■

Les auteurs

Michèle TREMOLIERES, Albin MEYER et Isabelle COMBROUX

LIVE – Laboratoire « Image Ville Environnement »
UMR 7362 UdS/CNRS Institut de botanique
28 rue Goethe – F-67083 Strasbourg – France

✉ tremolie@unistra.fr

✉ meyer@unistra.fr

✉ combroux@unistra.fr

EN SAVOIR PLUS...

- 📖 HENRY, C.-P., AMOROS, C., ROSET, N., 2002, Restoration ecology of riverine wetlands: A 5-year post-operation survey on the Rhone River, France, *Ecological Engineering*, n° 18, p. 543-554.
- 📖 LORENZ, A.W., JAHNIG, S.C., HERING, D., 2009, Re-meandering German lowland streams: qualitative and quantitative effects of restoration measures on hydromorphology and macroinvertebrates, *Environmental Management*, n° 44, p. 745-754.
- 📖 MEYER, A., 2012, *Processus et dynamique de la recolonisation et de la biodiversité dans les bras du Rhin et autres cours d'eau restaurés de la Plaine d'Alsace après reconnexion*, Mémoire de thèse de l'Université de Strasbourg, 225 p.
- 📖 PEDERSEN, M.L., FRIBERG, N., SKRIVER, J., BAATTRUP-PEDERSEN, A., LARSEN, S.E., 2007, Restoration of Skjern River and its valley – Short-term effects on river habitats, macrophytes and macroinvertebrates, *Ecological Engineering*, n° 30, p. 145-156.
- 📖 TREMOLIERES, M., 2004, Les habitats aquatiques, in : CSA et ONF, 2004, *Référentiel des habitats reconnus d'intérêt communautaire de la bande rhénane: description, états de conservation et mesures de gestion, Programme LIFE Nature Conservation et restauration des habitats de la bande rhénane*, p. 61-111.