



# Prospective sur les actions de recherche sur la restauration et la remédiation écologique des milieux aquatiques

**Journées d'étude les 11 et 12 mars 2013  
organisées par les Zones ateliers Rhône et Moselle  
dans le cadre du réseau inter Zones Ateliers**



Crédit photo : J.-M. Olivier, UCBL CNRS



## **Document de synthèse à destination de l'ONEMA proposé par**

Dad Roux-Michollet, Anne Clémens, Bernard Montuelle et Pierre Marmonier

### **Avec la collaboration de**

Gilles Armani, Cécile Bellot, Marc Benoit, Gudrun Bornette, Simon Devin, Sylvie Dousset, Sabine Greulich, Marc Lebouvier, Véronique Rosset, Evelyne Tales, Marielle Thomas, Aude Zingraff

**Juin 2013**

## **Fiche résumée des questions de recherche et d'innovation pour les 10 prochaines années**

Dans le cadre des échanges scientifiques inter-Zones Atelier, deux journées de réflexion prospective sur les besoins en recherche dans le domaine de la restauration et de la remédiation des milieux aquatiques ont été organisées par la Zone Atelier Bassin du Rhône à Villeurbanne, les 11 et 12 Mars 2013. Ces échanges ont conduit à soulever de nombreuses questions pour lesquelles des recherches paraissent nécessaires dans les dix prochaines années, soit d'un point de vue fondamental, soit d'un point de vue de l'application de connaissances déjà acquises. Ces questions sont listées, par grands axes de réflexion, dans cette fiche résumée et sont détaillées et discutées dans le document annexé à cette fiche.

***Des définitions claires.*** Au cours de la rédaction de ce document nous avons utilisé les définitions acceptées au niveau international pour les termes de restauration et remédiation. La **restauration écologique** consiste à favoriser le fonctionnement naturel d'un écosystème et sa capacité de résilience sans pour autant vouloir reconstituer toutes les composantes de l'écosystème préexistant à sa dégradation. La **remédiation** consiste à endiguer ou éliminer, par des moyens naturels ou artificiels, des substances nuisibles à l'environnement (polluants, contaminants...) afin de revenir à un meilleur état écologique.

***Une production scientifique importante.*** La production scientifique dévolue aux problèmes de restauration écologique des milieux est quantitativement très importante (plus de 2500 articles en 2012 étaient indexés dans Science Direct au mot clé "restoration ecology") mais une grande part de ces travaux prennent pour objet des systèmes terrestres : en 2012-13 seuls 30% des articles publiés dans la revue internationale Restoration Ecology traitaient des systèmes aquatiques. Parmi ceux-ci, seuls 25% s'intéressent à la restauration des zones humides et 15% aux cours d'eau.

***Des questions de recherche prioritaires.*** Les questions de recherche relevées par les participants à ces deux journées de réflexion relèvent de cinq grands axes:

- (1) Les points de blocage dans la compréhension du fonctionnement des milieux aquatiques et de leurs interfaces,
- (2) L'identification et la hiérarchisation des pressions actuelles et futures,
- (3) Les compromis entre exigences scientifiques, techniques/technologiques et socioéconomiques dans la mise en œuvre des actions de restauration,
- (4) Les modes opératoires, méthodes et stratégies pour une restauration durable,
- (5) Les indicateurs pour évaluer le succès des opérations de restauration.

Ces questions sont réunies sous forme de tableau synthétique dans cette fiche résumé et sont détaillées et argumentées dans l'annexe.

***Axe 1 : Points de blocage dans la compréhension du fonctionnement des milieux aquatiques et de leurs interfaces (Tableau 1)***

Thématiques	Questions de recherche à développer
Rôle des forçages externes dans le fonctionnement des milieux	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Comment quantifier des flux de matière et d'énergie ?</li> <li>2. Quels facteurs externes limitent les processus biogéochimiques dans le milieu étudié?</li> </ol>
Importance de la biodiversité	<ol style="list-style-type: none"> <li>3. Quels types de diversité biologique doivent être considérés pour évaluer le succès des restaurations ?</li> <li>4. Quels niveaux de diversité biologique veut-on atteindre ?</li> <li>5. Comment la biodiversité à l'échelle des paysages modifie-t-elle la dynamique des espèces invasives ?</li> </ol>
Espèces clé de voute et espèces ingénieurs	<ol style="list-style-type: none"> <li>6. Les espèces ingénieurs sont-elles des moteurs de la restauration ?</li> <li>7. Comment les identifier ?</li> <li>8. Comment évaluer les effets de leur réintroduction, directe ou indirecte ?</li> </ol>
Liens entre pressions anthropiques et grandes fonction biologiques	<ol style="list-style-type: none"> <li>9. Comment caractériser les pressions avant restauration, leur rôle dans le dysfonctionnement du système et les conséquences sur les grandes fonctions biologiques ?</li> <li>10. Comment évaluer les modifications induites par la restauration et les grandes fonctions biologiques ?</li> <li>11. Peut-on identifier les pressions à lever et anticiper les conséquences de cette levée sur les fonctions biologiques ?</li> </ol>
Processus adaptatifs	<ol style="list-style-type: none"> <li>12. Comment prendre en compte la diversité génétique et les flux de gènes dans les opérations de restauration ?</li> <li>13. La plasticité phénotypique favorise-t-elle le succès de la restauration ?</li> </ol>
Liens entre fonctionnement écologique et services rendus	<ol style="list-style-type: none"> <li>14. Comment la restauration du fonctionnement d'un système renforce-t-elle les services écologiques rendus ?</li> <li>15. Quels sont les services attendus pour chaque type d'action de restauration ?</li> <li>16. Quels fonctions/services sont antagonistes dans le cas d'une restauration ?</li> </ol>

**Axe 2 : Identification et hiérarchisation des pressions actuelles et futures (Tableau 2)**

Thématiques	Questions de recherche à développer
Hiérarchisation des pressions	1. Quelle méthode d'analyse est efficace pour hiérarchiser les pressions subies par un écosystème (par ex., DPSIR) ?
Devenir des pressions actuelles et pressions émergentes	2. Quel est le devenir des pressions physiques (scenarios)? 3. Quel est le devenir des pressions chimiques (scénarios)?
Changements climatiques	4. Quelles prédictions peuvent être faites à l'échelle locale ? 5. Quelles vont être les nouvelles contraintes et les nouvelles conditions du milieu ? 6. Comment appliquer ces prédictions aux projets de restauration ?
Changements d'utilisation de l'espace	7. Comment intégrer les changements démographiques et sociétaux au projet de restauration ? 8. Quel impact et quelle restauration en zones urbaine, périurbaine et touristique ? 9. Quelle est l'importance des zones tampons et de leur restauration dans l'amélioration du fonctionnement des écosystèmes ? 10. Existe-t-il une restauration favorisant la gestion écologiquement intensive des milieux aquatiques ?

***Axe 3 : Compromis entre les exigences scientifiques, techniques et socioéconomiques dans la mise en œuvre des actions de restauration (Tableau 3)***

Thématiques	Questions de recherche à développer
Les jeux d'acteurs	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Comment analyser les jeux d'acteurs dans les plans de restauration ?</li> <li>2. Comment définir le rôle de chacun pour optimiser les travaux de restauration ?</li> <li>3. Quels outils construire pour la formation du grand public et l'analyse des discours ?</li> <li>4. Quel est le rôle de la psychologie sociale environnementale ?</li> </ol>
Objectifs et enjeux	<ol style="list-style-type: none"> <li>5. Quels sont les critères et les compromis à prendre en compte pour construire les objectifs de restauration ?</li> <li>6. Comment arbitrer entre les différents enjeux ? Quel est le rôle de la socio-économie ?</li> </ol>
Représentations collectives de la Nature	<ol style="list-style-type: none"> <li>7. Comment évaluer la représentation collective des écosystèmes restaurés, des pollutions peu ou non visibles ?</li> <li>8. Comment intégrer la perception des services écologiques à la restauration des écosystèmes ?</li> <li>9. Les sociétés associent-elles des effets indésirables aux projets de restauration ?</li> </ol>
Mesures compensatoires	<ol style="list-style-type: none"> <li>10. Comment évaluer les objectifs des mesures compensatoires et construire le projet ?</li> <li>11. Comment intégrer l'histoire du site et son éco-potentialité ?</li> <li>12. Comment sont perçues ces mesures compensatoires par les différents acteurs ?</li> <li>13. Quelle est la légitimité éthique de ces mesures et comment est-elle perçue ?</li> </ol>

***Axe 4 : Modes opératoires, méthodes, et stratégies pour une restauration durable  
(Tableau 4)***

Thématiques	Questions de recherche à développer
Trajectoire écologique des milieux	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Comment modéliser les trajectoires et successions écologiques ?</li> <li>2. Faut-il maintenir les zones restaurées à un état donné de la succession ?</li> <li>3. Faut-il adapter les opérations de restauration pour obtenir une mosaïque de successions écologiques ?</li> </ol>
Phasage des étapes et échelle temporelle	<ol style="list-style-type: none"> <li>4. Quels critères pré-restauration faut-il mesurer ?</li> <li>5. Quand restaurer ?</li> <li>6. Quand lever les pressions chimiques, physiques ou biologiques, et dans quel ordre ?</li> <li>7. Quelle durée et quelles modalités des suivis post-restauration ?</li> </ol>
Echelle spatiale	<ol style="list-style-type: none"> <li>8. Comment définir une échelle spatiale pertinente ?</li> <li>9. Comment intégrer la connectivité spatiale aux échelles d'études des écosystèmes ?</li> </ol>
Modalités d'intervention et mise en place de suivis	<ol style="list-style-type: none"> <li>10. Quelle stratégie et quelle intensité d'intervention doivent être choisies ?</li> <li>11. Quelles méthodes pour rétablir la résilience des systèmes ? Et comment vérifier cette résilience ?</li> </ol>
Innovations métrologiques et technologiques	<ol style="list-style-type: none"> <li>12. Quelles expertises scientifiques pour valider les innovations techniques d'opérations de restauration ?</li> <li>13. Quelles métriques choisir pour un suivi post-restauration ?</li> <li>14. Quelles innovations en termes d'enregistrement et de mesures des paramètres du milieu (physique, chimique, biologique et sociaux) ?</li> </ol>

***Axe 5 : Indicateurs et plus-values pour évaluer le succès des opérations de restauration (Tableau 5)***

Thématiques	Questions de recherche à développer
Indicateur intégratif de fonctionnement écologique et de potentialité sociale	<ol style="list-style-type: none"> <li>1. Quelles applications du modèle DPSIR pour aboutir à des indicateurs intégratifs ?</li> <li>2. Comment associer des indicateurs écologiques et des indicateurs de potentialité sociale ?</li> <li>3. Quelles échelles spatiales et temporelles ?</li> </ol>
Intégration des services écologiques	<ol style="list-style-type: none"> <li>4. Quel est le cadre écologique et social permettant l'évaluation des services écologiques ?</li> <li>5. Comment combiner valeurs écologiques et valeurs patrimoniales de l'écosystème restauré ?</li> <li>6. Comment intégrer les services rendus dans les bilans d'opérations de restauration ou remédiation ?</li> </ol>
Fonctions économiques et sociales	<ol style="list-style-type: none"> <li>7. Comment intégrer les projets de restauration dans les plans d'aménagement du territoire à l'échelle nationale ?</li> <li>8. Quelles propositions de consommation et d'aménités pouvons-nous offrir au grand public ?</li> <li>9. Quels systèmes économiques et politiques peuvent favoriser la mise en œuvre de programme de restauration ou remédiation durables ?</li> </ol>

**Premières analyses des capacités du réseau des Zones Ateliers à s’impliquer sur les questions de recherche et d’innovation à 10 ans**  
(Tableau 6)

**Légende des chiffres**

Le premier chiffre correspond au numéro d’axe

Le second chiffre correspond au numéro de la question concernée dans l’axe

Exemple : 1-2 : Axe 1 question 2

Type de milieu	Localisation géographique	Type d’action	Zones Ateliers	Questions de recherche déjà engagées	Questions de recherche à venir
Zones Humides et Etangs	Rhône et Ain	Restauration de bras secondaires	ZABR	1-2, 1-5, 1-13, 2-4, 3-7, 4-1	2-4, 4-1, 4-2, 4-11, 5-5
	Bassin de la Seine	construction/gestion de ZH artificielles	PIREN Seine	2-9	2-9
	Plaine alluviale de la Seine	connexion des ZH périfluviales	PIREN Seine	1-3, 1-4 et 4-3	1-10
	ZH tourbeuses et paratourbeuses en Forêt de Chinon	Restauration du fonctionnement hydraulique et des continuités écologiques	ZAL		
	Etangs de barrage (réseau hydrographique de la Moselle)	Remédiation, à concilier avec les productions piscicoles	ZAM	1-9, 2-2, 2-3 et 5-4	3-8 et 4-14
	Etangs du domaine de Lindre sur la Seille et	Remédiation, à concilier avec les productions piscicoles	ZAM	1-9, 2-2, 2-3 et 5-4	3-8 et 4-14
Cours d'eau	Le Vistre	Restauration hydromorphologique et chimique	ZABR	1-9, 1-10, 1-11, 1-8, 4-1, 4-6 et 4-10	ND
	L'Yzeron	Restauration hydromorphologique et chimique - rivière périurbaine	ZABR	1-15,2-8, 3-1, 4-14	4-14,5-2
	Le Rhône	Restauration hydraulique et écologique du fleuve sur tout son linéaire	ZABR	1-9, 1-11, 3-7, 3,11, 4-6,4-7,4-13	1-9,1-11,1-12,2-2,3,1,3-3,3-7,4-6,4-7,4-8,4-13,5-2,5-4
	L'Isar à Munich	Restauration de rivière urbaine	ZAL	1-10, 2-1 et 3-5	1-14, 2-8, 3-8, 3-9, 5-1, 5-2, 5-3 et 5-8
Bassins versants	Orge/Yvette	Restauration des continuités écologiques	PIREN Seine	2-8	4-9 et 4-13
	Ardières	Remédiation, bandes enherbées	ZABR	1-2, 2-1 et 2-9	3-2 , 3-7,5-1
Lacs	Léman, Bourget-du-Lac, Annecy	Limitation des apports de phosphore	ZABR	1-3, 1-9, 2-4 et 4-1	1-10, 1-11, 2-4 et 2-5



**Prospective sur les actions de recherche  
sur la restauration et la remédiation  
écologique des milieux aquatiques**

**Annexe de la fiche-résumé**

**Etat de lieu bibliographique.  
Argumentation et mise en perspectives des  
questions de recherches.**

# Sommaire

<b>Liste des abréviations .....</b>	<b>p.13</b>
<b>Introduction .....</b>	<b>p.14</b>
<b>1. Etat des lieux de la bibliographie .....</b>	<b>p.15</b>
1.1. Bibliographie en fonction du milieu aquatique .....	p.17
1.2. Bibliographie en fonction du domaine biologique .....	p.18
1.3. Bibliographie en fonction du contexte économique et social .....	p.19
1.4. Bibliographie en fonction des pressions anthropiques et des méthodes de suivi post-restauration .....	p.20
<b>2. Contexte scientifique de la réflexion : les Zones Ateliers .....</b>	<b>p.21</b>
<b>3. Les enjeux de recherche sur la restauration et la remédiation écologique des milieux aquatiques .....</b>	<b>p.24</b>
<b>4. Questions prioritaires de recherche et d'innovation, et scénarios pour les dix prochaines années .....</b>	<b>p.25</b>
4.1. Quels sont les points de blocage dans la compréhension du fonctionnement des milieux aquatiques et de leurs interfaces ? .....	p.26
4.2. Comment identifier et hiérarchiser les pressions actuelles et futures ? .....	p.32
4.3. Quels types de compromis existe-t-il entre les exigences scientifiques/technologiques et socioéconomiques dans la mise en œuvre des actions de restauration ? .....	p.36
4.4. Quels modes opératoires, quelles méthodes, et quelles stratégies pour une restauration durable ?.....	p.40
4.5. Quels indicateurs et quelles plus-values pour évaluer le succès des opérations de restauration ?.....	p.45
<b>Remerciements .....</b>	<b>p.50</b>

**Bibliographie .....p.50**

**Annexe**

- **Annexe 1 : Présentation des participants aux journées d'étude .....p.55**

## Liste des abréviations

**ARPEGES** : Analyse de Risque Pesticides pour la Gestion des Eaux de Surface

**DCE** : Directive Cadre Européenne

**DPSIR** : Driving forces-Pressure-State-Impact-Response

**IBD** : Indice Biologique Diatomées

**IBGN** : Indice Biologique Global Normalisé

**IBMR** : Indice Biologique Macrophytique en Rivière

**INPN** : Inventaire National du Patrimoine Naturel

**LTER** : Long Term Ecological Research Network

**ONERC** : Observatoire National sur les Effets du Réchauffement Climatique

**PCB** : Polychlorobiphényles

**PLU** : Plan Local d'Urbanisme

**REVER** : Réseau d'Échanges et de Valorisation en Écologie de la Restauration

**SCOT** : Schéma de Cohérence Territoriale

**SDAGE** : Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux

**SYRAH** : Système Relationnel d'Audit de l'Hydromorphologie

**WISER** : Water bodies in Europe : Integrative Systems to assess Ecological status and Recover

**ZA** : Zones Ateliers

**ZH** : Zone humide

## Introduction

Depuis le début de l'ère Anthropocène, période commençant à la Révolution Industrielle et caractérisée par une accélération globale du processus d'urbanisation, les activités humaines ont engendré de profondes modifications structurales et fonctionnelles des écosystèmes (e.g. exploitation des ressources, multiplication des constructions, pollution, etc.). Suite à la dixième Conférence des Parties (COP10) de la Convention sur la diversité biologique (Nagoya, Japon, 2010), il est prévu de restaurer d'ici à 2020 15% des écosystèmes dégradés de la planète. Cette volonté politique internationale a été confirmée en octobre 2012 lors de la onzième Conférence des Parties (COP11) à Hyderabad en Inde.

Cet objectif de restauration est ambitieux et va nécessiter la mise en œuvre de stratégies et de méthodologies innovantes de restauration de systèmes. Grâce au travail des scientifiques et à une prise de conscience politique et citoyenne, les progrès technologiques se sont multipliés et une évolution législative et réglementaire s'est mise en place, avec, par exemple, la signature de conventions et de protocoles internationaux pour la gestion des milieux aquatiques. Nous pouvons ainsi citer le Clean Water Act aux Etats-Unis, ou la Directive Cadre Européenne (DCE) sur la qualité écologique des eaux de surface et des eaux souterraines.

Il est aujourd'hui essentiel de pouvoir proposer des solutions de restauration durable, de réhabilitation, et/ou de remédiation des milieux qui ont été dégradés. Ces opérations sont possibles grâce à l'ingénierie écologique, et à la création de nouveaux écosystèmes durables ayant une valeur pour les sociétés et leur environnement. La restauration et la remédiation écologique s'inscrivent donc dans des problématiques de gestion et de développement durable, de conservation et de réintroduction d'espèces, de modalités d'aménagement des territoires et d'organisation des activités économiques minimisant les impacts anthropiques sur l'environnement.

Toutefois, nos connaissances sont encore insuffisantes pour construire des outils opérationnels de restauration et remédiation pour l'ensemble des milieux anthropisés et dégradés. Il existe aussi des problèmes d'évaluation de nombreuses opérations dont l'aboutissement n'est pas perçu de manière positive d'un point de vue écologique ou social.

*La **restauration écologique** consiste à favoriser le fonctionnement naturel d'un écosystème et sa capacité de résilience sans pour autant vouloir reconstituer toutes les composantes de l'écosystème préexistant dégradé.*

*La **remédiation** consiste à endiguer ou éliminer, par des moyens naturels ou artificiels, des substances nuisibles à l'environnement (polluants, contaminants...) afin de revenir à un meilleur état écologique.*

*L'**ingénierie écologique** a pour but de modifier une ou plusieurs dynamiques biotiques ou physico-chimiques de l'environnement dans un sens réputé favorable à la société et compatible avec le maintien des équilibres écologiques et du potentiel adaptatif de l'environnement. Elle renvoie également à la mise au point d'outils biologiques pour maximiser un service écosystémique ou pour résoudre des problèmes de pollution.*

*[D'après le Programme CNRS IngECOTech]*

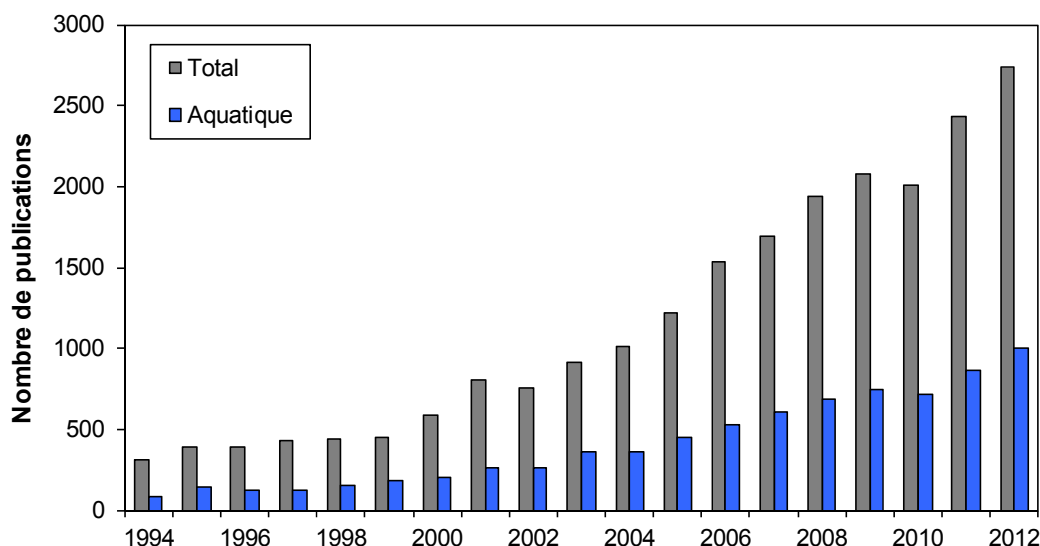
Les Zones Ateliers (ZA) se sont réunies les 11 et 12 mars 2013 pour construire la prospective du réseau sur la restauration et la remédiation écologique des milieux aquatiques (voir *Annexe 1* pour la liste des participants). Les échanges étaient centrés sur 3 points : (1) les

compétences des Zones Ateliers dans ce domaine, (2) les enjeux scientifiques identifiés par les Zones Ateliers, et (3) les questionnements scientifiques à investir dans les 10 prochaines années.

Nous proposons un document de prospective de recherche issu de ces échanges. Ce document est organisé de la façon suivante : après avoir présenté un état des lieux quantitatif et qualitatif de la bibliographie actuelle sur la restauration des milieux aquatiques, nous exposerons le contexte scientifique des Zones Ateliers, puis les enjeux de recherche. Enfin, nous développerons les questions prioritaires de recherche, en privilégiant cinq axes à développer autour des projets de restauration et remédiation : (1) le fonctionnement des écosystèmes aquatiques et de leurs interfaces, (2) les pressions actuelles et futures, (3) les compromis entre exigences scientifiques et socioéconomiques, (4) les stratégies dans un contexte de durabilité, et (5) les indicateurs et les plus-values permettant d'évaluer le succès d'opérations de restauration.

## 1. Etat des lieux de la bibliographie

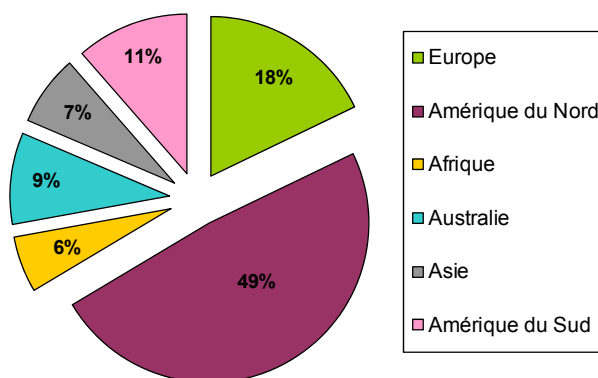
L'analyse de la littérature scientifique est un bon moyen pour évaluer l'intérêt et les avancées autour de champs disciplinaires particuliers. Ainsi, en utilisant les mots-clés « restauration », « ecology » et « publication » sur *Google Scholar*, nous avons pu constater que moins de 1,000 publications par an sortaient au début des années 90, pour atteindre plus de 5,000 dans les années 2000, puis 9,000 dans les années 2005 et pas loin de 16,000 en 2012. La même recherche sur le site web *Science Direct* permet de cibler les publications de rang A uniquement, et montre une évolution similaire de la littérature scientifique, en croissance forte depuis les années 2000 (*Figure 1*). Les travaux de recherche autour des questions de restauration écologique sont donc encore en cours de développement.



**Figure 1 :** Nombre de publications obtenu pour « restauration ecology » et « aquatic restoration ecology » sur le site web *Science Direct* en fonction de l'année.

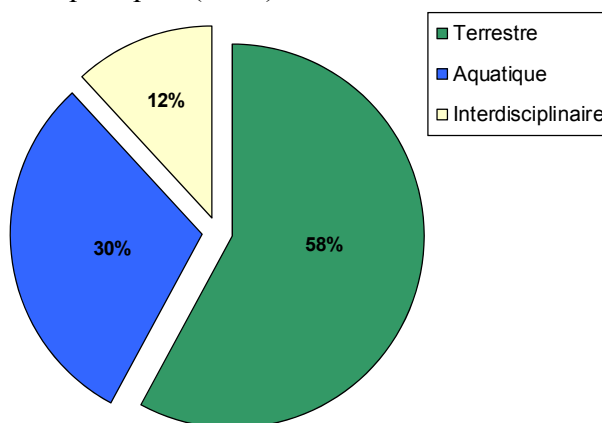
Afin de mieux comprendre la répartition actuelle des recherches dans ce domaine, nous avons réalisé une analyse quantitative des publications proposées depuis janvier 2012 par le journal *Restoration Ecology*, soit 152 articles parus. La répartition du nombre de publications en fonction de la localisation géographique (*Figure 2*) met en évidence une grande richesse des

projets de restauration écologique ayant abouti à des publications en Amérique du Nord (49%), majoritairement aux Etats-Unis. L'Europe ne représente que 18% des publications, l'Amérique du sud 11%, et l'Australie 9%. Enfin, l'Asie ne compte que 7% des publications (la grande majorité venant de Chine) et l'Afrique 6% (principalement pour des travaux réalisés en Afrique du Sud). Cette disparité s'explique sans doute par des pratiques différentes selon les aires culturelles. Ainsi, une analyse des pratiques a montré l'influence du contexte socioculturel et du contexte environnemental sur les pratiques de restauration (mise en œuvre et stratégie) et la cohésion sociale liée à ces pratiques (Morandi & Piégay, 2011).



**Figure 2 :** Quantité relative de publications parues en 2012 et 2013 dans la revue *Restoration Ecology* en fonction de la localisation géographique.

La répartition en fonction du domaine de recherche (**Figure 3**) montre un net déséquilibre des publications en faveur des sciences de l'environnement terrestre et aquatique (**88%**) par rapport aux publications interdisciplinaires intégrant des sciences économiques et/ou des sciences humaines et sociales (**12%**). Nous constatons également un plus grand nombre de travaux de recherche sur la restauration des milieux terrestres (**58%**) par rapport aux travaux de recherche sur la restauration des milieux aquatiques (**30%**).



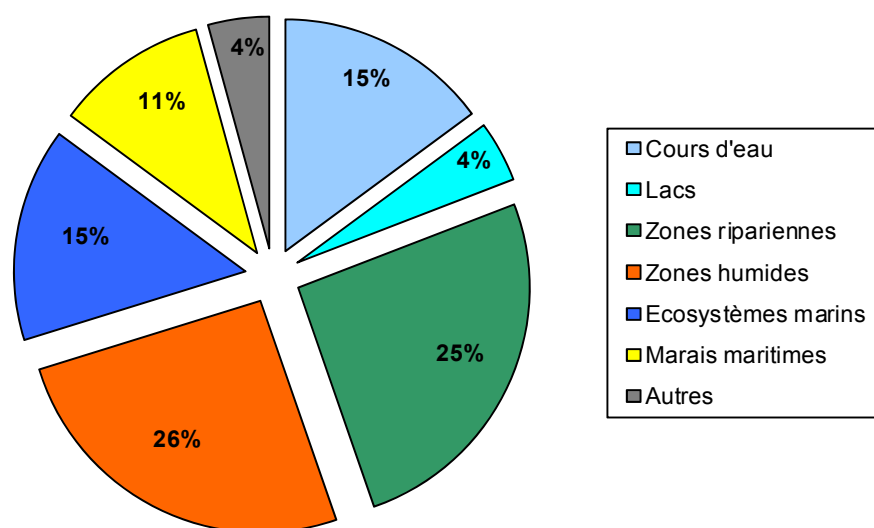
**Figure 3 :** Quantité relative de publications parues en 2012 et 2013 dans la revue *Restoration Ecology* en fonction du domaine de recherche scientifique.

En s'intéressant plus particulièrement à la restauration écologique des milieux aquatiques, nous pouvons voir là-encore une disparité entre champs thématiques. Cependant, avec plus de 1.000 publications de rang A parues en 2012 (d'après le site web *Science Direct*), il serait difficile d'être exhaustif sur l'ensemble des travaux de recherche réalisés en restauration

écologique des milieux aquatiques. Pour cet état des lieux de la bibliographie, nous proposons donc de nous appuyer sur une revue centrale de ce champ de recherche (*Restoration Ecology*) pouvant servir d'exemple. Nous présenterons une répartition quantitative des travaux de recherche en fonction du milieu. Puis nous dresserons un état des lieux qualitatif de la bibliographie en fonction du domaine biologique, en fonction du contexte économique et social, et enfin en fonction des pressions anthropiques et des méthodes de suivi post-restauration.

### 1.1. Bibliographie en fonction du milieu aquatique

D'après les résultats de l'analyse quantitative des publications proposées depuis janvier 2012 par le journal *Restoration Ecology*, nous pouvons observer une grande diversité de publications en fonction des milieux aquatiques (**Figure 4**). Les objets principaux de recherche sont les zones humides regroupant les marécages, les tourbières et les annexes fluviales (26%), et les zones ripariennes regroupant les écosystèmes des bords des cours d'eau, les corridors et les bassins versants (25%). nous retrouvons ensuite les grands cours d'eau, c'est-à-dire les fleuves, rivières ou chenaux (15%), les écosystèmes marins (15%) et les marais maritimes (11%). Les lacs ne représentent qu'un faible nombre de publications pour l'année 2012-2013 (4%). Nous pouvons également constater l'absence d'objets de recherche pourtant attendus comme les petits plans d'eau artificiels ou naturels, les bassins de lagunage, les petits cours d'eau, ou encore l'interface entre les bassins versants, les cours d'eau et les écosystèmes aquatiques souterrains.



**Figure 4 :** Quantité relative de publications parues en 2012 et 2013 dans la revue *Restoration Ecology* en fonction du milieu aquatique étudié.

Le projet européen WISER (Water bodies in Europe : Integrative Systems to assess Ecological status and Recovery) conduit entre 2009 et 2012 a permis de développer de nouvelles méthodes requises par la DCE. Un article de synthèse, paru dans le numéro spécial de la revue *Hydrobiologia*, discute des grandes conclusions de ce programme, notamment en terme de réponse au stress en fonction des organismes, des masses d'eau ou du type de perturbation, et aussi en terme de métriques utilisées, et d'échelles spatiale et temporelle (Hering et al., 2013).

Parmi les études récentes, citons également une méta-analyse portant sur 621 zones humides mettant en évidence que, malgré un siècle d'effort de restauration, la structure



biologique et les fonctions biogéochimiques des sites restaurés restent autour de 25% inférieurs aux sites de référence (Moreno-Mateos et al., 2012).

Concernant les rivières et leur bassin versant, les travaux de Palmer sont remarquables et d'une grande richesse pour les scientifiques et les gestionnaires : analyses théoriques (Palmer, 2008 ; Palmer et al., 2005), analyses pratiques des connaissances actuelles (Palmer et al., 2007), analyses méthodologiques concernant la restauration physique d'habitats en rivière (Palmer et al., 2009), la restauration de rivières urbaines (Bernhardt & Palmer, 2007), ou encore la restauration des services écologiques (Palmer & Filoso, 2009).

## **1.2. Bibliographie en fonction du domaine biologique**

En réalisant une analyse qualitative des travaux de recherche sur la restauration des milieux aquatiques, nous pouvons constater que les publications se répartissent de la façon suivante :

- De nombreuses publications ciblent les communautés végétales : d'une part les macrophytes, c'est-à-dire l'ensemble des plantes aquatiques, et d'autre part la ripisylve, c'est-à-dire les formations végétales qui se développent sur les bords des cours d'eau. Une étude sur la dynamique de colonisation de plantes aquatiques lors de la reconnexion de bras mort du Rhin a montré des corrélations avec les teneurs en phosphore et en azote (Meyer et al., 2013). Une problématique intéressante dans le cadre de la restauration de zones ripariennes est l'impact des inondations et des dépositions de sédiments sur les successions végétales (Baattrup-Pedersen et al., 2013).
- D'autres publications décrivent la réponse des communautés animales, principalement poissons et invertébrés (mollusques et crustacés), parfois amphibiens ou oiseaux. Ces études portent généralement sur le suivi de la dynamique des populations post-opérations de restauration. Citons les études accomplies sur le Rhône, par exemple un suivi réalisé entre 2003 et 2009 mesurant l'effet de la restauration de la connectivité hydrologique sur la diversité et les assemblages de populations de macroinvertébrés (Besacier-Monbertand et al., 2012), ou encore un suivi réalisé entre 1995 et 2004 évaluant les changements dans les communautés piscicoles après augmentation des débits réservés d'un chenal court-circuité (Lamouroux et al., 2006).
- Peu d'études s'intéressent aux microorganismes, bien qu'ils aient un rôle souvent crucial, positif ou négatif, dans le fonctionnement des systèmes restaurés (Harris, 2009).
- Des publications mobilisent la valeur de l'espèce pour décrire les conséquences des opérations de restauration sur le fonctionnement des milieux aquatiques et l'évolution de leur état écologique. Les espèces clés de voûte et les espèces ingénieurs (*voir paragraphe 4.1*) ont généralement un effet bénéfique sur l'écosystème. Leur présence naturelle ou leur réintroduction peut servir d'outil et/ou d'indicateur aux projets de restauration. Citons les travaux sur les effets positifs de la réintroduction du castor, espèce ingénieur, sur le peuplier faux-tremble (McColley et al., 2012). Nous pouvons également évoquer l'utilisation d'un bivalve clé de voûte, *Modiolus modiolus*, pour la restauration de récif côtier en tant que technique permettant d'augmenter la richesse spécifique et l'abondance des communautés de coquillages ainsi que le recrutement de naissains (Farinas-Franco et al., 2013).

- Les espèces bio-indicatrices sont également utilisées pour évaluer le succès de projets de restauration ou remédiation, et plus généralement l'impact des activités humaines sur les écosystèmes naturels (Holt & Miller, 2011). La présence et la fluctuation d'effectifs de ces espèces reflètent les variations des conditions environnementales et la qualité du milieu. Il est fréquent que les suivis scientifiques se focalisent sur ces espèces caractéristiques du bon fonctionnement des hydrosystèmes, et parfois sur les fonctions écologiques associées. C'est le cas des Odonates utilisés pour des diagnostics de milieux aquatiques, par exemple pour comparer l'effet d'une restauration passive de la qualité de lacs par rapport à une restauration utilisant des procédés chimiques (D'Amico et al., 2004).
- De nombreux travaux de recherche portent sur les espèces natives et invasives. Par exemple, sur le contrôle du développement du couvert végétal d'une zone riparienne par la réintroduction d'espèces végétales natives de la canopée (Harris et al., 2012), ou sur les successions de plantes, ainsi que l'abondance et la diversité d'insectes pollinisateurs après éradication de la bourdaine, une plante invasive (Fiedler et al., 2012). Un autre exemple est donné par la diversité fonctionnelle comparative entre macroinvertébrés natifs et invasifs après restauration de la connectivité hydrologique d'un cours d'eau (Paillex et al., 2012).
- Enfin des publications ciblent les espèces à forte valeur patrimoniale, parfois inscrites sur les listes rouges de l'Inventaire National du Patrimoine Naturel (INPN). En effet, certains projets de restauration ou remédiation ont pour objectif de protéger ou réintroduire des espèces rares ou en danger d'extinction. Cependant, dans le cas d'une étude récente, le bilan d'un projet commencé en 1994 montre que la majorité des populations réintroduites ont disparu 15 ans après, quelle que soit la méthode utilisée (Drayton & Primack, 2012).

### ***1.3. Bibliographie en fonction du contexte économique et social***

Nous avons constaté que les publications en sciences humaines et sociales sont encore proportionnellement peu représentées parmi les études portant sur la restauration et la remédiation : seulement 12% des articles parus depuis 2012 dans la revue *Restoration Ecology*.

Une analyse qualitative des publications montre que de nombreux travaux de recherche ciblent des problématiques de représentation et de perception esthétique ou culturelle des milieux aquatiques et des aménagements mis en place (par exemple Pflüger et al., 2010 ; Bulut & Yilmaz, 2009). Ainsi, les notions de valeur patrimoniale, de potentialité sociale, d'usage et de pratiques sont au cœur d'étude sur la relation Homme-Milieu. Notons que certaines de ces études associent l'évaluation des gains écologiques et la perception publique de travaux de restauration, démontrant l'importance de la pluridisciplinarité dans l'élaboration de tels projets (Petursdottir et al., 2013).

Nous avons pu noter aussi un certain nombre de publications sur la territorialité des problématiques et les aspects économiques des projets de restauration, notamment un article de synthèse récent discutant d'outils pour planifier, hiérarchiser et évaluer des projets de restauration (Robbins & Daniels, 2012). Citons également une méta-analyse sur l'économie locale émergente du développement, du financement et de la mise en œuvre d'un programme de réhabilitation de bassin versant (Nielsen-Pincus & Moseley, 2013). Ou encore un article de synthèse présentant des enquêtes de préférence sur le « consentement à payer » pour la restauration de services écologiques contribuant au bien-être (Schultz et al., 2012).

Enfin, il existe de plus en plus d'études sur la compréhension des phénomènes sociaux en lien avec les cours d'eau et leur politique de gestion, faisant parfois référence à la notion de socio-écosystèmes, systèmes complexes mêlant dynamique écologique et dynamique des sociétés. A ce titre, un numéro spécial du journal *Ecology and Society* traite des bénéfices d'une approche participative dans la gestion des ressources en eau, et de l'implémentation de ces approches dans des contextes socio-écologiques complexes (von Korff et al., 2012).

#### ***1.4. Bibliographie en fonction des pressions anthropiques et des méthodes de suivi post-restauration***

Deux grandes catégories de pressions anthropiques peuvent impacter les hydrosystèmes : les pressions d'origine chimique (produits phytosanitaires, engrais, hydrocarbures, métaux lourds, perturbateurs endocriniens, etc.) et les pressions d'origine physique (aménagement du territoire tels que les marges construites, les barrages hydroélectriques, etc.). Nous pouvons constater que les méthodes de suivis et les types d'indicateurs sont très variés, allant de la caractérisation du sédiment aux organismes. Cette grande diversité d'outils méthodologiques rend la généralité difficile.

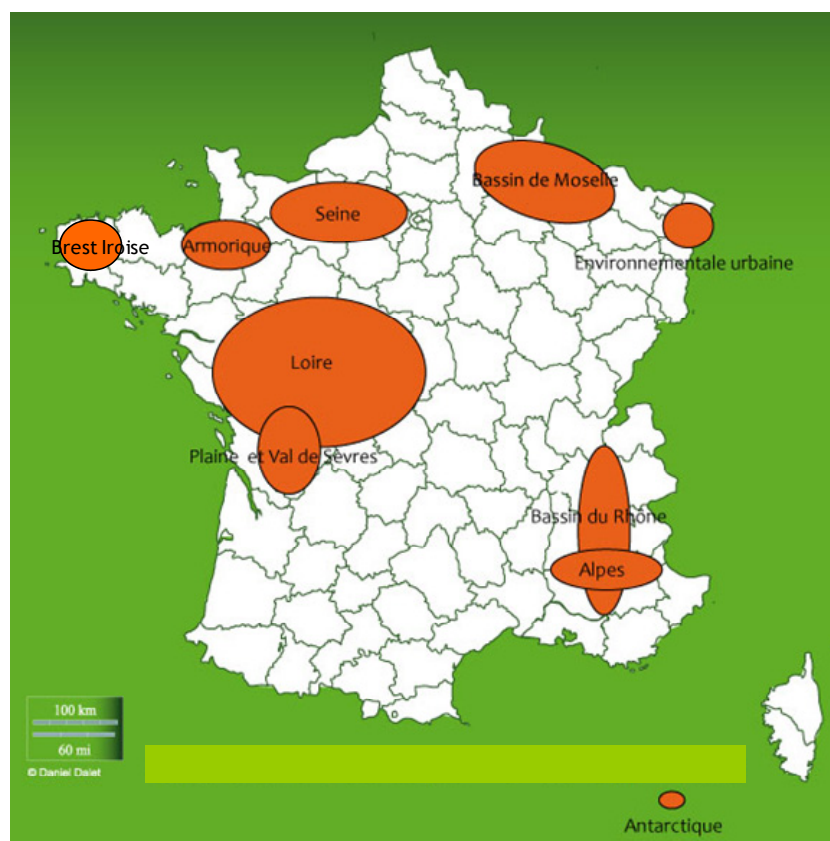
Les articles de synthèse présentant des méta-analyses tirent des conclusions identiques : une quantité et une qualité globalement pauvre des suivis pre- et post-projets. C'est le cas d'une analyse de 345 sites présentant l'impact de différentes techniques de réhabilitation sur l'hétérogénéité des habitats physiques, la qualité chimique de l'eau, et la productivité de biomasse (Roni et al., 2008). C'est également la conclusion d'une analyse destinée à évaluer l'efficacité des pratiques autour de la restauration d'habitats en rivière, d'après 53 publications mesurant la réponse des macroinvertébrés (Miller et al., 2010).

Enfin, une étude récente et innovante mérite également un intérêt particulier puisqu'elle associe différentes pressions et un suivi des services écologiques rendus dans le cadre de l'initiative nationale de restauration des Grands Lacs aux Etats-Unis. La comparaison de la distribution spatiale de 34 pressions (pêche, pollutions diffuses, changements climatiques, etc.) et 7 services écologiques rendus (approvisionnement en nourriture, loisirs, etc.) met en évidence l'importance de ce type de suivis pour maximiser les bénéfices écologiques et sociaux (Allan et al., 2012).

## 2. Contexte scientifique de la réflexion : les Zones Ateliers

### Un réseau de scientifiques et d'observatoires

Les Zones Ateliers sont des réseaux scientifiques pluridisciplinaires, labellisés par l'Institut National de l'Écologie et de l'Environnement. La problématique globale est celle des interactions entre un milieu et les sociétés qui l'occupent et l'exploitent. La compréhension de ces interactions implique une approche pluridisciplinaire incluant notamment les sciences de la nature, les sciences de la vie, les sciences humaines et les sciences de l'ingénieur dans un objectif de répondre à une question territoriale spécifique pouvant être élaborée en interaction avec les gestionnaires. Onze Zones Ateliers sont actuellement en activité (**Figure 5**), et un réseau inter ZA sur la ville est en cours de construction en collaboration avec le site LTER de Baltimore.



**Figure 5 :** Carte représentant la répartition géographique des dix Zones Ateliers en France et Outre-mer. La Zone Atelier Hwange (Zimbabwe) n'est pas représentée.

Les Zones Ateliers, à l'échelle de leur territoire, font l'effort de mettre en place des dispositifs d'observation collectifs et collaboratifs, qui permettent de réaliser des suivis long terme de l'évolution des milieux avec des lots de données précis. Ces suivis apportent des éléments d'aide à la décision aux acteurs des territoires concernés notamment pour favoriser une gestion durable des cours d'eau et de leurs bassins versants. Les retours d'expérience scientifique permettent de compléter le suivi minimal préconisé par la réglementation.

Parmi les onze Zones Ateliers en activité, quatre démontre une forte activité autour des questions de restauration et remédiation écologique. La Zone Atelier Loire (ZAL), la Zone

Atelier Bassin de la Moselle (ZAM), la Zone Atelier Bassin du Rhône (ZABR) et la Zone Atelier PIREN Seine. Les sites faisant l'objet de suivis scientifiques vont des étangs aux bassins versants, et démontrent de la grande diversité des problématiques abordées (*Annexe 2*).

### **Un contexte de collaboration stimulant**

Chaque Zone Atelier regroupe plusieurs laboratoires de recherche et de nombreux partenaires. Ce réseau permet d'apporter des compétences scientifiques et techniques favorisant les approches transversales des problématiques de restauration et remédiation écologique (*Annexe 3*). Les ZA travaillent de façon très étroite avec les acteurs de leur territoire de recherche, notamment les Agences de l'Eau avec qui la plupart des ZA ont des accords de partenariat, ou encore les Parcs Naturels Régionaux (e.g. PIREN Seine et PNR de la Haute Vallée de Chevreuse). Ces collaborations favorisent les actions de recherche, ainsi que les actions de transfert de connaissances. De plus, les Zones Ateliers ont une bonne connaissance des bassins hydrographiques, ainsi que des programmes de restaurations et remédiation qui y sont engagés. Enfin, les ZA sont directement confrontées aux contraintes pratiques opérationnelles des projets, et peuvent apporter leur expertise scientifique dans l'aide à la décision.

Les Zones Ateliers sont également structurées en réseau inter ZA favorisant :

- La mise en commun de compétences, d'outils (e.g. SENEQUE, ESTIMHAB), de méthodes (e.g. SYRAH : Système Relationnel d'Audit de l'Hydromorphologie), de protocole (e.g. CARHYCE), d'expertises (e.g. ARPEGES : Analyse de Risque Pesticides pour la Gestion des Eaux de Surface), et enfin de base de métadonnées pour suivre les anthroposystèmes, cœur des recherches des ZA, par exemple pour caractériser l'impact de projets de restauration.
- Des échanges scientifiques et la formulation de questions de recherche pertinentes à l'échelle du territoire national, grâce à la mutualisation des connaissances interdisciplinaires.
- La valorisation scientifique des travaux des Zones Ateliers avec des publications dans des revues de rang A, la participation à des grands congrès internationaux, des collaborations à l'échelle européennes et internationale (LTER).

Enfin, le réseau inter ZA permet de travailler avec les grands « opérateurs » de la recherche nationale (ONEMA, ANR, AllEnvi) tout en prenant en compte les accords déjà existants entre certains d'entre eux comme l'ONEMA avec des grands organismes de recherche (IRSTEA, INRA, BRGM.). Les compétences et les expériences en terme de restauration sont synthétisées dans le tableau 7 ci-dessous.

**Tableau 7** : Le réseau inter ZA, ses compétences et ses expériences en terme de restauration

**Légende des chiffres**

Le premier chiffre correspond au numéro d'axe

Le second chiffre correspond au numéro de la question concernée dans l'axe

Exemple : 1-2 : Axe 1 question 2

Type de milieu	Type d'action	Zones Ateliers	Questions de recherche déjà engagées	Questions de recherche à venir
Zones Humides et Etangs	Restauration de bras secondaires	ZABR	1-2, 1-5, 1-13, 2-4, 3-7, 4-1	2-4, 4-1, 4-2, 4-11, 5-5
	construction/gestion de ZH artificielles	PIREN Seine	2-9	2-9
	connexion des ZH périfluviales	PIREN Seine	1-3, 1-4 et 4-3	1-10
	Restauration du fonctionnement hydraulique et des continuités écologiques	ZAL		
	Remédiation, à concilier avec les productions piscicoles	ZAM	1-9, 2-2, 2-3 et 5-4	3-8 et 4-14
	Remédiation, à concilier avec les productions piscicoles	ZAM	1-9, 2-2, 2-3 et 5-4	3-8 et 4-14
Cours d'eau	Restauration hydromorphologique et chimique	ZABR	1-9, 1-10, 1-11, 1-8, 4-1, 4-6 et 4-10	ND
	Restauration hydromorphologique et chimique - rivière périurbaine	ZABR	1-15, 2-8, 3-1, 4-14	4-14, 5-2
	Restauration hydraulique et écologique du fleuve sur tout son linéaire	ZABR	1-9, 1-11, 3-7, 3-11, 4-6, 4-7, 4-13	1-9, 1-11, 1-12, 2-2, 3-1, 3-3, 3-7, 4-6, 4-7, 4-8, 4-13, 5-2, 5-4
	Restauration de rivière urbaine	ZAL	1-10, 2-1 et 3-5	1-14, 2-8, 3-8, 3-9, 5-1, 5-2, 5-3 et 5-8
Bassins versants	Restauration des continuités écologiques	PIREN Seine	2-8	4-9 et 4-13
	Remédiation, bandes enherbées	ZABR	1-2, 2-1 et 2-9	3-2, 3-7, 5-1
Lacs	Limitation des apports de phosphore	ZABR	1-3, 1-9, 2-4 et 4-1	1-10, 1-11, 2-4 et 2-5

### 3. Les enjeux de recherche sur la restauration et la remédiation écologique des milieux aquatiques

#### Des enjeux soulignés

Au-delà des moyens financiers et humains récurrents nécessaires à une bonne coordination et une bonne gestion des opérations de restauration, de nombreux points peuvent faire l'objet d'améliorations. Il convient notamment de structurer une approche globale de la restauration, en interfaçant scientifiques, gestionnaires et citoyens.

Pour que les actions de restauration et remédiation écologique soit efficaces, il est nécessaire de faire interagir étroitement la recherche fondamentale et la recherche appliquée. De plus, la restauration et la remédiation sont des problématiques fondamentalement pluridisciplinaires et interdisciplinaires, abolissant les frontières traditionnelles entre les sciences de l'homme et de la société et les sciences de l'environnement. Les Zones Ateliers se trouvent ainsi à l'interface entre économie, organisation sociale, écologie, biologie, biogéochimie et ingénierie écologique.

Il convient de proposer des suivis combinés prenant en compte toutes les composantes du système à restaurer (biologiques, physico-chimiques, sociales, politiques...) afin d'augmenter les chances de réussite du projet.

Tous ces enjeux seront développés au travers des axes de recherche proposés dans la partie 4 sur les questions prioritaires de recherche et d'innovation.

#### Des étapes à ne pas négliger

L'identification des **pressions** est un point majeur dans les enjeux de recherche en restauration et remédiation écologique. La mise en œuvre et le suivi d'actions de restauration doit prendre en compte les questions d'avenir de la planète en termes de changement climatique, raréfaction des ressources, perte de biodiversité, pollution, risques pour la sécurité des personnes. La hiérarchisation des pressions doit ensuite permettre de définir des **objectifs clairs** avec un certain nombre de critères permettant d'évaluer l'efficacité a posteriori des actions de restauration.

Des recherches sont aussi nécessaires pour identifier les **cadres juridiques, les règles et les lois à élaborer** pour accompagner et encadrer les stratégies de restauration. Ces innovations juridiques permettraient de donner une cohérence entre les dynamiques des systèmes écologiques et les réglementations qui accompagnent leur gestion (e.g. une zone protégée de type Réserve naturelle, une opération de restauration pour répondre par exemple au principe de continuité écologique des cours d'eau, un cadre conventionnel).

L'intégration de la **variabilité interannuelle** mesurée lors des campagnes d'échantillonnage pré-restauration est importante pour évaluer la vraie réponse des systèmes restaurés. Ainsi, dans le cadre du projet de restauration hydraulique et écologique du Rhône, des variations spectaculaires de la densité en macroinvertébrés avant restauration (doublement entre 2008 et 2010 par exemple) peuvent fragiliser le diagnostic avant travaux et, si elle n'est pas prise en compte, cette variabilité interannuelle pourrait biaiser les conclusions quant aux effets de la restauration.

La **standardisation des méthodologies et des procédures** en fonction du type de milieu aquatique et des pressions exercées est à poursuivre, notamment dans le cadre du travail de l'ONEMA. Cela nécessite un recensement des données, des ouvrages, des sites restaurés et une mise en ligne de l'information existante. Celles-ci seront utiles à la coordination des expertises conduites à une échelle nationale.

La mise en place d'**opérations-pilote** (restauration hydro-morphologique, remédiation de pollution agricole) sur des sites ateliers ou de démonstration permettant de faire des suivis long terme est essentielle pour comprendre les effets des restaurations, élaborer des modèles prédictifs et valider leur performance. Ces opérations pilotes doivent intégrer les forçages globaux, une échelle spatiale plus large et les observations sociales.

De manière complémentaire, la mise en place d'**opérations génériques** de restauration à l'échelle du territoire français. Ces opérations prennent tout leur sens en prévision des changements globaux : inondations plus nombreuses et plus violentes (bassins versants artificialisés et changements climatiques), modifications des régimes des cours d'eau, augmentation de la pollution en particulier lors d'étiages plus sévères. Cette méthode, déjà soutenue au niveau européen dans le cadre de la politique des trames vertes et bleues, pourrait constituer une première étape dans la protection des hydrosystèmes avec par exemple la mise en place systématique de bandes boisées ou enherbées jouant le rôle de zone tampon et de filtration.

Il est nécessaire de disposer de **retours d'expérience** sur l'efficacité ou l'inefficacité des stratégies mises en place. Il convient de coordonner les monitorings pour qu'ils soient conduits correctement, reconsidérer les référentiels et les objectifs, faire le lien avec les services et les bénéfiques, intégrer la restauration dans les autres politiques publiques dans le domaine de l'eau.

Enfin, parmi ces retours, la prise en compte des **plus-values économiques et sociales** des opérations de restauration à l'échelle des territoires concernés est essentielle. Il convient de dépasser les bénéfices apportés à l'écosystème pour révéler aux acteurs locaux les services rendus par cette restauration et redonner au milieu aquatique sa valeur culturelle.

#### **4. Questions prioritaires de recherche et d'innovation, et scénarios pour les dix prochaines années**

Il s'agit d'aborder ici les questionnements, les développements et points de blocage, sur les problèmes d'acteurs et de territoires liés aux opérations de restauration et de remédiation écologiques. Les journées de travail inter Zones Ateliers du 11 et 12 mars 2013 ont permis d'identifier cinq grands axes de recherche. Nous présenterons dans un premier temps les points de blocage dans la compréhension du fonctionnement des milieux aquatiques. Puis nous développerons des problématiques autour des pressions actuelles et émergentes. Nous discuterons ensuite des compromis entre les exigences scientifiques, techniques/technologiques et socio-économiques dans la mise en œuvre des actions de restauration. Nous apporterons des éléments de réflexion autour des modes opératoires, des méthodes, et des stratégies à adopter pour une restauration durable. Enfin, nous donnerons une ouverture sur les plus-values et les indicateurs des opérations de renaturation.

Les thématiques et les questions de recherche à développer autour de ces cinq axes sont présentées dans des tableaux de synthèse (**Tableaux 1 à 5**) situés en début de document.



#### ***4.1. Quels sont les points de blocage dans la compréhension du fonctionnement des milieux aquatiques et de leurs interfaces ?***

Il est dans un premier temps essentiel de s'accorder sur la définition que nous donnons aux modifications du fonctionnement des milieux aquatiques faisant suite aux opérations de restauration écologique ou de remédiation. En effet, les systèmes anthropisés où les pressions s'exercent depuis plusieurs années, voire dizaines d'années, ont évolué vers un nouvel équilibre. La réhabilitation de ces systèmes va modifier les flux de matière et d'énergie, et transformer les réseaux trophiques. Puis après restauration, de nouvelles interactions vont apparaître. Comprendre le fonctionnement de l'écosystème perturbé puis restauré est important pour pouvoir maîtriser pleinement les évolutions du système et atteindre les objectifs prédéfinis. Les fonctions écologiques principales généralement attendues dans un écosystème stable sont la minéralisation de la matière organique, la production de biomasse (végétale et animale), les fonctions de recyclage des nutriments et d'autoépuration. Quelle est l'efficacité de ces processus dans les hydrosystèmes restaurés ? Quel niveau de performance est souhaitable pour atteindre un bon état de santé des milieux restaurés ? Quelle est l'importance de la mosaïque d'habitats, du paysage, du climat, dans la régulation de ces fonctions ? Comment identifier correctement les effets en cascades ?

La reconnexion d'une zone humide fluviale au chenal du cours d'eau, par exemple, induit des changements dans les processus physiques de sédimentation et par conséquent modifie les processus biogéochimiques de recyclage des nutriments et les processus écologiques de succession végétale et animale, ainsi que la dynamique des habitats.

L'intégration des processus multiples, de leur intensité et de leurs interactions, renseigne sur le fonctionnement de l'écosystème. Pour rendre compte de la performance des processus du système restauré, il est important d'identifier et de hiérarchiser les facteurs de forçage, et d'en préciser l'importance relative sur l'évolution des compartiments (benthique, interstitiel, etc.) et des composantes clés (algues, microorganismes, invertébrés) au sein de l'écosystème.

Dans cette partie, nous discuterons (i) du rôle des forçages externes dans le fonctionnement des milieux aquatiques, (ii) de l'importance de la biodiversité dans la reconquête de l'intégrité des hydrosystèmes, (iii) du rôle des espèces clés de voûte et des espèces ingénieurs, (iv) des liens entre les pressions anthropiques et les grandes fonctions biologiques, (v) des processus adaptatifs impliqués dans la dynamique de recolonisation des milieux, et enfin (vi) des liens entre le fonctionnement écologique et les services rendus.

#### ***Rôle des forçages externes dans le fonctionnement des milieux aquatiques avant et après restauration***

Les forçages externes majeurs sont la température, l'hydrologie, la lumière, les apports de nutriments et les apports de molécules toxiques. L'arrivée d'organismes invasifs, animaux ou végétaux, est également considérée comme un forçage externe entraînant une compétition avec les espèces natives. Dans une démarche de restauration ou de remédiation durable, il convient de préciser ce que nous sous-entendons par fonctionnement des milieux aquatiques, mais également ce qui limite les performances des processus d'un écosystème. Par exemple, la présence de sources et puits de carbone (ou zones sources et zones puits) est une propriété essentielle de l'écosystème qui doit être considérées lors de la mise en œuvre des opérations de restauration.

Une analyse fine du rôle des contraintes externes sur les processus écologiques permet de mieux comprendre les causalités des transferts de matière et d'énergie, les conditions de développement et/ou de reproduction des espèces, ainsi que le rôle des organismes dans la régulation des cycles biogéochimiques. Ce point devrait être un préalable indispensable à toute opération de restauration environnementale, d'une part pour tenter d'anticiper la réponse du milieu à l'action restauratrice, mais aussi pour pouvoir analyser les échecs éventuels. Par exemple pourquoi la capacité d'accueil d'une annexe fluviale est-elle moins importante que prévue, moins favorable à la reproduction des poissons ? Différents niveaux de réponses doivent être considérés : les effets directs des paramètres physico-chimiques sur les organismes (température, pH, teneur en telle ou telle molécule...), les effets indirects des conditions environnementales sur la capacité de dispersion des espèces (hydrologie et connectivité avec le fleuve), ou enfin l'interaction entre ces différents paramètres.

Le cas particulier des facteurs limitant la productivité des écosystèmes restaurés (e.g. productivité naturelle ou pilotée par des pratiques comme la production piscicole en étang) requiert également des recherches plus approfondies. Il conviendrait d'étudier l'influence de contrôles biologiques, comme par exemple un changement des espèces végétales sur la productivité nette et les apports de nutriments (disponibilité et qualité). Dans ce cadre, il serait intéressant d'analyser les traits biologiques développés par les populations post-restauration, en fonction des caractéristiques du milieu. N'oublions pas que les facteurs physiques peuvent aussi exercer des contrôles sur les processus biogéochimiques et qu'il conviendrait de mieux comprendre le rôle du contrôle hydraulique (exportation de matériel, flux de matière minérale, érosion), thermique (température optimale et performance des réactions chimiques, décomposition de la matière organique), ou encore éolien, sur le fonctionnement des milieux aquatiques avant et après restauration.

### Importance de la biodiversité dans la reconquête de l'intégrité des écosystèmes

Il est important de définir quel type de diversité biologique est à prendre en compte, i.e. diversité génétique (degré de variété des gènes au sein d'une même espèce), diversité spécifique (richesse en espèces), diversité fonctionnelle, ou encore sur une échelle spatiale : diversité locale ou régionale. De même, les indicateurs de diversité (indices divers) ne permettent pas toujours de comprendre la structure de cette diversité ni sa valeur fonctionnelle.

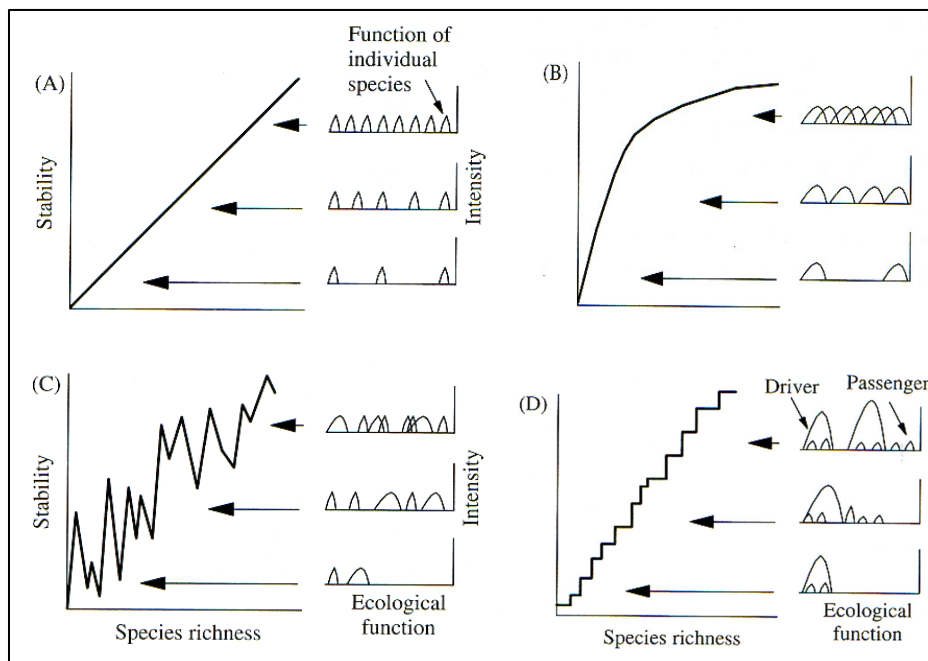
La redondance fonctionnelle permet dans certains cas d'atténuer les conséquences de la disparition d'espèces (lorsque les fonctions de celles-ci sont reproduites par d'autres espèces). Il ne faut cependant pas négliger l'importance de la biodiversité en tant que réservoir à espèces utiles (i.e. assurant des fonctions essentielles pour l'écosystème). C'est le principe de précaution décrit par le concept « d'assurance hypothesis » (Yachi & Loreau, 1999). Ainsi, le maintien de la biodiversité permettrait d'augmenter les capacités de résistance et de résilience d'un écosystème face à des perturbations. Pour comprendre l'importance de la biodiversité dans la reconquête de l'intégrité fonctionnelle des écosystèmes, il faut aussi définir quel niveau de diversité biologique est visé dans les objectifs du programme de restauration, ainsi que le niveau de biodiversité naturel ou état de référence.

Toutes les mesures de restauration et de remédiation des milieux aquatiques s'inscrivent dans le contexte de la DCE. Cette réglementation permet d'imposer des objectifs de qualité et de diversité biologique par rapport à des niveaux de référence de très haute qualité. Ainsi, la DCE vise à atteindre un bon état écologique qui est classiquement estimé à environ 80% du niveau de référence. Comment appliquer ce type de réglementation à l'ensemble des écosystèmes restaurés ? Les indicateurs de biodiversité utilisés sont-ils adaptés ? Comment incorporer des critères physico-chimiques (masses

d'eau, type de milieu) aux critères politiques ? Comment fixer les objectifs à atteindre ? Est-ce en utilisant des stations de référence ou bien en élaborant à des modèles prédictifs ?

Les travaux de restauration doivent s'inscrire à l'échelle de la structure et de la dynamique du paysage (i.e. connectivité, mosaïque d'habitats). Une attention particulière devrait être apportée à l'étude des flux de propagules qui aident à la reconstitution de la communauté, aux flux d'individus soutenant la stabilité génétique, mais aussi aux flux d'espèces allochtones, invasives ou non. Il existe un fort besoin de compréhension des modes de dispersion, d'établissement des populations et de leurs conséquences sur la biodiversité. Une question essentielle est aussi de comprendre les facteurs favorisant le développement d'invasifs. Ou encore comment la richesse spécifique, et dans certains cas la redondance fonctionnelle des communautés en place, permet de limiter les invasions biologiques. Pour comprendre cette limitation naturelle des invasions, l'étude de l'importance fonctionnelle des espèces natives est cruciale pour évaluer les effets des espèces invasives.

Pour mieux comprendre l'importance de la biodiversité dans le fonctionnement des écosystèmes restaurés, nous proposons d'utiliser les quatre modèles proposés par Clements et Newman à la suite des travaux de Lawton (**Figure 6**). Nous pouvons voir qu'il existe plusieurs relations entre la stabilité fonctionnelle d'un système et sa richesse spécifique. Ainsi, dans le modèle linéaire (A), la stabilité fonctionnelle diminue de manière linéaire avec la réduction du nombre d'espèces. Dans le modèle des rivets (B), la disparition d'espèces est compensée par la redondance fonctionnelle jusqu'à un niveau seuil où l'instabilité du système s'accélère. Le modèle idiosyncratique (C) montre que la réponse du système peut être variable et difficilement prédictible, et dépend des interactions entre les espèces. Enfin, le modèle conducteur – passager (D) montre que la stabilité fonctionnelle dépend dans certains cas de l'importance écologique des espèces : la disparition d'espèces déterminantes (espèces ingénieurs ou clés de voûte) a plus d'effet que la disparition de certaines autres espèces.



**Figure 6 :** Modèles théoriques montrant la relation entre la richesse spécifique et la stabilité fonctionnelle des écosystèmes. (A) Modèle linéaire ou équipotentiel, (B) modèle des rivets, (C) modèle idiosyncratique, (D) modèle conducteur – passager (D'après Clements and Newman, 2002).

## Rôle des espèces clés de voute et des espèces ingénieurs dans la réussite de la réhabilitation du fonctionnement des écosystèmes

Le fonctionnement des écosystèmes repose sur l'interaction entre les espèces, et entre les espèces et leur milieu. La compréhension du rôle de ces interactions dans la structure des écosystèmes et sur les processus biogéochimiques et écologiques est essentielle pour fixer des objectifs clairs de restauration. Certaines espèces dites clés de voute ou ingénieurs sont des acteurs indispensables au fonctionnement et à l'intégrité des écosystèmes. L'activité de ces organismes peut influencer l'ensemble de l'écosystème et donc être dans certains cas un moteur de la restauration, et d'en d'autres cas un frein (particulièrement si l'organisme est impliqué dans le dysfonctionnement du système ainsi maintenu loin de l'état de référence). Cependant, ce rôle déterminant est écosystème-dépendant et mériterait d'être mieux compris. Par exemple, le castor est essentiel dans une petite rivière, mais son impact est réduit dans les grands fleuves (à l'exception des marges) et il peut représenter dans certains cas un frein à la restauration.

Pouvons-nous identifier les espèces clés de voute et les espèces ingénieurs des écosystèmes à restaurer ? C'est le cas des Oligochètes, organismes ingénieurs qui creusent des galeries dans les sédiments aquatiques, modifiant la structure physique de ces sédiments et favorisant ainsi les processus biogéochimiques des hydrosystèmes au travers de leur activité bioturbatrice. De même les gammares, décomposeurs essentiels des litières de feuilles, fragmentent celles-ci et génèrent des ressources pour les autres invertébrés. D'un point de vue général, nous suggérons d'approfondir les connaissances sur les bénéfices écologiques des espèces clés de voute et ingénieurs.

**Espèce clé de voute :** *Espèce dont la présence est indispensable à l'existence même d'un écosystème, non pas par son effectif ou sa biomasse, mais par l'action qu'elle exerce sur les comportements et/ou les effectifs des autres espèces qui composent le système. L'activité de ces espèces détermine l'intégrité et la stabilité des écosystèmes. Leur disparition entraîne des extinctions en cascade et des changements fonctionnels majeurs.*

**Espèce ingénieur écologique :** *Espèce dont l'activité ou la présence contrôle l'accès aux ressources pour d'autres espèces en modifiant physiquement l'écosystème.*

[D'après [www.conservation-nature.fr/](http://www.conservation-nature.fr/)]

Enfin, pouvons-nous évaluer l'effet de la réintroduction de telles espèces clés de voute ou ingénieurs sur les processus fonctionnels et l'état de santé de l'écosystème dans son ensemble ? Exemple dans les sols agricoles sans équivalent en milieu aquatique, où l'inoculation de bactéries symbiotiques offre des possibilités intéressantes : stimulation de la croissance racinaire et accroissement du rendement de la plante, diminution des intrants azotés polluants grâce à l'amélioration de la fixation ou à la phytostimulation, lutte biologique et santé des plantes.

## Relations entre les pressions anthropiques et les grandes fonctions biologiques

Il est essentiel de mieux comprendre les conséquences biologiques de la combinaison des pressions physiques (hydraulique, température, lumière), chimiques (nutriments), ou toxiques (xénobiotiques) sur les organismes aquatiques. L'étude des réponses des communautés nécessite un diagnostic global prenant en compte les conditions de stress multiples (danger et probabilité

d'exposition) et les modes d'action des pressions sur les fonctions biologiques (i.e. fonctions physiologiques assurant le maintien des populations, comme la respiration, la croissance, la reproduction, les symbioses, etc.).

Prenons comme exemple le chenal court-circuité du Rhône où le transport des matériaux d'amont en aval ne s'effectue plus correctement à cause des barrages et de débits trop faibles dans les secteurs court-circuités (parfois inférieur à  $10 \text{ m}^3/\text{s}$  avant le plan de restauration). Ces perturbations ont pour conséquence la disparition progressive des frayères des espèces piscicoles d'eaux courantes et donc la diminution de l'efficacité de leur reproduction. De plus, les ouvertures de barrages provoquent de brusques modifications de débit (jusqu'à  $700 \text{ m}^3/\text{s}$ ), souvent accompagnées d'un apport en matières en suspension et d'une variation brutale de la température, entraînant une mortalité élevée des juvéniles. Enfin, ces secteurs court-circuités présentent une moins grande diversité d'habitats, une moins bonne oxygénation et bien sûr une connectivité écologique limitée. Il y a dans ce cas une cascade d'effets des aménagements hydrauliques sur la reproduction, la croissance et à terme la survie des peuplements piscicoles.

Les Polychlorobiphényles (PCB) sont des composés organiques aromatiques peu biodégradables et peu solubles dans l'eau. Les sédiments de plusieurs cours d'eau français sont ainsi contaminés. En outre, les PCB s'accumulent dans les organismes vivants, principalement dans les tissus graisseux. Les espèces de poissons présentant une forte teneur en matière grasse, comme les anguilles, sont donc plus susceptibles d'être contaminées ainsi que les espèces vivant au contact des sédiments comme les brèmes, les barbeaux et les carpes. Les transferts de contaminants des sédiments fluviaux aux peuplements piscicoles sont désormais bien décrits (Lopes et al., 2012). Cependant des questions relatives à la restauration et la remédiation persistent, notamment concernant la gestion des pollutions et le choix de seuils en fonction des objectifs à atteindre (e.g. espèces à réintroduire, type d'usage du milieu), l'évaluation des risques de contamination et les effets écotoxicologiques suite à des expositions nouvelles, ou encore la méthodologie à mettre en œuvre lors de dragage de sédiments contaminés.

Il est donc important de comprendre le lien entre les pressions anthropiques pré-restauration et les grandes fonctions biologiques, et l'impact des modifications induites par les opérations de restauration sur ces fonctions. Ces recherches permettront de décider des pressions à lever et d'anticiper les conséquences attendues. Notons que ces questions pourraient être particulièrement intéressantes pour les espèces ingénieurs.

### *Prise en compte des processus adaptatifs*

Restaurer un écosystème c'est aussi prendre en compte la dynamique évolutive des espèces, c'est-à-dire la diversité génétique des populations en place, leur possibilité d'échanges de gènes avec d'autres populations régionales et leur plasticité phénotypique. En intervenant dans des écosystèmes perturbés, l'homme modifie le cadre de vie d'espèces qui se sont adaptées, ou du moins qui expriment des caractères phénotypiques adaptés à leur environnement anthropisé. De ce point de vue, la restauration peut être considérée comme une nouvelle perturbation. Comment évaluer les potentiels de recolonisation ?

Mieux comprendre les mécanismes épigénétiques, c'est-à-dire comment l'environnement et l'histoire individuelle influent sur l'expression des gènes, peut permettre d'appréhender la dynamique d'acclimatation et d'adaptation des organismes avant et après restauration. Quel est le pas de temps

pour que ces processus adaptatifs apparaissent ? Est-ce cohérent avec des actions de restauration ? Un intérêt particulier pourra être porté sur les espèces spécialistes versus les espèces généralistes, et leur rôle dans la succession écologique post-restauration.

### Liens entre fonctionnement écologique et services rendus par les écosystèmes

A l'aube du 3<sup>ème</sup> millénaire, la prise de conscience générale de l'importance des services rendus par l'environnement, a conduit à donner une valeur économique aux écosystèmes qui nous entourent. Citons notamment le *Rapport de synthèse de l'Évaluation des Écosystèmes pour le Millénaire* ou *Millenium Ecosystem Assessment* paru en 2005, et le *Rapport Chevassus-au-Louis : Approches économiques de la biodiversité et des services liés aux écosystèmes* paru en 2009. La question de l'évaluation des services rendus à l'Homme par les écosystèmes aquatiques a depuis été étudiée (Amigues et Chevassus-au-Louis, 2011).

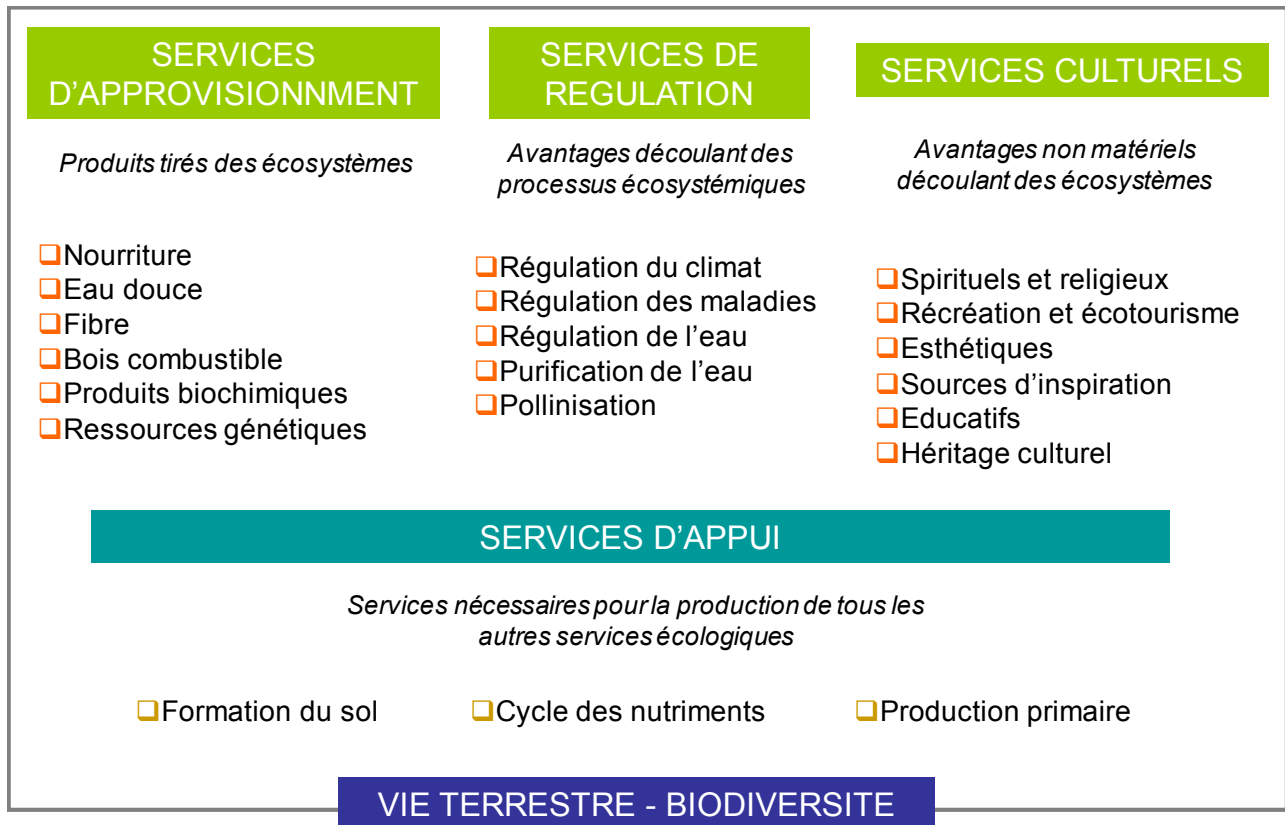
Une restauration écologique réussie rétablit la stabilité du système, son niveau de biodiversité, son fonctionnement, mais consiste aussi à améliorer ou recréer des services écosystémiques. Comprendre le lien entre le fonctionnement des écosystèmes et les services écologiques rendus fait partie des questions prioritaires à se poser dans le cadre de projet de restauration durable.

Il convient tout d'abord de définir quels services sont souhaités et/ou attendus. Par exemple, la restauration de zones humides peut conduire à une augmentation de la biodiversité et à une amélioration de la filtration/épuration des eaux de ruissellement agricole (service de régulation). Ou encore, la restauration des débits des cours d'eau permet souvent d'augmenter la production piscicole (service de prélèvement). Enfin, la restauration des habitats le long des cours d'eau favorise la présence d'oiseaux, et permet des observations ornithologiques (service culturel).

**Services écologiques :** *Les services que procurent les écosystèmes sont les bénéfiques que les humains tirent des écosystèmes. Ceux-ci comprennent des services de prélèvement (ou d'approvisionnement) tels que la nourriture, l'eau, le bois de construction, et la fibre; des services de régulation qui affectent le climat, les inondations, la maladie, les déchets, et la qualité de l'eau; des services culturels qui procurent des bénéfices récréatifs, esthétiques, et spirituels; et des services d'auto-entretien (ou de support) tels que la formation des sols, la photosynthèse, et le cycle nutritif (**Figure 7**). L'espèce humaine, quoique protégée des changements environnementaux par la culture et la technologie, est en fin de compte fondamentalement dépendante du flux de services d'origine écosystémique.*

*[D'après le programme d'évaluation des écosystèmes pour le millénaire–Millenium Ecosystem Assessment]*

D'autres questions sous-jacentes sont essentielles afin de mieux comprendre les fonctions écologiques associées aux services rendus. Dans ce cadre nous suggérons des recherches sur l'évaluation du rôle des organismes ingénieurs et de leurs fonctions dans l'amélioration des services écologiques. Cette démarche n'est pas simple. Par exemple, en science du sol l'utilisation de plantes qui fixent les métaux traces et permettraient une phyto-remédiation reste en débat.



**Figure 7 :** Schéma représentant les différents services écologiques. Source: FAO, 2007 (adapté de “Ecosystems and human well-being: a framework for assessment”, Millennium Ecosystem Assessment, 2003). Il existe de nombreux autres tableaux présentant, de façon plus ou moins détaillée, les différents services.

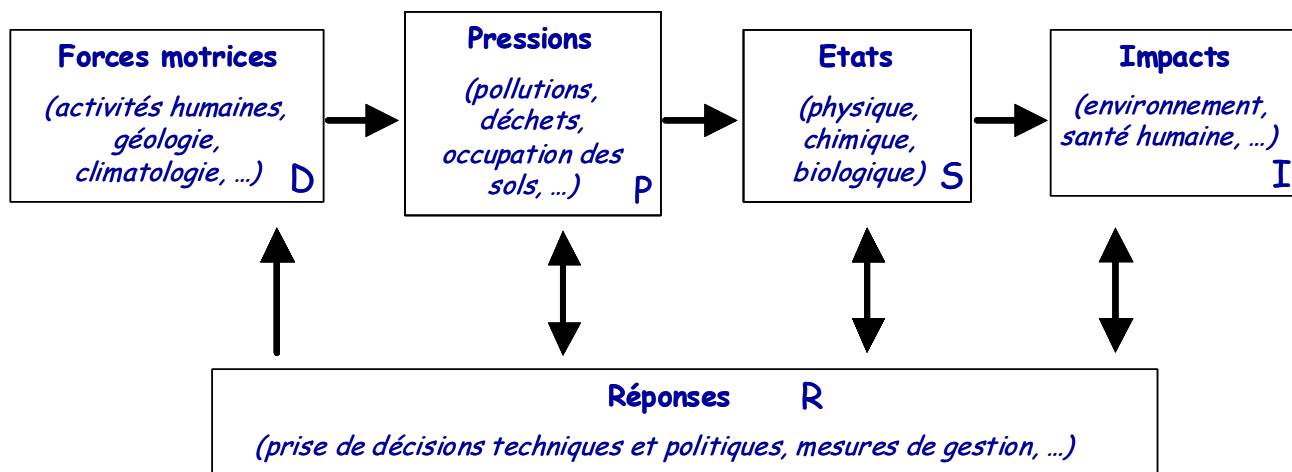
#### 4.2. *Comment identifier et hiérarchiser les pressions actuelles et futures ?*

Dans un contexte de changement global, il nous semble important de comprendre l’influence des pressions actuelles et des futures pressions marquantes sur les processus de restauration. En effet, la structure des espaces dits naturels est le fruit d’activités anthropiques plus ou moins anciennes, combinées aux dynamiques naturelles. Il est difficile de différencier ces deux séries de causalité mais aussi de prédire les perturbations futures qui impacteront les systèmes, par exemple l’émergence de nouvelles substances susceptibles de polluer les hydrosystèmes. Par contre, il est clair que les grandes tendances concernant les futures pressions anthropiques se déclineront autour des changements climatiques (température et hydrologie), de la croissance démographique mondiale (en particulier au bord des côtes), et d’une compétition accrue pour la ressource en eau. Dans cette partie, nous discuterons des besoins de recherche en termes (i) de hiérarchisation des pressions, (ii) du devenir des pressions actuelles et des pressions émergentes, (iii) de l’application des prédictions climatiques globales à l’échelle locale, et (iv) des mécanismes démographiques et sociétaux régulant la réhabilitation des espaces naturels.

#### Hiérarchisation des pressions

Les écosystèmes subissent des pressions physiques, chimiques, biologiques et sociales qu’il est important de hiérarchiser. Un cadre conceptuel doit être élaboré pour permettre d’identifier les principaux enjeux et faciliter la prise de décision (hiérarchisation des pressions). Ce cadre doit être

adaptable pour pouvoir évoluer (changements dans ces hiérarchies). Comprendre et hiérarchiser les pressions soutenant ou limitant les effets de restauration est possible grâce à des modèles d'analyse de système complexe. Ainsi, le modèle DPSIR (Driving forces-Pressure-State-Impact-Response) est une approche qui permet de définir les éléments clés dans le fonctionnement d'un écosystème et les pressions anthropiques modifiant la réponse de ce système (*Figure 8*).



**Figure 8 :** Schématisation de la modélisation DPSIR permettant les liens de causalité dans le fonctionnement d'un écosystème soumis à des pressions anthropiques.

Cette méthode de travail consiste à définir les différentes forces jouant sur les rouages du fonctionnement d'un écosystème, et donc à évaluer les effets des diverses pressions. Par exemple la hiérarchisation entre dégradation des habitats pour la faune et la flore dans un petit cours d'eau, et dégradation de la qualité chimique des eaux est nécessaire de manière à établir la gamme d'opérations à réaliser au cours de la restauration et l'ordre de priorité de ces travaux. A titre d'exemple les travaux menés sur le Vistre (rivière de la région de Nîmes) ont permis d'évaluer les gains écologiques acquis suite à des opérations de restaurations physiques (reméandrage, zone d'expansion de crue, recharge en gravier, revégétalisation des berges) ou à des levées de pressions chimiques (construction d'une station d'épuration performante). La balance entre les deux type de restauration est complexe à établir et une priorisation particulièrement délicate à faire. Dans un contexte où la pression chimique est forte (milieu fortement eutrophe), la restauration physique de tronçons du Vistre a indéniablement permis l'établissement d'une zone humide riche et diversifiée. Cependant pour le cours d'eau sensu stricto, le maintien d'une qualité chimique dégradée n'a pas permis de réelle évolution positive de la qualité biologique. A l'opposé, sur le tronçon où la pression chimique a été partiellement levée, une très nette augmentation de la qualité biologique (processus de transformation de la matière organique, invertébrés) a été observée. Mais le maintien de conditions hydrauliques dégradées (forte chenalisation) en maintenant une faible diversité d'habitat a limité cette amélioration (indicateurs IBMR de mauvaise qualité, limitation de l'IBD et de l'IBGN).

*In fine*, cette hiérarchisation devrait permettre de définir des critères pour l'aide à la prise de décision et l'évaluation de l'efficacité des plans d'action, notamment en termes de délimitation spatiale et temporelle des démarches à conduire.



## Devenir des pressions actuelles et pressions émergentes

Les questions de recherche à venir doivent intégrer le fait que certaines pressions actuelles sont amenées à disparaître ou du moins s'atténuer. En effet, nous pouvons d'ores et déjà noter une diminution progressive de certaines pressions grâce à la politique générale de qualité environnementale, à la gestion durable des écosystèmes, mais aussi à certains travaux de restauration actuellement engagés et modifiant durablement les habitats et les assemblages d'espèces.

C'est le cas d'ouvrages hydroélectriques pouvant être supprimés, ou dont la taille sera réduite dans les années à venir. Par exemple le barrage de Maisons-Rouges sur la Vienne supprimé en 1998/1999, ou les barrages de Vezins et La Roche-qui-Boit situés sur la Sélune dont l'effacement devrait avoir lieu d'ici quelques années. Nous pouvons encore citer le ré-élargissement des chenaux et la réouverture des marges construites sur certains cours d'eau. C'est également le cas des ballastières, gravières ou encore des casiers Girardon sur le Rhône.

A ces restaurations physiques se rajoutent des levées de pressions chimiques. C'est le cas des pollutions en matière organique qui devraient s'atténuer grâce à l'amélioration de la qualité chimique des rejets des stations d'épuration des eaux usées et à l'amélioration technologique de leur fonctionnement (normes de qualité des eaux de sortie de STEP précisées par la DCE). En outre, d'autres levées de pression sont attendues pour les substances actives de produits phytosanitaires interdites récemment par l'Union Européenne, mais encore présentes dans l'environnement (e.g. atrazine, bromure de méthyle). En contrepartie, les changements de pratiques agricoles et industrielles, les réglementations interdisant l'usage de certaines substances chimiques et les progrès technologiques vont être à l'origine de l'apparition de nouvelles molécules, parfois génotoxiques. Un exemple actuel est celui des nanoparticules, dont les impacts sur l'environnement et la santé sont encore mal connus. De manière générale, il semble judicieux d'anticiper quant aux polluants émergents pouvant impacter les systèmes à restaurer. Il existe donc un besoin d'études écotoxicologiques des effets des pressions attendues sur les hydrosystèmes restaurés. Ainsi qu'un renforcement des études préalables à la mise sur le marché de nouvelles substances, en particulier en prenant en compte les effets non létaux, « subtils », transgénérationnels.

Le devenir de certaines pressions est en revanche plus difficilement prédictible, mais nécessite néanmoins des efforts de recherche pour les intégrer dans les plans de gestion. Par exemple quelle trajectoire pouvons-nous envisager pour les dépositions atmosphériques de nanoparticules ou de métaux lourds ? Les effets de ces apports aériens à grande échelle sont encore méconnus, particulièrement sur les écosystèmes restaurés fragiles et oligotrophes.

## Déclinaisons locales des scénarios des changements climatiques

Les prédictions des changements climatiques à échelle mondiale (Rapport du Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, 2007) suggèrent une augmentation des températures (de 2 à 4°C), une modification des régimes hydrologiques (étiage estivaux plus longs), et une multiplication d'évènements climatiques extrêmes (tempêtes, ouragans, sécheresses ...). La déclinaison de ces prédictions globales à une échelle régionale, déjà prise en compte dans différents programmes (Rapport Technique de l'ONERC, 2008 ; programme ANR Wetchange sur les zones humides), doit encore progresser et nécessite des recherches tant en climatologie, qu'en modélisation, hydro-morphologie ou encore en biophysique, afin de comprendre l'influence des forçages globaux sur les conditions locales, tout en intégrant leur variabilité spatiale. L'étude des

changements environnementaux planétaires et de leur déclinaison régionale est indispensable afin de hiérarchiser les contraintes susceptibles d'affecter le fonctionnement des écosystèmes restaurés.

Des échanges constants entre écologues et climatologues sont nécessaires pour comprendre l'évolution climatique locale dans laquelle s'inscrivent les travaux de restauration, et donc prévoir les modifications des conditions du milieu. Ainsi, la diminution des zones humides associées aux grands fleuves, l'accroissement du nombre de rivières temporaires, la baisse prévisible des niveaux piézométriques des nappes souterraines, combinées à l'augmentation du niveau des mers, pourraient mettre en péril certains résultats attendus de travaux de restauration ambitieux. Les travaux effectués dans la Zone Atelier Terres Australes (ZATA) tout comme le LTER Arctique (Long Term Ecological Research Network) ont bien mis en évidence ces interactions entre changements globaux et changements locaux. Par exemple la restauration de certaines îles subantarctiques par éradication d'espèce invasive herbivore, a été réalisée dans un contexte de réchauffement climatique et de moindre pluviosité. Les résultats obtenus montrent des changements phytosociologiques différents de ceux attendus : assèchement des prairies et diminution de *Acaena magellanica*, plante vivace locale, au profit de *Taraxacum officinale*, le pissenlit commun (Chapuis et al., 2004).

### Mécanismes démographiques et changements sociétaux régulant la réhabilitation des espaces naturels

La dynamique démographique et les changements portés par les sociétés, notamment l'intensification de l'urbanisation, peuvent induire des dégradations de milieux, ou même des disparitions d'habitats jusqu'alors peu impactés. Les modalités de l'extension urbaine associée aux conflits d'usages des milieux (notamment entre industrie, tourisme et agriculture) sont d'une grande complexité. Ces pressions vont s'accroître dans les années à venir tout comme les besoins en eau des populations humaines. Des prédictions sur les trajectoires de la société sont nécessaires afin de mieux appréhender l'impact des activités humaines sur les hydrosystèmes, ainsi que leur hétérogénéité spatiale. Les changements d'usage des sols entraînent une compétition entre aménagement du territoire et zones à préserver pour le bon fonctionnement des hydrosystèmes. Ces zones vont des plaines d'inondations des fleuves, aux corridors écologiques, continuum éco-paysager reliant différents habitats vitaux à certains organismes. Il serait pertinent d'évaluer comment la répartition des populations, les changements d'usages des sols et d'utilisation de l'espace vont modifier la structure et le fonctionnement écologique des paysages, et ainsi perturber la dynamique des écosystèmes restaurés.

Il existe par ailleurs un besoin de recherche sur les moyens à mettre en œuvre pour réhabiliter l'intégrité des écosystèmes, notamment dans un contexte de production industrielle et agricole intensive. Citons par exemple les études nécessaires sur la dissémination des produits phytosanitaires au sein des bassins versants, et l'efficacité des zones tampons enherbées pour lutter contre la contamination des eaux de surface et des eaux souterraines (Dousset et al., 2010). Il convient aussi de mener des réflexions autour de nouvelles pratiques de gestion écologiquement intensive (e.g. le projet ANR-Systema PISCEnLIT), notamment dans le cas des écosystèmes restaurés. Ces pratiques, à l'échelle de l'écosystème, visent à produire mieux, de façon plus efficace, en respectant les services rendus par les écosystèmes. C'est le cas d'étangs en Moselle où des stratégies d'intensification écologique permettent d'augmenter la production piscicole, tout en assurant une meilleure insertion territoriale et en préservant la biodiversité (Lazartigues et al., 2012).

Enfin, et de manière plus nuancée, le développement du tourisme en bordure d'écosystèmes aquatiques patrimoniaux, représente à la fois une source de perturbation mais aussi un moteur fort pour initier des travaux de restauration. Cette dynamique entre tourisme et restauration des écosystèmes mérite d'être mieux comprise et approfondie, et il conviendrait donc d'intégrer des études sociales et socio-économiques dans les suivis de programmes de restauration.

### ***4.3. Quels types de compromis existe-t-il entre les exigences scientifiques, techniques/technologiques et socioéconomiques dans la mise en œuvre des actions de restauration ?***

Nos sociétés façonnent les choix politiques et économiques. Et même lorsqu'il s'agit de projets scientifiques inscrits dans les thématiques du développement durable, la validation par les différents groupes sociaux est primordiale. Il convient donc de s'interroger sur les compromis que la société est en mesure d'accepter. Par exemple, est-ce que l'esthétique liée à la présence d'un espace naturel suffit à compenser les désagréments potentiels pouvant être associés à la réhabilitation de l'écosystème ? Ou encore comment les valeurs scientifiques s'articulent avec des valeurs sociales (services rendus, usages et pratiques des milieux restaurés) ?

Dans cette partie, nous nous interrogerons sur les besoins de connaissance (i) sur les jeux d'acteurs, (ii) sur la diversité des objectifs et des enjeux, (iii) sur les représentations collectives des projets de restauration, et (iv) sur la pertinence écologique des mesures compensatoires.

#### *Analyse des jeux d'acteurs*

En France, les zones restaurées sont le plus souvent des zones ordinaires, c'est-à-dire non protégées, mais tout de même régies par un Plan Local d'Urbanisme (PLU), un schéma de cohérence territoriale (SCOT) ou un Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SDAGE). Les jeux d'acteurs sont donc particulièrement importants, mais restent malheureusement peu analysés.

Pour comprendre quels sont les jeux d'acteurs, nous devons d'abord nous demander qui dans nos sociétés s'intéresse à la restauration. Il existe une multitude de groupes pouvant agir de manière plus ou moins directe sur les projets de restauration : laboratoires de recherche, gestionnaires, collectivités territoriales, parcs naturels régionaux, fédérations de pêche et de chasse, conservatoires d'espaces naturels, centres permanents d'initiation à l'environnement, associations naturalistes, organisations non gouvernementales comme le Réseau d'Échanges et de Valorisation en Écologie de la Restauration (REVER), etc. Cette organisation multi-structures et pluridisciplinaire complexifie les jeux d'acteurs. Des travaux de recherche sont nécessaires pour analyser ces jeux et ces équilibres et peut-être mieux définir le rôle de chacun, dans le but de mieux prendre en compte les dimensions multiples liées aux travaux de restauration et remédiation écologique.

La prise en compte de ces dimensions multiples nécessite également une compréhension de la perception que les sociétés et les citoyens ont des milieux aquatiques. Il est important que cette perception soit soutenue par des connaissances objectives du fonctionnement des écosystèmes. Il est donc essentiel de donner des clés de lecture aux acteurs pour leur permettre de s'accorder sur les choix de restauration à mettre en œuvre.

Dans ces jeux d'acteurs, il convient aussi d'analyser les discordances de vocabulaire pouvant nuire aux projets de restauration, notamment lors des échanges entre gestionnaires, responsables des associations et acteurs politiques. Il est donc fondamental de proposer des analyses de discours et une définition précise du vocabulaire. Par exemple les analyses de discours de presse écrite à l'égard du Rhône ont montré que la médiatisation d'enjeux environnementaux et de gestion de crises expose les attitudes des populations envers une rivière multifonctionnelle. Celle-ci donne lieu à des solidarités mais aussi à des conflits. Des questions subsistent autour de la production, du contenu et de la réception des messages médiatiques.

Enfin, il convient de connaître le rôle de la psychologie environnementale dans l'adhésion au projet de restauration. La psychologie sociale de l'environnement est centrée sur l'étude des interrelations entre l'individu et son environnement physique et social, dans ses dimensions spatiales et temporelles. Elle s'intéresse aussi bien aux effets des conditions environnementales sur les comportements, cognitions et émotions de l'individu qu'à la manière dont celui-ci perçoit ou agit sur l'environnement (par exemple vis-à-vis des plantes invasives ou d'objets techniques comme les barrages). L'adhésion au projet de restauration nécessite donc des recherches sur ces comportements et ces perceptions, notamment des études sur l'impact psychosociologique de la restauration de milieux aquatiques dans les espaces urbains.

### *Définition des objectifs et arbitrage entre les différents enjeux*

Suivant les acteurs, les milieux aquatiques et le type de dégradation, les objectifs d'un programme de restauration ne sont pas les mêmes. Il faut donc trouver un compromis sur un ensemble de critères à la fois écologiques, économiques, politiques et sociaux. Or il existe des lacunes réelles quant aux critères permettant de définir des objectifs, et surtout des références sur lesquelles s'appuyer. Quels critères de décision choisir ? Quelles fonctions écologiques et sociétales sont attendues au terme des travaux de restauration ? Est-il possible d'obtenir une satisfaction partagée entre les différents acteurs ? Pour répondre à ces problématiques, il est important de comprendre les interactions entre les groupes sociaux et les espaces naturels dégradés pouvant faire l'objet de travaux de restauration.

Différentes perceptions se superposent dans les politiques et les programmes de restauration. Quelles espèces, quels habitats, quels paysages doivent être restaurés ? Les valeurs écologiques, socio-économiques et culturelles doivent être identifiées à l'avance et partagées par les différents acteurs (Clewel et Aronson, 2010).

Les arbitrages entre les différents enjeux associés à un projet de restauration ne sont pas les mêmes suivant les acteurs. Ils vont varier en fonction de l'usage de l'espace naturel restauré, en fonction des services écologiques rendus suite aux opérations de réhabilitation, et en fonction de leur perception. La définition même des concepts de « restauration écologique » et de « qualité environnementale » est en décalage entre scientifiques et gestionnaires, riverains et aménageurs. Pour améliorer l'arbitrage entre les différents enjeux, il est nécessaire d'apporter des analyses socioéconomiques mettant à jour les incompatibilités d'objectifs entre acteurs pouvant nuire au succès de projets de restauration.

Ces questions de recherche nécessitent une démarche pluridisciplinaire alliant Science de la Nature et Sciences de l'Homme et des Sociétés. La hiérarchisation des facteurs socioéconomiques et

écologiques est une étape clé pour définir des objectifs consensuels et sans ambiguïté entre les différents acteurs, et donc arbitrer entre les différents enjeux.

### *Représentations collectives de la nature, lien entre perception collective de la nature et valeur écologique*

Depuis plusieurs années, des mouvements culturels et sociaux s'engagent vers une réconciliation entre l'utilisation de l'environnement et le respect du fonctionnement naturel des écosystèmes. Les opérations de restauration et remédiation se placent dans cette problématique d'équilibre et de durabilité des écosystèmes. L'arbitrage entre les bénéfices des services écologiques rendus et les perceptions négatives de projets de restauration ou remédiation nécessite de comprendre les représentations collectives de la nature.

La mise en œuvre des opérations de restauration est guidée par la perception que les groupes sociaux ont des écosystèmes dégradés et des ouvrages modifiant le fonctionnement naturel des écosystèmes aquatiques. De manière générale la culture de l'eau, les usages et pratiques autour des fleuves, rivières ou marais, sont des éléments clés pour comprendre les perceptions collectives des écosystèmes perturbés puis restaurés. Il est de ce fait essentiel de connaître la valeur récréative, patrimoniale, culturelle, esthétique ou encore historique associées aux espaces naturels. Des recherches sur la représentation des transformations des milieux par les différents groupes sociaux (scientifiques, gestionnaires, élus, usagers...) est essentielle, puisque ce sont ces mêmes groupes qui apprécieront ensuite le caractère positif ou négatif du projet.

Une étude récente sur les rivières à chenaux multiples (rivières en tresse) a montré que les perceptions de la nature en termes d'aspect esthétique, services rendus et besoin de gestion, diffèrent en fonction des acteurs, soulignant une divergence entre l'attitude scientifique et populaire (Le Lay et al., 2013). Concernant les pollutions peu ou non visibles (micropolluants), la perception qu'ont les pêcheurs, les riverains, ou les opérationnels conditionnent là encore l'émergence de projets de remédiation de la qualité de l'eau. Des recherches sont donc nécessaires pour explorer la dynamique entre les différentes représentations de la nature. Ce type d'analyse nous renseigne également sur les relations et les rapports sociaux qui existent entre les différents groupes, et éclairent les conflits sur l'usage et le partage de l'eau.

La perception des changements paysagers associés aux opérations de restauration est obligatoire pour leur évaluation par les différents groupes sociaux. Il a ainsi été démontré que l'esthétique et l'écologie peuvent avoir des implications complémentaires ou au contraire contradictoires sur le paysage (Gobster et al., 2007). Dans ce contexte, l'utilisation de photo-questionnaires relatifs à la perception de la structure paysagère des bras morts fluviaux par des riverains ou des scientifiques permet d'apprécier les liens entre les qualités esthétiques et écologiques perçues par les acteurs (Cottet et al., 2010). Ce mode d'évaluation des préférences visuelles des zones humides favorise souvent les systèmes oligotrophes à eau claire et végétation immergée et visible. Cette homogénéisation des objectifs de restauration pourrait conduire à une nature idéalisée (esthétique d'aquarium), bien différente de la réalité ou de la nécessité environnementale. Il est donc primordial d'instaurer un dialogue entre scientifiques et citoyens afin que la valeur écologique des écosystèmes restaurés soit comprise par l'ensemble du public. Pour cela, des considérations écologiques devraient étayer les appréciations anthropologiques et des campagnes d'éducation et de sensibilisation sont nécessaires. Nous pensons qu'il est crucial

d'approfondir les connaissances sur ces critères esthétiques et patrimoniaux largement partagés par le grand public, mais pas toujours corrélés à des critères écologiques fonctionnels.

Des recherches sur les perceptions paysagères sont également à entreprendre permettant de caractériser précisément les bénéfices de restauration écologique tels qu'ils sont perçus par les habitants, de comprendre les facteurs qui influencent pour les habitants les représentations relatives à la qualité des environnements aquatiques, d'avoir une meilleure appréhension des divergences et convergences de perception des environnements aquatiques entre les acteurs de l'eau (gestionnaires, habitants)

Enfin, nous pouvons nous demander quelle est l'origine des perceptions négatives des projets de restauration ou remédiation ? Quels sont les freins ou les effets indésirables associés à ces opérations ? Peu d'études évoquent les critères qui peuvent donner une image négative des projets de restauration. Et surtout aucune analyse critique ne permet de différencier la gamme d'arguments avancés : espace visuellement non attractif, désagréments causés par des insectes, bruit engendré par le croassement des grenouilles, maladies émergentes (e.g. risque d'introduction du moustique-tigre suite à la mise en place de zones humides urbaines).

La perception des environnements aquatiques occupe donc une place centrale dans les projets de restauration en tant que concept médiateur, à l'interface entre les sociétés et les environnements. Ainsi, l'esthétique des paysages ou la valeur patrimoniale d'espèces emblématiques constituent un élément moteur et un intérêt promotionnel pour mettre en œuvre les projets de restauration écologique.

### Pertinence écologique des mesures compensatoires

Ces mesures visent à compenser les effets négatifs sur l'environnement (compensation écologique), ou créateurs de nuisances pour l'homme (compensation territoriales), d'un projet d'aménagement du territoire. Cette solution ne peut être engagée que (i) si le projet justifie d'une raison impérative d'intérêt public majeur et de l'absence de solution alternative (suppression ou atténuation des impacts négatifs), (ii) si le maître d'ouvrage est capable de mettre en place les mesures sur le site retenu et (iii) si ces mesures sont assorties d'objectifs de résultat et de modalités de suivi de leur efficacité et de leurs effets.

Parmi les mesures compensatoires possibles, les travaux de restauration visent à recréer des écosystèmes en compensation de la destruction d'habitats naturels (éventuellement délocalisés géographiquement). C'est le cas de la réhabilitation de pelouses sèches des contreforts

*Aspect réglementaire : la notion de mesures compensatoires existe dans le cadre législatif depuis la loi de 1976 pour la protection de la nature. La loi n°2008-757 relative à la responsabilité environnementale précise les attentes en matière de prévention et réparation des dommages environnementaux sur le fondement du principe pollueur payeur. La loi n°2010-788 relative à un engagement national pour l'environnement réforme la procédure de l'étude d'impacts (articles L. 122 du code de l'environnement), notamment en matière d'identification de mesures visant à compenser les effets négatifs notables sur l'environnement et la santé humaine. En 2009, la loi Grenelle I a précisé la portée de la compensation en désignant entre autre les espaces prioritaires dans la mise en œuvre de l'obligation de la compensation. Puis la loi Grenelle II a apporté un complément en terme de modalités de suivi et contrôle des effets de la mise en œuvre des mesures compensatoires.*

*[D'après les publications du Commissariat Général au Développement Durable]*

savoyards ou encore de l'aménagement du parc de la Feyssine, mesure compensatoire du périphérique Téo à Lyon. Un autre exemple d'actualité et très controversé est celui de la mise en place de mesures justifiant la construction de l'aéroport de Notre-Dame-des-Landes. Dans ce cas, la commission des experts scientifiques considère que la méthode actuelle de compensation des incidences sur les zones humides ne peut pas être validée (de Marsily et al., 2013).

Il est important de comprendre quels sont les objectifs de ces mesures et comment construire le projet, notamment en intégrant les différents groupes sociaux dans la définition des objectifs. Une « juste compensation » ne peut être évaluée qu'avec des écologues compétents, en connaissant l'histoire du site et son éco-potentialité. Une évaluation des effets attendus des futures pressions liées à l'exploitation est également nécessaire, ainsi qu'une appréciation d'éventuelles mesures correctrices.

Nous pouvons nous demander comment sont perçues ces mesures compensatoires par les différents acteurs, opérationnels et usagers. Est-ce une restauration au rabais, le remboursement d'une dette, ou bien un projet de restauration ayant toute sa valeur écologique ? Et pour les aménageurs, est-ce une contrainte, une obligation, ou au contraire une libération, un droit leur permettant de réaliser tous les projets d'aménagements qu'ils souhaitent ?

D'un point de vue écologique, ces mesures restent discutables et le principe de la compensation peut être jugé éthiquement contestable. La mise en place de mécanismes compensatoires sur la biodiversité donne-t-elle le droit de détruire des espèces ou des milieux naturels ? Existe-t-il un caractère remplaçable ou compensable des espèces, habitats ou fonctions écosystémiques liés à des milieux ? Quelles sont les dérives de ce type de réglementation ? Enfin, la marchandisation du vivant et des services écologiques pourrait biaiser les choix politiques en terme de conservation. Une véritable réflexion reste donc à mener sur l'éthique de la compensation de la destruction.

#### ***4.4. Quels modes opératoires, quelles méthodes, et quelles stratégies pour une restauration durable ?***

Une restauration durable n'est possible que si les modes opératoires et les méthodes de suivis sont pertinents et maîtrisés. Or à l'heure actuelle, les scientifiques s'accordent à dire que certains manques majeurs limitent les effets bénéfiques de nombreux projets de restauration. Tout d'abord dans la mise en œuvre de ces projets, nous pouvons souligner un manque d'informations historiques (état du système avant les impacts multiples et l'accélération des perturbations anthropiques post XIX<sup>ème</sup> siècle) ainsi qu'un manque de clarté dans les objectifs à atteindre. Le manque récurrent de données pré-restauration est une faiblesse majeure et de nombreux paramètres mériteraient d'être renseignés en amont des actions de restauration. La caractérisation de l'état initial devrait être d'une durée suffisante et prendre en compte l'évolution du système post-aménagement, la variabilité saisonnière et la variabilité interannuelle. Une connaissance approfondie des sites (caractéristiques physico-chimiques antérieures à la restauration, état des lieux de la diversité biologique) est également primordiale afin de hiérarchiser les objectifs à atteindre et donc les indicateurs à suivre.

D'autre part, la restauration écologique est une discipline relativement jeune, et nous pouvons constater qu'il y a peu de suivis long terme et peu de retours d'expériences. Il reste donc difficile d'évaluer la réussite ou l'échec de travaux de restauration. Le manque de données rétrospectives et d'outils prédictifs des effets de la restauration sur les variations des proportions des différentes espèces limitent la compréhension de la dynamique des populations, en particulier sur des échelles

spatiales et temporelles longues. Ce manque de données est spécialement limitant pour connaître l'évolution de la biodiversité, ou les changements d'équilibre entre espèces natives et invasives (disparition ou au contraire prolifération dans le système restauré) ?

Dans cette partie, nous proposerons des problématiques de recherche afin de répondre à cinq questions principales alimentant actuellement le plus de débat. Il s'agit de questions autour (i) des prédictions concernant les milieux restaurés, (ii) des échelles de temps, (iii) des échelles spatiales, (iv) des niveaux d'intervention et de suivi, et (v) des innovations.

### *Définition de la trajectoire écologique d'un milieu et inscription des travaux de restauration dans cette trajectoire*

L'anthropisation génère des modifications du fonctionnement des écosystèmes dont les trajectoires écologiques sont ainsi modifiées : parfois une destruction complète des communautés et des stocks de nutriments, ou au contraire une maturation accélérée du système pouvant être perçue comme un vieillissement. Par exemple, les apports excessifs de nutriments dans les zones humides et petits lacs génèrent une eutrophisation, un comblement, un atterrissement. En zone de plaine cette eutrophisation peut être naturelle et ne nécessite pas de restauration. Dans de nombreux cas des travaux de restauration peuvent être orientés vers un rajeunissement de ces milieux. Ainsi les travaux de restauration de zones humides consistent en un curage des fonds (riches en matière organique) permettant d'induire une re-oligotrophisation du système. Nous pouvons alors nous demander s'il faut obligatoirement maintenir ces milieux qui ont été restaurés dans un état juvénile (dans ce cas fortement oligotrophe), ou bien s'il faut les laisser évoluer vers un nouvel équilibre, pour une plus grande hétérogénéité de l'environnement à l'échelle du paysage. Ces choix de restauration et leurs conséquences sur la trajectoire écologique des systèmes doivent bien entendu être en lien avec les services écologiques attendus et les objectifs prédéfinis.

Il y a un besoin essentiel d'observation à long terme et à grande échelle pour décrire, comprendre et modéliser les trajectoires naturelles de ces écosystèmes de manière à inscrire les travaux de restauration ou remédiation dans la dynamique naturelle et le fonctionnement de ces systèmes. Des approches pluridisciplinaires (analyses géomorphologiques, écologiques, sociales) permettent d'élaborer des tests de prédiction sur les conséquences de ces opérations. A ce titre, la restauration hydrologique et écologique du Rhône est exemplaire puisque les prédictions des changements dans les communautés piscicoles et d'invertébrés sont testées sur des échelles de temps supérieur à la décennie. De même, la re-oligotrophisation des grands lacs alpins nécessite des suivis de très longue durée (plus de 60 ans pour le lac Léman) qui peuvent alors montrer des interactions complexes entre la limitation des apports en nutriments (comme le phosphore) et les changements climatiques.

La connaissance de la trajectoire écologique des écosystèmes apporte des réponses méthodologiques et conceptuelles aux opérations de restauration mais nullement sur les stratégies à appliquer. Celles-ci doivent être conduites par des choix politiques, soutenus par des connaissances scientifiques de la dynamique des systèmes à restaurer. Ainsi, les annexes fluviales suivent un processus d'atterrissement naturel, comment devons-nous réagir face à ce processus ? Devons-nous renouveler les opérations de restauration au fil des ans ou laisser vieillir les systèmes et créer ailleurs d'autres milieux à des stades différents de leur succession ? Enfin, la capacité de restaurer une dynamique pour que le système recrée lui-même une diversité d'habitats doit être étudiée et déclinée en application méthodologique.



## Phasage des étapes de restauration et choix d'une échelle temporelle pertinente pour le suivi post-restauration

Une bonne connaissance de la succession des communautés dans les écosystèmes à restaurer ainsi que les données pré-restauration et des analyses géomorphologiques, permettent de choisir la période optimale pour engager les travaux de restauration ou remédiation, c'est-à-dire le moment le moins perturbant pour agir sur l'écosystème cible. Ce moment peut varier en fonction des facteurs abiotiques considérés, par exemple la remobilisation de sédiments dans les systèmes aquatiques stagnant peut devenir une source de pollution en période de faible oxygénation. Les opérations de restauration devront donc éviter les périodes de forte sensibilité des processus biogéochimiques. De même le moment optimal de restauration doit tenir compte des cycles biologiques des organismes inféodés à ces écosystèmes. Ce moment peut varier d'une espèce à une autre, par exemple au sein des communautés piscicoles, il existe un grand décalage entre les périodes de reproduction des Salmonidés (hiver) et des Cyprinidés (printemps). Une étude de la phénologie des espèces formant les communautés est primordiale pour choisir le phasage de la restauration, particulièrement dans le cas de la restauration physique des habitats.

La description de la phénologie des espèces n'est pas suffisante, il convient aussi d'améliorer les campagnes d'échantillonnages avant restauration en termes d'échelles temporelle et spatiale, non seulement dans le but de décrire l'écosystème, mais aussi pour définir les modalités et le phasage temporel des opérations de restauration, ainsi que la succession des objectifs de réhabilitation. Les opérations de restauration doivent être minutieusement séquencées, en particulier pour préciser quand lever les pressions physiques, chimiques, ou biologiques (dans la mesure du possible) et dans quel ordre.

Ces caractérisations initiales conduisent parfois à modifier les plans de restauration ou leur organisation dans le temps, et parfois même les annuler. C'est le cas d'un bras mort du Rhône dont les opérations de réhabilitation ont été annulées pour préserver une espèce de mollusque répertoriée sur les listes rouges (*Anisus vorticulus*). La réponse de l'écosystème aux opérations de restauration pourra aussi varier en fonction de l'état écologique pré-restauration et de la capacité de colonisation (principalement pour les écosystèmes isolés) : communautés en place, stock de nutriments et type de matière organique. Cette description de l'état du système permettra d'émettre des hypothèses quant à la succession secondaire qui se mettra en place après restauration.

Enfin, une étape indispensable aux opérations de restauration est celle du suivi de l'évolution temporelle du système restauré. La durée et les modalités de ce suivi post-restauration posent de nombreuses questions de recherche et doivent être l'objet de développements conceptuels et pratiques. (i) Quelle durée est nécessaire pour sortir de la phase d'équilibrage (période de fluctuation liée aux travaux de restauration eux-mêmes) ? (ii) Sur quelle durée et sur quelle échelle spatiale évaluer le succès ou l'échec de la restauration ? (iii) Sur quelle périodicité faut-il se baser ? Dans tous les cas, les travaux de recherche étudiant les processus post-restauration s'accordent à recommander des suivis sur le long terme (plusieurs années à plusieurs dizaines d'années). Par exemple, les peuplements piscicoles du Rhône en Chautagne ont été suivis pendant plus de 30 ans (<http://restaurationdurhone.fr>) pour pouvoir estimer l'effet de l'aménagement du fleuve (début des années 80) et de la restauration des débits réservés dans l'ancien lit court-circuité (au début des années 2000).

## Choix d'une échelle spatiale pertinente

Les plans de restauration peuvent être conçus à différentes échelles allant de la station au bassin versant ; il est important de définir à l'avance l'échelle la plus pertinente en fonction de la hiérarchie des pressions subies par l'écosystème. Ainsi, il convient de vérifier si le dysfonctionnement d'un écosystème à réhabiliter est lié à des contraintes locales (échelle de la station) ou régionales (échelle du paysage ou du bassin versant). Ce choix d'échelle spatiale doit intégrer à la fois la nature des pressions (physiques, chimiques ou biologiques), leur cause (activités anthropiques), la distance entre la source de la pression et l'écosystème à restaurer (parfois très éloigné), et les exigences écologiques des espèces ainsi que les dynamiques de populations

Des travaux sont particulièrement nécessaires pour comprendre la dynamique spatiale à grande échelle de l'interface entre paysages ruraux et urbains. En effet, les zones périurbaines sont extrêmement dynamiques et les processus qu'elles induisent à l'échelle du paysage nécessitent des approches expérimentales et de modélisation. Ces approches permettront de prendre en compte les influences urbaines dans les plans de restauration, et notamment les lignes de partage entre des usages très opposés du milieu. Ainsi les processus d'imperméabilisation des sols, de modifications des débits et d'érosion des cours d'eau sont particulièrement impactés par la périurbanisation et nécessitent des modélisations à grande échelle (i.e. le bassin versant).

A une échelle plus réduite, la connectivité entre différents écosystèmes ou entre plusieurs compartiments d'un même écosystème doit être comprise afin d'être intégrée aux opérations de restauration. De nombreux travaux ont été centrés sur la reconnexion de zones humides à des réseaux hydrographiques, mais leurs conséquences ne sont pas toujours prévisibles (apport de nutriments, inoculum de communautés, etc.). Ainsi la reconnexion des annexes fluviales au chenal d'un fleuve permet d'assurer la continuité écologique, la reproduction de certains organismes (poissons), l'amélioration des capacités auto-épuratrices. Cependant, cette reconnexion peut aussi entraîner la colonisation des annexes par des espèces invasives. Une compréhension en profondeur des conséquences de ces reconnexions est essentielle pour leur évaluation, particulièrement pour les problèmes écologiques liés à l'apparition et au développement d'espèces invasives. De même les chenaux court-circuités posent des questions de choix dans la longueur du tronçon à réhabiliter, et donc dans les objectifs de la restauration et les modes opératoires.

## Modalités d'intervention et mise en place de suivis post-restauration

Comment et jusqu'où intervenir ? Le degré de restauration ainsi que l'investissement technique et humain alloué aux opérations, peuvent être d'intensité variable. Des recherches sont nécessaires pour préciser quelle stratégie doit être appliquée en fonction du type d'écosystèmes, du type de perturbation, et de l'objectif à atteindre (e.g. réintroduire une espèce de poisson, augmenter la biodiversité des invertébrés, ou encore diminuer la concentration en polluants). Pour rétablir la dynamique naturelle d'un écosystème et le ramener dans un domaine de fonctionnement en lien avec les objectifs de gestion, deux grandes stratégies peuvent être adoptées :

- Une stratégie d'intervention lourde ou intensive (investissement relativement important) avec reconstitution du cadre physique, chimique et biologique du système impliquant des choix dans les compartiments à restaurer, un impact fort sur l'écosystème, et un retour à l'équilibre relativement long. Il est néanmoins important de consacrer des efforts de recherche à ce type de restauration car les écosystèmes fortement impactés par des perturbations multiples nécessitent

souvent des opérations lourdes de restauration (nombreux paramètres à modifier, changement brutal d'un facteur...). Un phasage des étapes de restauration est alors nécessaire et peu de choses sont connues sur l'importance de l'ordre des modifications appliquées au système.

- Une stratégie d'intervention minimale, idéale pour des écosystèmes isolés et répartis sur des surfaces importantes, lorsque les facteurs écologiques limitant sont amenés à changer avec les futures pressions climatiques ou encore lorsque la restauration repose sur des processus extérieur au site (Hughes et al., 2012). Cette restauration écologique passive ou restauration naturelle est usuellement plus rentable qu'une stratégie d'intervention lourde, et induit généralement un faible impact sur le système à restaurer, ainsi qu'un retour vers l'équilibre rapide en cas de perturbation simple. Toutefois, cette stratégie peut être complexe à mettre en œuvre car elle nécessite une bonne compréhension du fonctionnement du système. Des besoins de recherche existent pour mieux cerner les processus ramenant le système à l'équilibre et les interactions possibles en cas de perturbations multiples. De même les modalités des actions à mettre en place par les opérationnels et les gestionnaires de l'environnement requièrent la poursuite de travaux de recherche appliquée tels que ceux présentés dans les revues techniques de transfert.

Pour la plupart des écosystèmes, quel que soit le type d'intervention, le retour à un état historique de référence est un anachronisme (Jackson & Hobbs, 2009). L'empreinte humaine et naturelle ont conduit à une « dérive » des conditions environnementales dans lesquelles les écosystèmes actuelles doivent s'intégrer. Toutefois, l'histoire écologique et la paléoécologie permettent d'identifier des objectifs adéquats à atteindre et révèlent parfois l'origine des changements environnementaux anciens. Des travaux de recherche restent nécessaires pour identifier et caractériser les stratégies et les méthodes de restauration appropriées permettant de rétablir la capacité de résilience du système favorisant son aptitude de succession et sa stabilité à long terme.

Par exemple, la restauration hydraulique des chenaux court-circuités du Rhône consiste à modifier les débits réservés, en quantité et en répartition annuelle. Une modélisation du régime hydraulique avant et après restauration permet de prédire la diversification des habitats dans le cours d'eau (gamme de profondeur et de vitesse de courant) permettant de favoriser la diversité des zones de reproduction, de nutrition, ou encore de repos, et donc d'augmenter la biodiversité locale. Cette stratégie de modification d'un seul paramètre (hydrologie du chenal artificialisé) devrait permettre de réhabiliter le fonctionnement écologique de ce chenal. Toutefois des écarts entre l'état écologique prédit avant restauration et l'état observé laisse penser que d'autres facteurs peuvent localement interférer avec l'hydrologie (dépôts écotoxiques)

Enfin, la mise en place d'un suivi post-restauration est indispensable pour l'évaluation de la stratégie adoptée. Ces suivis devront intégrer un certain nombre d'indicateurs écologiques et de potentialité sociale (*voir paragraphe 4.5*). Il est essentiel de trouver un équilibre opérationnel entre effort d'échantillonnage et performance des suivis : des designs expérimentaux adaptés doivent permettre de trouver cet équilibre entre le nombre de sites à échantillonner, le nombre de paramètres à suivre et l'intensité des suivis (fréquence de prélèvements).

### *Innovations métrologiques et technologiques permettant d'améliorer les opérations de restauration et leur suivi à long terme*

Les innovations techniques de restauration ou remédiation sont essentiellement orientées vers les traitements de l'eau et nécessitent encore des expertises scientifiques. En termes de remédiation de la qualité de l'eau, les techniques utilisées vont de nouvelles méthodologies simples (comme

l'implantation de bottes de paille au niveau des sorties de drains agricoles ou la création d'étangs) à des procédés biotechnologiques innovants. Dans ce domaine, des associations de plantes et de microorganismes indigènes de sols pollués (Kozdroj & van Elsas, 2000) ou des microorganismes génétiquement modifiés (Sayler & Ripp, 2000) ont fait l'objet d'études pour la mise au point de procédés de phyto-remédiation et bio-remédiation. Ces agents dépollueurs pourraient être prometteurs dans la dégradation de nombreux composants toxiques. Cependant des études *in situ* et une validation environnementale de ces procédés sont nécessaires.

Concernant le suivi post opération, toute étude robuste des effets de restauration nécessite une maîtrise des contraintes métrologiques : acquisition de données pré- et post-restauration de qualité suffisante pour l'évaluation de l'efficacité de l'opération menée. Ces avancées métrologiques concernent à la fois des innovations en terme d'enregistrement et de mesure des paramètres du milieu, et en terme de métriques physiques, chimiques, biologiques et sociales à mettre en place. D'un point de vue métrologique, le développement de nouveaux outils de surveillance destinés au diagnostic ou au suivi à moyen et long terme des milieux naturels anthropisés permet d'améliorer la qualité des mesures. C'est le cas des échantillonneurs passifs (type POCIS) permettant de suivre des substances polluantes circulant dans l'environnement à des teneurs inférieures au seuil de détection d'instruments habituellement utilisés en laboratoire, ou présentes ponctuellement dans l'environnement. Du point de vue du choix des métriques, des recherches sont nécessaires sur le choix des indicateurs à suivre, qui devraient aller au-delà des indices biologiques actuellement utilisés. Par exemple, une grande diversité de métrique a été choisie pour le suivi des communautés d'invertébrés lors de la restauration des chenaux court-circuités du Rhône. A terme, il conviendrait que ces métriques permettent d'estimer le niveau de restauration fonctionnelle du système. Les recherches engagées actuellement sur l'utilisation des taux de décomposition de la litière de feuilles sont une illustration de ce type de métrique fonctionnelle (Woodward et al., 2012).

En Sciences Humaines et Sociales, l'acquisition de nouveaux outils biotechnologiques comme le "Eye tracking" nouvelle génération va permettre d'apporter de nouvelles approches pour les études de perception environnementale. Les aspects cognitifs étudiés par des photo-questionnaires pourront être complétés par des aspects physiologiques. En effet, un oculomètre intégré à une monture de lunette enregistre le mouvement des yeux (système de rayon infrarouge permettant de calculer le mouvement de la pupille) et parallèlement, une caméra vidéo filme le champ de vision. Ce système a l'avantage d'être portatif, facilement utilisable sur le terrain, et permet de déterminer ce qui dans le champ visuel attire l'attention. Cet outil a montré son efficacité dans des études de marketing, et un besoin de recherche est aujourd'hui nécessaire pour développer une méthodologie adaptée aux projets de restauration.

#### ***4.5. Quels indicateurs et quelles plus-values pour évaluer le succès des opérations de restauration ?***

Au-delà des choix métrologiques et méthodologiques permettant de définir les stratégies de restauration et le phasage des opérations, il existe un besoin de recherche pour mieux définir et intégrer les indicateurs écologiques et socioéconomiques. D'une part, de nouveaux indicateurs biologiques et fonctionnels de la santé des écosystèmes sont nécessaires dans l'évaluation écologique des hydrosystèmes à une large échelle spatiale, ainsi que dans le contexte européen de la DCE. D'autre part, les indicateurs socioéconomiques sont pour le moment peu élaborés, souvent déconnectés des projets, et peu robustes d'un point de vue méthodologique.

Dans cette partie nous considérerons successivement (i) l'élaboration de nouveaux indicateurs intégratifs (fonctionnement écologique et potentialité sociale), (ii) l'intégration des services écosystémiques dans l'évaluation du succès des opérations de restauration, et (iii) et l'importance du grand public dans cette estimation des plus-values de la restauration.

### *Indicateurs intégratifs associant fonctionnement écologique et potentialité sociale*

Le choix des indicateurs associés à l'évaluation du succès des programmes de restauration doit obéir à une logique prenant en compte tous les aspects de la durabilité du système restauré. Dans ce cadre, le modèle DPSIR (*voir paragraphe 4.2*) facilite la représentation et la compréhension de l'information mesurée par ces indicateurs. En effet, ce modèle permet de mettre en lien les contraintes (D), les pressions subies (P) et les effets (R), puis d'élaborer des indicateurs mixtes de plus-values. Ces indicateurs associant valeur écologique et valeur économique et sociale sont des outils déterminants pour évaluer le succès des actions de restauration ou de remédiation. Ils restent cependant encore mal connus et des recherches sont nécessaires pour compléter les indicateurs traditionnels mesurant séparément l'abondance, la composition, la richesse spécifique ou la diversité génétique de populations du milieu à restaurer.

Une méthode intégrative axée sur des expertises pluridisciplinaires reste donc à élaborer. D'une part, le développement de nouveaux indicateurs écologiques doit permettre d'évaluer l'intégrité des écosystèmes restaurés à l'échelle de la communauté (Jaunatre et al., 2013), par exemple en utilisant les traits d'espèces. Ces traits peuvent décrire (i) les attributs biologiques : habitudes alimentaires, traits physiologiques, caractéristiques phénotypiques, stratégies de reproduction ou de dispersion (Dolédec et al., 2006), (ii) les stratégies écologiques comme les préférences d'habitat (Usseglio-Polatera et al., 2000), ou encore (iii) les réponses éco-toxicologiques (e.g. SPEAR index). D'autre part, l'évaluation des opérations de restauration doit absolument être associée à des indicateurs de potentialité sociale (indicateurs paysagers, récréatifs, patrimoniaux, etc.). Ces indicateurs sont au début de leur développement et de leur utilisation. Hormis des enquêtes socioéconomiques locales souvent menées à l'initiative des syndicats de rivières, peu de programmes ambitieux de suivi semble intégrer ce type d'indicateurs. En France, le Plan Rhône est un exemple réussi de ce type de suivi pluridisciplinaire.

D'une manière générale, les indicateurs écologiques et sociaux, doivent être multicritères, multi-compartiments, et intégrer l'écosystème dans son entier. Ils permettent de réaliser des suivis robustes, et dans une certaine mesure de décider de nouvelles étapes à mettre en œuvre dans un programme de restauration ou remédiation (*Figure 9*).



**Figure 9 :** Modèle conceptuel d'un programme de réhabilitation avec une approche de gestion adaptable. Le projet est conçu de manière à améliorer l'état écologique d'un système par l'exécution d'actions de restauration ou remédiation. L'efficacité de ces actions est suivie et évaluée, conduisant à une meilleure compréhension du système, et permettant si cela est nécessaire de réajuster les opérations. Cette démarche est limitée par des contraintes socioéconomiques (comme le budget allouable) et des contraintes techniques. Ces dernières peuvent être maîtrisées grâce aux informations obtenues durant le suivi et l'apprentissage que nous pouvons en tirer. Ainsi, l'efficacité de l'ensemble de ces actions peut aider à rectifier l'allocation initiale du budget (ajustement du plan en cours) et servir d'exemple pour de futurs projets (réduction des contraintes techniques). D'après Hermoso et al., 2012.

La constitution d'indicateurs mixtes pose des questions quant à l'échelle spatiale et temporelle de leur utilisation. Ainsi, des recherches sont nécessaires afin d'élaborer des diagnostics de territoire associant restauration ou remédiation et développement général d'un territoire. Les notions de proximité ou au contraire d'éloignement, ainsi que l'analyse des interactions entre l'Homme et son milieu, vont permettre d'évaluer l'ampleur des territoires sur lesquels les programmes de restauration ont un impact, et le rythme d'appropriation des nouveaux espaces restaurés. L'analyse du rapport sur la dimension sociale de l'eau qui sera publié prochainement dans la collection Comprendre pour Agir de l'ONEMA, permettra d'apporter des réponses quant au choix des indicateurs sociaux.

### Intégration des services écosystémiques rendus au succès des opérations de restauration

Les services écologiques rendus par les écosystèmes restaurés (voir paragraphe 4.1) sont difficiles à quantifier précisément, pourtant l'évaluation de ces services est un critère essentiel pour choisir la meilleure stratégie d'intervention, apprécier le succès d'une restauration ainsi que sa rentabilité (Birch et al., 2010). Ainsi l'estimation des services écologiques rendus par les systèmes

restaurés, comme l'approvisionnement en eau potable à moindre coût, ou encore le développement économique d'un territoire grâce au tourisme, donne la possibilité de mettre en évidence des biens d'intérêt public.

Nous pensons qu'il est nécessaire de préciser le cadre écologique et social rendant compte du retour sur investissement des opérations de restauration en termes de services écosystémiques et de bien-être humain. Ces analyses mixtes permettent un retour sur les plans de restauration et un ajustement de leur mise en œuvre (*Figure 9*). Cependant, la complexité des interactions entre paramètres écologiques peut avoir des conséquences inattendues pour la société. Ainsi, l'amélioration de la qualité des grands lacs alpins (re-oligotrophisation) a modifié les dynamiques relatives de populations de poissons (réduction des populations de perches et augmentation des populations de corégones), induisant des modifications de productivité et du service écologique de prélèvement (pêche).

Des questions subsistent sur les stratégies à mettre en place pour combiner valeurs écologiques et valeurs patrimoniales de l'écosystème restauré. Dans ce contexte, un élément phare du Plan de Restauration du Rhône, la ViaRhôna est un formidable enjeu touristique et environnemental. Cet itinéraire cyclable de 700 km reliera le lac Léman à la mer Méditerranée d'ici 2014. Avec déjà 225 km de cette voie verte praticables en Rhône-Alpes, c'est autant d'opportunité de balades et sorties en compagnie du fleuve, le long d'un grand nombre de zones humides restaurées, sur un site protégé accessible à tous. Cet exemple réussi permet d'améliorer l'appropriation des marges alluviales par un large public (service culturel).

### Fonctions économiques et sociales de la restauration

S'interroger sur les fonctions économiques et sociales de la restauration revient à intégrer les projets de restauration dans les plans d'aménagement du territoire. Cette démarche, déjà engagée à l'échelle locale, mériterait d'être approfondie à l'échelle nationale (à l'image du programme « Trame verte et bleue » du Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie). Les problématiques associées s'articulent autour de la consommation de la restauration par le grand public, et des aménités offertes par les écosystèmes restaurés (valeur d'authenticité, de calme, valeur de l'odeur de la nature, ou encore des étendues sauvages). Il semble donc important d'élaborer des analyses contingentes permettant d'évaluer la valeur « hors-marché » attribuée aux sites naturels restaurés et à leur rôle symbolique. Ces analyses pourront être complétées par des études sur les comportements et les motivations associés à la satisfaction des besoins ou des désirs (i.e. influence de l'usage des biens et des services consommés). Cette perspective intégrant les attentes des usagers d'un point de vue paysager est prise en compte dans un travail de thèse en cours, sur la restauration de rivières urbaines, en collaboration avec la Zone Atelier Loire.

Que ce soit pour favoriser l'adhésion sociale, dynamiser les initiatives de renaturation, ou encore encourager une appropriation des milieux recréés, des propositions de consommation de la restauration sont essentielles, et nécessitent couramment de combiner un usage pratique ou récréatif. Une question demeure, celle de la place donnée aux citoyens, aux habitants et aux usagers. Mettre en avant des retours valorisant pour les acteurs locaux, ou encore donner une valeur humaine à la renaturation semble être un point de départ à cette problématique.

Enfin, pour que les bénéfices économiques et sociaux soient partagés, de nouveaux systèmes doivent être pensés et développés, notamment en combinant incitations financières et écologie

participative. Cette dimension sociopolitique de la restauration vise à favoriser l'action collective et la solidarité spatiale. Pour cela, la mise en place de « forums hybrides » conduit à des discussions du sens écologique et du sens social des plans de restauration ou de remédiation, et l'élaboration de propositions d'actions fondées sur des processus de co-construction. Cette démarche va au-delà d'une concertation habituelle, favorisant la participation du public aux décisions environnementales (article 7 de la Charte de l'environnement).



## Remerciements

Nous remercions Christophe Piscart, Jean-Michel Olivier, Pierre Sagnes et Samuel Segura pour leurs échanges au sein du Laboratoire d'Ecologie des Hydrosystèmes Naturels et Anthropisés (UMR CNRS 5023). Nous sommes très reconnaissants du temps accordé par les chercheurs de l'unité de recherche Laboratoire Milieux Aquatiques, Ecologie et Pollutions (UR MALY IRSETA) : Yves Souchon (Hydroécologie quantitative), Véronique Gouy et Dorothea Noll (Pollutions agricoles diffuses), Maxence Forcellini et Nicolas Lamouroux (Dynamiques, indicateurs et modèles en écohydrologie). Nous présentons nos vifs remerciements à Bertrand Morandi, Marylise Cottet et Anne Rivière Honegger du Laboratoire Environnement Ville et Société (UMR CNRS 5600) pour leur apport sur les questions socioéconomiques.

## Bibliographie

- Allan JD., McIntyre PB., Smith SDP., Halpern BS., Boyer GL., Buchsbaum A., Burton GA., Campbell LM., Chadderton WL., Ciborowski JJH., Doran PJ., Eder T., Infante DM., Johnson LB., Joseph CA., Marino AL., Prusevich A., Read JG., Rose JB., Rutherford ES., Sowa SP. and Steinman AD., **2012**. *Joint analysis of stressors and ecosystem services to enhance restoration effectiveness*. PNAS doi: 10.1073
- Amigues JP and Chevassus-au-Louis B., **2011**. *Evaluer les services écologiques des milieux aquatiques : enjeux scientifiques, politiques et opérationnels*. Comprendre pour Agir, Onema.
- Baatrup-Pedersen A., Dalkvist D., Dybkjaer JB., Riis T., Larsen SE. and Kronvang B., **2013**. *Species Recruitment following Flooding, Sediment Deposition and Seed Addition in Restored Riparian Areas*. Restoration Ecology 21 (3): 399-408.
- Bernhardt ES. & Palmer MA., **2007**. *Restoring streams in an urbanizing world*. Freshwater Biology 52: 738-751.
- Besacier-Monbertrand AL., Paillex A. and Castella E., **2012**. *Short-term impacts of lateral hydrological connectivity restoration on aquatic macroinvertebrates*. River Research and Applications DOI: 10.1002/rra.
- Birch JC., Newton AC., Alvarez Aquino C., Cantarello E., Echeverria C., Kitzberger T., Schiappacasse I. and Tejedor Garavito N., **2010**. *Cost-effectiveness of dryland forest restoration evaluated by spatial analysis of ecosystem services*. PNAS 107 (50): 1-6.
- Bulut Z. and Yilmaz H., **2009**. *Determination of waterscape beauties through visual quality assessment method*. Environmental Monitoring and Assessment 154: 459-468.
- Chapuis JL., Frenot Y. and Lebouvier M., **2004**. *Recovery of native plants communities after eradication of rabbits from the subantarctic Kerguelen islands, and influence of climate change*. Biological Conservation, 117: 167-179.

Chevassus-au-Louis B., Salles JM., Bielsa S., Richard D., Martin G. and Pujol JL., **2009**. *Approche économique de la biodiversité et des services liés aux écosystèmes – Contribution à la décision publique*. Centre d'analyse stratégique, La Documentation française.

Clements WH. and Newman MC., **2002**. *Community ecotoxicology*. Chichester, UK: J. Wiley & Sons (eds.).

Cottet M., Rivière-Honegger A. and Piégay H., **2010**. *Mieux comprendre la perception des paysages de bras morts en vue d'une restauration écologique: quels sont les liens entre les qualités esthétique et écologique perçues par les acteurs?* *Norois* 216 (3): 85-103.

D'Amico F., Darblade S., Avignon S., Blanc-Manel S. and Ormerod SJ., **2004**. *Odonates as Indicators of Shallow Lake Restoration by Liming: Comparing Adult and Larval Responses*. *Restoration Ecology* 12 (3): 439-446.

Dolédec S., Phillips N., Scarsbrook M., Riley RH. and Townsend CR., **2006**. *Comparison of structural and functional approaches to determining land use effects on grassland stream invertebrate communities*. *JNABS* 25 (1): 44-60.

Dousset S., Thévenot M., Schrack D., Gouy V. and Carlier N., **2010**. *Effect of grass cover on water and pesticide transport through undisturbed soil columns, comparison with field study (Morcille watershed, Beaujolais)*. *Environmental Pollution* 158: 2446-2453.

Drayton B. & Primack RB., **2012**. *Success Rates for Reintroductions of Eight Perennial Plant Species after 15 Years*. *Restoration Ecology* 20 (3): 299-303.

Farinas-Franco JM., Allcock L., Smyth D. and Roberts D., **2013**. *Community convergence and recruitment of keystone species as performance indicators of artificial reefs*. *Journal of Sea Research* 78: 59-74.

Fiedler A., Landis DA. and Arduser M., **2012**. *Rapid Shift in Pollinator Communities Following Invasive Species Removal*. *Restoration Ecology* 20 (5): 593-602.

Gobster PH., Nassauer JL., Daniel TC. and Fry G., **2007**. *The shared landscape: what does aesthetics have to do with ecology?* *Landscape Ecology* 22: 959-972.

Harris CJ., Leishman MR., Fryirs K. and Kyle G., **2012**. *How Does Restoration of Native Canopy Affect Understory Vegetation Composition? Evidence from Riparian Communities of the Hunter Valley Australia*. *Restoration Ecology* 20 (5): 584-592.

Harris J., **2009**. *Soil Microbial Communities and Restoration Ecology: Facilitators or Followers?* *Science* 325: 573-574.

Hering D., Borja A., Carvalho L. and Feld CK., **2013**. *Assessment and recovery of European water bodies: key messages from the WISER project*. *Hydrobiologia* 704: 1-9.

Hermoso V., Pantus F., Olley J., Linke S., Mugodo J. and Lea P., **2012**. *Systematic planning for river rehabilitation: integrating multiple ecological and economic objectives in complex decisions*. *Freshwater Biology* 57: 1-9.

- Holt EA. and Miller SW., **2011**. *Bioindicators: Using Organisms to Measure Environmental Impacts*. Nature Education Knowledge 3 (10): 8.
- Hughes FMR., Adams WM. and Stroh PA., **2012**. *When is Open-endedness Desirable in Restoration Projects?* Restoration Ecology 20 (3): 291-295.
- Jackson ST. and Hobbs RJ., **2009**. *Ecological Restoration in the Light of Ecological History*. Science 325: 567-569.
- Jaunatre R., Buisson E., Muller I., Morlon H., Mesléard F. and Dutoit T., **2013**. *New synthetic indicators to assess community resilience and restoration success*. Ecological Indicators 29: 468-477.
- Kozdroj J. and van Elsas JD., **2000**. *Response of the bacterial community to root exudates in soil polluted with heavy metals assessed by molecular and cultural approaches*. Soil Biology and Biochemistry 32: 1405-1417.
- Lamouroux N., Olivier JM., Capra H., Zylberblat M., Chandesris A. and Roger P., **2006**. *Fish community changes after minimum flow increase: testing quantitative predictions in the Rhône River at Pierre-Bénite, France*. Freshwater Biology 51: 1730-1743.
- Lazartigues A., Banas D., Feidt C., Brun-Bellut J., Gardeur JN., Le Roux Y. and Thomas M., **2012**. *Pesticide pressure and fish farming in barrage pond in North-eastern France. Part III: How management can affect pesticide profiles in edible fish?* Environmental Science and Pollution Research 20(1): 126-135.
- Le Lay YF., Piégay H. and Rivière-Honegger A., **2013**. *Perception of braided river landscapes: Implications for public participation and sustainable management*. Journal of Environmental Management 119: 1-12.
- Lopes C., Persat H. and Babut M., **2012**. *Transfer of PCBs from bottom sediment to freshwater river fish species: a food-web modelling approach in the Rhône River (France) in support of sediment management*. Ecotoxicology and Environmental Safety 81: 17-26.
- De Marsily G., Barnaud G., Benoit M., de Billy V., Birgand F., Garnier J., Lesaffre B., Leveque C., Muller S., Musy A., Tournebize J. and Zimmer D., **2013**. *Rapport du collège d'experts scientifiques relatif à l'évaluation de la méthode de compensation des incidences sur les zones humides*. Ministère de l'écologie, du développement durable et de l'énergie.
- McColley SD., Tyers DB. and Sowell BF., **2012**. *Aspen and Willow Restoration Using Beaver on the Northern Yellowstone Winter Range*. Restoration Ecology 20 (4): 450-455.
- Meyer A., Combroux I. and Trémolières M., **2013**. *Dynamics of Nutrient Contents (Phosphorus, Nitrogen) in Water, Sediment and Plants After Restoration of Connectivity in Side-Channels of the River Rhine*. Restoration Ecology 21 (2): 232-241.
- Miller SW., Budy P. and Schmidt JC., **2010**. *Quantifying Macroinvertebrate Response to In-Stream Habitat Restoration: Applications of Meta-Analysis to River Restoration*. Restoration Ecology 18 (1): 8-19.

- Morandi B. and Piégay H., **2011**. *Les restaurations de rivières sur Internet: premier bilan*. *Natures Sciences et Sociétés* 19: 224-235.
- Moreno-Mateos D., Power ME., Comin FA. and Yockteng R., **2012**. *Structural and Functional Loss in Restored Wetland Ecosystems*. *PLOS Biology* 10 (1): e1001247.
- Nielsen-Pincus M. and Moseley C., **2013**. *The Economic and Employment Impacts of Forest and Watershed Restoration*. *Restoration Ecology* 21 (2): 207-214.
- Paillex A., Dolédec S., Castella E., Mérioux S. and Aldridge DC., **2012**. *Functional diversity in a large river floodplain: anticipating the response of native and alien macroinvertebrates to the restoration of hydrological connectivity*. *Journal of Applied Ecology* doi: 10.1111/1365-2664.12018.
- Palmer MA. & Filoso S., **2009**. *Restoration of Ecosystem Services for Environmental Markets*. *Science* 325: 575-576.
- Palmer MA., Menninger HL. and Bernhardt E., **2009**. *River Restoration, habitat heterogeneity and biodiversity: a failure of theory or practice?* *Freshwater Biology* 55: 1-18.
- Palmer MA., **2008**. *Reforming Watershed Restoration: Science in Need of Application and Applications in Need of Science*. *Estuaries and Coasts* DOI 10.1007/s12237-008-9129-5.
- Palmer M., Allan JD., Meyer J. and Bernhardt ES., **2007**. *River Restoration in the Twenty-First Century: Data and Experiential Knowledge to Inform Future Efforts*. *Restoration Ecology* 15 (3): 472-481.
- Palmer MA., Bernhardt ES., Allan JD., Lake PS., Alexander G., Brooks S., Carr J., Clayton S., Dahm CN., Follstad Shah J., Galat DL., Loss SG., Goodwin P., Hart DD., Hassett B., Jenkinson R., Kondolf GM., Lave R., Meyer JL., O'Donnell TK., Pagano L. and Sudduth E., **2005**. *Standards for ecologically successful river restoration*. *Journal of Applied Ecology* 42: 208-217.
- Petursdottir T., Aradottir AL. and Benediktsson K., **2013**. *An Evaluation of the Short-Term Progress of Restoration Combining Ecological Assessment and Public Perception*. *Restoration Ecology* 21 (1): 75-85.
- Pflüger Y., Rackham A. and Larned S., **2010**. *The aesthetic value of river flows: an assessment of flow preferences for large and small rivers*. *Landscape and Urban Planning* 95: 68-78.
- Robbins AST. and Daniels JM., **2012**. *Restoration and Economics: A Union Waiting to Happen?* *Restoration Ecology* 20 (1): 10-17.
- Roni P., Hanson K. and Beechie T., **2008**. *Global Review of the Physical and Biological Effectiveness of Stream Habitat Rehabilitation Techniques*. *North American Journal of Fisheries Management* 28: 856-890.
- Sayler GS. and Ripp S., **2000**. *Field applications of genetically engineered microorganisms for bioremediation processes*. *Current Opinion in Biotechnology* 11: 286-289.

Schultz E., Johnston RJ., Segerson K. and Besedin E., **2012**. *Integrating Ecology and Economics for Restoration: Using Ecological Indicators in Valuation of Ecosystem Services*. *Restoration Ecology* 20 (3): 304-310.

Usseglio-Polatera P., Bournaud M., Richoux P. and Tachet H., **2000**. *Bio-monitoring through biological traits of benthic macroinvertebrates: how to use species trait databases?* *Hydrobiologia* 422: 153-162.

Von Korff Y., Daniell KA., Moellenkamp S., Bots P. and Bijlsma RM., **2012**. *Implementing Participatory Water Management: Recent Advances in Theory, Practice, and Evaluation*. *Ecology and Society* 17 (1): 30.

Woodward G., Gessner MO., Giller PS., Gulis V., Hladyz S., Lecerf A., Malmqvist B., McKie BG., Tiegs SD., Cariss H., Dobson M., Eloisegi A., Ferreira V., Graça MAS., Fleituch T., Lacoursière JO., Nistorescu M., Pozo J., Risnoveanu G., Schindler M., Vadineanu A., Vought LBM. and Chauvet E., **2012**. *Continental- Scale Effects of Nutrient Pollution on Stream Ecosystem Functioning*. *Science* 336: 1438-1440.

Yachi S. and Loreau M., **1999**. *Biodiversity and ecosystem productivity in a fluctuating environment: The insurance hypothesis*. *PNAS* 96: 1463-1468.



## Annexe 1

### Participants au séminaire d'étude du 11 et 12 mars 2013

#### **I.N.R.A.**

Bernard MONTUELLE  
Directeur de recherche  
Co-président de la ZABR  
UMR Carrel  
75 Avenue de Corzent  
B.P. 511  
74203 THONON LES BAINS CEDEX  
Tél. : 04 50 26 78 03  
bernard.montuelle@thonon.inra.fr

#### **IRSTEA**

Véronique ROSSET  
Ingénieur de recherche  
UR MALY, Equipe Dynam  
Zone Atelier Bassin du Rhône  
5 rue de la Doua  
CS 70077  
69626 VILLEURBANNE  
Tél. : 04 72 20 10 85  
veronique.rosset@irstea.fr

#### **Syndicat de l'Orge**

Cécile BELLOT  
Doctorante  
Service Prospective  
et Etudes des milieux  
PIREN Seine  
163 route de Fleury  
91172 VIRY-CHATILLON CEDEX  
Tél. : 01 69 12 15 54  
Cecile.Bellot@Sivoa.fr

#### **U.C.B.LYON 1**

Dad ROUX MICHOLLET  
LEHNA - Equipe E3S -Ecologie,  
Evolution, Ecosystèmes  
UMR CNRS 5023 - Bât. Forel  
Zone Atelier Bassin du Rhône  
43, Bd du 11 Novembre 1918  
69622 VILLEURBANNE CEDEX  
Tél. : 04 72 44 82 61  
dadrm@live.com

#### **I.N.R.A. SAD**

Marc BENOIT  
Directeur de recherche  
Unité Aster  
Zone Atelier Moselle  
662 avenue Louis Buffet  
88500 MIRECOURT  
Tél. : 03 29 38 55 01  
Marc.Benoit@mirecourt.inra.fr

#### **IRSTEA**

Evelyne TALES  
UR Hydrosystèmes et bioprocédés  
PIREN Seine  
1 rue Pierre Gilles de Gennes  
92761 ANTONY CEDEX  
Tél. : 01 40 96 60 94  
evelyne.tales@irstea.fr

#### **U.C.B.LYON 1**

Gudrun BORNETTE  
Directrice de recherche  
LEHNA - Equipe E3S -Ecologie,  
Evolution, Ecosystèmes  
UMR CNRS 5023 - Bât. Forel  
Inter ZA  
43, Bd du 11 Novembre 1918  
69622 VILLEURBANNE CEDEX  
Tél. : 04 72 43 12 94  
gudrun.bornette@cnrs.fr

#### **Université de Rennes 1 UMR 6553 CNRS**

Marc LEBOUVIER  
Ingénieur de recherche  
Zone Atelier Antarctique  
Station Biologique  
35380 PAIMPONT  
Tél. : 02 99 61 81 75  
marc.lebouvier@univ-rennes1.fr

#### **IRSTEA**

Véronique GOUY  
Ingénieur de recherche  
UR MALY, pollution diffuse  
Zone Atelier Bassin du Rhône  
5 rue de la Doua  
CS 70077  
69626 VILLEURBANNE  
Tél. : 04 72 20 87 94  
veronique.gouy@irstea.fr

#### **Maison du Fleuve Rhône**

Gilles ARMANI  
Co responsable thématique  
Observation sociale du fleuve  
Zone Atelier Bassin du Rhône  
1 place de la Liberté  
69700 GIVORS  
Tél. : 04 72 49 18 07  
gilles.armani@maisondufleuverhone.org

#### **U.C.B.LYON 1**

Pierre MARMONIER  
Professeur  
Co-président de la ZABR  
LEHNA - Equipe E3S  
UMR CNRS 5023 - Bât. Forel  
43, Bd du 11 Novembre 1918  
69622 VILLEURBANNE CEDEX  
Tél. : 04 72 44 82 61  
pierre.marmonier@univ-lyon1.fr

#### **Université de Lorraine**

Simon DEVIN  
Maître de conférences  
Zone Atelier Moselle  
Faculté des Sciences  
Domaine Scientifique Victori Grignard  
BP 70 239  
54506 VANDOEUVRE LES NANCY  
Tél. : 03 87 37 84 02  
simon.devin@univ-lorraine.fr

**Université de Lorraine**

Sylvie DOUSSET  
Faculté des Sciences  
Zone Atelier Moselle  
Domaine Scientifique Victori Grignard  
BP 70 239  
54506 VANDOEUVRE LES NANCY  
Tél. : 03 83 68 42 93  
sylvie.dousset@univ-lorraine.fr

**Université François Rabelais  
Polytech' Tours**

Aude ZINGRAFF  
Doctorante  
UMR CITERES  
Zone Atelier Loire  
33 allée de Lesseps  
37200 TOURS  
audezingraff\_hamed@yahoo.fr

**Université de Lorraine**

Marielle THOMAS  
Maître de conférences  
Faculté des Sciences  
Zone Atelier Moselle  
Domaine Scientifique Victori Grignard  
BP 70 239  
54506 VANDOEUVRE LES NANCY  
Tél. : 03 83 68 55 95  
marielle.thomas@univ-lorraine.fr

**ZABR**

Anne CLEMENS  
Directrice  
Zone Atelier Bassin du Rhône  
66 bd Niels Bohr - Bât CEI  
B.P. 52132  
69603 VILLEURBANNE CEDEX  
Tél. : 04 72 43 61 61  
anne.clemens@zabr.org

**Université François Rabelais  
Polytech' Tours**

Sabine GREULICH  
Maître de conférences  
UMR CITERES  
Zone Atelier Loire  
33 allée de Lesseps  
37200 TOURS  
Tél. : 02 47 36 73 61  
greulich@univ-tours.fr