Les
RENCONTRES

synthèse

Évaluer la réponse des cours d'eau aux opérations de restauration écologique

Études de cas et enseignements pour le suivi et l'évaluation

Laurent Basilico et Anne Vivier

OFB
OFFICE FRANÇAIS DE LA BIODIVERSITÉ

Évaluer la réponse des cours d'eau aux opérations de restauration écologique

Études de cas et enseignements pour le suivi et l'évaluation

Synthèse de la journée d'échanges techniques organisée par l'OFB le 16 novembre 2021

Laurent Basilico et Anne Vivier

Cette synthèse est présentée en ligne sur le portail technique de l'OFB (https://professionnels.ofb.fr/fr/node/213) et référencée dans le portail documentaire partenarial sur l'eau et la biodiversité (www.documentation.eauetbiodiversite.fr).

Ce document constitue une synthèse des interventions et échanges de la journée d'échanges techniques consacrée à l'évaluation de la restauration hydromorphologique sur les cours d'eau et les milieux associés, ayant eu lieu le 16 novembre 2021 en visioconférence et ayant rassemblé près de 600 participants.

Cette journée d'échanges s'est appuyée sur le travail d'un comité de pilotage multi-partenarial, ayant mené un travail bibliographique important, ainsi que, pour certains retours d'expériences, des analyses de données spécifiques. Le comité de pilotage s'est attaché à sélectionner des évaluations robustes scientifiquement (suivis à long terme, plans d'échantillonnages reproductibles…) et diversifiées (protocoles, objectifs, types d'opérations de restauration…). Durant la journée, une place importante a été également consacrée aux échanges lors d'ateliers thématiques.

Le programme complet de la journée, les vidéos de présentation, ainsi que les supports des interventions sont disponibles en ligne : https://professionnels.ofb.fr/fr/node/1393

Contact :
Anne Vivier
Chargée de mission recherche Restauration des milieux
Direction de la recherche et de l'appui scientifique
Office français de la biodiversité
anne.vivier@ofb.gouv.fr

PRÉAMBULE

Effacement d'obstacle, reméandrage, recharge sédimentaire, contournement de plan d'eau… Depuis deux décennies, les opérations de restauration écologique se sont imposées comme un levier majeur au service de l'objectif de « bon état » des rivières, et pour la « reconquête » de leur biodiversité. Soutenue par les politiques publiques, portée sur les territoires par des réseaux d'acteurs déterminés et un socle de connaissances scientifiques et techniques de plus en plus solides, la restauration a gagné en maturité à mesure que se multipliaient les réalisations, les réussites, et parfois les déconvenues.

Alors que nombre de projets, en France, bénéficient aujourd'hui d'un recul temporel suffisant, le suivi des trajectoires écologiques qu'empruntent les milieux restaurés, et l'évaluation du chemin parcouru vers les objectifs de chaque projet, restent encore souvent les parents pauvres du champ de la restauration. Comment définir ces objectifs de façon à pouvoir, ensuite, en mesurer la bonne atteinte ? Quels paramètres, quels indicateurs faut-il suivre pour appréhender et quantifier la réponse du milieu à une opération donnée ? À quelle fréquence, sur combien de temps, pour quel budget ? Comment progresser vers la mise en œuvre de méthodes d'évaluation standardisées et comparables d'un site à l'autre ?

Consacrée à ces questions, la journée d'échanges techniques nationale proposée fin 2021 par l'Office français de la biodiversité (OFB) a rassemblé, en ligne, plus de 700 professionnels d'origines variées : gestionnaires de bassins versants, fédérations de pêche, collectivités, chercheurs, services de l'État… Largement appuyée sur une sélection de retours d'expériences, elle a constitué un moment privilégié d'émulation collective, vers l'avènement d'une culture partagée de l'évaluation des projets de restauration écologique sur les cours d'eau et les milieux aquatiques.

SOMMAIRE

4 ■ Préambule

8 ■ Introduction

Projets, objectifs, évaluation : la restauration écologique à l'âge de raison

12 ■ Évaluer la restauration : bases scientifiques et enjeux opérationnels

1.1- Trajectoires écologiques, « taille de l'effet » et site témoin
1.2- Paramètres de suivi : tout dépend des objectifs
1.3- Le Suivi scientifique minimal, méthodologie de référence pour les cours d'eau prospectables à pied

18 ■ Effacements d'ouvrages transversaux : comment les flux se réactivent

2.1- De la continuité écologique au projet de territoire
2.2- Suppression d'étangs sur le Val des Choues : la « libre évolution » tient ses promesses
2.3- Génétique, dendrochronologie… un large éventail de méthodes de suivi

28 ■ Reméandrages et contournements de plans d'eau : le succès n'est pas une ligne droite

3.1- Contournement de gravière : la Veyle retrouve la vie courante
3.2- Reméandrage de la Veyre : des effets limités en l'absence de recharge granulométrique
3.3- Sur le Marolles reméandré, une dynamique à confirmer

38 ■ Recharges sédimentaires, reconnexions : restaurer le fonctionnement

4.1- Recharges dans la Save : un suivi « poissons » au défi du temps hydromorphologique
4.2- Sur le Vieux Rhin, une approche pionnière pour évaluer les effets d'opérations hydromorphologiques
4.3- Phytosociologie et observation naturaliste pour suivre la reconnexion des bras morts de la Dordogne

48 ■ Plans d'eau, zones humides, estuaires… un œil sur les autres milieux

5.1- Vers un réseau de sites de démonstration pour les plans d'eau
5.2- Mhéo, une boîte à outils complète pour évaluer l'état des zones humides
5.3- Restauration estuarienne : avant l'évaluation, progresser sur la formulation des objectifs

56 ■ Conclusion

60 ■ Bibliographie

I NTRODUCTION

Projets, objectifs, évaluation : la restauration écologique à l'âge de raison

En seulement vingt ans, la restauration écologique a véritablement changé de dimension. Définie pour la première fois au début des années 1980, d'abord cantonnée au champ académique et aux réalisations expérimentales, ce champ d'action a vu à partir des années 2000 les projets se multiplier et les techniques se perfectionner, avec la montée en compétences d'une communauté de professionnels de plus en plus mature et structurée. En France et en Europe, cet essor s'est joué pour beaucoup sur les berges des rivières, à la faveur de la mise en œuvre de la directive cadre sur l'eau dont les objectifs d'atteinte du « bon état » - notamment en matière d'hydromorphologie et de continuité de la rivière - ont constitué une formidable impulsion pour la réalisation d'opérations comme les suppressions d'ouvrages, les reméandrages de cours d'eau, les contournements de plans d'eau ou les recharges sédimentaires.

De ces centaines de projets visant à « assister le rétablissement d'un écosystème qui a été dégradé, endommagé ou détruit » (définition de la restauration retenue par la *Society for ecological restoration*, 2004), menés sur de petits ruisseaux ou de grands fleuves, en plaine ou dans les vallées de montagne, la communauté de la restauration a beaucoup appris. Elle s'est dotée d'un socle de connaissances scientifiques commun, d'un langage et de méthodes partagées. Elle sait notamment que le lancement d'opérations de restauration sur un milieu donné exige d'avoir précisément défini, au préalable et de manière aussi consensuelle que possible sur le territoire, les objectifs auxquels doit répondre le projet : rétablissement d'une fonctionnalité perdue (écrêtage de crue, continuité sédimentaire…), retour d'espèces ou d'habitats protégés, amélioration de la qualité de l'eau, et le plus souvent une combinaison de ces différents

enjeux. Elle sait aussi que l'évolution temporelle d'un écosystème restauré est semée d'incertitudes, et résulte d'interactions complexes entre les choix de restauration opérés, la dynamique propre de l'écosystème, la présence de populations-sources à proximité, l'évolution des milieux connexes et les « forçages » extérieurs (climat, hydrologie, espèces exotiques envahissantes…).

Chaque tronçon de rivière, chaque plan d'eau étant unique, tout l'art de la restauration écologique consiste justement à mobiliser au mieux les connaissances disponibles et les retours d'expériences obtenus dans des contextes proches, afin d'orienter le système sur la trajectoire souhaitée : celle qui, au fil des années, l'amènera au plus proche des objectifs socio-écologiques définis à la conception du projet.

Reste alors à suivre dans le temps cette trajectoire et à mesurer le chemin parcouru - ou restant à parcourir - vers l'état cible : au même titre que la définition d'objectifs précis en amont des travaux, la mise en œuvre d'une stratégie d'évaluation solide et judicieuse est aujourd'hui une condition essentielle de tout projet de restauration ambitieux. Elle permet d'abord de contrôler la bonne évolution du milieu restauré, et au besoin de réaliser les ajustements nécessaires dans une logique de gestion adaptative. Elle contribue au développement des connaissances scientifiques et de la compréhension des trajectoires écologiques suivies par les milieux après restauration. Enfin, elle fournit (en cas d'atteinte des objectifs) des éléments solides et quantifiés pour justifier les moyens parfois conséquents investis dans les projets, et convaincre d'en engager d'autres dans des contextes proches.

Promoteur de longue date de la restauration écologique, dont il a fait l'un des principaux leviers de la « reconquête » de la biodiversité en France, l'Office français de la biodiversité (OFB) est pleinement mobilisé pour accompagner son essor : par le soutien financier à des travaux de recherche, par l'apport de méthodes, de connaissances scientifiques ou d'outils aux porteurs de projets, et en contribuant à la structuration de la communauté d'acteurs. De même, l'Office s'est emparé depuis plusieurs années des enjeux liés à l'évaluation des projets, qui implique des compétences et des outils spécifiques. C'est dans cette optique qu'a été conçu en 2010, en partenariat avec les agences de l'eau et INRAE, le réseau des sites de démonstration. À la fois laboratoire et vitrine de la restauration écologique des cours d'eau, il compte en 2022 plus de 60 sites de

restauration hydromorphologique qui ont en commun de bénéficier d'un rigoureux dispositif d'évaluation au long cours : le « suivi scientifique minimal », véritable référence méthodologique pour les cours d'eau prospectables à pied.

À l'écoute des attentes des gestionnaires et des acteurs de la restauration, l'OFB a ensuite rassemblé, dès 2018, un groupe de travail pour dresser, à partir d'une large sélection d'études de cas et de publications scientifiques, un état des lieux du suivi de la restauration en milieux aquatiques, des différentes méthodes qu'il mobilise, des enseignements et des interrogations qui en découlent. Ce travail a débouché, fin 2021, sur l'organisation d'une journée d'échanges techniques en ligne qui a rencontré un succès d'audience sans précédent : plus de 700 inscrits, soit un record pour un événement de ce type et la confirmation de l'intérêt que portent les gestionnaires de bassins versants, les praticiens du génie écologique et les acteurs des collectivités, aux questions du suivi et de l'évaluation des opérations de restauration. En cinq sessions émaillées d'études de cas, d'interventions scientifiques et de temps de discussion, la journée a abordé successivement les principaux types d'opérations en cours d'eau - effacement d'ouvrages transversaux, reméandrage et contournement de plans d'eau, reconstitution du matelas alluvial ou reconnexion d'annexes fluviales - puis ouvert la réflexion à d'autres milieux aquatiques. Elle a ainsi constitué une occasion privilégiée pour partager, à l'échelle nationale, les méthodes et les expériences liées à l'évaluation : un pas de plus pour la montée en maturité de la restauration, désormais parvenue à l'âge de raison, et comptable de ses manques comme de ses succès.

© Anne Vivier OFB

CHAPITRE 1

© Philippe Massit OFB

Le protocole Carhyce (Caractérisation hydromorphologique des cours d'eau) définit les données à ac
Adapté aux cours d'eau prospectables à pied, il permet d'obtenir un rendu de la situation du cours d'
du lit jusqu'à la description des berges et du corridor rivulaire.

Évaluer la restauration : bases scientifiques et enjeux opérationnels

quérir et leur méthode d'acquisition.
eau, de la géométrie et des substrats

Quels paramètres faut-il suivre pour évaluer les effets d'une action de restauration ? Pendant quelle durée, avec quelle fréquence ? Au moyen de quels outils et protocoles ? Selon le type de milieu, les opérations menées et les objectifs poursuivis, chaque projet de restauration est unique. Il en est de même de la stratégie de suivi à mettre en place. Cependant, pour être rigoureuse et exploitable, celle-ci doit s'intégrer dans un cadre scientifique aujourd'hui bien structuré, et respecter autant que possible les standards méthodologiques qui permettront d'en valoriser les résultats. Cette première partie expose quelques notions et concepts génériques qui sous-tendent l'évaluation de la restauration écologique. Elle présente dans un second temps la démarche de référence proposée par l'OFB et ses partenaires pour le cas des cours d'eau prospectables à pied, qui traduit ces principes en une méthodologie opérationnelle et formalisée à l'intention des acteurs de terrain.

1.1 - Trajectoires écologiques, « taille de l'effet » et site témoin

Un écosystème (biotope et biocénose) n'est pas un objet fixe dont l'état serait immuable, mais au contraire un système dynamique qui évolue spontanément en permanence : de manière tendancielle (à l'image des tourbières qui se comblent naturellement avec le temps) ou cyclique (comme les vasières estuariennes sous l'effet des marées), au fil des saisons ou en réponse à un événement ponctuel (crue, séisme, aménagement anthropique, action de restauration…). L'ensemble de ces évolutions temporelles constitue la **« trajectoire écologique »** de l'écosystème, qui peut être appréhendée à travers différents indices quantifiables (par exemple la richesse spécifique d'une communauté, la granulométrie du fond…). Pour mesurer la réponse du système à un événement, les écologues utilisent classiquement la mesure de la taille de l'effet, ou ratio de réponse (Osenberg *et al.,* 1997). Celle-ci est donnée mathématiquement par le logarithme népérien du rapport Xt / Xo, où Xt est la valeur à l'instant t du paramètre considéré, et Xo est sa valeur avant l'événement (ici les travaux de restauration) : la **taille de l'effet** sera positive si Xt est supérieur à Xo, et négative dans le cas contraire.

Cette mesure de la taille de l'effet sur un écosystème restauré ne suffit cependant pas à évaluer l'efficacité du projet, a souligné Évelyne Tales (INRAE) lors de la session de cadrage scientifique de la journée : les trajectoires écologiques sont multifactorielles, et toute la problématique de l'évaluation de la restauration consiste à distinguer et à quantifier, dans l'évolution du système, ce qui relève de sa réponse aux opérations de restauration, et ce qui relève des autres influences. Pour ce faire, il est nécessaire de recourir à un (ou plusieurs) site témoin : un écosystème (tronçon de rivière par exemple) proche géographiquement de celui où ont été menées les opérations et présentant des caractéristiques (hydrologiques, pédoclimatiques) comparables à celui-ci, mais non soumis à l'influence de la restauration. Cette notion peut être illustrée par l'exemple du reméandrage d'un ruisseau (Figure 1), dont la trajectoire temporelle post-travaux serait appréhendée

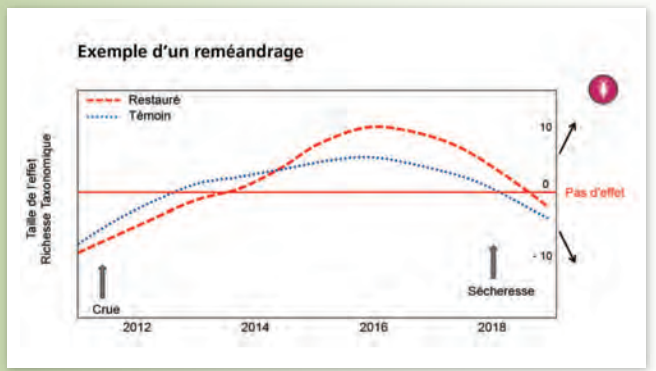


Figure 1. Comparaison de la « taille de l'effet » d'un reméandrage sur la richesse taxonomique, entre site restauré et site témoin (d'après Lorenz, 2020).

à travers un indicateur donné (ici la taille de l'effet sur la richesse taxonomique).

Alors que l'évolution de ce paramètre sur le site restauré suggère des évolutions significatives de la richesse taxonomique à la suite des travaux, le suivi réalisé sur le site témoin montre que cette trajectoire y est sensiblement la même : dans ce cas, l'effet observé n'est donc pas attribuable à la restauration, mais plutôt aux autres forçages, communs aux deux sites (qualité de l'eau, crue, sécheresse…).

De manière générale, l'évaluation d'un projet de restauration se basera presque toujours sur le suivi dans le temps de la « taille de l'effet » pour un jeu de paramètres donnés, et sa comparaison avec l'évolution de ces mêmes paramètres sur le ou les site(s) témoin(s) ; ces variations d'indicateurs pourront être complétées par des résultats d'expertise, le recours à des simulations ou la comparaison avec une « image modèle » (état cible de l'écosystème). Dans tous les cas, il est indispensable de disposer d'une connaissance solide de **l'état initial** du système (et du site témoin), afin d'avoir une référence pour quantifier son évolution ultérieure : cette étude est souvent programmée pendant l'année précédant les travaux. Quant au choix des indicateurs de suivi, ainsi que la durée pertinente pour ces suivis, ils sont étroitement liés aux objectifs du projet (voir section suivante) et au type d'opération réalisé.

1.2 - Paramètres de suivi : tout dépend des objectifs

Il est aujourd'hui admis qu'une condition essentielle pour la réussite d'un projet de restauration réside dans la **définition préalable d'objectifs précis**, chiffrés si possible, et idéalement compris et partagés par l'ensemble des acteurs du territoire. De la même façon, les modalités du suivi post-restauration doivent être pensées dès l'amont du projet, et ses moyens dimensionnés en conséquence. Dans son introduction consacrée aux bases scientifiques de l'évaluation de la restauration (et aux bonnes pratiques qui en découlent), Évelyne Tales a rappelé que la stratégie de suivi à mettre en œuvre pour un projet donné, et notamment le choix des paramètres à suivre, découle directement des objectifs retenus : l'on ne suivra pas nécessairement les mêmes indicateurs selon que l'opération vise à restaurer la continuité écologique d'un cours d'eau (par suppression d'un ouvrage par exemple) ou son hydromorphologie (par la reconstitution d'un lit en tresse par exemple). Les parties suivantes du présent document, qui abordent successivement les principaux types d'opération de restauration, dressent à travers une sélection d'études de cas un panorama des paramètres de suivi pertinents selon les objectifs poursuivis.

Idéalement, la stratégie d'évaluation devra se baser sur **une large palette d'indicateurs**, qui renverront une image fine des réponses des différentes fonctions ou compartiments biologiques pour reconstituer la trajectoire

écologique du système. Cette palette pourra comporter, outre les paramètres physico-chimiques et hydrologiques classiques (température, pH, turbidité, débit…), des indicateurs fonctionnels décrivant les processus physiques du système (flux de sédiments, granulométrie du fond…), des **indicateurs relatifs aux biocénoses** (mosaïques d'habitats, composition, diversité taxonomique, diversité génétique…), mais aussi des **indicateurs de perception sociale** (qualité scénique, naturalité, services pour la société…). Ces différents suivis sont complémentaires dans la conception de la restauration défendue ici, où il s'agit d'abord de rétablir les processus qui structurent le biotope (hydromorphologie, continuité) pour créer les conditions d'une auto-restauration des habitats et des peuplements biologiques. Ainsi les paramètres mesurant le rétablissement des processus fonctionnels permettent de vérifier la bonne évolution physique et morphologique du milieu en lien avec les opérations réalisées, tandis que les métriques biologiques (richesse, densité…) cherchent à caractériser la réponse des biocénoses à ces nouvelles conditions. Cette deuxième catégorie relève davantage d'une évaluation de l'auto-restauration du système, sur laquelle les porteurs du projet ont moins de prise : les trajectoires écologiques conservent une dimension d'incertitude que les acteurs de la restauration doivent assumer, et faire accepter à leurs partenaires sur les territoires.

1.3 - Le « suivi scientifique minimal », méthodologie de référence pour les cours d'eau prospectables à pied

À partir de 2010, le réseau des sites de démonstration, bâti grâce au partenariat entre l'OFB, les agences de l'eau et INRAE, constitue au niveau national une véritable vitrine pour le pilotage de projets de restauration écologique en cours d'eau… et leur évaluation. Il regroupe aujourd'hui 61 projets partenariaux (Figure 2), répartis sur l'ensemble du territoire métropolitain, et fédérés par un suivi commun, défini par la mise en œuvre du « suivi scientifique minimal » (SSM) : une méthodologie de référence pour l'évaluation des effets de la restauration, dont Marlène Rolan-Meynard (OFB) a rappelé les principes lors de la journée. Basé sur un ensemble de protocoles standardisés, déclinés selon sept grands types d'opérations (effacement d'ouvrage transversal, reméandrage, contournement de plan d'eau, remise dans le talweg, reconstitution du matelas alluvial, suppression des contraintes latérales, modification de la géométrie du lit mineur ou moyen), le SSM propose la mise en place d'une évaluation rigoureuse sur le long terme : les suivis sont à réaliser *a minima* une fois l'année précédant les travaux, puis un an sur deux pendant sept années *a minima* après ceux-ci, de préférence à la même période de l'année pour livrer des résultats comparables. Les différents protocoles de suivi mobilisés pour chaque type d'opération sont détaillés par un guide méthodologique, publié par l'OFB en 2019 (Rolan-Meynard *et al.*, 2019). Leur mise en œuvre, qui nécessite

des compétences solides, est assurée par le tissu des partenaires locaux, en régie ou par le biais de prestations : ainsi sur le site de la Hem, dans le Nord, elle mobilise les équipes départementales et régionales de l'OFB (pêches complètes et protocole Carhyce / hydromorphologie), le Conservatoire botanique national de Bailleul (relevés de végétation), l'Agence de l'eau Artois - Picardie (physico-chimie, diatomées, invertébrés aquatiques…), la Fédération départementale de pêche et de protection du milieu aquatique (suivi de frayères, indice anguilles, suivi drone), ou encore le Parc naturel régional des Caps et marais d'Opale (suivis photos) (Vivier *et al.,* 2022). L'ensemble de ces données de suivi est centralisé sur la base de données dédiée aux sites de démonstration, OSSIDE, qui constitue ainsi une ressource de grande valeur pour la compréhension des trajectoires de restauration en cours d'eau.

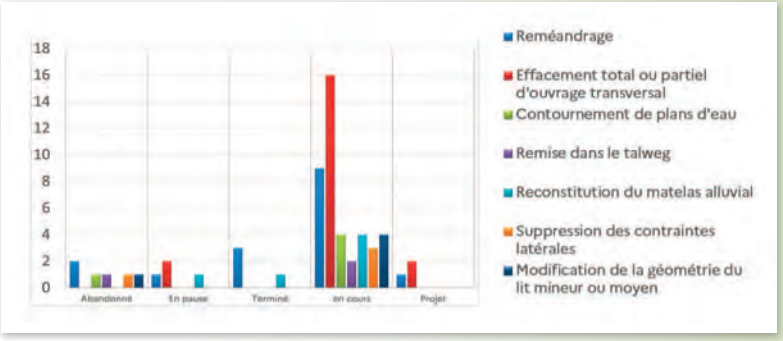


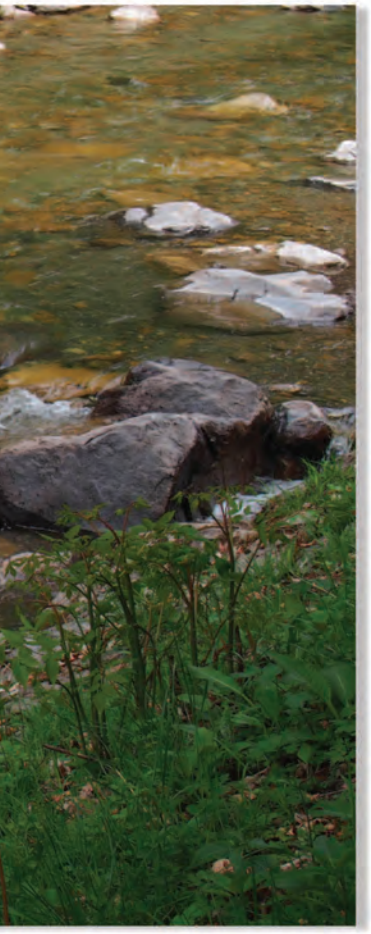
Figure 2. Le réseau des sites de démonstration en 2021 : état d'avancement pour les 61 projets (Source : OFB).

Après plus de dix ans d'existence, le réseau des sites de démonstration est appelé à se développer encore avec l'accueil de nouveaux projets, et la prise en compte de nouveaux compartiments encore non suivis tels que la ripisylve ou les co-bénéfices sociaux. Les avantages à le rejoindre sont multiples : **appui technique et scientifique, aide à la conception du suivi, assurance de disposer d'un état initial solide et d'un suivi rigoureux sur le long terme, mise en réseau des compétences et mise en visibilité des résultats.** L'OFB invite tous les porteurs de projets entrant dans le champ d'application du SSM (cours d'eau permanent, prospectable à pied, largeur mouillée d'au moins un mètre, opérations impliquant un linéaire d'au moins 50 fois la largeur pleins bords) à se manifester auprès de ses services territoriaux ou des agences de l'eau pour rejoindre le réseau. Mais au-delà de la stricte application du SSM, pas toujours possible ou justifiée selon les contraintes opérationnelles et les ambitions de chaque projet, ce sont ses principes et les bonnes pratiques associées qu'il s'agit de généraliser à toutes les réalisations de restauration en cours d'eau : de la réalisation de l'état des lieux initial au choix des stations de suivi (et de la/des station/s témoin), du plan d'échantillonnage à sa mise en œuvre temporelle.

© Anne Vivier OFB

Rivière alpine aux berges stabilisées par des enrochements (Suisse).

Effacements d'ouvrages transversaux : comment les flux se réactivent



D'après le recensement coordonné depuis 2010 par l'OFB, dans le cadre du référentiel des obstacles à l'écoulement (ROE), plus de 80 000 obstacles parsèment le cours des rivières françaises (chiffre 2019), parmi lesquels 500 grands barrages et des dizaines de milliers de petits seuils, souvent dépourvus d'utilité économique. Près d'un quart d'entre eux sont situés sur des cours d'eau classés en « liste 2 », pour lesquels le rétablissement de la continuité écologique est une obligation réglementaire au titre de la directive cadre sur l'eau européenne (DCE) et de sa transposition en droit français avec la loi sur l'eau et les milieux aquatiques (Lema) de 2006 : l'effacement total ou partiel d'ouvrages transversaux constitue aujourd'hui le type d'opération de restauration écologique le plus fréquent ; c'est également le plus représenté au sein du réseau des sites de démonstration. Cette deuxième partie leur est consacrée : après un aperçu des travaux collectifs menés dans le cadre du réseau des zones-ateliers (projet Efresco-ZA), qui vise à dresser un bilan des connaissances écologiques et socio-économiques sur les opérations d'effacement d'ouvrage et leur suivi, les enjeux méthodologiques du suivi de restauration de la continuité écologique sont illustrés à travers le cas exemplaire du val des Choues. Sont ensuite présentées deux méthodes originales pour évaluer les effets de l'effacement d'ouvrages sur la croissance de la ripisylve et le cloisonnement génétique des populations d'organismes aquatiques.

2.1 - De la continuité écologique au projet de territoire

Un ouvrage transversal (barrage, seuil…) installé sur un cours d'eau a pour effet principal de rompre, partiellement ou totalement, la continuité des flux entre l'amont et l'aval. Le flux d'eau, et avec lui les flux de matières (sédiments fins ou grossiers, contaminants) et les flux biologiques (organismes, gènes) sont affectés à différents degrés, entraînant des conséquences écologiques multiples qui peuvent se ressentir à des distances importantes de l'ouvrage : distribution des habitats hydrauliques et thermiques, distribution et structure génétique des populations, fonctionnement des écosystèmes… Mais la présence d'un ouvrage, qui structure parfois de longue date le paysage vécu par les riverains - plus encore s'il est associé à un lac ou une retenue - influence aussi fortement les représentations et les usages socio-économiques du cours d'eau et de ses berges.

Un projet visant à rétablir la continuité écologique a donc des implications majeures sur la rivière et son fonctionnement, mais également sur le territoire riverain et ses habitants. Aux côtés de ses objectifs écologiques (améliorer la qualité de l'eau, permettre le retour d'espèces patrimoniales comme les poissons migrateurs, retrouver un transport sédimentaire…), il doit appréhender les enjeux sociaux associés afin de susciter l'adhésion et d'éviter les blocages : prendre en compte les différents usages, la valeur et l'identité paysagère, ne pas aggraver les risques, conserver le patrimoine naturel (et bâti, si possible).

Dans son intervention de cadrage sur les opérations de restauration de la continuité, Maria Alp (INRAE) a souligné cette nature duale (« socio-écologique ») qui impose de déployer une approche transdisciplinaire où

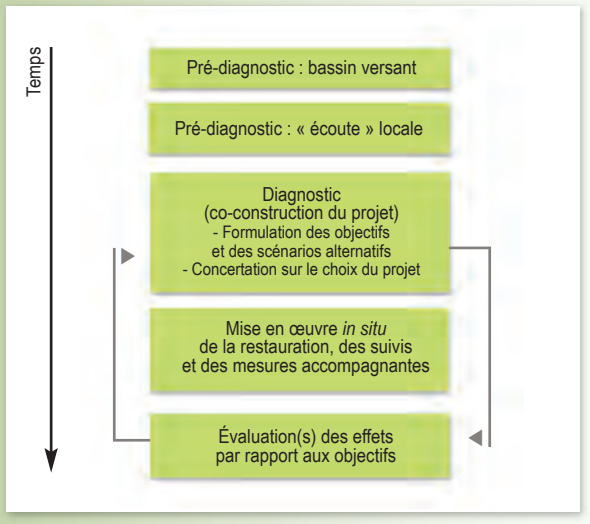


Figure 3. Les grandes étapes d'un projet de restauration (effacement de barrage ou de seuil) sur un territoire (Source : Efresco-ZA).

les sciences humaines et sociales ont toute leur place. Dans une logique de « projet de territoire », la démarche-cible proposée (Figure 3) comprend ainsi une phase essentielle d'écoute locale, puis de **concertation autour des objectifs co-construits avec les acteurs et des moyens de les atteindre.** À chaque étape, et jusqu'à l'évaluation des effets de l'opération de restauration, l'implication des acteurs locaux et la communication sont indispensables : il s'agit de rendre compte de l'avancée des opérations, des résultats obtenus, mais aussi d'aborder et mettre en discussion les incertitudes inhérentes aux trajectoires écologiques.

Efresco-ZA, une analyse collective pour structurer la « boîte à outils »

Au-delà de ce cadre très générique, les opérations de restauration de la continuité écologique recouvrent une grande variété de situations, selon la taille du cours d'eau, le type d'ouvrage présent, le contexte local et celui du bassin et les objectifs du projet. Pour progresser vers une meilleure anticipation des effets des projets et compléter une « boîte à outils » dédiée, l'OFB a financé le projet Efresco-ZA, qui réunit depuis 2019 une équipe scientifique transdisciplinaire (pilotée par le GRAIE, INRAE, l'ENS Lyon, les Universités d'Aix-Marseille et de Lyon II). Sous la coordination d'INRAE (Maria Alp), ce travail mobilise à la fois l'expérience acquise sur le réseau des zones ateliers (réseau inter-organismes de recherches sur les socio-écosystèmes) et une étude bibliographique collective au service de plusieurs objectifs. Il a notamment pour objectifs d'identifier les meilleurs travaux empiriques ayant suivi les effets des opérations de restauration de la continuité ; d'identifier les manques de connaissances ; d'identifier les outils et nouveaux cadres conceptuels pertinents pour définir et conduire les opérations de restauration de la continuité.

L'un des premiers acquis de l'étude Efresco-ZA a été de recenser, à partir d'un sondage auprès des acteurs des zones-ateliers, un éventail d'une trentaine de cas d'étude (dont 14 en France) qui constituent un best of des retours d'expériences en matière de suivis de la restauration de la continuité (Alp *et al.,* 2022). Ces travaux ont été sélectionnés au regard d'un ensemble de critères : longue durée des suivis avant et après restauration, pertinence des échelles spatiales considérées, bonne résolution temporelle des suivis et confiance dans les choix méthodologiques des suivis (incluant idéalement une approche couplée socio-écologique). L'un de ces cas, celui des étangs du Val des Choues, est détaillé dans la section qui suit.

2.2 - Suppression d'étangs sur le Val des Choues : 15 ans après, la « libre évolution » tient ses promesses

Affluent de l'Ource en Côte-d'Or, dans le bassin de la Seine amont, le Val des Choues est un ruisseau de 5,5 km de long, essentiellement sous couvert forestier, dont le cours a longtemps accueilli un chapelet de cinq étangs sur la commune de Villiers-le-Duc. Ces plans d'eau artificiels influençaient profondément le régime thermique et physico-chimique du ruisseau, son faciès et ses populations de poissons (installation d'espèces limniques indésirables) et d'écrevisses (une population d'écrevisses à

pattes blanches, espèce autochtone et protégée, se trouvant cantonnée à l'amont des étangs). Situé dans un site Natura 2000, le secteur a été le théâtre d'une vaste opération de restauration écologique : en 2006, le complexe des étangs Narlins ainsi qu'un canal latéral ont été supprimés ; un étang situé plus en amont, conservé pour son intérêt historique et écologique, a été équipé d'un moine hydraulique (Figure 4).

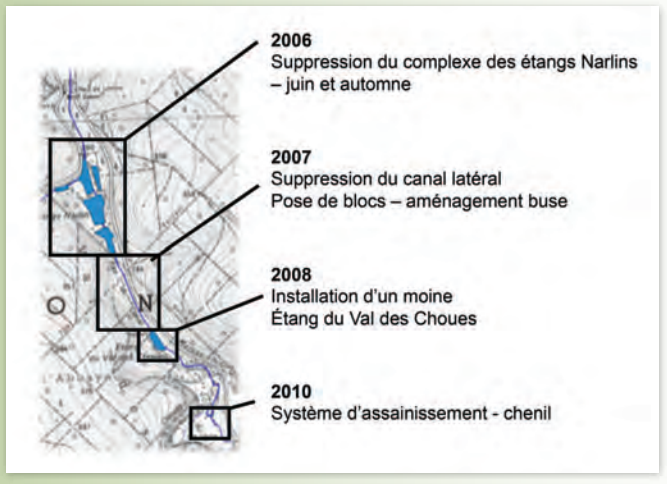


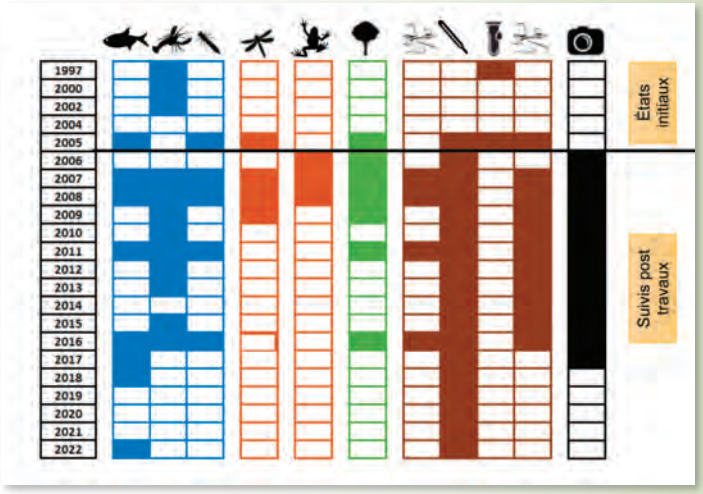
Figure 4. Plan de situation et principales opérations réalisées sur le ruisseau du Val des Choues (Source : OFB-IGN).

Mené dans le cadre du programme Life Nature « ruisseaux de têtes de bassins et faune patrimoniale associée », avec l'objectif principal d'accroître le secteur colonisable par les écrevisses à pattes blanches, ce projet avait plus largement pour finalités la restauration de la continuité écologique amont-aval et du cycle thermique naturel du cours d'eau, ainsi que la restauration des habitats de la truite fario, du chabot et de la lamproie de Planer, espèces patrimoniales. Au plan technique, la volonté des maîtres d'ouvrage était de rechercher des solutions peu coûteuses et reproductibles : l'effacement des étangs a été mené par simple vidange suivie de l'ouverture des digues ; l'ensemble du système a ensuite été laissé en « libre évolution », les seules interventions de génie écologique réalisées ont consisté à poser quelques blocs de calcaire pour aider le cours d'eau à recréer des habitats diversifiés. L'ensemble des travaux a représenté un budget de 50 000 € TTC.

Avant et après, un suivi au long cours sur tous les compartiments

Mené plus d'une décennie avant le lancement du réseau des sites de démonstration et la formalisation du « suivi scientifique minimal », le projet du Val des Choues se distingue par l'exhaustivité et la durée du suivi engagé. Présentés lors de la journée technique (Julien Bouchard, OFB), les suivis ont débuté l'année

précédant les travaux (et même plusieurs années auparavant pour les populations d'écrevisses), et se sont poursuivis pendant plus de 12 ans, dans une logique résolument multi-compartiments : communautés animales (poissons, écrevisses, invertébrés benthiques, odonates, amphibiens), végétales (ripisylve), paramètres hydromorphologiques et physico-chimiques, le tout complété par un suivi photographique régulier (Figure 5).



- *Pêches électriques De Lury 3 passages*
- *Suivi écrevisses (prospection nocturne et télémétrie)*
- *Suivi macro-invertébrés (MAG 20, IBGN)*
- *Suivi odonates (Inventaire 5 passages (mai / sept))*
- *Suivi amphibiens (3 sorties diurnes, 2 sorties nocturnes, observation adultes, pontes, écoute chants)*
- *Suivi végétation (Cartographie des formations végétales)*
- *Indice d'attractivité morphodynamique*
- *Suivi température*
- *Suivi physico-chimique*
- *Cartographie linéaire de l'évolution des faciès d'écoulement*
- *Suivi photographique*

Figure 5. Dans le Val des Choues, une stratégie de suivi multi-compartiments étalée sur plus de 20 ans. Le trait noir horizontal indique la période des travaux (Source : OFB).

Côté méthodologie, un ensemble d'approches complémentaires a été déployé par les différents partenaires mobilisés : protocole de suivi selon la méthodologie IBGN pour les macroinvertébrés benthiques sur un ensemble de sept stations ; prospections nocturnes sur l'ensemble du linéaire pour les écrevisses ; inventaire en cinq passages sur l'ensemble du fond de vallon pour les odonates…

Le suivi de la recolonisation des anciens étangs par la végétation a été mené selon trois approches complémentaires : transects sur la plus grande largeur de chaque étang, suivi d'une placette phytosociologique et cartographie des formations végétales.

Pour le compartiment des poissons, le suivi a été mené par pêche électrique sur un ensemble de sept stations (les mêmes que pour les macro-invertébrés benthiques), dont les localisations permettent d'évaluer l'effet de la restauration : trois stations restaurées, une station témoin affectée par la restauration (à l'aval des étangs), trois stations témoins non affectées par la restauration (une à l'amont du secteur restauré, une sur un petit affluent, la troisième dans un autre bassin). Pour mémoire et pour exemple, le coût de ce suivi « poissons » est de l'ordre de 6 000 € TTC par campagne, soit 42 000 € TTC pour l'ensemble du suivi (sept campagnes menées entre 2005 et 2018).

Une évolution favorable et des objectifs atteints

Dans son ensemble, cette stratégie de suivi au long cours peut *in fine* être considérée comme exemplaire, malgré quelques lacunes à l'état des lieux initial (peu d'années de suivi pré-travaux et absence de suivi initial pour certains compartiments). Quant aux résultats qu'elle a livrés, ils s'avèrent globalement très satisfaisants et témoignent d'une réponse rapide et positive de l'écosystème à la restauration de sa continuité écologique. La température de l'eau, d'abord, s'est rafraîchie de 3°C en moyenne dans les stations situées à l'aval des anciens étangs, et se situe désormais dans des fourchettes compatibles avec les exigences de la truite fario et de l'écrevisse à pattes blanches. Les scores obtenus pour le calcul de l'indice IBGN, reflétant la qualité écologique du milieu selon les macro-invertébrés, ont considérablement augmenté dans les stations restaurées et à l'aval du système (passant de 14 à 17 ou 18/20, ce qui indique un très bon état selon cet indice). Les peuplements invertébrés ont montré des variations importantes suite à l'ouverture des étangs, mais se sont stabilisés après une dizaine d'années, à un bon niveau de diversité et de fonctionnalité. De même, les suivis effectués sur la ripisylve dans le lit des anciens étangs ont montré des changements rapides dans les successions végétales entre 2007 et 2011, avant un ralentissement et une simplification des compositions avec la disparition des végétations pionnières post-travaux. Le site a pleinement retrouvé sa fonction d'habitat pour les amphibiens (10 espèces recensées sur le site des anciens étangs) et les odonates (24 espèces dont 9 rares en Côte-d'Or), qui affichent aujourd'hui une diversité et une densité satisfaisante pour un ruisseau de tête de bassin en bonne santé.

Enfin, le pari est gagné en ce qui concerne les espèces cibles du projet. **L'écrevisse à pattes blanches a bien réagi,** et les prospections nocturnes démontrent qu'elle a désormais colonisé, depuis l'amont du site restauré, l'ensemble du secteur. Quant aux poissons, les différentes campagnes de pêche électrique ont confirmé la disparition des espèces liées aux plans d'eau et mis en évidence une évolution marquée de composition : après un fort développement du vairon et de la loche franche dans les premières années post-travaux, ces deux espèces ont régressé et les peuplements se sont stabilisés, en 10 ans, autour des trois espèces patrimoniales des ruisseaux de tête de bassin : truite fario, chabot et lamproie de Planer.

2.3 - Génétique, dendrochronologie… selon les objectifs, un large éventail de méthodes de suivi

Le retour d'expérience qui précède fournit une bonne illustration de l'éventail des méthodes mobilisables pour suivre la réponse d'un cours d'eau face à l'effacement d'un obstacle : relevés physico-chimiques, campagnes de pêche électrique, inventaires faunistiques, suivi photo, indices biologiques, relevés phytosociologiques… Dans une optique de répétabilité et de comparabilité des résultats, ces approches doivent être mises en œuvre autant que possible selon des protocoles et des indicateurs standardisés, dont beaucoup ont été formalisés au cours des 15 dernières années à la faveur notamment de la mise en œuvre de la directive cadre sur l'eau : le protocole de Caractérisation hydromorphologique des cours d'eau (Carhyce), le nouvel indice invertébrés multimétrique (I2M2) ou l'Indice biologique diatomées (IBD), les protocoles de pêche électrique standardisés selon la taille du milieu et les espèces recherchées, etc.

La « boîte à outils » du suivi des opérations de restauration de la morphologie des cours d'eau est donc aujourd'hui bien remplie, et ne se limite d'ailleurs pas à ces méthodes relativement classiques. Pour un projet donné d'effacement d'ouvrage, avec ses objectifs et son contexte propre, la stratégie d'évaluation pourra emprunter des voies plus originales : les deux exemples ci-après, identifiés dans le cadre du projet Efresco-ZA, ont été présentés lors de la journée.

Le FINDEX, une mesure génétique de l'effet de la suppression de seuils

L'un des principaux effets occasionnés par la présence d'un obstacle transversal sur un cours d'eau est de limiter la circulation des espèces aquatiques entre l'amont et l'aval. Cet isolement peut être total ou partiel, selon les espèces, les caractéristiques de l'ouvrage ou encore le débit du cours d'eau. Il se traduit, entre autres, par un cloisonnement génétique plus ou moins marqué entre les populations d'une même espèce vivant d'un côté et de l'autre - au point parfois de menacer leur viabilité, dans le cas de petites populations isolées entre deux obstacles infranchissables. La mesure du niveau de « proximité » génétique entre deux populations est donc une approche pertinente pour estimer le degré de franchissabilité d'un obstacle pour une espèce donnée (et, le cas échéant, pour appuyer la décision de l'effacer). Elle peut de même être utilisée, une fois la continuité rétablie, pour évaluer dans le temps les effets de la restauration en termes de reconnexion génétique des populations. C'est ce que propose le FINDEX, basé sur l'échantillonnage génétique amont-aval d'un ouvrage existant ou restauré, qui peut s'appliquer à toute espèce aquatique non-migratrice. Cet indice standardisé, développé par une équipe du CNRS, s'exprime en pourcentage : pour un FINDEX en-deçà de 20 %, l'obstacle peut être considéré comme transparent pour l'espèce considérée (c'est à dire qu'il est totalement franchissable) ; au-delà de 90 %, il constitue une barrière infranchissable.

Cet outil novateur a été mis en œuvre (S. Blanchet, J. Prunier, CNRS) pour évaluer

les effets de la restauration de la continuité écologique sur un panel de 11 seuils (effacés ou aménagés), avec pour espèce témoin le vairon. Les scores FINDEX avant et après restauration ont été présentés lors de la journée (Figure 6).

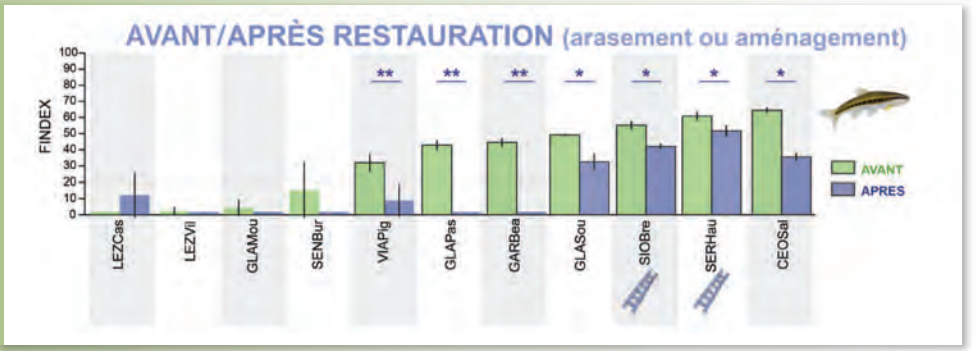


Figure 6. Résultats de l'indice Findex pour le Vairon (*Phoxinus phoxinus*) avant (en vert) et après (en violet) restauration de la continuité écologique, sur un panel de 11 sites restaurés. Les échelles représentent des mesures de restauration basées sur la création d'une passe à poissons. Les astérisques indiquent une diminution significative de l'indice après restauration, avec un rétablissement partiel (un astérisque) ou total (double astérisque) de la continuité (Source : CNRS).

Les résultats confirment d'abord que, dans tous les cas, la restauration a bien permis d'améliorer la proximité génétique entre les populations amont et aval. Mais ils suggèrent aussi que, selon les opérations réalisées et/ou le contexte initial, les effets sont très variables : dans plusieurs cas l'obstacle est devenu « transparent » pour le vairon ; dans d'autres, le rétablissement de la continuité n'est que partiel. À la lumière de cet exemple, le FINDEX (Prunier *et al.,* 2020) apparaît comme un outil pertinent, **tant pour le diagnostic de fragmentation que pour le suivi** de restauration dans les projets d'effacement de seuil, en particulier lorsque l'opération a pour objectif principal la pérennisation d'une espèce cible impactée par la fragmentation. Son coût de mise en œuvre est à l'heure actuelle de l'ordre de 1000 € par espèce et par opération (donc 2000 € minimum pour une comparaison amont-aval).

Dendrochronologie : quand les arbres parlent du passé

Alors que la quasi-totalité des méthodes d'évaluation de la restauration repose sur une stratégie de recueil périodique de données, une approche originale (S. Dufour, Université de Rennes 2) présente la particularité de permettre des analyses rétrospectives,

jusqu'à plusieurs décennies : elle consiste à analyser l'évolution dans le temps de la croissance de la ripisylve, par mesure des cernes des arbres. Cette méthode dite « dendrochronologique » a, par exemple, été employée pour retracer les effets sur la végétation rivulaire de la suppression de deux ouvrages d'une hauteur de 2 et 3 m, supprimés en 1997, respectivement sur les sites du moulin de Viard (sur l'Orne) et du moulin des Rondelles (sur la Vire) (Depoilly et Dufour, 2015). L'étude dendrochronologique a été menée sur chaque site sur un ensemble de placettes positionnées le long d'un axe amont-aval, complétées par une placette témoin non impactée par la suppression de l'ouvrage. L'analyse des résultats, en lien avec les chroniques climatiques et hydrologiques locales, montre une influence significative de la suppression des seuils sur la plupart des arbres : la tendance majoritaire est une baisse modérée de la croissance chez certaines espèces (notamment les aulnes), tandis que quelques autres (frênes et tilleuls) enregistrent au contraire une augmentation de leur croissance. Ceci peut s'interpréter comme une conséquence de la diminution des taux d'humidité dans les sols à proximité des seuils effacés, qui désavantage les espèces hygrophiles (qui vivent en milieux humides) au profit des espèces qui tolèrent des milieux plus secs. Cependant, l'ampleur de cet effet reste modérée et aucun dépérissement n'a été observé sur les sites.

© Michel Bramard OFB

Travaux de reméandrage de l'Échandon (37).

Reméandrages et contournements de plans d'eau : le succès n'est pas une ligne droite

Si les opérations d'effacements d'ouvrages transversaux se prêtent généralement bien à une stratégie de restauration « passive », où le cours d'eau recrée de lui-même son lit naturel une fois rétablie la continuité amont-aval, d'autres situations peuvent demander une approche plus interventionniste et un recours accru aux techniques du génie écologique. C'est le cas des rivières dont l'hydromorphologie a été profondément altérée par le creusement d'un plan d'eau (gravières et sablières en particulier), ou dont le tracé a été rectifié, en lien avec le remembrement agricole ou l'urbanisation, et dont les capacités de morphogenèse sont limitées (cours d'eau de plaine notamment). Pour recréer les conditions d'atteinte d'un bon état écologique à une échéance temporelle raisonnable, il faut alors engager des moyens parfois conséquents dans des projets de reméandrage ou de recréation de lit. Malgré une montée en compétence certaine depuis une quinzaine d'années, le succès de ces opérations n'est pas garanti : pour les porteurs de projets, l'évaluation des effets de la restauration reste un fort enjeu de connaissance… et un défi méthodologique. Les études de cas présentées dans cette troisième partie apportent quelques enseignements, tant sur les résultats obtenus que sur les stratégies de suivi, entre bonnes pratiques et pièges à éviter.

3.1 - Contournement de gravière : la Veyle retrouve la vie courante

Quatre décennies durant, les eaux de la Veyle, dans la Dombes, ont traversé sur 1 km la gravière de Buellas, issue de l'extraction de granulats dans les années 1970. La présence de ce plan d'eau de 50 ha et de 20 m de profondeur a fortement perturbé le fonctionnement de la rivière : réchauffement de l'eau en aval (+ 3 à + 5 °C par rapport à l'amont), apport de nutriments, altération du transport sédimentaire, remplacement du peuplement de poissons d'eau courante par des espèces lentiques…
Le projet, porté par l'OFB, l'Agence de l'eau Rhône Méditerranée Corse et le syndicat mixte Veyle Vivante, a consisté à créer un nouveau lit méandriforme de 2 km de long en contournement de la gravière, avec pour objectifs de réduire les impacts du plan d'eau, et de rétablir un fonctionnement et des peuplements de milieu lotique (d'eau courante) de plaine.
Les travaux, menés en 2008 et 2009 pour un montant de 860 000 € (hors volet foncier), ont privilégié les techniques naturelles et une revégétalisation spontanée du nouveau lit. Après un état initial limité au suivi thermique et au compartiment « poissons » en 2008, la stratégie d'évaluation s'est basée sur un réseau de cinq stations : trois sur le linéaire restauré et deux stations témoins, l'une située en amont du site et l'autre en aval (Figure 7).

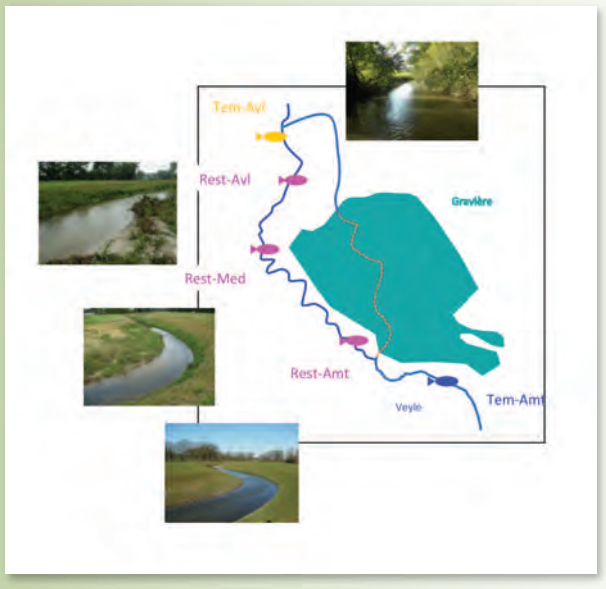


Figure 7. Localisation des cinq stations de suivi sur le linéaire de la Veyle (Source : OFB).

Les suivis post-travaux, qui se sont étalés de 2010 à 2021, ont porté sur plusieurs compartiments du système :

- suivi thermique annuel, complété certaines années par d'autres paramètres physico-chimiques (matières organiques, oxygène, nutriments…) ;
- suivi hydromorphologique par le protocole Carhyce (6 campagnes entre 2010 et 2021), complété en 2010 par des relevés de vitesse et de granulométrie ;
- suivi par les indicateurs normalisés DCE pour les poissons (6 campagnes), les invertébrés benthiques (4 campagnes), les diatomées et les macrophytes (2 campagnes).

Le retour d'expérience, présenté lors de la journée technique (N. Roset, OFB), s'est centré sur les suivis en matière de thermie, d'hydromorphologie et de peuplements de poissons. Les résultats confirment d'abord une forte réduction du réchauffement de l'eau occasionné par la gravière : celui-ci était de + 4°C avant les travaux, et est tombé dès 2012 à moins de 1° C. Très échauffé en 2010, le tronçon restauré a rapidement adopté un profil thermique équivalent à celui de la station amont, sous l'effet du développement de la végétation et de la reprise des échanges avec la nappe.

Les résultats pour l'hydromorphologie et la ripisylve, d'après le protocole Carhyce, montrent quant à eux une forte diversification des faciès d'écoulement et des habitats aquatiques en 10 ans, ainsi que le développement rapide d'une végétation rivulaire variée, dominée par la strate arborescente (Roset *et al.* 2022a). Après 10 années, les caractéristiques des stations restaurées se rapprochent de celles de la station témoin amont, voire les dépassent à la faveur de l'entretien du site (Figure 8).

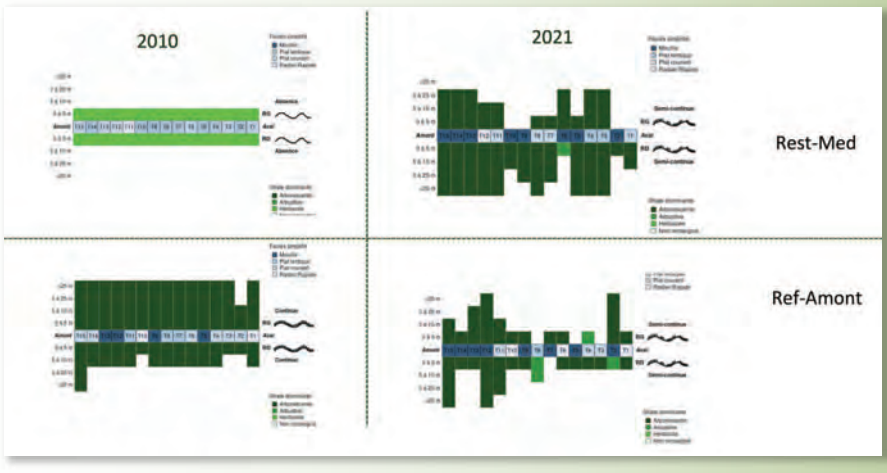


Figure 8. Résultats du protocole Carhyce pour l'hydromorphologie et la ripisylve sur la Veyle en 2010 (état initial) et 2021, pour la station restaurée médiane et pour la station amont (Source : OFB - IED Carhyce).

Dans le même temps, les populations de poissons (Roset *et al.,* 2022b) ont répondu rapidement et fortement à la transformation du milieu. Dans le lit recréé, elles se sont stabilisées en quelques années et présentent désormais un peuplement dense et diversifié, mêlant espèces lotiques et lentiques : loche franche, goujon, gardon, perche, barbeau… De manière notable, les stations dites « témoin » ont également vu leurs compositions spécifiques se modifier et tendre vers ce peuplement mixte, depuis des situations pourtant très contrastées avant le projet : faible densité dominée par la truite fario et le chabot pour le secteur amont, et peuplement composé d'espèces lentiques et d'exotiques (dont silure, brème, perche soleil) pour le secteur aval.

Avec plus de 10 ans de recul, le projet livre *in fine* un bilan très satisfaisant. Les objectifs en termes de température, d'hydromorphologie et de ripisylve sont globalement atteints, avec **une forte diversification des habitats aquatiques sous l'effet des crues morphogènes.** La réponse des populations de poissons est également positive, même si la persistance de certaines espèces lentiques peut nuancer le bilan. Enfin, l'ensemble du projet est perçu très positivement par les riverains et les pêcheurs, associés à la démarche dès ses premières étapes.

Quelques regrets ont cependant été soulignés lors de la journée, notamment sur la méthodologie de suivi : l'état initial avant travaux, en particulier, s'est limité aux seuls suivis poissons et thermie, tandis que dans la suite le SSM n'a été mis en œuvre que de manière partielle. Un autre point faible porte sur l'emplacement des stations « témoins » aval et amont, jugées *a posteriori* trop proches du site restauré et influencées par le projet (notamment pour le compartiment poissons). Enfin, le colmatage élevé sur le secteur restauré et une qualité d'eau qui demeure médiocre sur la Veyle limitent les bénéfices écologiques du projet.

3.2 - Reméandrage de la Veyre : des effets limités en l'absence de recharge granulométrique

Comme de nombreux petits cours d'eau français de plaine, la Veyre amont (63), cours d'eau de moyenne montagne, a vu certaines portions de son linéaire rectifiées et ses zones humides drainées par le remembrement agricole intensif des années 1960-1970, avec des impacts catastrophiques sur la ripisylve et la vie piscicole. L'un de ces tronçons, à l'ouest du lac d'Aydat sur le cours amont de la rivière, a fait l'objet en 2010 d'une opération de reméandrage portée par le syndicat mixte des vallées de la Veyre et de l'Auzon (SMVVA).

Les travaux, d'un montant de 98 000 € (étude comprise), ont porté sur un linéaire de 525 m de rivière : outre la recréation d'un lit en méandres, le projet a permis l'effacement d'un ouvrage infranchissable, la création d'un réseau de cinq mares et la mise en défens des berges par 2400 m de clôture, sept abreuvoirs et trois passerelles agricoles. Les partenaires du projet ont fait le choix de ne pas réaliser de recharge granulométrique, en misant sur une reconstitution naturelle du lit grâce aux apports provenant de l'amont.

Le suivi a été mené selon les principes du SSM, sur quatre stations : deux situées sur le linéaire restauré, une station témoin altérée, et une station témoin dite « non altérée » (avec la particularité d'être située à l'aval du site restauré, en l'absence de possibilité à l'amont). Après un état initial en 2010, des campagnes ont été réalisées en 2011, 2012, 2013, 2014, puis en 2018 et 2019. Les résultats ont été présentés lors de la journée (A. Mathevon, SMVVA ; M. Bacchi, bureau d'études RIVE) pour les différents compartiments biologiques, en s'appuyant essentiellement sur les indices de suivis issus de la DCE :

- pour les populations de diatomées, appréhendées au travers de l'indice IBD, la qualité reste globalement moyenne sur les quatre stations : ce compartiment peu sensible à l'hydromorphologie témoigne davantage d'une altération de la qualité des eaux de la Veyre, sans lien avec les travaux de restauration ;
- les populations de macroinvertébrés benthiques (indice I2M2) apparaissent quant à elles, pour toutes les années de suivi, d'une qualité « bonne » à « très bonne », avec des évolutions limitées et communes à l'ensemble des stations. Après dix ans, l'état de ce compartiment sur les stations restaurées est sensiblement le même qu'avant les travaux ;
- pour les poissons, l'interprétation des valeurs de l'indice IPR est difficile sur la Veyre en raison de la faible richesse spécifique : seules trois espèces sont présentes, dont la truite fario (soutenue par des alevinages) et le chabot dont les effectifs restent faibles ;
- enfin l'indice Habitats montre une qualité habitationnelle des stations restaurées encore éloignée de ce qu'elle est sur la station témoin non altérée.

Globalement **les travaux ne semblent donc pas avoir produit d'effet significatif** sur la qualité biologique du cours d'eau. Ce bilan décevant est peut-être lié à l'absence de reconstitution naturelle du lit. En effet, contrairement à ce qui était attendu, la charge minérale grossière n'augmente pas, et tend même à régresser au cours du temps sur les stations restaurées (Figure 9, suivis granulométriques réalisés au droit des points de transect Carhyce).

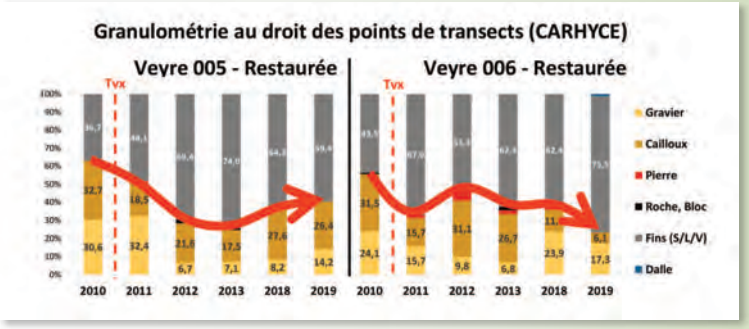


Figure 9. Évolution dans le temps de la granulométrie du substrat dans les deux stations restaurées de la Veyre (Source : SMVVA / BE RIVE).

L'absence d'apports sédimentaires depuis l'amont peut s'expliquer par la présence de boisements sur les versants des sources de la Veyre, qui limitent l'érosion et donc l'apport naturel sédimentaire - autrement dit la montagne s'avère, avec 10 ans de recul, trop peu productive en « cailloux ».

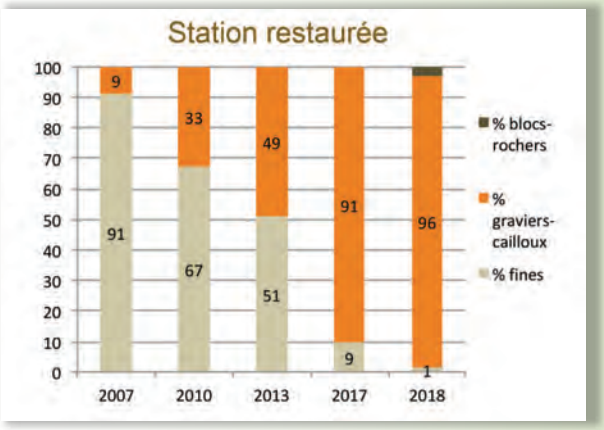
La leçon a été retenue. En 2018, le SMVVA a lancé un nouveau programme de restauration sur un total de 4,8 km de linéaire de la Narse et du Labadeau (affluents de la Veyre en amont du premier site). Avec là encore des opérations de reméandrage, de renaturation, des plantations d'hélophytes… et cette fois des recharges granulométriques pour un volume total de 649 m^3. À ce sujet les porteurs de projets soulignent la nécessité de bien définir la gamme granulométrique des apports, et de ne pas se limiter aux propositions des carriers, pour se rapprocher autant que possible du fond de lit « naturel ».

3.3 - Sur le Marolles reméandré, une dynamique à confirmer

Autre petit cours d'eau rectifié, en milieu semi-urbain cette fois, le Marolles (37) a également fait l'objet d'un reméandrage en 2008 et 2009. Le projet, mené pour un budget de 50 000 € dans le cadre du contrat territorial Milieux aquatiques de l'Indrois et affluents, visait à améliorer l'état écologique du cours d'eau, classé en RNABE (« risque de non atteinte du bon état ») par la surveillance DCE mais fort d'un bon potentiel d'accueil pour des espèces comme le chabot, le vairon ou la moule de ruisseau (*Unio crassus*). L'opération a consisté à recréer 550 m de linéaire sinueux sur un terrain communal situé à 2 km de la source : les 1 150 m^3 de matériaux déplacés ont été utilisés pour reboucher le lit rectifié, et 100 m^3 de graviers ont été injectés pour reconstituer le matelas alluvial. Des travaux de restauration de la ripisylve ont également été menés. Une seconde phase, en 2017, a permis de réaliser une recharge complémentaire du matelas alluvial pour un montant de 21 000 €.

La stratégie de suivi présentée lors de la journée (L. Boutet-Berry, OFB), conforme aux principes du « Suivi scientifique minimal », s'est étendue sur une durée de 14 années (sept à huit campagnes selon les compartiments évalués, état initial compris, entre 2007 et 2020), sur une station de la moitié aval du secteur restauré, et sur une station témoin située 970 m en amont.

L'évolution hydromorphologique du tronçon restauré a été suivie par le protocole Carhyce (sauf pour l'état initial, caractérisé en 2008 par la méthode des transects). Les résultats montrent une évolution favorable des faciès et de la ripisylve : dès 2013 se développe une alternance plus marquée de faciès courants et de mouilles, et en 2017 les berges accueillent une végétation arborée en rideaux. En parallèle, les suivis granulométriques (Figure 10) témoignent d'une évolution favorable suite à la reconstitution du matelas alluvial : entre 2007 et 2018 les proportions de classes se sont inversées, passant de 90 % de fines à 96 % de graviers-cailloux (une composition



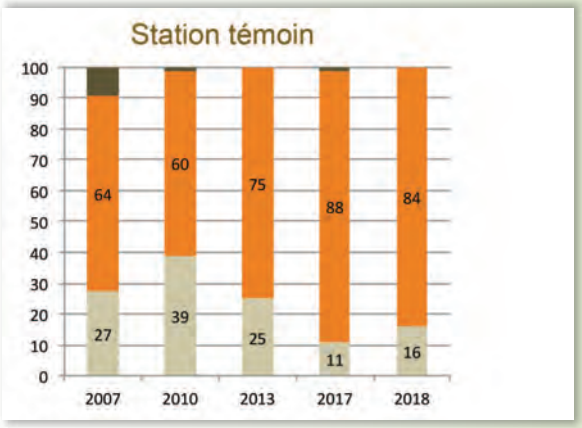


Figure 10. Résultats des suivis granulométriques dans le ruisseau de Marolles sur la station restaurée en 2008-2009 et la station témoin (Source : OFB).

proche de celle de la station témoin), avec un effet notable de la recharge effectuée en 2017. À noter enfin que l'évolution de la morphologie du lit n'a pu être analysée que pour l'année 2013, les données des autres campagnes (2010, 2017 et 2018) étant inexploitables en raison d'un problème de relevé de la largeur pleins bords, liée à une modification du protocole et au recours à des opérateurs différents.

En une décennie, le projet a donc globalement rempli ses objectifs en termes d'amélioration de la qualité des habitats. Mais si l'hydromorphologie et la capacité d'accueil conditionnent le retour de communautés biologiques en bon état, elles n'y sont pas toujours suffisantes. Ainsi le bilan des suivis réalisés sur les populations de macro-invertébrés benthiques et de poissons montre-t-il une **réponse encore fragile de la biodiversité** du ruisseau de Marolles sur le tronçon restauré (Archaimbault *et al.,* 2022).

Le compartiment des macro-invertébrés, suivi par l'indice I2M2 et des métriques de structures et de composition, montre une réponse rapide après les travaux : sur le segment restauré, 15 nouvelles familles ont été observées après seulement un mois, et 25 après deux ans, avec l'apparition de taxons sensibles et une composition qui reflètent une meilleure diversité d'habitats. Mais la communauté de la station restaurée demeure plus polluo-tolérante que celle de la station témoin, et surtout l'ensemble des indicateurs enregistrent une baisse en 2018 et 2020. Cette tendance pose la question de la stabilité temporelle des effets positifs observés : la dynamique enclenchée par la restauration est-elle fragilisée par des événements extérieurs sur le bassin, affectant la qualité physico-chimique de l'eau ? Cette baisse des indicateurs en 2018 et 2020 pourrait également être expliquée par la perturbation transitoire (fuite et mortalité des organismes…) engendrée par la recharge granulométrique de 2017.

Côté poissons, les suivis par pêche électrique alimentant l'indice IPR montrent des effets bénéfiques mesurables un mois seulement après les travaux, et une évolution globalement favorable sur l'ensemble de la période 2007-2020 (Figure 11) : régression des espèces tolérantes et limnophiles (gardon, perche, rotengle), disparition de la perche-soleil, augmentation des espèces rhéophiles et lithophiles (vairon et surtout chabot). Mais là encore une incertitude demeure sur la pérennité de cette tendance. La truite fario et la lamproie de Planer demeurent absentes du secteur, le vairon reste sous abondant et le goujon a disparu en 2020. Ces constats suggèrent le risque d'un « effet isolat » du ruisseau de Marolles, qui conflue en aval avec un cours d'eau en mauvais état ne constituant pas un réservoir biologique suffisant pour les attendues.

Enfin, du point de vue méthodologique, ce retour d'expérience met en évidence plusieurs enseignements. Les problèmes rencontrés sur le suivi morphologique (mauvaise mesure du gabarit de pleins bords) rappellent d'abord l'importance, souvent soulignée, **d'opérer avec un protocole stable et unique sur l'ensemble de la période**, état initial compris - et d'éviter autant que possible les changements d'opérateurs. Par ailleurs, les résultats des suivis « poissons » questionnent le choix de l'emplacement des stations : l'amélioration de l'état du tronçon restauré est indéniable mais elle est également observée (Figure 11), de manière comparable, sur la station témoin, ce qui empêche l'évaluation de la « taille de l'effet » de la restauration. Cette tendance commune résulte-t-elle d'une **trop grande proximité entre la station témoin et le site restauré ?**

La question (déjà posée plus haut dans le cas de la Veyle) apparaît fréquemment dans les retours d'expériences, en particulier sur de petits cours d'eau présentant un linéaire réduit, ou lorsque le projet de restauration est situé proche des sources en tête de bassin. Dans ce cas, faut-il préférer lorsque c'est possible une station témoin située sur un affluent voisin ?

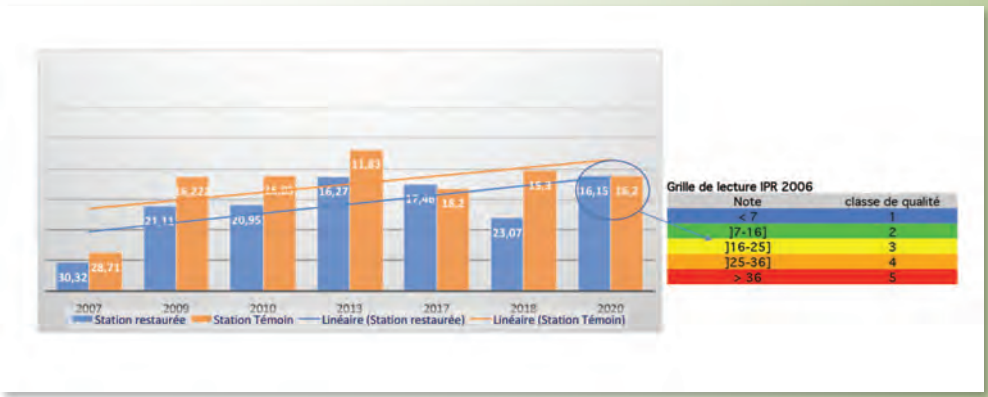


Figure 11. Évolution de l'Indice Poisson Rivière sur le site reméandré du Marolles entre 2009 et 2020 (Source : OFB).

© Anne Vivier OFB

Réinjection sédimentaire sur le Vieux Rhin à Kembs (68) en 2014.

Recharges sédimentaires, reconnexions : des formes restaurées, une pérennité sous conditions

Pour les rivières dont le fonctionnement a été profondément altéré par la mise en place de contraintes latérales (endiguement), ou d'obstacles transversaux bloquant le transit sédimentaire, un reméandrage ou une recréation complète du lit ne sont pas toujours envisageables. Afin d'améliorer l'hydromorphologie et la qualité des habitats de ces cours d'eau, les acteurs de la restauration peuvent cependant intervenir localement, sur des stations judicieusement choisies au regard des bénéfices écologiques qu'elles peuvent apporter. La reconstitution du matelas alluvial par recharge sédimentaire est l'une des approches envisageables pour aider le système à retrouver un fonctionnement plus équilibré et favorable à la biodiversité, en complément des efforts réalisés sur le rétablissement du transit sédimentaire. Dans le cas des grands cours d'eau, la reconnexion d'annexes fluviales est également une option de plus en plus employée pour redonner de l'espace à la biodiversité : ces « bras morts », longtemps sacrifiés sur l'autel de la chenalisation, sont des milieux vitaux pour de nombreuses espèces fluviales (zone d'alimentation, de refuge ou de reproduction) et jouent un rôle majeur pour l'écrêtage des crues. Pour être efficaces dans la durée, ces opérations doivent permettre de rétablir non seulement les habitats fluviaux, mais surtout les processus hydrosédimentaires qui les façonnent : c'est tout l'enjeu des stratégies d'évaluation exposées dans cette quatrième partie.

4.1 - Recharges sédimentaires dans la Save : un suivi « poissons » au défi du temps hydromorphologique

Affluent de la Garonne en rive gauche, la Save est une rivière de 148 km en état physico-chimique globalement bon, mais dont le cours médian est lourdement affecté au plan hydromorphologique. Les curages, les recalibrages, la présence de nombreux seuils et merlons ont abouti à une érosion quasi-totale du matelas alluvial et une incision prononcée (2 à 5 m) du lit. Le projet présenté lors de la journée (Gaël Durbe, FDPPMA 31) a consisté, sur une station choisie pour son accessibilité (propriété de l'AAPPMA locale), à réaliser une recharge sédimentaire avec réalimentations annuelles, pour améliorer la fonctionnalité écologique du secteur et en particulier la qualité d'habitat pour les cyprinidés rhéophiles.

Après une première recharge en 2016 (308 T de graviers/galets et 68 T de blocs) sur la station suivie, des réalimentations ont été réalisées chaque année de 2017 à 2020, réparties sur 100 mètres de linéaire en amont. Au total, 1 466 tonnes de matériaux ont ainsi été injectés dans le secteur, pour un budget de 55 800 €. Ces opérations se sont traduites par la création d'un grand radier varié de faible profondeur (moins de 30 cm) au cours des trois premières années, puis une diversification des écoulements et une reconnexion aux habitats de berges sous l'effet d'une crue vicennale survenue en décembre 2019.

La stratégie de suivi s'est concentrée sur les effets de l'opération sur les peuplements de poissons, évalués par des inventaires de pêche complète en deux passages, avec relevé des données biométriques, sur un linéaire de 170 m (dont 70 non rechargés, en aval du site) : en 2016 (état initial), puis en 2017, 2019, 2021.

Après la crue de 2019, un « nouvel état initial » ?

Les résultats montrent que l'opération favorise durablement la reproduction naturelle des cyprinidés rhéophiles, dont la densité globale a presque doublé entre l'état initial et l'inventaire 2021 (Figure 12).

La recharge granulométrique a favorisé dès la première année les juvéniles et les espèces de petite taille (vairons, goujons et loches), puis un glissement progressif a été observé les années suivantes avec un bénéfice sur les classes de taille 3-4 ans et globalement une meilleure structuration des peuplements. La réalimentation annuelle permet de limiter l'érosion de la station et de conserver dans la durée les bénéfices écologiques. La forte crue de 2019 a cependant induit une profonde transformation des habitats, entraînant notamment le départ des barbeaux adultes (une dizaine de gros individus qui représentaient une part prépondérante de la biomasse totale du secteur) et déclenchant une phase de recolonisation : cette année charnière, qui peut être comparée à un « nouvel état initial », complique l'analyse des tendances et l'évaluation de la « taille de l'effet » des opérations de restauration. Les lacunes de la stratégie de suivi mise en œuvre ont par ailleurs été discutées lors de la journée : absence d'un véritable suivi scientifique sur les micro-habitats, débits et température

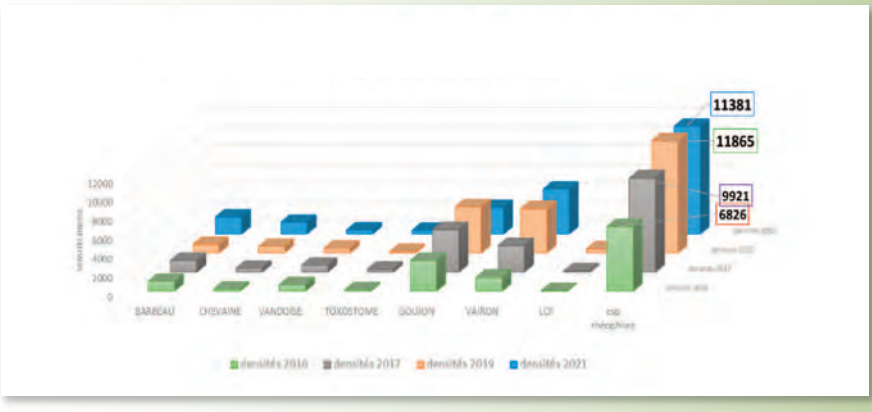


Figure 12. Évolution des densités de poissons rhéophiles dans le secteur restauré de la Save (Source : FDPPMA 31).

(par manque de moyens), et surtout **difficultés pratiques et foncières pour déterminer une station témoin non altéré représentative.**

En conclusion, ce retour d'expérience confirme l'intérêt écologique potentiel des opérations de recharge sédimentaire (surtout lorsqu'elles sont réitérées), mais aussi leur complexité opérationnelle et méthodologique, notamment en matière d'évaluation. Pour les auteurs, un enjeu majeur sera de poursuivre le suivi sur un temps plus long afin de comprendre les effets du projet à l'échelle du « temps hydromorphologique » (celui d'une crue vicennale par exemple, qu'un suivi de cinq années ne permet pas d'appréhender). Un autre axe d'amélioration concerne l'adaptation du dimensionnement et du positionnement de la station de suivi par rapport à la surface rechargée. Ainsi dans le cas de la Save présenté ici, le fait que la partie aval de la station de suivi n'ait pas retenu les matériaux conduit probablement à minorer l'estimation des gains en densité et en biomasse pour l'ensemble de la station.

4.2 - Sur le Vieux Rhin, une approche pionnière pour évaluer les effets d'opérations de recharge et d'érosion maîtrisée

Le cas des grandes rivières au fonctionnement très artificialisé (endiguement, chenalisation, régulation des débits…) reste un véritable défi pour la restauration écologique. Aux difficultés pratiques de l'intervention sur ces milieux larges et profonds (qui nécessitent de mobiliser le cas échéant d'importants volumes de matériaux) s'ajoutent les spécificités liées au suivi : il est par exemple impossible d'y réaliser une pêche électrique représentative.

Le projet scientifique mené par EDF et le CNRS sur le Vieux Rhin, présenté lors de la journée (Cybill Staentzel et Valentin Chardon, CNRS / laboratoire Image Ville Environnement), constitue ainsi une approche pionnière en la matière. Ce tronçon fluvial de 50 km, court-circuité par le grand canal d'Alsace, est passé en deux siècles d'un faciès en tresses à un cours endigué, simplifié et presque rectiligne ; il souffre d'une dynamique hydrosédimentaire très affaiblie entraînant une forte incision du chenal et une perte importante de diversité des habitats, de la faune et de la flore.

Pour redynamiser les processus et améliorer la qualité d'habitats, deux types d'opérations ont été menés. En 2010, 2015 et 2016, trois injections sédimentaires ont été réalisées sur des sites proches au niveau de Kembs (68), pour des volumes égaux de respectivement 23 000, 13 000 et 30 000 m^3. Sur une station située à quelques kilomètres en aval, au niveau d'Ottmarsheim, des opérations de ré-érosion maîtrisées à partir de berges déroctées (retrait de la contrainte latérale sur 300 m), couplées à l'implantation de deux épis transversaux artificiels, ont également été expérimentées.

Pour évaluer dans le temps les effets de ces travaux, une stratégie ambitieuse a été déployée, avec l'utilisation de méthodes et d'outils scientifiques parfois inédite dans ce contexte. Le suivi hydromorphologique, d'une durée de 2 à 8 ans selon les paramètres, a notamment étudié la mobilité de la charge sédimentaire par RFID (suivi du déplacement de graviers équipés d'un pit-tag) et les évolutions granulométriques du fond du chenal par imagerie 2D ; des relevés Lidar topo-bathymétriques ont été réalisés pour cartographier les évolutions morpho-sédimentaires. Le bilan, à ce stade, est assez partagé.

Pour les recharges sédimentaires, le suivi de la « vague sédimentaire » montre à court terme une translation voire une dispersion des matériaux injectés ; puis à moyen terme une fragmentation avec la réhabilitation potentielle de zones de frai favorables pour les cyprinidés.

Concernant l'opération d'érosion maîtrisée, la mise en place des épis transversaux a occasionné une forte augmentation de la diversité morphologique du chenal, mais la fourniture sédimentaire par la berge déroctée s'avère très faible, en lien avec la mise en affleurement d'anciens blocs profondément enfouis qui limitent les processus de sapement de la berge. Ainsi, d'un point de vue géomorphologique, les deux modes d'opérations ont réhabilité en partie les formes d'une hydromorphologie résiduelle mais pas les processus qui assureraient leur maintien à terme. Les effets positifs sont probablement non durables en raison de l'absence de fourniture sédimentaire depuis l'amont mais également lié à l'encaissement important du chenal.

Si les effets morphologiques de ces opérations ne sont pas pérennes, leurs bénéfices écologiques sont en revanche, pour l'heure, bien réels. Leur évaluation (Figure 13) s'est basée sur un suivi multi-compartiment (végétation aquatique et rivulaire, macro-invertébrés benthiques, poissons) et multi-échelle (de l'individu au paysage), selon une approche BACI (*before-after-control-impact*). L'analyse de ces résultats mobilise, là encore, des outils novateurs issus de la géographie ou des mathématiques. Elle a donné lieu au développement d'indicateurs de suivi spécifiques (Staentzel *et al.,* 2018), à la création de ressources pour l'usage opérationnel et à des réflexions méthodologiques (Chardon *et.al.*, 2021). À ce stade, les différentes approches montrent globalement une diversification de la végétation rivulaire et aquatique, et des effets positifs nets sur la faune benthique, notamment sur la station où ont été mis en place les épis transversaux : gains en hétérogénéité des habitats (lotiques et lentiques), augmentation des substrats sableux et des espèces inféodées, accroissement de la richesse spécifique globale et apparition d'un nouveau groupe fonctionnel (celui des espèces fouisseuses, adaptées aux zones de sédimentation).

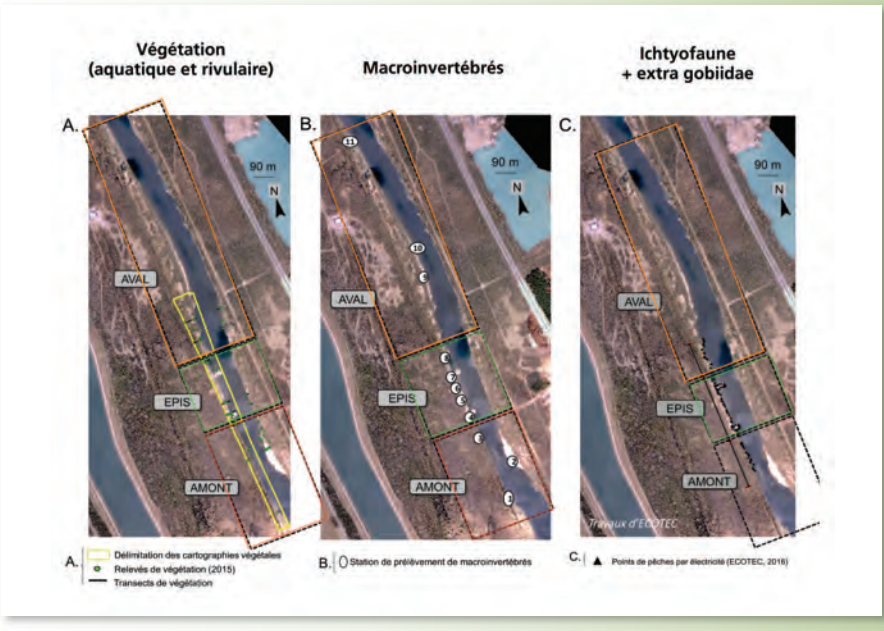


Figure 13. Emprise spatiale des suivis écologiques menés dans le secteur à « érosion maîtrisée » du Vieux Rhin (Source : CNRS laboratoire LIVE).

Plus largement, ce projet toujours en cours constitue un apport majeur au développement d'une boîte à outils opérationnelle pour le suivi de restauration hydromorphologique en grands cours d'eau. Il livre par ailleurs un double constat : les opérations testées se traduisent rapidement par une amélioration de l'état hydromorphologique, qui entraîne une amélioration observable de l'état écologique, mais ces effets positifs ne sont pas durables, en l'absence de rétablissement des processus hydrosédimentaires grâce auxquels ils pourraient perdurer.

Enfin, à partir de l'analyse de l'ensemble des résultats issus des nombreux suivis réalisés par les équipes des laboratoires LIVE - UMR 7362 et de EVS 5600, des recommandations opérationnelles ont été formulées pour optimiser l'efficacité des futures opérations et la durabilité de leurs effets. Il a notamment été proposé de réaliser des zones d'élargissement en aval des injections sédimentaires afin de réduire localement les forces tractrices en période de crue et donc favoriser le dépôt des sédiments injectés. Des bancs de graviers pourraient alors se former et permettre l'installation d'une végétation pionnière, favorable à une potentielle diversification des habitats aquatiques et terrestres. Les sédiments excavés qui résultent de l'élargissement du chenal pourraient être temporairement stockés et injectés en amont de manière itérative.

Cette étude suggère *in fine* qu'un projet de restauration hydromorphologique pour de grands cours d'eau très artificialisés ne peut se limiter à une action localisée sur quelques stations éparses. Elle doit au contraire, pour être durablement suivie d'effets, s'intégrer dans une **stratégie intégrée à grande échelle,** visant d'abord à réamorcer un fonctionnement hydrosédimentaire dynamique. Parmi les pistes pouvant y contribuer : identifier un ensemble de linéaires de berges à dérocter selon leur potentiel de fourniture sédimentaire, et réaliser des injections coordonnées de matériaux sur les stations qui le nécessitent le plus. En parallèle, le rétablissement (autant que possible) de la continuité amont-aval demeure un levier majeur, de même qu'une gestion des débits prenant davantage en compte les enjeux de l'hydromorphologie.

4.3 - Phytosociologie et observation naturaliste pour suivre la reconnexion des bras morts de la Dordogne

Une problématique écologique fréquemment associée à l'altération du transport hydrosédimentaire et à l'incision du lit dans les grands cours d'eau est celle du comblement des annexes fluviales, bien mal nommées « bras morts ». Ces reculées d'eau calme, normalement connectées au moins à l'une de leurs extrémités au cours principal de la rivière, constituent des habitats-clés pour la biodiversité fluviale : elles abritent une faune et une flore résidentes souvent riches, et jouent également des rôles importants pour de nombreuses espèces qui les occupent temporairement (zones de repos ou de refuge lors des crues, frayères pour des poissons comme le brochet…). Elles peuvent en outre offrir des services écologiques précieux, notamment en

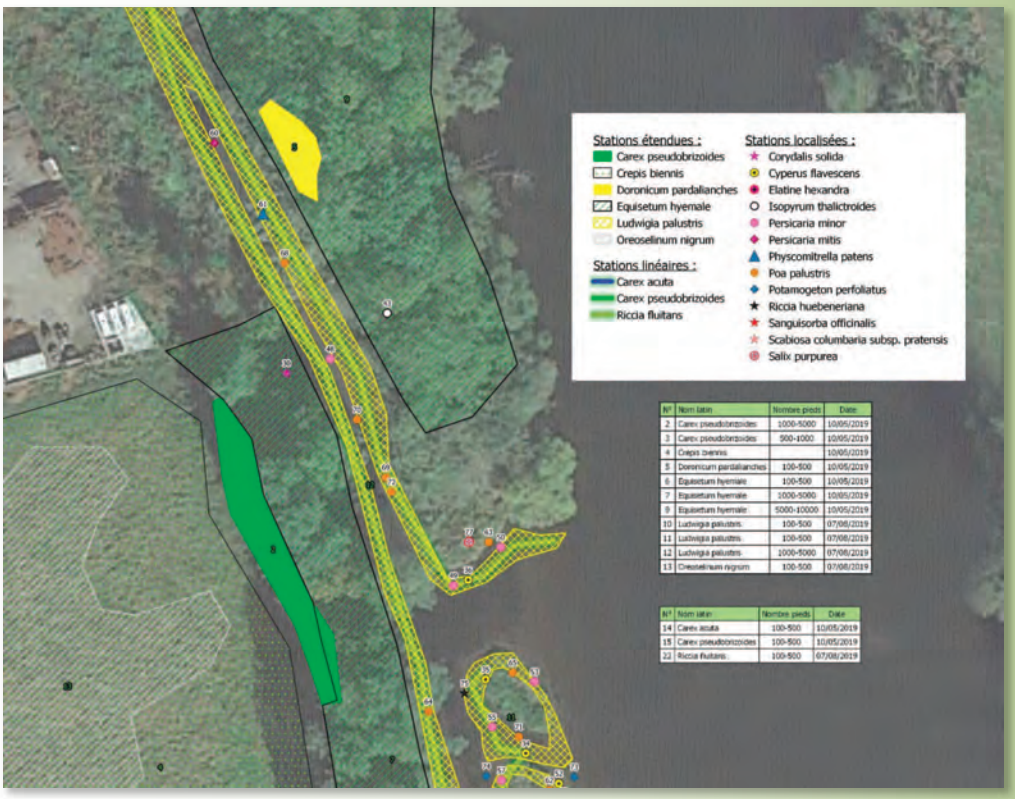
contribuant à l'écrêtage des crues. Avec la chenalisation et l'enfoncement du lit principal, ces milieux se retrouvent partiellement ou complètement isolés du système fluvial et connaissent alors un comblement progressif, associé à une banalisation de leurs communautés végétales.

C'était le cas du bras d'Estresse, annexe déconnectée de la rivière Dordogne sur la commune de Beaulieu (19), qui a fait l'objet en 2014 d'un travail de restauration dont le retour d'expérience a été présenté lors de la journée (F. Moinot, Établissement public territorial du bassin de la Dordogne). Le projet visait la reconstitution d'habitats ripariens par reprofilage des berges sur une surface d'1 ha, et la reconstitution d'habitats piscicoles par creusement pour une surface de 0,7 ha. Co-financé par l'agence de l'eau Adour Garonne, il s'est traduit par une opération de déblai/remblai d'un volume total de 1 500 m^3, avec réinjection des sédiments dans le lit de la rivière, en épaulement de berge.

La stratégie de suivi présentée a consisté à évaluer l'évolution du système entre l'état initial, étudié en 2014 avant les travaux, et son état cinq ans plus tard. Une troisième campagne est programmée pour 2024. Les porteurs du projet ont choisi d'appréhender l'évolution du système essentiellement à travers la qualification de ses habitats. En pratique, pour chaque campagne (état initial et N+5), des **relevés phytosociologiques** ont été réalisés sur l'ensemble du site au printemps, en été et en automne. Cette approche, confiée à un naturaliste indépendant, a permis de décrire de manière standardisée la distribution des espèces floristiques, la cartographie évolutive des habitats (menée en utilisant les cahiers d'habitat publiés par le MNHN), l'installation des espèces cibles et le contrôle des plantes invasives. En complément, des observations piscicoles ont contrôlé le retour des fonctionnalités attendues (en l'occurrence une zone de frayères pour le brochet), et d'autres relevés naturalistes, (mammifères, oiseaux, odonates) ont documenté plus largement la trajectoire de l'écosystème.

Évolution très positive, mais pérennité non garantie

En attendant les résultats du suivi à 10 ans, le bilan est très encourageant. Les 7 habitats identifiés dans l'état initial sous une forme dégradée, se trouvent aujourd'hui dans un bien meilleur état fonctionnel. Le site enregistre une nette augmentation des gazons amphibies, des végétations de grèves alluviales et des mégaphorbiaies riveraines. Les relevés mentionnent en particulier 12 nouvelles espèces végétales d'intérêt patrimonial (Figure 14, page suivante), dont deux espèces classées en « danger d'extinction » dans le Limousin (Souchet jaunâtre et Potamot à feuilles perfoliées). Ces résultats montrent que l'on peut, à partir d'une opération initiale bien menée, faire confiance aux processus spontanés de rétablissement de l'écosystème, notamment l'expression des banques de graines présentes dans les sédiments, les potentiels de recolonisation des espèces, la capacité de concurrence des espèces pionnières indigènes face aux invasives exotiques.



N°	Nom latin	Nombre pieds	Date
2	Carex pseudobrizoides	1000-5000	10/05/2019
3	Carex pseudobrizoides	500-1000	10/05/2019
4	Crepis biennis		10/05/2019
5	Doronicum pardalianches	100-500	10/05/2019
6	Equisetum hyemale	100-500	10/05/2019
7	Equisetum hyemale	1000-5000	10/05/2019
9	Equisetum hyemale	5000-10000	10/05/2019
10	Ludwigia palustris	100-500	07/08/2019
11	Ludwigia palustris	100-500	07/08/2019
12	Ludwigia palustris	1000-5000	07/08/2019
13	Oreoselinum nigrum	100-500	07/08/2019

N°	Nom latin	Nombre pieds	Date
14	Carex acuta	100-500	10/05/2019
15	Carex pseudobrizoides	100-500	10/05/2019
22	Riccia fluitans	100-500	07/08/2019

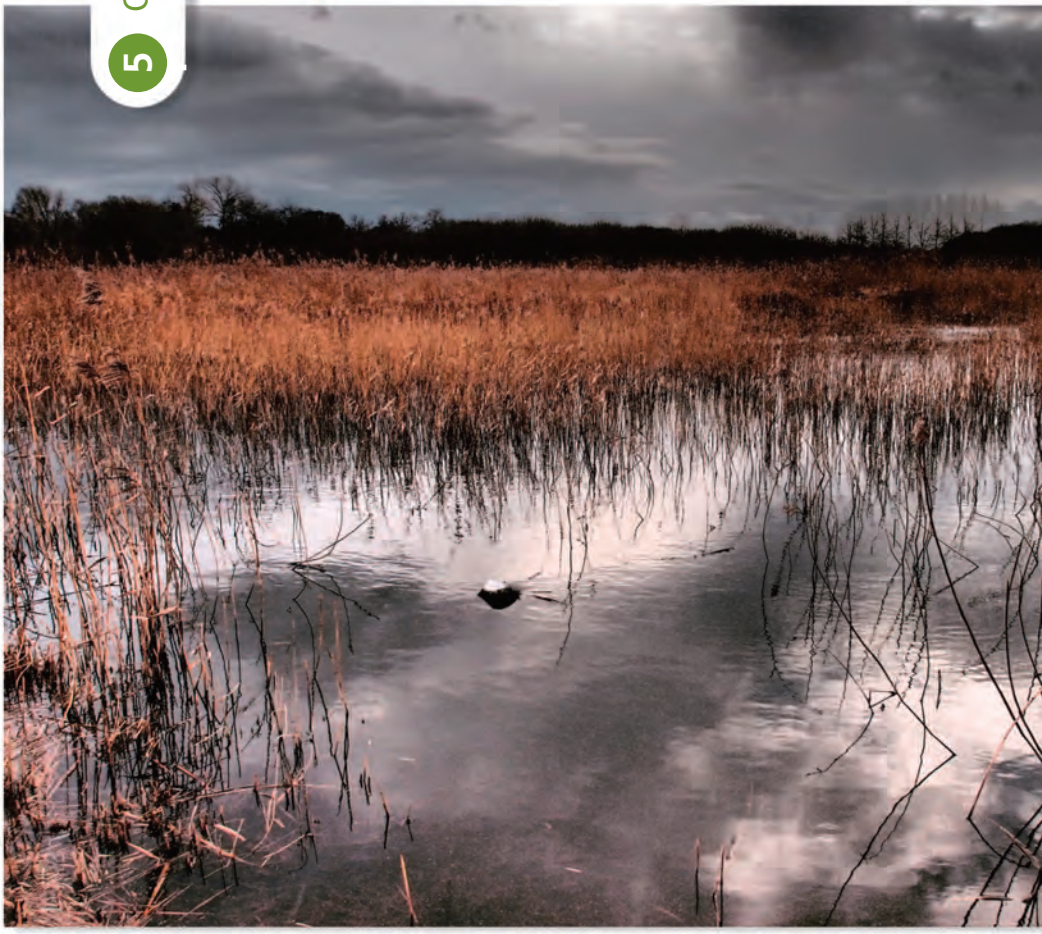
Figure 14. Cartographie des espèces végétales d'intérêt patrimonial dans le bras mort d'Estresse, cinq ans après sa reconnexion (détail) (Source : EPTB Dordogne).

Malgré cette résilience, la trajectoire écologique positive qui s'est enclenchée sur le bras d'Estresse pourrait cependant ne pas durer : en l'absence d'un programme d'interventions de grande envergure, qui permettrait de restaurer une dynamique fluviale et sédimentaire suffisante sur le cours de la Dordogne, son annexe hydraulique restaurée sera probablement à nouveau menacée de déconnexion dans quelques années. Comme souligné plus haut dans le cas du Vieux Rhin (section 4.2), les opérations de restauration locales en grands cours d'eau sont d'utiles « coups de pouces » donnés à la rivière, mais **le maintien de leurs bénéfices écologiques reste conditionné à la réhabilitation des processus** hydrosédimentaires et de la continuité amont-aval.

Une boîte à outils en construction

Du point de vue méthodologique, ce retour d'expérience confirme la pertinence d'une évaluation basée sur les relevés phytosociologiques et les cahiers d'habitats, comme indicateurs intégrateurs de la qualité des milieux recomposés pour la reconnexion d'annexes fluviales. Le projet, parmi les premiers du genre sur la Dordogne, a également livré quelques enseignements quant aux facteurs de succès pour ce type d'opération : être attentif à la configuration topographique et au fonctionnement hydraulique du site (relations hauteur / débit, saisonnalité de l'hydrologie) ; travailler sur des emprises suffisantes, et **privilégier les solutions de type déblai / remblai / réinjection locale,** qui permettent de contribuer à moindre coût à la recharge sédimentaire tout en traitant sur place les foyers d'espèces invasives. Contribution pionnière à la construction d'une « boîte à outils » adaptée au suivi de restauration en milieu fluvial, l'opération du bras d'Estresse en appelle d'autres, notamment sur les berges de la Dordogne : à la faveur d'un programme Life, l'EPTB Dordogne a engagé en 2019 un ensemble de 39 chantiers de restauration (bras morts, îlots, banquettes alluviales…) qui seront aussi l'occasion d'affiner et de consolider les protocoles de suivi.

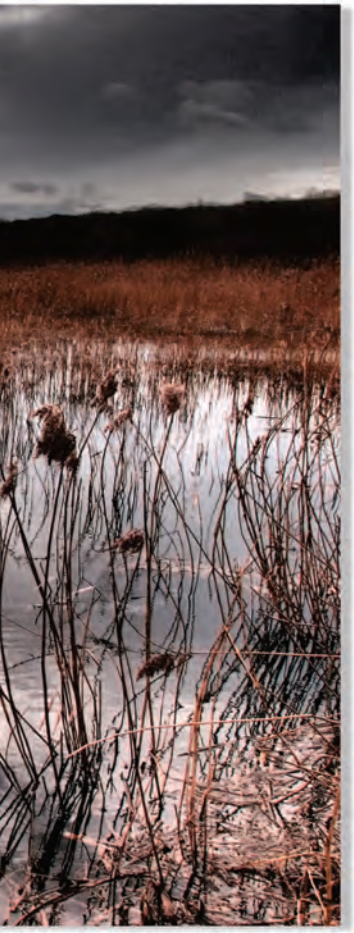
CHAPITRE 5



© Anne Vivier OFB

Marais du Paraclet à Fouencamps-Boves (80).

Plans d'eau, zones humides, estuaires… un œil sur les autres milieux



Si le champ de la restauration écologique s'est d'abord développé autour des cours d'eau, il s'est depuis étendu à d'autres types d'environnements naturels, en particulier aquatiques et humides. Mais qu'il concerne les roselières d'un lac alpin, une butte tourbeuse ou les habitats estuariens, un projet de restauration poursuit toujours un ou des objectifs précis… dont il s'agit désormais de prédire et d'évaluer l'atteinte.

Cette dernière partie aborde quelques contributions françaises à la « boîte à outils de l'évaluation de la restauration », hors des berges des rivières : la création d'un réseau de sites de démonstration pour les plans d'eau ; l'utilisation des indicateurs et protocoles issus du programme MHéO en suivi de restauration des zones humides, et enfin les réflexions en cours pour structurer l'action de restauration écologique dans les milieux estuariens.

5.1 - Vers un réseau de sites de démonstration pour les plans d'eau

À l'instar des cours d'eau, un nombre croissant de projets de restauration écologique porte sur les plans d'eau - étangs, lacs et gravières. Recréation de roselières, reprofilage de berges et désenrochements font partie des opérations les plus souvent menées. Cependant, les retours d'expérience offrant suffisamment de recul demeurent peu nombreux, du fait notamment d'un manque d'outils permettant un suivi rigoureux des projets en plan d'eau.

Le pôle R&D Écla (écosystèmes lacustres) qui regroupe l'OFB, INRAE et l'Université Savoie-Mont Blanc, s'est emparé de cette problématique avec l'objectif de bâtir un réseau de sites de démonstration en plans d'eau, à l'image de ce qui existe pour les cours d'eau (voir section 1.3), et d'y développer une méthodologie d'évaluation standardisée sur le modèle du « suivi scientifique minimal ».

Un premier état des lieux du projet a été présenté lors de la journée (C. Garron, INRAE). Le jeune réseau compte à ce stade une dizaine de plans d'eau, de tailles et de natures très différentes : du lac Léman (Suisse, 74) à l'étang des Aulnes (13), de la retenue hydroélectrique de Serre-Ponçon (04, 05) au lac du Tolerme (46), où sont menés en parallèle le développement des protocoles et l'acquisition de données de suivi.

La première version du guide méthodologique a été publiée en 2019 (Guide et protocoles pour le suivi d'actions de restauration hydromorphologique du littoral en plans d'eau, Taubaty *et al.,* 2019). Elle détaille les modalités d'évaluation pour les **six types d'opérations de restauration retenus :** reprofilage de berges, végétalisation de berges, restauration des niveaux d'eau, restauration de roselières, diversification d'habitats hors berges et restauration de frayères. Les objectifs sont, comme pour le guide de suivi proposé en cours d'eau, de mettre à disposition pour chaque type d'opération une méthode reconductible permettant d'évaluer la « taille de l'effet ». Cela qui implique notamment de définir pour chaque site une station de suivi restaurée, une station témoin altérée, et (lorsque c'est possible) une station témoin non altérée. Pour les opérations qui concernent non pas une partie du linéaire de berge mais l'ensemble du plan d'eau (restauration des niveaux d'eau par exemple), le suivi est réalisé à l'identique sur trois stations réparties sur le pourtour du plan d'eau (Figure 15) afin de disposer de réplicats.

Sur chacune des stations ainsi définies, le suivi doit bien sûr commencer par un état initial (l'année précédant les travaux *a minima*, deux ou trois années avant si c'est possible) puis se poursuivre sur au moins sept années suivant les travaux de restauration. Il comporte trois volets, suivis selon des protocoles précisément décrits dans le guide : hydromorphologie (relevé de la cote en continu et cartographie des habitats), physico-chimie (relevé de température en continu et suivi des paramètres classiques par échantillonnage), et biologie. Cette dernière est appréhendée classiquement à travers trois compartiments :

- les peuplements de poissons (protocole de pêche électrique par points sur chaque station, complétée par l'utilisation de nasses à alevins et de quadrats pour le suivi des frayères) ;

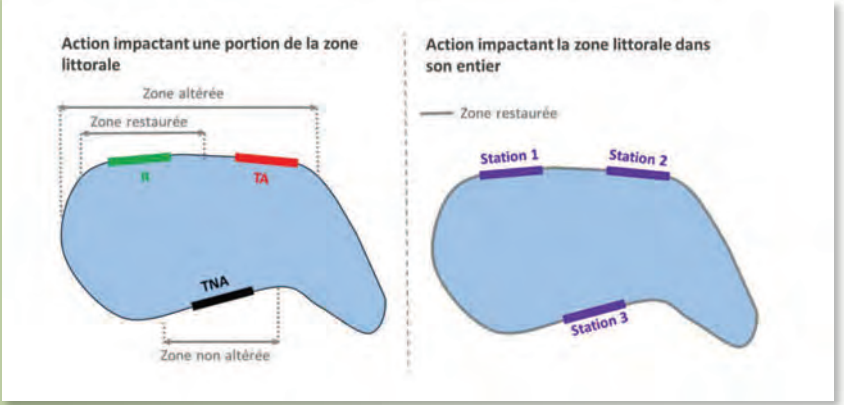


Figure 15. Emplacement des stations de suivi dans le cadre du réseau des sites de démonstration en plans d'eau, schéma de principe (Source : OFB / INRAE).

- les macro-invertébrés benthiques (échantillonnage selon la composition et le recouvrement des différents substrats) ;
- les macrophytes (relevés le long de la zone littorale et transects perpendiculaires à la rive). Le cas des restaurations de roselières fait l'objet d'un protocole spécifique basé sur le relevé de quadrats.

Les données ainsi collectées sont utilisées pour étudier, par exemple, l'évolution de la composition taxonomique, de l'abondance des différentes espèces, des différents indices de diversité et d'équitabilité obtenus.

Le réseau national des sites de démonstration, où sont mis en œuvre et affinés ces protocoles, est appelé à s'étoffer en intégrant d'autres plans d'eau, théâtres d'opérations de restauration. Toutes les candidatures sont les bienvenues, à condition que le plan d'eau (naturel ou artificiel) ait une surface de plus de 2 ha, que le projet concerne l'un (ou plusieurs) des six types d'opérations listées plus haut, et que ses porteurs aient une ambition d'exemplarité dans la conduite des opérations et de leur évaluation. Contact :
prj.suivi-restaurations-plandeau.aix@inrae.fr

5.2 - Mhéo, une boîte à outils complète pour évaluer l'état des zones humides

Marais littoraux, tourbières, mares temporaires, lagunes… les différents types de zones humides, à la fois habitats remarquables et sources de services écosystémiques essentiels, sont souvent des enjeux de première importance pour les gestionnaires de milieux naturels. Nourrie notamment par la mise en œuvre de la directive Habitats Faune Flore, la volonté de développer une méthode intégrée et standardisée pour évaluer leur état de conservation s'est traduite, dès 2009, par le lancement du programme RhoMéo, à l'échelle du bassin Rhône-Méditerranée.

Mené par un collectif de gestionnaires des milieux naturels, de scientifiques et d'experts, ce travail de longue haleine se base sur la définition d'une typologie complète des zones humides (13 types, dont certains comptent plusieurs sous-types), assorties de fonctionnalités données (hydrologiques, biogéochimiques, biologiques). Pour chaque type, l'état de conservation et le niveau de fonctionnalité sont évalués à travers une batterie d'indicateurs standardisés, calculés sur la base de données de terrain (caractéristiques du sol, niveaux d'eau, inventaires floristiques…) collectées par des protocoles formalisés et réplicables.

Après six années de développement, et le test des indicateurs et protocoles proposés sur plus de 200 sites, la première version de la « boîte à outils » Rhoméo a été livrée aux gestionnaires des milieux naturels du bassin Rhône Méditerranée en 2014. Elle a ensuite été déclinée pour les autres grands bassins, sous le nom générique Mhéo ou sous ses appellations locales (Ligéro pour le bassin Loire Bretagne, Bimh-Bap en Artois Picardie…), et fait l'objet d'une **formation nationale à l'usage des gestionnaires,** animée par l'OFB et la Fédération des Conservatoires d'espaces naturels (CEN).

Une approche adaptée au suivi post-restauration

Intervenant lors de la journée, François Micheau (Fédération des conservatoires d'espaces naturels) a rappelé les grandes lignes de cette approche, qui peut être appliquée à tout type de zone humide (y compris les milieux humides connexes à un cours d'eau ou à un plan d'eau). La présentation a souligné l'intérêt et l'opérationnalité de la boîte à outils Mhéo, non seulement pour l'évaluation ponctuelle de l'état d'une zone humide, mais aussi pour le suivi dans le temps de sa trajectoire écologique… et donc l'évaluation des effets d'un projet de restauration : l'idée est alors de réitérer la méthode dans le temps et de mesurer l'évolution du système au regard de l'état-cible et des fonctionnalités visées par le projet.

Un exemple de l'utilisation de cette boîte à outils en suivi de restauration a été donné (S. Gressette, CEN Val de Loire) pour le cas de la butte tourbeuse de la Raguennerie, en Indre-et-Loire. Cette petite tourbière alcaline (rares en France et en Europe) accueille un cortège végétal et animal des milieux humides calcaires, dont plusieurs espèces protégées et notamment l'Orchis élevé, en danger critique d'extinction dans la région.

Pour améliorer l'état de conservation de la tourbière, différents travaux d'entretien et de restauration ont été menés en février et juillet 2019 : débroussaillage (ronciers et fruticées) et arrachage manuel des roseaux, avec export de la végétation. L'objectif visé était de retrouver un bas marais alcalin engorgé en quasi-permanence, avec une baisse significative du recouvrement en phragmites. Pour quantifier les effets des travaux, le gestionnaire a déployé, en 2017 (état initial) puis 2020, la démarche Ligéro, en mobilisant cinq indicateurs (Figure 16) en lien avec les objectifs du projet. Parmi ces indicateurs, l'« indice floristique d'engorgement », mesuré à partir d'un plan d'échantillonnage par transects sur quatre placettes du site, utilise la valeur d'humidité édaphique de chaque taxon (de 1 pour les plantes hyper-xérophiles à 0 pour les plantes aquatiques) pour appréhender le niveau de la nappe. Pour mémoire, dans le cas de la butte tourbeuse de la Raguennerie, cet indicateur est passé de 7,92 en 2017 à 7,44 en 2020 : une réduction qui traduirait une baisse de l'engorgement, mais dont l'ampleur n'est pas significative d'un point de vue statistique. Le recul temporel n'est bien sûr pas suffisant pour dégager une tendance quant à l'effet des travaux ; il faudra poursuivre le suivi de cet indicateur tous les deux ans et analyser en parallèle l'évolution de l'indice floristique de fertilité et de la dynamique hydrologique de la nappe… Pour les zones humides comme pour les cours d'eau, l'évaluation de la restauration se joue sur le temps long, et mobilise plusieurs compartiments.

Fonction	Indicateur Ligéro	Protocole Mhéo
Hydrologique	I02 Indice floristique d'engorgement	P02 flore
	I03 Dynamique hydrologique de la nappe	P03 piézométrie
Biogéo-chimique	I06 Indice floristique de fertilité du sol	P02 flore
Biologique	I10 Intégrité du peuplement d'odonates	P06 odonates
	I11 Intégrité du peuplement d'amphibiens	P07 amphibiens

Figure 16. Tableau des indicateurs et protocoles Mhéo utilisés pour le suivi de restauration de la butte tourbeuse de la Raguennerie (Source : CEN Val de Loire).

5.3 - Restauration estuarienne : avant l'évaluation, progresser sur la formulation des objectifs

Au croisement de multiples enjeux écologiques et socio-économiques, les estuaires sont des milieux complexes qui concentrent les pressions anthropiques : endiguement, poldérisation, dragage, blocage des apports sédimentaires en amont, flux polluants issus de l'ensemble du bassin versant… Ils constituent également un défi particulièrement relevé pour les acteurs de la restauration, du fait d'un manque persistant de connaissances sur leur fonctionnement écologique spécifique (marnage, turbidité, salinité), du manque de partage des retours d'expériences, ainsi que de complexités foncières et administratives.

Dans ce contexte, un travail est mené depuis 2015 à la faveur d'une convention R&D entre l'OFB et le BRGM, pour bâtir et diffuser un cadre méthodologique permettant de structurer et de promouvoir les démarches de restauration estuarienne. La démarche (C. Capderrey, BRGM) a débuté par un état des lieux des pratiques actuelles, à partir de la littérature scientifique internationale (Capderrey *et al.,* 2016). Cette première étape a permis d'identifier un éventail de solutions de restauration déployées en estuaire, selon les différents types de problématiques, mais surtout deux constats génériques qui minorent leur efficacité actuelle. D'abord, les objectifs des projets engagés pour ces milieux sont encore trop souvent imprécis et dépourvus de quantification sur les fonctionnalités écologiques attendues, ce qui constitue un frein à leur bon déroulement - et bien sûr à leur évaluation. Par ailleurs, l'analyse des opérations actuelles montre qu'elles sont généralement centrées sur les structures (restauration de formes ou d'habitats), et non sur les processus et le fonctionnement des écosystèmes, avec pour conséquence une forte incertitude quant à leur pérennité, déjà évoquée dans le cas des grandes rivières (sections 4.2 et 4.3).

Partir des fonctions et services à restaurer pour dimensionner l'effort de terrain

Sur la base de ces constats, un des enjeux majeurs consiste à structurer le cadre méthodologique de la restauration écologique pour les milieux estuariens, à commencer par la définition d'objectifs précis et quantifiés. Une deuxième étape de travail a porté sur l'identification des outils à notre portée notamment en modélisation (Figure 17), pour préciser le lien entre les objectifs de restauration, fonctions écologiques et services écosystémiques, et l'effort de terrain que cela implique : par exemple, « quelle surface de vasières faut-il restaurer pour réhabiliter la fonction de nourricerie de l'estuaire et contribuer de X % à sa productivité secondaire ? ».

En pratique, les dysfonctionnements à traiter sont généralement multiples, amenant les projets de restauration en estuaire à mobiliser conjointement plusieurs approches.

Plus largement, la complexité du fonctionnement de ces écosystèmes et des interactions entre leurs différentes composantes implique de penser les projets de

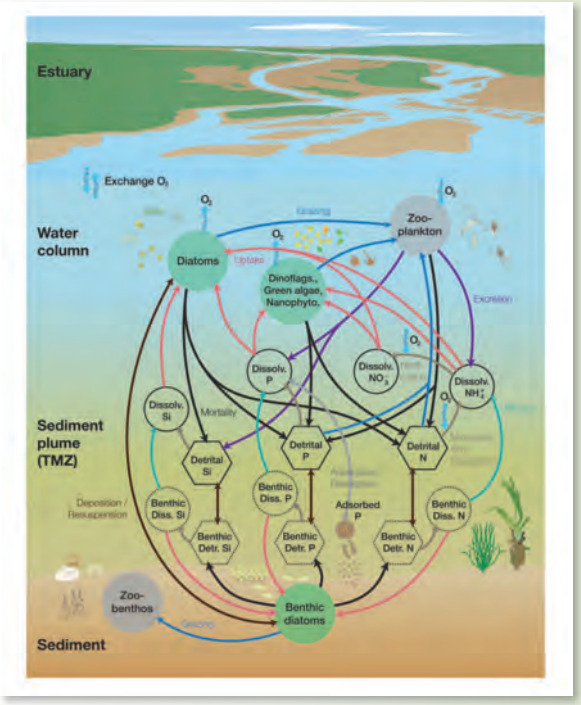


Figure 17. Processus biogéochimiques modélisés par le logiciel Ecomars 3D dans l'estuaire de la Seine (Source : Romero *et al.,* 2019).

restauration dans une stratégie intégrée à l'échelle du paysage, plutôt que sous la forme de « petits projets » épars dont l'efficacité à terme est faible. Pour progresser dans cette voie, les enjeux portent toujours plus sur l'apport de connaissances complémentaires sur le fonctionnement écologique des estuaires, le perfectionnement des outils prédictifs existants, mais surtout le transfert et la mutualisation de ces acquis.

En réponse, l'OFB et le BRGM préparent la création d'une plate-forme nationale dédiée à la restauration en estuaire. Celle-ci s'emploiera à inventorier et à centraliser les actions déjà réalisées, à en réaliser une analyse critique, à mettre en réseau les acteurs et à mettre à leur disposition des ressources : études de cas, annuaire, méthodes, outils de dimensionnement et d'évaluation.

CONCLUSION

© Anne Vivier OFB

Fourreau de trichoptère sur un galet de l'Armançon (21).

Quelques mois après la tenue de cette journée d'échanges techniques, la Commission européenne publiait un ambitieux projet de règlement, portant notamment l'objectif de couvrir au moins 20 % des zones terrestres et marines de l'Union par des mesures de restauration de la nature d'ici 2030. À la suite d'annonces majeures déjà faites en ce sens au cours des dernières années en France et dans le monde, comme la décennie des Nations Unies pour la restauration des écosystèmes 2021-2030, cette avancée confirme que la restauration écologique est désormais reconnue comme l'un de nos meilleurs atouts, en parallèle de l'arrêt des dégradations sur les écosystèmes, pour enrayer l'érosion de la biodiversité. Cette légitimité, les acteurs de la restauration écologique, scientifiques et gestionnaires de terrain, l'ont bâtie en seulement deux ou trois décennies, en multipliant les projets et les réalisations concrètes, notamment sur les cours d'eau. Les expériences et les initiatives relatées dans les pages qui précèdent illustrent le chemin accompli en France. La communauté de la restauration s'appuie aujourd'hui sur un socle conceptuel, un langage commun et des outils de plus en plus éprouvés. La définition d'objectifs écologiques et territoriaux en amont des projets, aussi largement partagés que possible par les acteurs locaux, est maintenant reconnue comme l'un des incontournables de la discipline. La palette de techniques du génie écologique, mobilisables pour atteindre ces objectifs, continue à s'élargir et à se consolider.

Pour autant, les trajectoires des écosystèmes restaurés demeurent semées de l'incertitude inhérente aux processus naturels. Comme l'a rappelé Philippe Dupont, ancien directeur de la recherche et de l'appui scientifique de l'OFB et grand témoin de cette journée, l'une des forces de la communauté de la restauration tient à l'honnêteté de son approche. Le fait d'assumer les incertitudes, les semi-réussites et parfois les déconvenues, est aussi un gage de crédibilité donné aux décideurs comme au grand public. Cependant les actions de restauration engagent et transforment dans la durée les territoires, et peuvent mobiliser des budgets conséquents : de plus en plus les porteurs de projets sont appelés à justifier de la bonne utilisation des moyens engagés, de la manière la plus objective possible. Ainsi le domaine de l'évaluation de l'efficacité des projets constitue-t-il un axe de progression capital dans les prochaines années, pour gagner encore en crédibilité et alimenter une « politique basée sur les preuves ». Alors que seule une minorité des projets actuels intègre aujourd'hui une réelle stratégie de suivi, l'enjeu est d'accroître rapidement cette part pour, à terme, faire de l'évaluation une composante systématique des actions de restauration.

Le panorama provisoire proposé ici, appuyé sur la sélection d'études et de retours d'expériences rassemblée en amont par un groupe d'experts nationaux, montre d'abord que la boîte à outils pour mener cette évaluation est aujourd'hui bien remplie, notamment pour la restauration des cours d'eau. Selon le type d'opération et les objectifs du projet, les maîtres d'ouvrages ont à leur disposition un large éventail de méthodes pour suivre dans la durée l'évolution des paramètres pertinents et le rétablissement des fonctionnalités écologiques : indices faunistiques et floristiques, protocoles de caractérisation de l'hydromorphologie, jusqu'aux approches les plus innovantes comme l'indice de fragmentation génétique ou l'« écoute » des pierres de la rivière au moyen d'hydrophones… Sous l'impulsion de l'OFB et de ses partenaires, à la faveur entre autres du développement du Réseau des sites de démonstration, des efforts importants sont faits pour standardiser ces méthodes. Elles s'accompagnent d'un ensemble de bonnes pratiques que devraient partager tous les projets à venir : la réalisation d'un état initial solide, la mise en œuvre d'un suivi multi-compartiment dans la durée (au moins sept années post-travaux) à la fréquence adéquate, sur un ensemble de stations (restaurées et témoin) judicieusement choisies… Cette véritable ingénierie du suivi, qu'il s'agit de mettre en œuvre, mobilise du temps et des compétences pointues : elle implique un accompagnement technique des maîtres d'ouvrage et des acteurs de terrain, dans lequel l'OFB et ses partenaires continueront à prendre pleinement leur part.

Indispensable pour rendre compte de l'atteinte des objectifs d'un projet donné, ce travail d'évaluation systématique apporte aussi des éléments objectifs et chiffrés pour susciter plus largement l'adhésion autour des

efforts engagés, auprès des financeurs, des élus ou de la société toute entière. Il constitue enfin une formidable mine d'enseignements pour la démarche de restauration écologique elle-même. La moisson de données qu'il génère, de plus en plus standardisées et donc comparables d'un site à l'autre, alimente le socle de connaissances scientifiques et techniques sur lequel se baseront les succès de demain. Les quelques retours d'expériences présentés ici en sont représentatifs. Il en ressort notamment que les projets d'effacements d'ouvrages transversaux, lorsqu'ils sont bien menés, entraînent en général des réponses marquées et positives des écosystèmes : retour rapide des espèces-cibles (dont les poissons migrateurs), diversification des habitats aquatiques, amélioration des indices biologiques… Pour les opérations de type reméandrage ou contournement de plans d'eau, le succès est aussi souvent au rendez-vous, mais il apparaît davantage conditionné par les techniques de restauration et les critères de dimensionnement utilisés, la capacité d'auto-restauration du cours d'eau, son hydrologie (crues morphogènes) et sa dynamique sédimentaire. Ce constat est plus marqué encore dans le cas des opérations de type recharge sédimentaire, érosion maîtrisée ou reconnexion d'annexes alluviales : les démarches de suivi encore expérimentales menées sur quelques projets montrent ainsi que les bénéfices « de forme » (diversification des habitats et de la végétation, accroissement de la richesse spécifique), obtenus rapidement à la suite de telles opérations, ne seront probablement que provisoires en l'absence d'un rétablissement de la dynamique hydrologique et sédimentaire du cours d'eau - notamment dans le cas des grandes rivières au fonctionnement très artificialisé.

Ainsi les cours d'eau ont fait office, à la faveur notamment de la mise en œuvre de la DCE, de laboratoire pour l'évaluation de la restauration. Un défi majeur des prochaines années sera d'établir des passerelles entre les différents types de milieux, afin de partager et de transférer les acquis méthodologiques concernant l'évaluation de la restauration. Les travaux et initiatives pionniers présentés dans la dernière partie de cette synthèse montrent que cet effort de transfert est déjà engagé, à différents degrés, pour le cas des plans d'eau, des zones humides et des milieux estuariens. Demain, il s'étendra également aux initiatives, de plus en plus nombreuses, consacrées à la restauration des milieux marins, terrestres, ou encore à la désartificialisation des sols. Là aussi, des outils et des méthodes sont ou devront être développés et testés, standardisés, et déployés, en s'aidant de ce qui existe déjà, pour donner aux femmes et aux hommes qui portent ces projets les moyens d'en suivre les effets, et d'en démontrer le bien-fondé.

BIBLIOGRAPHIE

■ Alp M., Arnaud F., Barthélémy C., Cottet M., Gramaglia C. - Taking an interdisciplinary perspective to disentangle complex effects of restoring ecological continuity in riverine socio-ecosystems. 4e Conférence internationale I.S.Rivers, Jul 2022, Lyon, France. ⟨hal-03760362⟩ https://asso.graie.org/isrivers/programme/ (consulté le 11/01/2023)

■ Archaimbault V., Boutet-Berry L., Rolan-Meynard M., Bramard M., Vivier A. - Evaluer l'efficacité d'une action de restauration hydromorphologique : apport des 13 années de suivi sur le Marolles. 4e Conférence internationale I.S.Rivers, Jul 2022, Lyon, France. https://asso.graie.org/isrivers/programme/ (consulté le 11/01/2023)

■ Capderrey C., Olivier J.M., Moussard S., Foussard V., Bacq N. 2016. - Retours d'expériences de restauration écologique en milieu estuarien, analyse de la littérature ascientifique publiée. Rapport final. Onema-BRGM. 92 pp. https://www.documentation.eauetbiodiversite.fr/notice/00000000016bb6d90c991ab061792140

■ Chardon V., Schmitt L., Arnaud F., Piégay H. & Clutier A. 2021. - Efficiency and sustainability of gravel augmentation to restore large regulated rivers: Insights from three experiments on the Rhine River (France/Germany). Geomorphology 380: 107639. https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2021.107639

■ Depoilly D. & Dufour S. 2015. - Influence de la suppression des petits barrages sur la végétation riveraine des cours d'eau du nord-ouest de la France. Norois (237): 51-64. https://doi.org/10.4000/norois.5786

■ Lorenz A.W. 2021. - Continuous riverine biodiversity changes in a 10-years-post-restoration-study-impacts and pitfalls. River Research and Applications 37 (2): 270-282. https://doi.org/10.1002/rra.3729

■ Osenberg C.W., Sarnelle O. & Cooper S.D. 1997. - Effect Size in Ecological Experiments: The Application of Biological Models in Meta-Analysis. The American Naturalist 150 (6): 798-812. https://doi.org/10.1086/286095

■ Prunier J.G., Poesy C., Dubut V., Veyssière C., Loot G., Poulet N. & Blanchet S. 2020. - Quantifying the individual impact of artificial barriers in freshwaters: A standardized and absolute genetic index of fragmentation. Evolutionary Applications 13 (10): 2566-2581. https://doi.org/10.1111/eva.13044

■ Rolan-Meynard M., Vivier A., J. Bouchard, Boutet-Berry L., P. Mangeot, Navarro L., Moreira-Pellet B., Bramard M., Bihan M.L., Magand C., Leurent T., Vigneron T., Cagnant M., Bourrain X., Morel A., Kreutzenberger K., Reyjol Y. & Melun G. 2019. - Guide pour l'élaboration de suivis d'opérations de restauration hydromorphologique en cours d'eau. Agence française pour la biodiversité. Coll. Guides et protocoles 190 pp. https://www.documentation.eauetbiodiversite.fr/notice/guide-pour-l-elaboration-de-suivis-d-operations-de-restauration-hydromorphologique-en-cours-d-eau0

■ Romero E., Garnier J., Billen G., Ramarson A., Riou P. & Le Gendre R. 2019. - Modeling the biogeochemical functioning of the Seine estuary and its coastal zone: Export, retention, and transformations. Limnology and Oceanography 64 (3): 895-912. https://doi.org/10.1002/lno.11082

■ Roset N., Parussatti S., Sadot M., Charbonnier L., Navarro L., Tessier C., Vivier A. - Restauration de la Veyle à Buellas par création d'un nouveau lit en dérivation d'une gravière. Zoom sur le suivi hydromorphologique 11 ans après la mise en eau. 4e Conférence internationale I.S.Rivers, Jul 2022, Lyon, France. https://asso.graie.org/isrivers/programme/ (consulté le 11/01/2023)

■ Roset N., Parussatti S., Sadot M., Charbonnier L., Navarro L., Tales E. - Restauration de la Veyle à Buellas par création d'un nouveau lit en dérivation d'une gravière. Focus sur les suivis piscicoles et la thermie 11 ans après la mise en eau. 4ème Conférence internationale I.S.Rivers, Jul 2022, Lyon, France. https://asso.graie.org/isrivers/programme/ (consulté le 11/01/2023)

■ Society for Ecological Restoration International Science & Policy Working Group. 2004.- The SER International Primer on Ecological Restoration. www.ser.org & Tucson: Society for Ecological Restoration International.

■ Staentzel C., Arnaud F., Combroux I., Schmitt L., Trémolières M., Grac C., Piégay H., Barillier A., Chardon V. & Beisel J.-N. 2018. - How do instream flow increase and gravel augmentation impact biological communities in large rivers: A case study on the Upper Rhine River. River Research and Applications 34 (2): 153-164. https://doi.org/10.1002/rra.3237

■ Taubaty M., Rolan-Meynard M., Argillier C.,Raymond J.C., Marchand C. 2019. - Guide et protocoles pour le suivi d'actions de restauration hydromorphologique du littoral en plans d'eau. Rapport intermédiaire. Pôle ECLA. pp.100. 〈hal-02608713〉

■ Vivier A., Rolan-Meynard M., Tuaux S., Rigault B., Reyjol Y., Melun G. & Jourdan S. 2022. - Principes fondamentaux et exemple d'application du « Guide pour l'élaboration des suivis d'opérations de restauration hydromorphologique en cours d'eau ». Naturae (5). https://doi.org/10.5852/naturae2022a5

Rédaction

Laurent Basilico (journaliste scientifique) et Anne Vivier (OFB)

Le comité de pilotage souhaite remercier l'ensemble des intervenants et des animateurs d'ateliers, les participants, ainsi que l'ensemble des personnes ayant contribué à la réussite de cette journée et notamment les indispensables « fonctions support ».

Membres du comité de pilotage :

- Coordinatrice : Anne Vivier (OFB - DRAS)
- Nicolas Hette-Tronquart (OFB - DRAS)
- Gabriel Melun (OFB - DRAS)
- Yoann Bressan (OFB - DRAS)
- Karl Kreutzenberger (OFB - Pôle R&D « Migrateurs amphihalins » OFB-INRAe-Institut Agro-UPPA, Service « Eau et milieux aquatiques »)
- Marlène Rolan-Meynard (OFB - DRAS/Pôle ECLA)
- Coralie Garron (INRAE FRESHCO/Pôle ECLA)
- Evelyne Tales (INRAE HYCAR)
- Maria Alp (INRAE RiverLy)
- Josée Peress (OFB - DAC)
- Delphine Jung (OFB - DAC)
- William Sremski (OFB - DR AURA)
- Laetitia Boutet-Berry (OFB - DR CVdL)
- Olivia Mercier (OFB - DR GE)
- Julien Bouchard (OFB - DR BFC)
- Sophie Tuaux (OFB - DR HdF)
- Michel Bramard (OFB DR Naq)
- Alexandra Hubert (OFB DR Bretagne)
- Laure Lebecherel (MTES - DEB)
- Jérôme Guillouet (FNPF)
- Stéphanie Hudin (FCEN)
- François Micheau (FCEN)
- Charlotte Le Moigne (FCEN)
- Stéphane Jourdan (AEAP)
- Marie-Pierre Pinon (AESN)
- Anne Citterio (AEAG)

Intervenants et relecteurs :

- Anne Vivier (OFB - DRAS)
- Marlène Rolan-Meynard (OFB - DRAS/Pôle ECLA)
- Evelyne Tales (INRAE HYCAR)
- Virginie Archaimbault (INRAE HYCAR)
- Maria Alp (INRAE RiverLy)
- Laetitia Boutet-Berry (OFB - DR CVdL)
- Julien Bouchard (OFB - DR BFC)
- Florian Rabemananjara (CEN Lorraine)
- Jérôme Prunier (CNRS Moulis)
- Simon Dufour (Université Rennes 2 - CNRS)
- Nicolas Roset (OFB - DR AURA)
- Aurélien Mathevon (SMVVA)
- Michel Bacchi (SARL RIVE)
- Gaël Durbe (FDPPMA 31)

- Frédéric Moinot (EPIDOR)
- Cybill Staentzel (ENGEES - CNRS)
- Valentin Chardon (Faculté de géographie et d'aménagement de Strasbourg - CNRS)
- François Micheau (FCEN)
- Serge Gressette (CEN CVdL)
- Coralie Garron (INRAE FRESHCO/Pôle ECLA)
- Cécile Capderrey (BRGM)
- Philippe Dupont
- Claire-Cécile Garnier (MTES)
- Marie Lusson (INRAE Montpellier)
- Alexandre Peeters (CNRS)
- Bertrand Morandi (GRAIE)
- Gabriel Melun (OFB-DRAS)
- Bernard De Le Court (Service public de Wallonie)
- Paul Rouveyrol (UAR Patrinat)
- Benoît Blazejewski (FDPPMA 62)

Programme complet de la journée :
https://professionnels.ofb.fr/sites/default/files/pdf/jet/JET2021_EvaluationRestauration_Programme.pdf

Édition

- Béatrice Gentil-Salasc, Stéphanie Belaud (OFB)

Création et mise en page graphique

- Béatrice Saurel (saurelb@free.fr)

Citation

- Basilico L., Vivier A. 2023. Évaluer la réponse des cours d'eau aux opérations de restauration écologique - Études de cas et enseignements pour le suivi et l'évaluation. Office français de la biodiversité. Collection Rencontres-Synthèse. 68 pages.

La collection Rencontres synthèse,

destinée à un public technique ou intéressé, présente les principaux résultats de séminaires organisés, ou co-organisés, par l'OFB.

Derniers numéros parus

- Évaluer la réponse des cours d'eau aux opérations de restauration écologique - Études de cas et enseignements pour le suivi et l'évaluation (novembre 2023)
- Évaluer l'état écologique des récifs coralliens - Réflexions à la croisée des politiques publiques de protection (septembre 2021)
- Quand les rivières reprennent leur cours - Notes sur l'effacement de barrages et de seuils, sur la Sélune et ailleurs (février 2021)
- La pollution plastique. De nouvelles connaissances et des pistes pour l'action publique (septembre 2020)
- L'ADN environnemental pour l'étude de la biodiversité. État de l'art et perspectives pour la gestion (janvier 2019)
- Quels instruments pour une gestion collective des prélèvements individuels en eau pour l'irrigation ? (août 2016)
- Récifs coralliens et herbiers des outre-mer. Réflexions autour du développement d'outils de bioindication pour la directive cadre sur l'eau (août 2016)
- La bioindication en outre-mer. Situation et perspectives dans le contexte de la directive cadre sur l'eau (janvier 2016)
- La contamination chimique des milieux aquatiques. Outils et méthodes pour le diagnostic et l'action (mars 2014)
- Comment améliorer le flux de la connaissance pour relever les défis de la DCE ? (mars 2014)

- Les invasions d'écrevisses exotiques. Impacts écologiques et pistes pour la gestion (octobre 2013)
- Biodiversité aquatique : du diagnostic à la restauration (septembre 2013)
- Bioindication : des outils pour évaluer l'état écologique des milieux aquatiques (avril 2013)
- Mise en oeuvre de la directive cadre sur l'eau. Quand les services écosystémiques entrent en jeu (février 2013)
- Plan de sauvegarde de l'anguille. Quelles solutions pour optimiser la conception et la gestion des ouvrages (novembre 2012)

https://professionnels.ofb.fr/fr/rencontres-synthese

Gratuit
Dépôt légal à parution
ISBN web : 978-2-38170-159-2
ISBN print : 978-2-38170-160-8
Impression : Estimprim
Imprimé en France sur du papier issu de sources responsables

La reproduction à des fins non commerciales, notamment éducatives, est permise sans autorisation écrite à condition que la source soit dûment citée.
La reproduction à des fins commerciales, et notamment en vue de la vente, est interdite sans permission écrite préalable.

© OFB, novembre 2023

RÉPUBLIQUE FRANÇAISE
Liberté
Égalité
Fraternité

OFB
OFFICE FRANÇAIS DE LA BIODIVERSITÉ

www.ofb.gouv.fr @ofbiodiversite
Office français de la biodiversité
12, cours Lumière, 94300 Vincennes - Tél. : 01 45 14 36 00
Photo couverture : © Anne Vivier - OFB
Graphisme : © B. Saurel pour OFB