



HAL
open science

Techniques de restauration hydromorphologique des plans d'eau et méthodes de suivi. Synthèse bibliographique et Création d'un réseau de sites pilotes. Rapport intermédiaire

C. Marchand, J. Dublon, Samuel Westrelin, J.M. Baudoin, J.C. Raymond

► To cite this version:

C. Marchand, J. Dublon, Samuel Westrelin, J.M. Baudoin, J.C. Raymond. Techniques de restauration hydromorphologique des plans d'eau et méthodes de suivi. Synthèse bibliographique et Création d'un réseau de sites pilotes. Rapport intermédiaire. [Rapport de recherche] irstea. 2017, pp.72. hal-02605650

HAL Id: hal-02605650

<https://hal.inrae.fr/hal-02605650v1>

Submitted on 16 May 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



Programme 2016/2018 -
Thème « Restauration des écosystèmes
lacustres : synthèse bibliographique des
techniques de restauration de l'habitat
physique et des méthodes de suivi » -
Action n°43

TECHNIQUES DE RESTAURATION HYDROMORPHOLOGIQUE DES PLANS D'EAU ET METHODES DE SUIVI

**Synthèse bibliographique
Création d'un réseau de sites pilotes**

Rapport intermédiaire

Céline Marchand, Julien Dublon, Samuel Westrelin,
Jean-Marc Baudoin (Pôle Onema-Irstea Hydro-écologie
des plans d'eau), Jean-Claude Raymond (Onema –
USML)

Janvier 2017



- **AUTEURS**

Céline MARCHAND, Ingénieure d'Etude (Pôle Onema-Irstea « Hydro-écologie des plans d'eau »),
celine.marchand@irstea.fr

Julien DUBLON, Assistant Ingénieur (Pôle Onema-Irstea « Hydro-écologie des plans d'eau »),
julien.dublon@irstea.fr

Samuel WESTRELIN, Ingénieur chercheur (Pôle Onema-Irstea « Hydro-écologie des plans d'eau »),
samuel.westrelin@irstea.fr

Jean-Claude RAYMOND, Ingénieur (Onema, Délégation régionale Auvergne-Rhône-Alpes, Unité Spécialisée Milieux Lacustres), jean-claude.raymond@onema.fr

Jean-Marc BAUDOIN, Directeur (Pôle Onema-Irstea « Hydro-écologie des plans d'eau »),
jean-marc.baudoin@onema.fr ou jean-marc.baudoin@irstea.fr

- **CORRESPONDANTS**

Onema: Jean-Marc BAUDOIN, Directeur (Pôle Onema-Irstea « Hydro-écologie des plans d'eau »),
jean-marc.baudoin@onema.fr ou jean-marc.baudoin@irstea.fr

Droits d'usage :	<i>Accès libre</i>
Couverture géographique :	<i>France métropolitaine</i>
Niveau géographique :	<i>National</i>
Niveau de lecture :	<i>Professionnels, experts</i>



Techniques de restauration
hydromorphologique des plans d'eau et
méthodes de suivi – Synthèse
bibliographique et Création d'un réseau
de sites pilotes
Rapport intermédiaire
**Céline Marchand, Julien Dublon,
Samuel Westrelin, Jean-Claude
Raymond, Jean-Marc Baudoin**



- **RESUME**

Les plans d'eau, qui accueillent une grande biodiversité, satisfont de nombreux usages qui causent de nombreuses altérations de ces écosystèmes. Pour compenser ces altérations, diverses restaurations sont entreprises. Nous nous concentrons sur la restauration hydromorphologique au moyen d'une analyse bibliographique recensant les techniques mises en œuvre et ébauchons les méthodes de suivi de l'efficacité de ces opérations. La restauration hydromorphologique/des habitats des plans d'eau se concentre autour de six groupes de techniques : la restauration d'un marnage naturel, le remodelage des berges, la restauration de roselières, la végétalisation des berges, la diversification des milieux par création d'habitats et la création et restauration de frayères.

Cette synthèse bibliographique est complétée d'une enquête nationale auprès de diverses structures (Onema, Agences de l'eau, DREAL, gestionnaires) visant notamment à sélectionner des sites avec opérations de restauration prévues. Cela permettra ensuite de créer un réseau de sites pilotes pour y harmoniser les suivis à entreprendre de façon opérationnelle (diagnostic, définition des stations, état initial, suivi long-terme, définition des compartiments à suivre, mise à disposition des protocoles).

L'enquête effectuée au printemps 2016 montre l'intérêt porté par les gestionnaires pour les plans d'eau et le rétablissement de caractéristiques naturelles et de fonctionnalités altérées. Un total de 30 sites potentiels a été présélectionné pour la création du réseau de sites pilotes.

- **MOTS CLES**

RESTAURATION HYDROMORPHOLOGIQUE ; PLANS D'EAU ; HABITATS ; TECHNIQUES ; SUIVIS ; PROTOCOLES, SITES PILOTES



Techniques de restauration
hydromorphologique des plans d'eau et
méthodes de suivi – Synthèse
bibliographique et Création d'un réseau
de sites pilotes
Rapport intermédiaire
**Céline Marchand, Julien Dublon,
Samuel Westrelin, Jean-Claude
Raymond, Jean-Marc Baudoin**



- **TECHNIQUES OF HYDROMORPHOLOGICAL RESTORATION IN LAKES AND MONITORING METHODS - BIBLIOGRAPHICAL SYNTHESIS AND CREATION OF TRIAL SITES NETWORK**

- **ABSTRACT**

Lakes host a great biodiversity but supply numerous human services which can damage them in various ways. To compensate these alterations, several restoration measures are carried out. Here, we focus on hydromorphological restoration with a bibliographical review of techniques and a sketch of monitoring methods used to follow the efficiency of actions. Hydromorphological restoration in lakes gather six groups of techniques: restoration of natural water level fluctuations, reshaping of banks, reed bed restoration, restoration of bank vegetation, creation of habitats and creation or restoration of spawning grounds.

This review is completed with a national survey addressed to government agencies and managers. It aims to select sites with planned restoration programs. On this basis, a network of experimental sites could be created where to standardize operational monitoring of restoration (diagnosis, definition of the experimental sites, initial state, long term monitoring, definition of compartments to monitor, definition of protocols).

The survey realized in the beginning of 2016 shows the interest of managers for restoration of natural characteristics and altered functionalities of lakes. In a first step, we have selected 30 potential sites to create this network.

- **KEY WORDS**

HYDROMORPHOLOGICAL RESTORATION ; LAKES ; HABITATS ; TECHNIQUES ; MONITORING ; PROTOCOLS ; EXPERIMENTAL SITES

• **SOMMAIRE**

1. Introduction	6
1.1. Contexte.....	6
1.2. Objectifs.....	7
1.3. Définitions et concepts	8
2. Synthèse bibliographique	13
2.1. Problématique	13
2.1.1. <i>L'hydrosystème et l'écosystème « plan d'eau »</i>	13
2.1.2. <i>Contexte historique de la restauration</i>	15
2.1.3. <i>Prise en compte des typologies de plans d'eau</i>	16
2.1.4. <i>Pourquoi, avec quels objectifs et quelle démarche restaurer les plans d'eau ?</i>	18
2.1.5. <i>Remarque introductive à la suite du document</i>	20
2.2. Aspect hydromorphologique et altérations.....	21
2.3. Techniques de restauration hydromorphologique	25
2.3.1. <i>Restauration d'un marnage naturel</i>	26
2.3.2. <i>Remodelage des berges</i>	26
2.3.3. <i>Restauration de roselières</i>	27
2.3.4. <i>Végétalisation des berges</i>	27
2.3.5. <i>Diversification des milieux par création d'habitats</i>	29
2.3.6. <i>Création et restauration de frayères</i>	30
2.4. Méthodes de suivi.....	33
2.4.1. <i>La capture et l'identification d'individus</i>	34
2.4.2. <i>L'utilisation de l'ADN environnemental</i>	37
2.4.3. <i>L'observation et l'identification d'individus</i>	37
2.4.4. <i>La détection des individus par télémétrie ou hydroacoustique</i>	38
3. Premières réflexions sur la réalisation de protocoles de suivis	40
3.1. S'inspirer du suivi scientifique minimal des cours d'eau	40
3.2. Premiers tests de méthodes.....	41
4. Enquête et création d'un réseau de sites pilotes	43
4.1. Méthodologie.....	43
4.2. Résultats de l'enquête – questions d'ordre général ou conceptuel.....	44
5. Conclusion et perspectives	57
6. Références	58
6.1. Bibliographie	58
6.2. Figures	63
7. Annexes	64

- **TECHNIQUES DE RESTAURATION HYDROMORPHOLOGIQUE DES PLANS D’EAU ET METHODES DE SUIVI – SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE ET CRÉATION D’UN RESEAU DE SITES PILOTES**

1. Introduction

1.1. Contexte

Les écosystèmes aquatiques continentaux sont des milieux riches en biodiversité et fournissant de nombreux services à la société. Ils subissent cependant divers impacts et perturbations liés aux activités humaines depuis de nombreuses années voyant aujourd'hui leurs équilibres complexes menacés.

Les enjeux de la biodiversité et du bon fonctionnement des écosystèmes aquatiques sont non seulement écologiques mais aussi éthiques, sociaux ou économiques. Depuis 2005 (Rapport du Millennium Ecosystem Assessment), la notion de services écosystémiques s'est vue attribuer de plus en plus de crédit et constitue un argument important dans les prises de décisions politiques. Ceux-ci sont définis comme « l'ensemble des biens et services, matériels ou immatériels, produits par la nature et source de bénéfices pour l'homme » (Amigues and Chevassus-au-Louis, 2011).

Face au constat de la dégradation des écosystèmes naturels, plusieurs documents ont été élaborés afin d'agir concrètement. La Stratégie Nationale pour la Biodiversité (SNB), mise en place en 2004 et révisée en 2010 (MEDDE, 2012), reprend notamment les grands engagements de la Convention de Rio (1992) ainsi que les directives européennes directement ou indirectement liées à la biodiversité (« Oiseaux » - Directive 79/409/CEE, « Habitat » - Directive 92/43/CEE, Directive Cadre sur l'Eau - DCE - Directive 2000/60/CE). La doctrine « Eviter, Réduire, Compenser » (6 mars 2012) vise quant à elle à minimiser les impacts sur les milieux naturels en les évitant ou en les réduisant et, si besoin, en les compensant. Elle a pour objectif de s'appliquer le plus en amont possible des démarches de conception et de mise en œuvre de projets impactant les milieux naturels.

Concernant le contexte plus ciblé des écosystèmes aquatiques, la Directive Cadre sur l'Eau, instaurée au niveau européen en 2000, a pris une place majeure dans la mise en œuvre d'actions en faveur des milieux dulçaquicoles. Son objectif étant d'atteindre le bon état/potentiel écologique (biologie, physico-chimie, hydromorphologie) des masses d'eau en 2015. Suite à sa mise en application, les chercheurs ont renforcé le développement d'indicateurs biologiques faisant référence aux structures de communautés (Indice Biologique Global Normalisé - IBGN, Indice Poissons Rivière - IPR, Indice Biologique Macrophytes Rivière - IBMR, Indice Biologique Diatomées - IBD, etc.). Plus récemment, des études se focalisant sur le développement d'indicateurs fonctionnels (dégradation de matière organique, métabolisme écosystémique) ont également vu le jour afin de venir compléter les bioindicateurs existants avec pour objectif d'augmenter l'efficacité de l'évaluation de l'état des milieux d'eau douce et de leurs suivis.

La mise en place de la DCE a montré des dysfonctionnements écosystémiques favorisant l'essor d'opérations de restauration permettant de rétablir les équilibres et fonctions des écosystèmes. Les plans d'eau sont relativement peu connus en termes de restauration par rapport au cours d'eau. Une des raisons est la proportion des masses d'eau représentée par les deux catégories : sur un total de 10402 masses d'eau en métropole, 4 % (427) sont des plans d'eau contre 94 % (9773) des cours d'eau (2 % pour les eaux côtières et de transition) (MEEM, 2015). Néanmoins, un certain nombre

d'actions existent. Ce sujet constitue donc une grande préoccupation de la part des gestionnaires, mais nécessite un plus grand partage des connaissances.

Le cas des plans d'eau est à prendre en considération en tenant compte des différents types de masses d'eau. Parmi les plans d'eau, on distingue les lacs, qui sont des plans d'eau naturels, des retenues de barrage artificielles et d'autres types (étangs, gravières, etc.) Par ailleurs, la DCE distingue les plans d'eau de « 50 ha et plus » des autres plans d'eau. Cela est susceptible d'influencer l'évaluation de leur état et les décisions quant aux besoins de mesures d'amélioration. Dans le cadre de ce projet, tous les types de plan d'eau sont néanmoins concernés.

Les écosystèmes plans d'eau méritent qu'on y accorde plus d'importance. En effet, les plans d'eau, et particulièrement leurs zones littorales et rivulaires, présentent une forte biodiversité et une richesse d'habitats importante. Ils possèdent une diversité de substrats (vase, sable, graviers, galets, blocs, rochers, etc.), de végétation et de caractéristiques morphologiques (fluctuations de niveau d'eau, profondeurs, pentes de berges, etc.) intéressante.

Les plans d'eau constituent un fort intérêt également d'un point de vue des nombreux usages que l'homme peut en tirer : réserve d'eau potable, irrigation, hydroélectricité, extraction de matériaux, activités récréatives (pêche, chasse, baignade, nautisme, etc.). Tous ces usages entraînent des pressions et ces écosystèmes concentrent donc souvent plusieurs impacts qui sont associés aux activités humaines : forte érosion des berges, artificialisation et homogénéisation des rives (digues, ports, pontons, plages, routes, etc.), perte d'habitats pour la faune et la flore, perturbation des communautés biologiques (ex : introduction d'espèces envahissantes), etc. Ces impacts se concentrent majoritairement sur les zones littorales qui sont pourtant souvent des zones privilégiées de reproduction, d'alimentation et de refuge pour nombre d'organismes aquatiques.

En tenant compte de tous ces éléments, aux regards des activités et usages humains variables, il est fondamental de mieux connaître, gérer, protéger et restaurer les écosystèmes plans d'eau.

1.2. Objectifs

Ce document constitue une étape dans l'amélioration des actions en faveur des plans d'eau. Il vise la synthèse et le partage des connaissances actuelles en termes de restauration hydromorphologique de ces écosystèmes.

Deux grandes phases structurent le projet :

- Au cours de l'année 2016, l'objectif est de réaliser une **synthèse bibliographique** (littérature scientifique et littérature grise) des techniques de restauration hydromorphologique et des méthodes de suivi existantes au niveau national et international. Cette synthèse doit s'accompagner d'une **enquête** visant la mise en place d'un réseau national de partenaires et de sites pilotes pour la suite du projet. Ce premier point est l'objet du présent rapport.
- Les perspectives pour les années 2017 et 2018 sont de bâtir des **protocoles de suivi** des actions de restauration et de les mettre en œuvre sur les sites pilotes sélectionnés puis de les tester et les optimiser en vue d'une application plus large par les gestionnaires. Un autre projet lié à celui-ci testera la mise en place de prototypes de solutions techniques de restauration physique de l'habitat.

Plus précisément en 2016, il s'agit de recenser les actions de restauration réalisées, d'en synthétiser les techniques utilisées et les méthodes de suivis existantes. Le but final est de fournir des outils de gestion pour orienter le choix des solutions techniques et apporter un suivi adéquat attestant de la réussite ou non d'une action.

Le projet se concentre sur l'aspect **hydromorphologique** des plans d'eau. Il existe également de nombreux types d'altérations biologiques et physico-chimiques. Notamment, l'impact de l'enrichissement des plans d'eau en nutriments, a été bien étudié depuis des décennies en comparaison aux effets des altérations hydromorphologiques sur la zone rivulaire et les habitats littoraux (Jurca *et al.*, 2012), tout comme les techniques de restauration faisant appel à la biomanipulation (Klapper, 2003; Winfield, 2004; Amemiya *et al.*, 2005; Søndergaard *et al.*, 2007). C'est en partie la raison pour laquelle nous nous concentrons sur l'aspect hydromorphologique ainsi que sur les solutions à apporter pour améliorer ce compartiment et l'état des plans d'eau. De ce fait, nous ciblons particulièrement les zones littorales et les habitats nécessaires à la faune aquatique qui y sont étroitement liés. La problématique de présence ou d'absence de marnage, affectant fortement ces zones, constituera un pan important de ce projet.

L'enquête accompagnant cette synthèse bibliographique est effectuée au moyen d'un questionnaire afin de recenser et synthétiser des informations permettant d'obtenir un aperçu exhaustif du travail réalisé en France. Elle permet également de lister de futurs projets de restauration hydromorphologique envisagés au cours des trois prochaines années, ciblant notamment une amélioration directe ou indirecte de la qualité physique des habitats des organismes aquatiques. Des sites pilotes potentiels seront ensuite sélectionnés pour un suivi scientifique standardisé de l'efficacité des mesures de restauration mises en œuvre (suivi sur site, avant et après restauration).

Dans ce document, on trouve tout d'abord la définition des principaux termes, sujets du document. Viennent ensuite la synthèse bibliographique concernant la problématique, puis l'aspect hydromorphologique, les techniques de restauration et les méthodes de suivi. En troisième partie, nous trouvons les réflexions quant aux protocoles de suivis. Enfin, la dernière partie concerne l'enquête nationale en vue de la création du réseau de partenaires et sites pilotes.

1.3. Définitions et concepts

Cette partie vise à clarifier un certain nombre de concepts et de termes clés utilisés dans le domaine. En effet, certains sont peu ou mal connus tandis que d'autres, assez globaux, sont utilisés comme termes parapluie et induisent un manque de précision, voir une mauvaise communication. Ce point n'est donc pas à négliger même si les avis peuvent diverger ; il est important d'être cohérent et d'avoir un vocabulaire commun sur lequel se baser.

La structure de ce point est la suivante : pour chaque terme ou ensemble de termes, la définition que nous proposons (et utilisons dans ce document) se trouve en gras. Chaque définition est issue d'un travail de réflexion après un parcours de la littérature. Un éventuel complément d'informations provenant de celle-ci est disponible en-dessous.

Plan d'eau

Ecosystème lentique constitué d'une masse d'eau permanente ou temporaire, d'origine naturelle ou anthropique et de taille variable

Les plans d'eau (terme générique) regroupent (**Figure 1**) :

- Les **lacs** : plans d'eau naturels, alimentés ou non par des cours d'eau (ou la fonte des neiges en altitude), dont les dimensions permettent la présence d'une zonation des processus et la stratification thermique.
- Les **retenues** : plans d'eau artificiels, au fonctionnement similaire à celui des lacs, alimentés par des cours d'eau et obtenus par barrage de l'écoulement à des fins d'usages divers, dont les dimensions permettent la présence d'une zonation des processus et la stratification thermique.
- Les **gravières** et **sablières** : plans d'eau artificiels alimentés par la nappe phréatique suite au creusement et à l'extraction de granulats, généralement de faible profondeur.
- Les **étangs** : plans d'eau naturels ou artificiels stagnants de faible profondeur et de petite superficie.
- Les **mars** : plans d'eau naturels ou artificiels stagnants de faible profondeur et de superficie plus faible que les étangs.

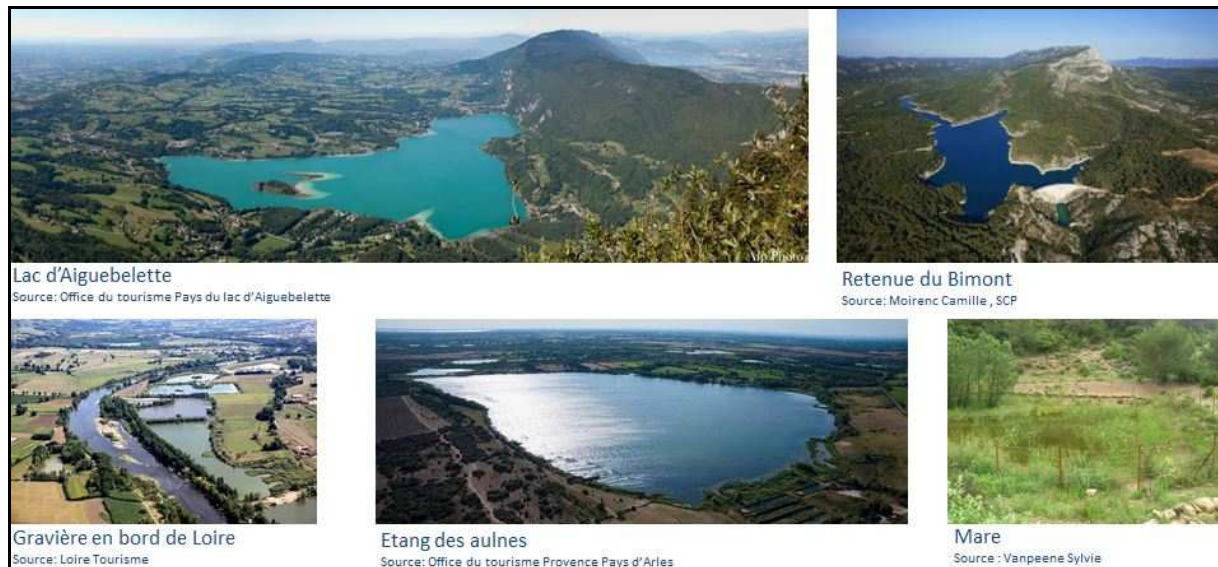


Figure 1 : Termes regroupés sous le nom « plan d'eau » : lac, retenue, gravière, étang, mare

Zone littorale

Zone définie par le niveau d'eau maximal possible et la profondeur maximale jusqu'à laquelle peut s'étendre la végétation enracinée

La zone littorale (**Figure 2**) peut être plus ou moins avancée vers le large en fonction de la pente des berges et avoir une profondeur variable selon les fluctuations du niveau d'eau. Elle concentre une grande richesse biologique en constituant une zone de transition entre les milieux terrestre et aquatique.

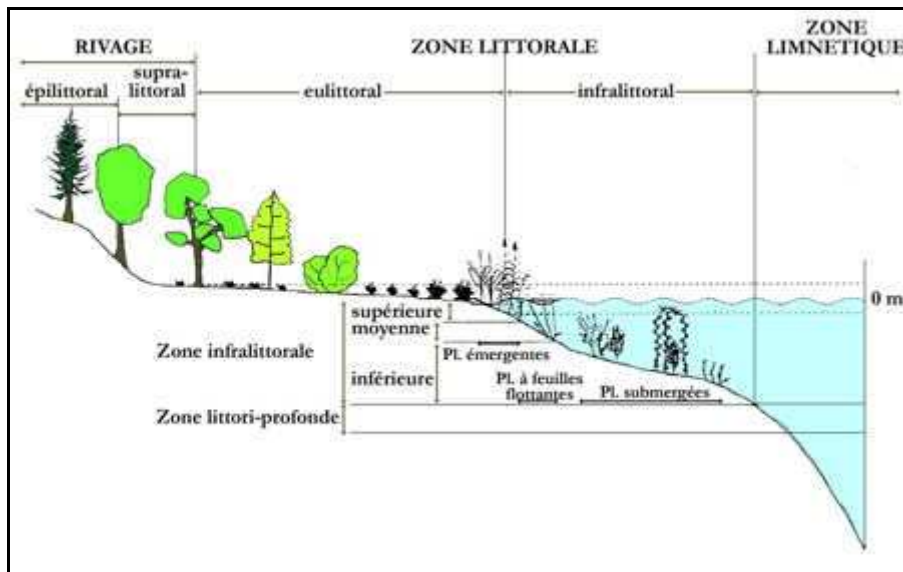


Figure 2 : Illustration de la zone littorale lacustre (Lachavanne *et al.* 1985)

Berge

Portion hors d'eau de la rive du plan d'eau, naturelle ou artificialisée, en pente douce ou abrupte

Hydromorphologique

Relatif aux écoulements, au niveau d'eau, au temps de résidence, à la connexion avec les nappes phréatiques, à la profondeur, au substrat, aux rives et en lien direct (habitat) ou indirect avec l'état des communautés biologiques (piscicoles, invertébrées, végétales)

Dans le cadre de la Directive Cadre sur l'Eau, les éléments précis (interdépendants et difficiles à dissocier) des régimes hydrologiques et des conditions morphologiques sont les suivants :

- Hydrologie
 - quantité et dynamique du débit d'eau
 - temps de résidence
 - connexion avec la masse d'eau souterraine
- Morphologie
 - variation de la profondeur
 - quantité, structure et substrat du lit
 - structure de la rive

Marnage / Fluctuation du niveau d'eau

Différence de hauteur entre les hautes eaux (immersion des berges) et les basses eaux (émersion des berges), d'origine naturelle (crues vs. étiage) ou anthropique (gestion hydraulique)

Un plan d'eau peut être concerné par une absence de marnage/fluctuation ou par un(e) marnage/fluctuation naturel(le) ou artificiel(le) de faible ou de forte amplitude.

!!! Que l'on utilise le terme « marnage » ou « fluctuation », les deux sont valables pour un phénomène naturel ou provoqué par l'activité humaine. Le terme « marnage » est fortement utilisé et souvent associé à l'aspect artificiel (lié à la régulation du niveau d'eau), tandis qu'on parle plutôt de fluctuations naturelles de niveau d'eau.

Diagnostic

Identification de la ou des cause(s) d'un dysfonctionnement. S'effectue avant de définir les objectifs de l'action et les moyens nécessaires pour y remédier

Restauration

Démarche visant le rétablissement de l'état et des fonctions de l'écosystème altéré permettant à celui-ci de retrouver ses capacités de résilience face aux perturbations

Démarche pouvant être passive (contrer un processus dégradant l'écosystème) ou active (favoriser le rétablissement d'un état et de fonctions tendant idéalement vers la référence) et tenant compte des activités humaines

La Société Internationale pour la Restauration Ecologique (SER) définit la restauration écologique comme étant « le processus d'accompagnement de la récupération d'un écosystème qui a été dégradé, endommagé ou détruit ».

L'enquête nationale sur la restauration hydromorphologique des plans d'eau que nous avons réalisée au printemps 2016 révèle l'acceptation du concept de restauration issue de 71 réponses de divers groupes d'acteurs (cf. point IV. de ce document : concessionnaires, fédérations de pêche, syndicats, parcs naturels, services de l'Onema, etc.). Les résultats montrent également la prise en compte des contraintes existantes liées aux activités humaines dans la réalité.

D'autres termes sont parfois utilisés et/ou regroupés sous le terme « restauration » :

- **Réhabilitation** : action visant à se rapprocher de l'écosystème d'origine, peu influencé, le plus naturel possible en reconstituant ses fonctions et habitats, terme très proche de celui de restauration.
- **Réaffectation** : action de créer de nouvelles fonctions écologiques, indépendamment de l'écosystème préexistant.
- **Renaturation** : action de rendre l'écosystème plus naturel, terme assez général et parfois considéré comme abusif car correspondant à la (re)création de la nature.
- **Revitalisation** : action de « redonner de l'intensité à la vie » de l'écosystème, terme global et moins courant.

Mitigation

Atténuation des impacts négatifs pour l'environnement

!!! Beaucoup d'actions de restauration peuvent être considérées comme étant plus précisément de la mitigation, autant en milieu naturel que fortement modifié ou artificiel.

Les plans d'eau artificiels possèdent une fonction utilitaire ayant motivé leur création ; il n'est donc pas injustifié de considérer leur effacement ou comblement égal à leur restauration (au sens strict), comme il est parfois observé dans un certain nombre d'avis (exemple : série d'étangs piscicoles sur cours d'eau). Néanmoins, dans bon nombre de cas, ce retour à l'état originel du milieu est purement utopique étant donné l'emprise des usages anthropiques. De façon plus réaliste, il convient donc de considérer ces milieux artificiels ou fortement modifiés comme des écosystèmes à part entière. La mise en œuvre d'actions aura pour but de se rapprocher d'un état et d'un fonctionnement le plus naturel possible. C'est notamment dans ce cadre que le terme de mitigation trouve toute sa place.

Notons que le terme « mitigation » ainsi que les termes regroupés sous « restauration » peuvent être discutés dans le cas des plans d'eau comme pour d'autres milieux (cours d'eau, estuaires) (Chocat, 2013; Capderrey *et al.*, 2016).

2. Synthèse bibliographique

2.1. Problématique

2.1.1. L'HYDROSISTÈME ET L'ÉCOSISTÈME « PLAN D'EAU »

L'hydrosystème est défini comme un ensemble d'écosystèmes aquatiques, semi-aquatiques et terrestres compris dans un bassin versant (portion de territoire délimité par des lignes de crêtes – (ONEMA, 2010)). Il comprend différentes composantes ou dimensions (longitudinale, latérale, verticale et temporelle) et s'appuie sur l'aspect fonctionnel des écosystèmes (CNFSH, 1996; Angelier, 2000). L'hydrosystème regroupe l'ensemble des affluents convergeant vers les plans d'eau existants au sein du bassin versant. Ces affluents alimentent les écosystèmes lacustres en eau mais également en matières solides et dissoutes ainsi qu'en énergie (Montuelle and Clémens, 2015). L'état et le fonctionnement des plans d'eau (avec des différences plus ou moins marquées selon le type) sont donc dépendants de leur contexte environnemental (Figure 3) aux caractéristiques climatiques, topographiques, géologiques, physico-chimiques et anthropiques (occupation des sols) propres. Notons également que l'hydrologie et la morphologie sont des paramètres importants pour les interactions entre les lacs et leur bassin versant (Gulati *et al.*, 2008).

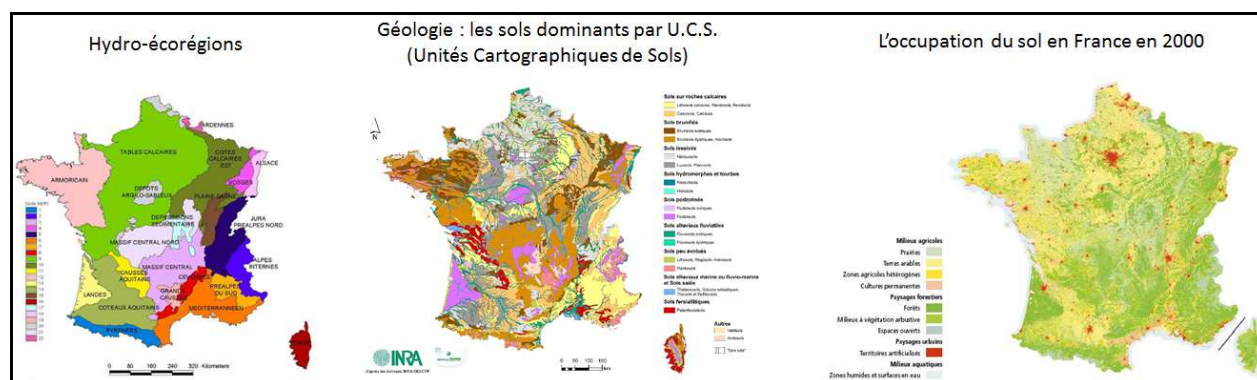


Figure 3 : Contexte environnemental (exemples) dont dépendent les écosystèmes plans d'eau : hydro-écorégions (Wasson *et al.*, 2006), géologie (Chéry *et al.*, 2014) et occupation des sols (UE – Ifen, CORINE Land Cover, 2000).

Les écosystèmes lacustres sont des systèmes dynamiques malgré une possible impression de stabilité. Ils sont caractérisés par l'ensemble des organismes vivants présents, par les composantes physico-chimiques et par les éléments hydromorphologiques mais également par les interactions entre et au sein de ces compartiments biotiques et abiotiques (Montuelle and Clémens, 2015).

La répartition des propriétés physiques (lumière, température, turbulence) et chimiques (gaz dissous, pH, minéraux, nutriments, oligoéléments) ainsi que les caractéristiques hydrologiques (temps de renouvellement, débit) et morphologiques (profondeur, substrat, rive) influencent toute l'organisation structurelle et fonctionnelle du plan d'eau (chaîne trophique et transferts de matière et d'énergie) et les fonctions vitales des organismes (Rowan *et al.*, 2006). Ainsi, l'intensité lumineuse est un facteur majeur influençant la répartition des organismes photosynthétiques. Suite à plusieurs processus physiques tels que la réflexion partielle des rayons lumineux en surface (perte d'environ 5%), l'absorption par l'eau et la matière organique dissoute et la dispersion par les particules, seule une partie des rayons lumineux sont absorbés par les pigments photosynthétiques. La profondeur à laquelle l'intensité lumineuse est égale à 1% de l'intensité initiale correspond à la limite entre zone euphotique et aphotique (absence d'activité photosynthétique). La température de l'eau est également

un facteur très important puisqu'elle influence le métabolisme, la physiologie et le comportement des organismes. De plus, des différences de température induisent des différences de densité, provoquant elles-mêmes une stratification du milieu (épilimnion, métalimnion au niveau de la thermocline - chute brusque de la température sur une profondeur restreinte - et hypolimnion). Cette stratification a notamment pour effet de modifier la distribution des gaz dissous, des nutriments et des organismes. Selon l'altitude, la latitude, les dimensions du plan d'eau (la profondeur surtout), et l'intensité des turbulences, les écosystèmes lacustres peuvent présenter différents régimes de mélange (amictiques, monomictiques, dimictiques, oligomictiques, polymictiques ou méromictiques). La distribution des composants chimiques dépend des facteurs physiques mais également biologiques et inversement, leur disponibilité (principalement l'oxygène, le gaz carbonique dissous et les nutriments) impacte les organismes vivants. Enfin, les caractéristiques hydromorphologiques ne sont pas à négliger ; on peut notamment constater leur impact sur le transport et le dépôt des sédiments de granulométrie variable et aussi leur importance au niveau de la zone littorale des plans d'eau et de la ripisylve (substrat, pente de berge, etc.).

La végétation des rives des plans d'eau possède des fonctions essentielles pour ces écosystèmes. Que l'on considère les arbres et arbustes de la ripisylve ou encore les macrophytes de la zone littorale, dont les végétaux constituant la roselière (espèces d'origine terrestre adaptées à une immersion quasi-permanente des racines, exemple : roseaux, massettes, iris, etc. (Montuelle and Clémens, 2015)), les rives constituent un écotone riche en espèces aquatiques et terrestres avec un rôle d'habitat, de zone d'alimentation et de reproduction. La végétation des rives fournit également un rôle de régulation de la luminosité et de la température, un rôle de filtration des éléments provenant du milieu terrestre, d'autoépuration et un rôle important de stabilisation des berges (Tomson *et al.*, 2010).

Le schéma ci-dessous (**Figure 4**) (initialement réalisé pour les cours d'eau) synthétise bien les facteurs et leurs interactions intervenant dans la dynamique des écosystèmes aquatiques, notamment lacustres.

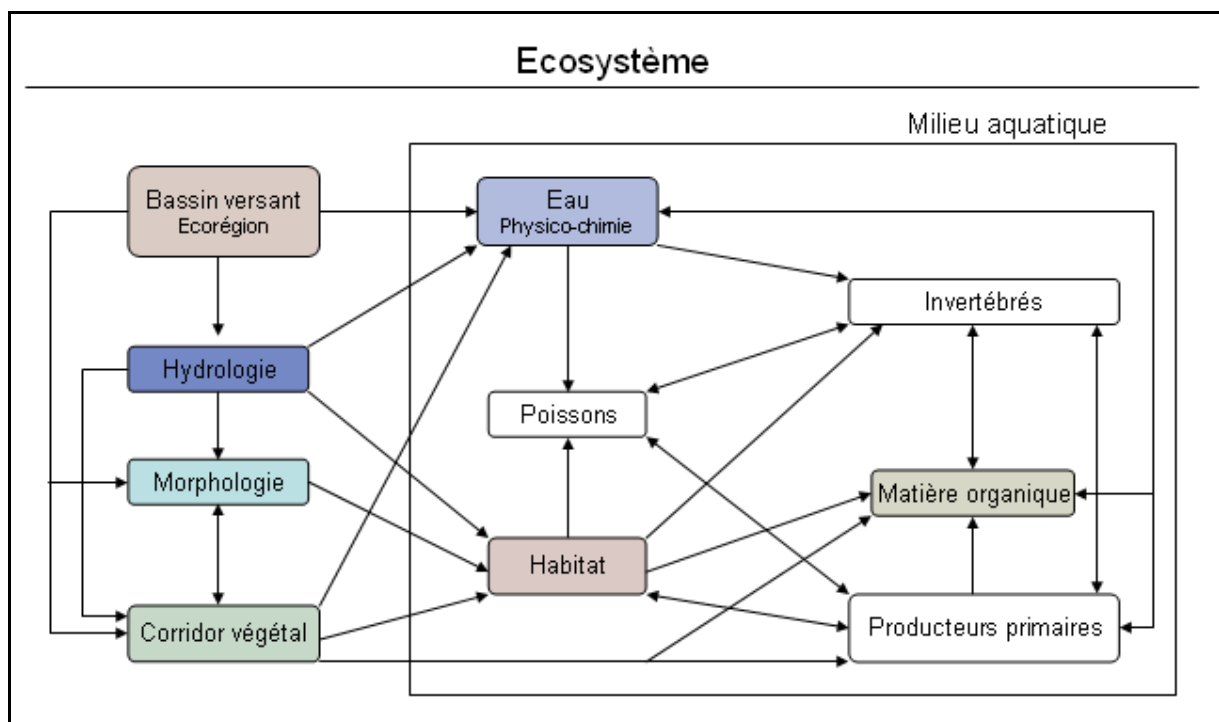


Figure 4 : Schéma représentant la dynamique des écosystèmes aquatiques (Wasson *et al.*, 1998)

2.1.2. CONTEXTE HISTORIQUE DE LA RESTAURATION

Historiquement, l'aspect halieutique puis les aspects qualitatif et quantitatif ont constitué l'intérêt majeur concernant les cours d'eau et plans d'eau. C'est à partir de 1964, avec la mise en place de la loi sur l'eau (du 16 décembre 1964, n°64-1245) et l'instauration des Agences de l'Eau et de leur comité de bassin que des états des lieux et suivis (réseaux de mesures) ont été développés. Néanmoins, les actions de restauration des milieux aquatiques se sont principalement développées depuis les années 2000 et la mise en place de la Directive-Cadre sur l'Eau (DCE - Directive 2000/60/CE) au niveau européen. Bien que des actions et des prises de conscience aient eu lieu précédemment et progressivement, la DCE a en effet donné une impulsion à l'attention portée à ces écosystèmes.

La DCE concerne l'entièreté du domaine de l'eau (eaux intérieures de surface, eaux de transition, eaux côtières et eaux souterraines) et vise un « bon état » ou « bon potentiel » des masses d'eau respectivement naturelles et fortement modifiées ou artificielles. Pour cela, des districts hydrographiques nationaux ou internationaux ont été établis et scindés en bassins hydrographiques. A cette échelle, la méthode de la DCE est d'effectuer un état des lieux permettant de diagnostiquer les dysfonctionnements. Ensuite des plans de gestion, des conditions de référence et des programmes de mesures déterminant les actions à mener sont établis et renouvelés tous les six ans. Des suivis et programmes de surveillance sont également mis en place. Des protocoles et outils d'expertises ont également été développés, à l'instar des protocoles LHS, AIBer et Charli (décrits plus loin) visant à caractériser et évaluer les habitats lacustres (Rowan *et al.*, 2006). L'évaluation de la qualité écologique des masses d'eau utilise les éléments biologiques, physico-chimiques et hydromorphologiques.

Au niveau national, la DCE a été transposée au règlement français par le biais de l'établissement de la loi sur l'eau et les milieux aquatiques (LEMA – du 30 décembre 2006, n°2006-1772). Celle-ci a permis de se doter des outils permettant d'atteindre les objectifs fixés par la DCE, entre autres, par la création de l'ONEMA.

Parmi les acteurs de la restauration des écosystèmes aquatiques, on retrouve des organismes nationaux (Ministère de l'écologie, Comité national de l'eau (CNE), ONEMA scindés en Directions inter-régionales avec leurs Services départementaux), les Agences de l'eau et Comités de bassins hydrographiques, des organismes régionaux (Conseils régionaux, DREAL, Parcs Naturels Régionaux) et départementaux (Conseils généraux, DDTM, Fédérations de pêche, laboratoires de recherche) ainsi que les concessionnaires et les communes et regroupements de communes (syndicats intercommunaux, communautés de communes, Etablissements Publics Territoriaux de Bassins - EPTB).

2.1.3. PRISE EN COMPTE DES TYPOLOGIES DE PLANS D'EAU

Une grande partie des plans d'eau en France correspond à des masses d'eau fortement modifiées ou artificielles. En effet, la base nationale « Plans d'eau » comporte 79 % de plans d'eau artificialisés pour 21 % de naturels (Figure 5, n = 740). De plus, si l'on se concentre sur les plans d'eau concernés par la DCE (superficie supérieure à 50 ha, n = 481), l'écart est d'autant plus marqué ; les taux sont respectivement de 86 % et 14 %.

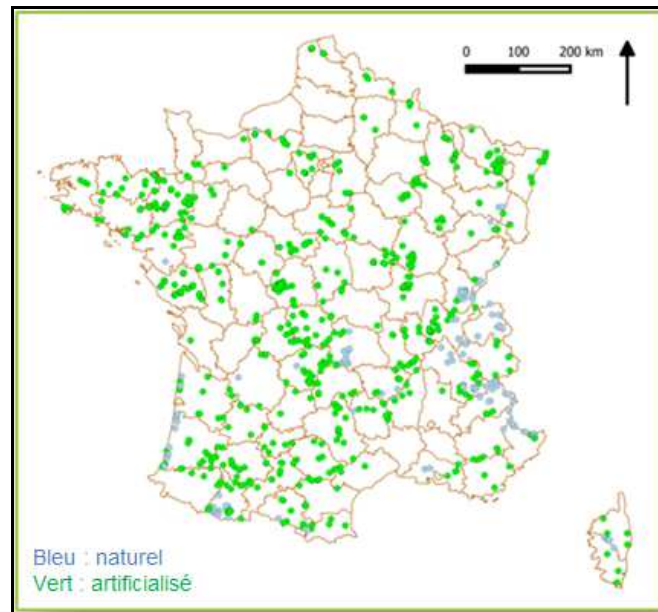


Figure 5 : Plans d'eau répertoriés dans la base de données nationale (Pôle Onema-Irstea, 2016)

Le cas de l'artificialisation n'est pas spécifique à la France. Au niveau mondial, le nombre de grandes retenues (barrage supérieur ou égal à 15 m des fondations à la crête) a été estimé à 42 000 et le nombre de petites retenues (arbitrairement définies par un barrage de moins de 15 m) à 800 000 (d'après l'International Commission on Large Dams – ICOLD, 1996). Moins de 1000 grandes retenues ont été construites chaque décennie entre 1900 et 1949, et un pic de 5415 grandes retenues construites est constaté durant les années 1970 (pour ensuite diminuer jusqu'aux années 2000) (Rosenberg *et al.*, 2000).

Avant toute intervention, il est important de tenir compte du type de plans d'eau. Au niveau national, il existe une typologie basée sur l'origine naturelle ou anthropique des plans d'eau (Circulaire DCE 2005-11). Une fois l'origine identifiée (origine naturelle, origine anthropique avec hauteur de barrage importante ou origine anthropique avec creusement ou aménagement d'une digue), il s'agit de situer l'hydro-écorégion (cf. ci-dessus) dans laquelle se trouve le plan d'eau. Enfin, le type de plan d'eau sera ensuite déterminé par la forme de la cuvette (L : peu profond, sans ou avec faible stratification ; P : profond, avec stratification thermique stable ; LP : profond avec zone littorale étendue, symétrique ou asymétrique). Notons que pour certains types de plans d'eau d'origine anthropique, le fonctionnement hydraulique peut être un critère supplémentaire (MEDD, 2005).

Des typologies ciblées sur les caractéristiques hydromorphologiques ont également été créées au pôle Onema-Irstea « Hydro-écologie des plans d'eau ». Il existe une multitude de typologies possibles qui visent, par une homogénéisation des plans d'eau d'un point de vue hydromorphologique, une

meilleure caractérisation de l'importance des altérations et de leurs impacts sur les communautés biologiques. Elles ont été établies de manière à être précises, simples et écologiquement (hydromorphologiquement) pertinentes. Elles reprennent un ensemble de descripteurs d'état et d'indicateurs d'altération hydromorphologiques (en cours de développement) à différents niveaux d'échelle : le bassin versant (ex. superficie du bassin versant), le corridor rivulaire (ex. surface en zone inondable), les berges et le littoral (ex. nombre de prises et de restitutions d'eau) ainsi que la cuvette (ex. profondeur maximale). Les descripteurs peuvent être obtenus par le biais de l'application des protocoles correspondants (**Figure 6**) (Nicolas *et al.*, 2015) :

- BaveLa : description de l'occupation du sol dans le bassin versant (Heyd *et al.*, 2012)
- CoRiLa : description de l'occupation du sol dans le corridor rivulaire (Alleaume and Argillier, 2012)
- AIBer : caractérisation des modifications, d'origine anthropique, des rives (Alleaume *et al.*, 2012a)
- Charli : description de la qualité des habitats de la zone littorale (Alleaume *et al.*, 2012b)
- Bathymétrie : caractérisation de la forme de la cuvette par le biais d'un échosondeur (Alleaume and Lanoiselée, 2010)
- Roxann : caractérisation du substrat de la cuvette par le biais d'un échosondeur (Poulain *et al.*, 2011)

Il est important de garder à l'esprit que pour l'évaluation des caractéristiques hydromorphologiques des plans d'eau, ces protocoles fournissent des descripteurs mais pas encore d'indicateurs (en cours de développement).

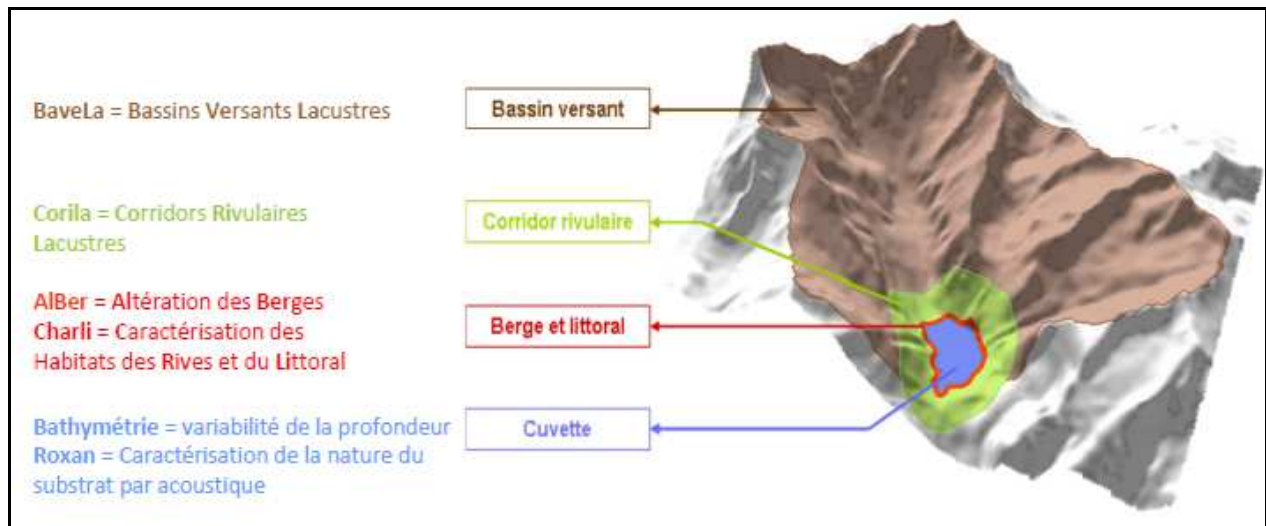


Figure 6 : Protocoles de caractérisation de l'hydromorphologie des plans d'eau aux différentes échelles existantes (Nicolas *et al.*, 2015)

Notons qu'en parallèle des protocoles AIBer et Charli, l'utilisation du protocole LHS (Lake Habitat Survey) peut avoir lieu, mais constitue une méthode complexe et demandant du temps. Ce protocole permet de caractériser la qualité des habitats et leurs altérations en utilisant des descripteurs de la végétation et du substrat (Rebière *et al.*, 2012; Nicolas *et al.*, 2015). En complément du développement de la méthode LHS, un indice des altérations morphologiques a été créé, le LHMS (Lake Habitat Modification Score) (Rowan *et al.*, 2006).

2.1.4. POURQUOI, AVEC QUELS OBJECTIFS ET QUELLE DEMARCHE RESTAURER LES PLANS D'EAU ?

Les plans d'eau, comme le montrent les typologies, peuvent être extrêmement diversifiés des points de vue environnemental et hydromorphologique. De ce fait, l'état des communautés biologiques ainsi que le fonctionnement des plans d'eau se révèle également très riche et divers, notamment dans les zones rivulaires.

Même d'origine anthropique, les plans d'eau constituent des écosystèmes au potentiel de biodiversité et de services comparable à celui des plans d'eau naturels. De plus, ils sont dominants sur le territoire national ; l'intérêt à leur porter n'est donc pas négligeable, même si l'on parlera plutôt d'actions de mitigation.

Les objectifs des projets de restauration dépendent tout d'abord du ou des dysfonctionnement(s) diagnostiqué(s). Ils peuvent ensuite être séparés en objectifs majeurs et secondaires. En effet, un projet peut concentrer plusieurs objectifs d'importance variable. Ils peuvent être reliés à différentes catégories (**Figure 7**). Les actions entreprises au niveau national (information issue de l'enquête nationale du printemps 2016) possèdent principalement des objectifs d'amélioration de la biodiversité générale, des caractéristiques fonctionnelles des plans d'eau et des peuplements biologiques ciblés et d'intérêt (contours épais sur la **Figure 7**).

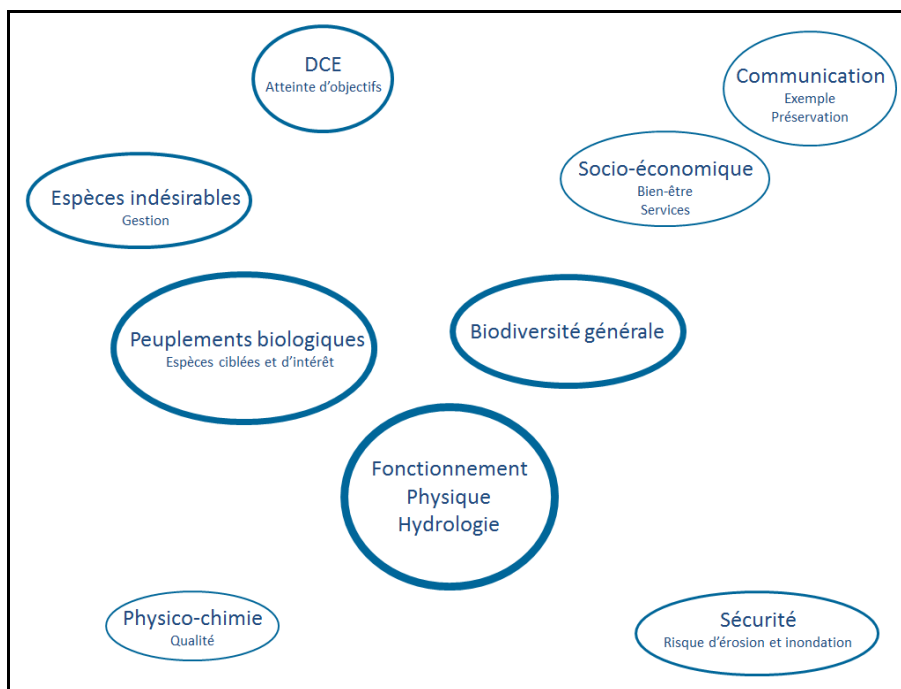


Figure 7 : Catégories d'objectifs possibles dans le cadre de projets de restauration (Pôle Onema-Irstea, 2016)

La réalisation de diagnostics et l'identification d'objectifs font partie de la démarche globale de restauration (UFBAG and AEAG, 2014). Le diagnostic consiste en la caractérisation des altérations en tenant compte du contexte du plan d'eau voir de son bassin versant (Jeudy *et al.*, 2012b; Navarro and Stroffek, 2015). La clarification des objectifs est quant à elle nécessaire afin de sélectionner par la suite les indicateurs les plus appropriés à utiliser lors de l'évaluation des résultats des opérations de

restauration. Cela permet également de mieux ajuster les actions pour atteindre les objectifs lorsque celles-ci ne sont pas concluantes (Colas and Chauvet, 2015). Le cadre de l'opération est également à définir : écosystème de référence, prise en compte des critères biologiques, hydromorphologiques et physico-chimiques, échelle d'intervention, réglementation et acteurs concernés et impliqués. Ensuite, il s'agit d'établir des programmes de mesures et d'envisager les actions à mettre en place, en gardant à l'esprit qu'il n'existe pas de technique universelle. Les techniques doivent cependant être pertinentes (présence d'un état initial pour évaluer l'efficacité), applicables (selon les caractéristiques et usages ainsi qu'en fonction de la législation), efficaces et pérennes et avec le moins d'effets indésirables possible (en s'assurant de leur réversibilité le cas échéant). Enfin, la mise en place de suivis de l'efficacité des opérations permet d'évaluer les actions. Elle nécessite des indicateurs fiables, pertinents et facilement mesurables et comparables. Toute cette démarche nécessite une planification en amont, notamment pour prendre en compte le coût de la mise en œuvre, de l'entretien et des suivis, qui peut être important (Jeudy *et al.*, 2012b; Navarro and Stroffek, 2015).

Enfin, dans le cadre de la restauration, il est important de tenir compte des aspects sociaux et économiques (Chocat, 2013). En effet, étant donné le lien étroit entre les plans d'eau et les activités humaines, les aspects économiques, sociaux, culturels et politiques ne peuvent être négligés. La communication est également primordiale. Ainsi, afin de maximiser les chances de réussite d'un projet, il est utile d'identifier et d'établir un bon contact avec les acteurs potentiellement concernés (élus, acteurs locaux, usagers, etc.), et de les intégrer à tous les niveaux d'intervention. Lors de la programmation des projets, une phase de concertation, avec une bonne communication, est indispensable (UFBAG and AEAG, 2014). Cela permet de contextualiser le projet (notamment d'un point de vue historique) et d'assurer l'adhésion des partenaires en tenant compte des intérêts de chacun tout en ayant un objectif commun. La sensibilisation des acteurs potentiels permet une meilleure compréhension des enjeux et peut inciter à agir. Par le biais d'outils de communication adaptés, la présentation des possibilités de financement, de témoignages et d'exemples concrets, l'implication peut être facilitée. Pour convaincre au mieux, il est utile de montrer la pertinence sociale du projet (d'optimiser les liens entre celui-ci et les activités sociales), tout comme les pertinences politique et territoriale. Il est également intéressant de démontrer l'intégration technico-économique (sur le moyen-terme) d'un projet. En effet, la justesse technique des propositions d'actions ne suffit pas toujours à convaincre les maîtres d'ouvrage publics à se lancer dans une démarche de restauration. Évaluer les retombées socio-économiques peut donc également aider, tout comme le soutien institutionnel, pour négocier avec les acteurs économiques. Le transfert des résultats (réponses écologiques mais également perception du projet) par le biais de sites internet, brochures, films, etc., est aussi nécessaire, notamment pour assurer une continuité de l'implication dans le cas d'éventuels futurs projets (Bouni, 2014; Onema, 2016).

2.1.5. REMARQUE INTRODUCTIVE A LA SUITE DU DOCUMENT

Nous tenons à préciser qu'un important travail de synthèse a déjà été effectué par l'Agence de l'eau Rhône-Méditerranée et Corse (RMC) en 2012 ; il s'agit d'une bibliographie concernant la France et l'étranger qui reprend aussi bien l'aspect physico-chimique qu'hydromorphologique. Ce travail cible ensuite les actions de restauration entreprises sur le territoire RMC, présentées sous forme de recueil de fiches (Jeudy *et al.*, 2012b). Il ne s'agit donc pas ici de refaire le même travail mais de s'intéresser à l'aspect hydromorphologique de façon complémentaire et en visant l'échelle nationale.

Actuellement, dans le bassin Rhône-Méditerranée et Corse et parmi les 94 plans d'eau DCE, le risque de non atteinte du bon état ou bon potentiel en 2021 est de 42 % pour les masses d'eau naturelles, de 51 % pour les masses d'eau fortement modifiées et de 85 % pour les masses d'eau artificielles. Les origines du risque sont principalement les pollutions, diffuses puis ponctuelles, suivies des altérations hydrologiques (marnage artificiel), la discontinuité piscicole et enfin, les dégradations morphologiques (dégradation des berges).

Afin de mener à bien les actions de restauration, en France et à l'étranger, 65 techniques ont été recensées. Pour le bassin Rhône-Méditerranée et Corse, 37 techniques ont été recensées pour 100 opérations concentrées sur 41 plans d'eau (lacs naturels, retenues, étangs, mares, gravières). Quel que soit le type de restauration (physico-chimique ou hydromorphologique), les dysfonctionnements / altérations ont été catégorisés ; il s'agit de l'eutrophisation, des pollutions toxiques, de la turbidité, du dysfonctionnement des sédiments, de **l'érosion des berges** et du **déséquilibre de la biodiversité** (Jeudy *et al.*, 2012b; Navarro and Stroffek, 2015).

Les techniques de restauration peuvent être regroupées selon leur catégorie préventive, curative, palliative ou selon les procédés concernés chimique, biologique, physique ou encore réglementaire. La plupart des techniques recensées visent à lutter contre le déséquilibre de la biodiversité (40 %) et l'eutrophisation (28 %). A noter également un point non négligeable ; la dégradation de l'écosystème littoral de manière globale regroupe 45 % des techniques recensées. Cette zone est en effet très vulnérable et sensible tout en étant une zone de transition entre les milieux aquatiques et terrestres abritant la plus forte biodiversité (écotone) (Jeudy *et al.*, 2012b).

Dans la suite de cette partie, nous développons l'aspect hydromorphologique de manière générale, les techniques de restauration qui y sont relatives et les méthodes de suivi des actions de restauration.

2.2. Aspect hydromorphologique et altérations

La caractérisation de l'hydromorphologie des plans d'eau permet d'identifier des pressions ou dysfonctionnements potentiels et peut servir de base dans le cadre de mesures de restauration. Il existe trois niveaux d'altérations subies par les plans d'eau : le niveau global, celui du bassin versant et celui du plan d'eau lui-même, où l'on retrouve les impacts liés aux usages (Figure 8) (Munch and Raymond, 2015).

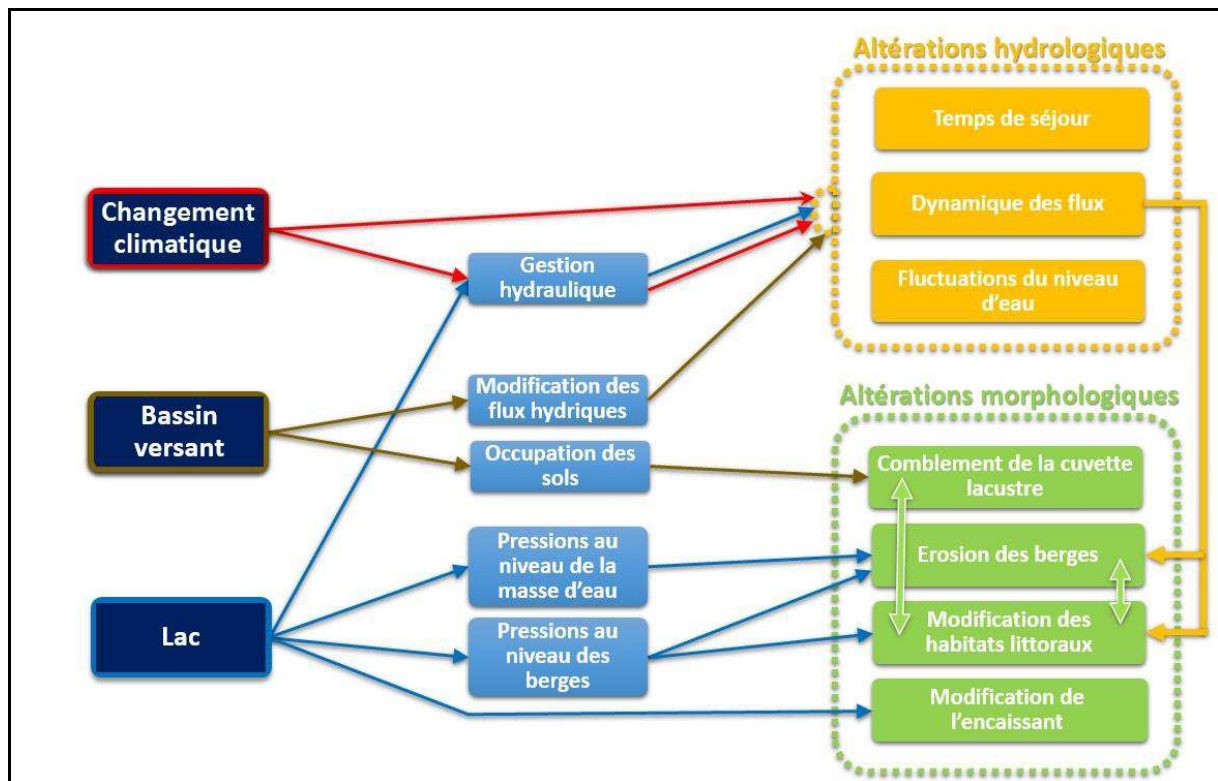


Figure 8 : Altérations des plans d'eau au niveau global, au niveau du bassin versant et au niveau du plan d'eau (Munch and Raymond, 2015)

Au niveau global, le changement climatique est susceptible d'influencer l'hydrologie des plans d'eau. En effet, les modifications de températures, de précipitations peuvent influencer le temps de séjour, la dynamique des flux et les fluctuations de niveau d'eau (évapotranspiration, amplitude et fréquence des étiages et crues). Les impacts du changement climatique auront également pour effet de modifier les usages anthropiques (gestion hydraulique), et donc indirectement les impacts liés à ceux-ci.

Au niveau du bassin versant, les flux hydriques arrivant dans les plans d'eau varient selon le fonctionnement des cours d'eau en amont et leur gestion et influencent l'hydrologie des plans d'eau récepteurs. L'occupation des sols du bassin versant peut quant à elle modifier les caractéristiques morphologiques des plans d'eau en termes de comblement de la cuvette. Effectivement, la déstabilisation des sols suite à la déforestation et/ou l'imperméabilisation des sols associée à l'urbanisation peuvent provoquer érosion et ruissellement et entraîner la sédimentation des matières solides dans les plans d'eau.

A l'échelle du plan d'eau, les usages liés aux activités humaines influencent directement l'hydrologie en fonction du système de gestion. Les facteurs hydrologiques impactent les berges et la zone littorale

(et ses habitats), endroits caractérisés par la présence de végétation dont des macrophytes. Ces derniers constituent d'ailleurs des indicateurs sensibles de changement hydromorphologique (ex : marnage), notamment de par le critère d'abondance (Hellsten and Dudley, 2004). La masse d'eau et les berges subissent en outre les effets des usages ; batillage lié à la navigation et pollution de la masse d'eau ainsi qu'artificialisation et homogénéisation des berges (enrochements, murs pour stabiliser, construction de port, pontons, quais, etc.). En conséquence, les peuplements de macro-invertébrés, par exemple, peuvent être affectés par l'artificialisation ; leur diversité et leur densité sont plus élevées sur des interfaces naturelles (grève caillouteuse, grève caillouteuse sous ripisylve, roselière, talus terreux et grève sablonneuse) que sur des interfaces artificielles (mur de béton, mur avec anfractuosités et enrochements) (Bänziger, 1995). Le substrat, ainsi que la biomasse des macrophytes et des détritiques, sont en effet des facteurs parmi les plus importants dans le contrôle de la distribution et de l'abondance des individus constituant le macrobenthos. D'autres facteurs interviennent également tels que la profondeur, l'exposition à l'action des vagues et la transparence de l'eau. Les macro-invertébrés jouent un rôle clé dans les zones littorales lacustres mais la composition de leurs communautés est donc en étroite relation avec les conditions d'habitat (Weatherhead and James, 2001). De même, les communautés piscicoles peuvent être perturbées par une homogénéisation des berges ; le retrait d'éléments de structures tel que du bois grossier (supérieur à 10 cm) peut ainsi influencer les gammes de taille d'habitat, la distribution spatiale et les comportements/stratégies d'alimentation de certaines espèces (Ahrenstorff *et al.*, 2009). L'abondance et l'hétérogénéité des macrophytes quant à elles influencent positivement l'abondance piscicole (Weaver *et al.*, 1997). Enfin, en fonction de l'usage du plan d'eau, la cuvette (encaissant) peut elle-même être directement modifiée (volume, surface, zone littorale) (Munch and Raymond, 2015).

Nous retrouvons donc à ce niveau deux grands groupes d'altérations : l'un relatif à l'érosion des berges et l'autre relatif à l'équilibre de la biodiversité (faune et flore : espèces envahissantes indigènes ou exotiques, aquatiques ou terrestres) et aux habitats littoraux (dégradation par artificialisation, homogénéisation, loisir, exploitation industrielle et marnage) (Jeudy *et al.*, 2012b; Munch and Raymond, 2015).

- Cas particulier du marnage

Un élément important à l'échelle du plan d'eau est la présence de fluctuations de niveau d'eau ou marnage. Le marnage est un critère majeur de différenciation entre plans d'eau naturels et artificiels (Furey *et al.*, 2006). Un plan d'eau ayant un fonctionnement naturel voit son niveau d'eau varier selon la sécheresse, l'évaporation, la percolation (diminution du niveau) ainsi que selon les précipitations et ruissellement, la fonte des neiges et le débit des tributaires (augmentation du niveau). A titre d'exemple, les lacs français naturels de Sylans (01), Chaillexon (25) et de Lauvitel (38) marnent respectivement de 4-5, 9 et 20 m (pers.com.). Le marnage constitue une des forces motrices majeures pour les plans d'eau, fort sensibles aux changements rapides, notamment en terme de régime des températures (Coops and Hosper, 2002; Leira and Cantonati, 2008). Un plan d'eau artificiel voit, quant à lui, son niveau varier selon les facteurs environnementaux mais surtout en fonction de la gestion hydraulique adaptée à l'usage (Fraissé, 1999). Le marnage peut impacter les berges du plan d'eau par érosion directement suite à l'action des vagues ou suite à une déstabilisation des berges à cause d'une perturbation de certaines espèces végétales. Les habitats littoraux peuvent aussi être modifiés ; c'est principalement la ceinture de végétation qui est impactée et indirectement les communautés macrobenthique et piscicole (Leira and Cantonati, 2008). L'impact du marnage sur les habitats littoraux et l'état des berges est variable selon l'amplitude, la durée et la fréquence ainsi que la nature des fluctuations (artificielle dans beaucoup de cas actuellement) (Munch and Raymond, 2015).

Concernant les plans d'eau artificiels (retenues), et plus particulièrement concernant l'usage de production d'hydroélectricité, on peut retrouver deux types d'aménagements hydroélectriques : au fil de l'eau (retenues de faible volume) et donc dépendant des apports immédiats (production électrique non flexible), ou turbinant par intermittence l'eau stockée dans une retenue et donc induisant des fluctuations de niveau d'eau (Tissot and Gilbert, 2016). Il existe différents types de marnage impactant la dynamique de colonisation des berges par les végétaux (diversité et abondance), dont certains ont développé des adaptations à la variabilité temporelle et à l'amplitude des fluctuations.

- Marnage journalier : amplitude faible et fréquence élevée ; les espèces végétales des berges doivent être résistantes à de courtes et fréquentes périodes d'émersion ;
- Marnage saisonnier : amplitude importante (supérieure à 10 m) et fréquence inférieure à celle de la saison (liée aux crues et à la consommation) ; les espèces végétales des berges doivent être capables de s'adapter rapidement car les variations sont irrégulières, et doivent supporter des périodes d'immersion et d'émersion de plusieurs mois ;
- Marnage interannuel : amplitude très importante (environ 30 m) et fréquence supérieure à la saison voir à l'année ; les espèces végétales doivent être capables de terminer leur cycle phénologique à contre-saison le cas échéant (lorsque la période d'émersion correspond à l'hiver).

Dans le cas d'un marnage saisonnier, les plans d'eau artificiels peuvent présenter trois types de zones de marnage au niveau des berges :

- Berges escarpées : roche mère apparente, microfalaise d'érosion (régressive très sévère), substrat varié et peu de colonisation par la faune et la flore ;
- Replats vaseux : topographie et conditions dépendant de la sédimentation, substrat sablonneux ou caillouteux et colonisation de la végétation abondante et peu diversifiée ;
- Berges sableuses et lessivées : pente douce, topographie dépendant des eaux de ruissellement et de l'action des vagues, substrat lessivé et peu de colonisation par la faune et la flore (Fraissé, 1999).

Les conséquences des fluctuations de niveau d'eau sur la ceinture de végétation peuvent être non négligeables (Dienst *et al.*, 2004) et sont les plus étudiées depuis les années 1990 (Leira and Cantonati, 2008). Par exemple, la retenue des Bariousses (Treignac, Corrèze) voit son pourcentage de linéaire recouvert de végétation passer de 80 % (cote maximale – octobre) à 4 % (niveau bas – janvier) (Rebière *et al.*, 2012). Lorsque le niveau d'eau est élevé, le marnage peut avoir pour conséquences la réduction de la disponibilité en lumière (Loiselle *et al.*, 2005) pour les végétaux aquatiques. Tandis que lorsque le niveau d'eau est bas, ces derniers peuvent être endommagés par l'action des vagues, de la glace ou de la sécheresse (Daguet and Munch, 2015).

Le marnage perturbe également les communautés macrobenthiques, directement en les obligeant à faire face à des alternances exposition à l'air vs. submersion (Furey *et al.*, 2006) ou, indirectement, en agissant sur la diversité des caractéristiques des habitats littoraux et sur les caractéristiques de la végétation rivulaire (extension/développement des macrophytes, présence ou absence d'une végétation rivulaire complexe, nombre total de types de macrophytes) (Jurca *et al.*, 2012).

Enfin, les communautés piscicoles sont également impactées par le marnage, en termes de zone de reproduction (Gafny *et al.*, 1992), de succès de recrutement et d'incubation des œufs, avec une sensibilité au marnage variable selon les espèces. Par exemple, pour le brochet, le gardon et la brème, le marnage induisant la perte de végétation sont fortement impactant car ce sont des espèces phytophiles (ou litho-phytophiles) (Winfield, 2004; Tissot and Gilbert, 2016). L'accès aux zones

d'alimentation en fonction des fluctuations de niveau d'eau impacte également l'état des communautés (alimentation des juvéniles et des adultes) (Tomson *et al.*, 2010). La tolérance à la dessiccation ou à l'inondation est largement déterminante dans la distribution des communautés littorales, que cela concerne les macrophytes (germination, développement) ou les communautés faunistiques (invertébrés en dormance ou enterrés) (Coops *et al.*, 2003).

Si le marnage artificiel, en fonction de son amplitude, constitue une altération comme vu précédemment, l'absence ou la régulation de marnage d'un plan d'eau marnant naturellement est également une altération. Les fluctuations de niveau d'eau constituent en effet aussi un processus naturel (même si les plans d'eau concernés sont actuellement rares) nécessaire à la survie de nombreuses espèces (Wantzen *et al.*, 2008). Par exemple, les roselières (roseaux, joncs, grandes massettes, etc.), qui se développent en zone littorale (à maximum 1.5 m de profondeur), nécessitent une exondation estivale qui stimule l'extension végétative et une inondation hivernale. La régulation du niveau d'eau peut entraîner une concentration de l'action de la houle sur une même zone et provoquer une érosion mécanique des végétaux (rupture des tiges) ainsi qu'une érosion directe de la berge. De plus, des objets flottants (exemple : bois mort) peuvent être amenés sur cette même zone d'action et amplifier l'impact de la houle (Daguet and Munch, 2015). Pour résumer, la gestion hydraulique peut donc générer deux types d'impacts, l'amplification ou la modification des fluctuations naturelles (par rapport au fonctionnement initial du plan d'eau) mais aussi leur réduction voir suppression. Les actions de restauration viseront donc les deux cas.

2.3. Techniques de restauration hydromorphologique

Avant toute chose, il est important de garder à l'esprit qu'il n'existe généralement pas une technique « miracle » ou type pour une altération. D'une part, les altérations sont souvent multiples ou induites par plusieurs facteurs et d'autre part, plusieurs techniques peuvent être combinées pour atteindre un même objectif de restauration.

Suite à l'enquête nationale réalisée en 2016 (cf. point IV.), dans laquelle 55 projets passés ou en cours ont été recensés, les actions de restauration hydromorphologiques / des habitats concernent :

- La restauration des fluctuations de **niveau d'eau** : **3** projets
- La restauration des **berges** (suppression de mur, reprofilage) : **7** projets
- La restauration/protection/création de **roselières** : **5** projets
- La **végétalisation** des berges ou restauration de la ripisylve : **4** projets
- La **diversification** d'habitats : **14** projets dont **4** de mise en place de **récifs artificiels** et **1** de mise en place de **haut-fond**
- La restauration/création de **frayères** : **10** projets
- La gestion des macrophytes ou **espèces végétales invasives** : **5** projets
- La **dérivation du cours d'eau** alimentant le plan d'eau : **2** projets
- La restauration de **zone humide** adjacente par **reconnexion** au plan d'eau : **5** projets

Ces résultats, bien que constituant un échantillon des actions existantes, sont cohérents avec la synthèse réalisée par l'Agence de l'Eau RMC (Jeudy *et al.*, 2012b; Navarro and Stroffek, 2015). En effet, afin de contrer la dégradation de l'écosystème littoral, on retrouve les actions de **diversification** du milieu par création d'habitats (**récifs artificiels**, **haut-fonds**, îlots flottants, radeaux végétalisés), la redynamisation de **roselières** et la restauration d'un **marnage naturel**. Les actions de contrôle mécanique ou manuel sont répertoriées afin de lutter contre le déséquilibre du **compartiment floristique**. Quant au compartiment faunistique, il est concerné par des actions de restauration/création de **frayères** auxquelles s'ajoutent la réintroduction ou le renforcement de populations ou encore la capture destructive d'espèces indésirables. Enfin, le reprofilage de **berges** et leur protection par utilisation du **génie végétal** sont les actions citées dans la lutte contre l'érosion.

Comme précisé précédemment, l'Agence de l'Eau RMC a produit un travail complet détaillant les techniques existantes (description, contraintes, effets ciblés, effets néfastes, techniques complémentaires ou antagonistes, coût et efficacité). Nous fournissons donc ici quelques éléments synthétiques ou supplémentaires issus de la littérature.

2.3.1. RESTAURATION D'UN MARNAGE NATUREL

La restauration d'un marnage naturel, en rétablissant l'amplitude de variation adaptée au milieu, est peu fréquente. De par les nombreux usages généralement en jeu, le processus est soit impossible, soit difficile à mettre en place. Dans la plupart des cas, le recours au génie écologique et à d'autres techniques est d'application (Montuelle and Clémens, 2015). Cela a le mérite d'atténuer les impacts de la gestion des fluctuations de niveau d'eau mais ne s'attaque généralement pas à la cause du dysfonctionnement.

La restauration d'un marnage naturel peut permettre de préserver et restaurer les roselières, de favoriser la minéralisation des sédiments exondés et d'accroître les processus d'autoépuration (Navarro and Stroffek, 2015). Une étude de faisabilité et un bilan hydrique sont toutefois à réaliser. Ces étapes permettent de travailler en fonction des enjeux concernant le plan d'eau, de limiter les risques d'inondation (le cas échéant) et d'accélération de l'érosion des berges. Il est par exemple utile d'assurer les changements de niveau d'eau de manière progressive et réfléchie, et d'établir un programme de modification des cotes (fréquence des modifications, planning précis).

2.3.2. REMODELAGE DES BERGES

Le reprofilage, retalutage ou réengraissement (apports de matériaux) des berges est une action conséquente qui consiste à modifier la pente et la forme du talus pour obtenir un profil plus doux et un équilibre naturel entre les processus d'érosion et de sédimentation. Il peut par exemple être associé à la suppression de murs (lac Léman à Chens-sur Léman). Cette action peut être l'occasion d'augmenter les zones d'affleurement terre-eau en augmentant la sinuosité des rives. Elle est également souvent accompagnée de végétalisation et du recours au génie végétal (géotextiles, plantations, etc.) (SIAEBVELG, 2007; Jeudy *et al.*, 2012a).

En supplément ou à défaut de reprofilage des berges, leur protection (et la protection des habitats littoraux) vis-à-vis des impacts des usages anthropiques peut passer par la mise en place de pieux jointifs (séries de pieux jointifs espacées pour laisser des passages), de fascines (fagots de rondins ou branches de saule ou autre essences), de palissades à claire-voie (deux séries de pieux parallèles entre lesquelles sont placées des fascines et éventuellement de la terre), d'enrochements, de digues ou de gabions (caissons remplis de blocs). Ces dispositifs limitent l'érosion de manière efficace (Navarro and Stroffek, 2015). Les enrochements, digues et gabions peuvent être utilisés pour la protection des berges (techniques assez lourdes de génie civil) mais il faut prendre garde à ne pas les utiliser pour remodeler les berges au point que ça en devienne une altération.

2.3.3. RESTAURATION DE ROSELIÈRES

La technique idéale afin de restaurer à long-terme des roselières serait de restaurer un marnage naturel ou proche du naturel (amplitude adéquate). En effet, en absence de celui-ci, les roselières subissent un impact de la houle toujours au même niveau (rupture des tiges), un embroussaillage et elles sont restreintes dans leur phase de germination et subissent l'accumulation de matière organique et la désoxygénation (besoin d'une exondation régulière). Les contraintes socio-économiques (complexité et multiplicité des usages) sont telles que la solution est la plupart du temps orientée vers des actions de génie écologique. Parmi les techniques de génie écologique, l'action passe donc par une atténuation de la houle en plaçant des récifs artificiels, des fascines, des enrochements, des pieux jointifs (exemple : lac d'Annecy (SILA, 2016)) et non jointifs ou en adaptant la pente et la granulométrie des berges. C'est donc une réponse à moyen-terme qui peut être complétée par un renforcement des roselières elles-mêmes (plantations) (Montuelle and Clémens, 2015). Enfin, la redynamisation des roselières passe également par une diminution des secteurs atterris au profit de la partie aquatique afin de favoriser la croissance des végétaux (étrépage de la couche superficielle du sol, création de chenaux, fauche des roselières terrestres pour éviter l'étouffement de la partie aquatique, abattage de ligneux pour garder le milieu ouvert). Ces méthodes sont toutefois à utiliser avec parcimonie, après diagnostic et objectifs définis, car elles présentent un risque de fragilisation de la roselière et de colonisation par des espèces indésirables (Jeudy *et al.*, 2012a).

2.3.4. VEGETALISATION DES BERGES

La protection des berges par génie végétal peut utiliser différentes techniques telles que l'ensemencement, la plantation, le bouturage, la mise en place de peignes, de lits de plançons ou de tressages. Les résultats qui ont été recensés montrent une efficacité moyenne, tendant vers le positif (Navarro and Stroffek, 2015).

Un travail conséquent a été réalisé par le passé sur la végétalisation (Fraissé, 1999) et montre qu'il existe de nombreux avantages à la végétalisation des berges. D'un point de vue écologique et paysager, la végétalisation favorise la diversité du milieu et équilibre le fonctionnement général du plan d'eau. De plus, elle permet de lutter contre les risques d'eutrophisation, offre potentiellement des zones de frai et fournit des zones de refuge et d'alimentation pour la faune aquatique et pour la faune terrestre. Elle diminue aussi localement la turbidité de l'eau par un piégeage des particules, enraye l'érosion et améliore l'aspect paysager. Enfin, d'un point de vue socio-économique, elle peut augmenter l'attrait touristique pour le plan d'eau. Toutefois, il est difficile de savoir à l'avance quelles espèces végétales et techniques seront les plus adaptées et efficaces car il existe des contraintes fortes et multiples liées au marnage notamment. Les contraintes peuvent être d'origine physique (température, acidité, salinité, type de berges – sableuses, escarpées, envasées), biologique (prédation, piétinement, isolement et exposition solaire), anthropique (gestion hydraulique) ainsi que climatique (accentuation des contraintes physiques) et locale (géologie, pédologie), voir réglementaire. Afin de limiter les échecs, il est nécessaire de bien connaître les caractéristiques écologiques des milieux à restaurer et de respecter la chronologie des actions à entreprendre (diagnostic, choix des espèces, choix des techniques et mise en œuvre d'essais préalables). Un bon diagnostic initial est primordial (paramètres physiques, chimiques, biologiques et objectifs des maîtres d'ouvrage), ainsi qu'une bonne estimation des coûts, un stockage correct des matériaux à utiliser et un entretien ou protection de la zone après travaux.

De manière spontanée, la végétation des zones de marnage colonise tout d'abord le haut des berges (espèces annuelles, puis espèces pérennes supportant de courtes périodes d'immersion). La colonisation se poursuit ensuite en bas de berge avec des espèces pérennes adaptées à l'immersion longue. Deux types d'espèces végétales spontanées ont été identifiés : des espèces annuelles opportunistes dont les semences résistent à l'immersion et des espèces pérennes possédant des caractéristiques biologiques permettant leur adaptation au marnage. Pour végétaliser des berges, des critères de choix ont donc été établis en tenant compte des contraintes. La résistance potentielle à l'immersion est un critère de choix, la durée de vie (pérennité des espèces) également, ainsi que le mode de multiplication (stratégie de colonisation) et l'appartenance phytosociologique (espèces que l'on peut retrouver sur différents types de berge). Des tests ont été réalisés avec un certain nombre d'espèces dont les dix suivantes : *Eleocharis palustris* (L.) (Scirpe des marais), *Phalaris arundinacea* (L.) (Baldingère faux-roseau), *Deschamsia cespitosa* (L.) (Canche cespiteuse), *Carex hirta* (L.) (Laiche hérissée), *Mentha pulegium* (L.) (Menthe pouliot), *Rorippa sylvestris* (L.) (Cresson des bois), *Lysimachia vulgaris* (L.) (Grande Lysimaque), *Lythrum salicaria* (L.) (Salicaire commune), *Cyperus eragrostis* (Lam.) (Souchet robuste) et *Scirpus maritimus* (L.) (Scirpe maritime) (détails par fiches individuelles dans le document réalisé par Fraissé, 1999). Les caractéristiques biologiques qu'elles présentent de manière commune sont : une possibilité d'immersion de plus de sept mois sous cinq mètres d'eau grâce à un système racinaire résistant, une capacité à résister au stress hydrique grâce à la possibilité d'exploiter les réserves en eau du sol via un réseau racinaire s'atrophiant sans mourir, une tolérance par rapport au substrat et une adaptabilité du cycle phénologique et de la reproduction face au régime hydrique saisonnier.

Parmi les techniques de végétalisation proposées par Fraissé (1999), on retrouve :

- La végétalisation temporaire : cas d'un régime hydrique saisonnier chaotique (exemple : pas de diminution du niveau d'eau certaines années). Elle s'applique sur des zones de marnage dont la topographie est peu marquée et est également utilisée pour la création de frayères temporaires.
- La végétalisation permanente à partir d'herbacées adaptées au marnage :
 - utilisation de semences adaptées au marnage : technique s'appliquant sur des zones d'érosion de la partie haute de la zone de marnage ou sur la zone de marnage elle-même,
 - utilisation d'herbacées adaptées au marnage, par plantation directe : technique s'appliquant aux mêmes zones que pour les semences lorsque l'installation de la végétation doit être réalisée en moins de trois mois.
- La végétalisation classique transposée aux zones de marnage : s'applique aux zones supérieures des berges.

Il existe aussi la possibilité de combiner des techniques de génie civil (enrochements, gabions, palplanches) avec la végétalisation afin de protéger la berge restaurée. Ainsi des enrochements peuvent être confortés par des végétaux ligneux pré-racinés ou à l'état de bouture placés entre les blocs. Les enrochements peuvent également être enfouis par un nappage avec semis et/ou plantations.

2.3.5. DIVERSIFICATION DES MILIEUX PAR CREATION D'HABITATS

Parmi les techniques de diversification d'habitats, il existe plusieurs options ; les radeaux végétalisés et les îlots flottants, les haut-fonds, les récifs artificiels et ce, avec différents modèles possibles. Ces structures sont utilisées pour augmenter les zones de refuge, de reproduction et d'alimentation. De manière générale, ces techniques se révèlent efficaces et peuvent être combinées (Navarro and Stroffek, 2015).

Les radeaux végétalisés sont composés d'hélophytes sur un support flottant, avec par exemple une natte de coco comme base pour permettre l'implantation des végétaux sans problème de développement racinaire, en espaçant suffisamment les plants pour permettre ce développement. Le radeau est idéalement relié au fond du plan d'eau par des élingues lestées (ancre ou sacs remplis) et dont la longueur tient compte des variations de niveau d'eau (exemple : deux fois la profondeur). Plusieurs radeaux peuvent être assemblés pour former des îlots ; c'est par exemple le cas du plan d'eau de Filheit (09) où 25 modules de 3 radeaux (1 radeau = 2.7 m²) ont été placés pour un total de 200 m² (Yotte, 2016) ou le cas des lacs de l'Eau d'Heure (Belgique) où des radeaux de 20 m² sont composés en structures modulaires (Tomson *et al.*, 2010; Dumonceau and Gilles, 2012). Il est important de faire attention à la solidité de la structure (face aux conditions météo variables : gel, vent, etc.), à la reprise de la végétation plantée ainsi qu'aux organismes qui peuvent se fixer aux radeaux et les alourdir (exemple : *Dreissena polymorpha*).

Les haut-fonds peuvent être constitués d'enrochements, de matériaux terreux et végétalisés. Ils sont formés avec des pentes douces et sont placés éloignés des berges, en zone peu profonde. Cette technique augmente l'habitat aquatique mais également l'habitat pour l'avifaune (Jeudy *et al.*, 2012a).

Les récifs artificiels, placés sur le fond du plan d'eau, peuvent être constitués de diverses structures ; des arbustes artificiels implantés en récifs à différentes profondeurs en immersion quasi permanente (Yotte, 2016), des blocs de béton creux, des briques, des caissons remplis de branches (Yamamoto *et al.*, 2014), etc. Ils sont particulièrement sujets à la sédimentation mais également à l'accumulation d'algues ou d'espèces animales invasives. Ils sont aussi sensibles à l'action des vagues et aux fluctuations de niveau d'eau (McLean *et al.*, 2015).

Il existe également des structures de refuge et de croissance pour poissons juvéniles en milieu portuaire marin (Bouchoucha *et al.*, 2016) transposables aux plans d'eau appelés Biohut ® (Figure 9). Il existe plusieurs modèles constitués de caissons grillagés remplis de coquilles d'huîtres associés à un ou des autres caissons grillagés vides (quai, ponton) ou constitués de tiges en bois de longueur variable emboîtées sur une platine métallique (corridor, digue). Ces structures sont utilisées pour diversifier les zones artificialisées et leur type est choisi selon l'endroit où ils doivent être placés (quai, ponton, digues, etc.) (ECOCEAN).

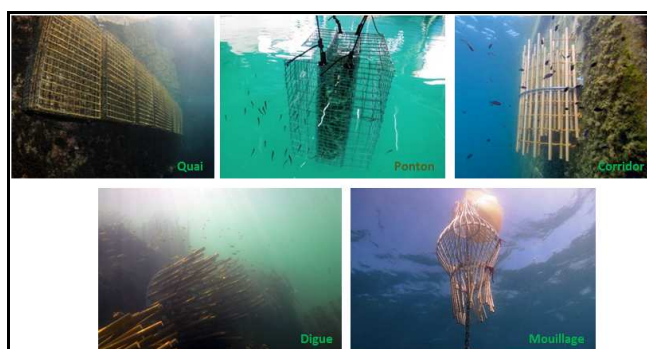


Figure 9 : Biohut ® de différents types selon l'endroit de mise en place (ECOCEAN)

2.3.6. CREATION ET RESTAURATION DE FRAYERES

Cette technique de restauration est particulièrement ciblée et souvent destinée à des espèces piscicoles particulières, mais présente néanmoins des résultats efficaces (Navarro and Stroffek, 2015).

Afin de restaurer des zones de reproduction piscicoles (perte par exemple due au marnage artificiel dans le cas de retenues), il existe deux types de mesures : la création de frayères et des mesures de restauration visant l'amélioration de l'habitat (création de lônes, végétalisation de berges, installation de radeaux végétalisés) (Tissot and Gilbert, 2016).

Parmi les frayères, il existe les frayères artificielles synthétiques (Tomson *et al.*, 2010; Dumonceau and Gilles, 2012; Passeron and Barla, 2013) ou végétalisées (Gillet, 1989) et les frayères semi-naturelles, constituées par une digue devant une anse de plan d'eau protégeant cette zone du marnage.

- Frayères artificielles flottantes

Deux systèmes de frayères artificielles flottantes existent (Figure 10) : une qui suit le niveau d'eau tout en s'éloignant de la berge lorsque celui-ci descend. Cela évite l'échouage du dispositif mais peut occasionner un blocage à cause de débris ou objets solides se prenant dans les cordages. L'autre technique consiste à relier les frayères avec des anneaux métalliques pouvant coulisser à des poteaux d'acier enfoncés verticalement (Gillet, 1989).

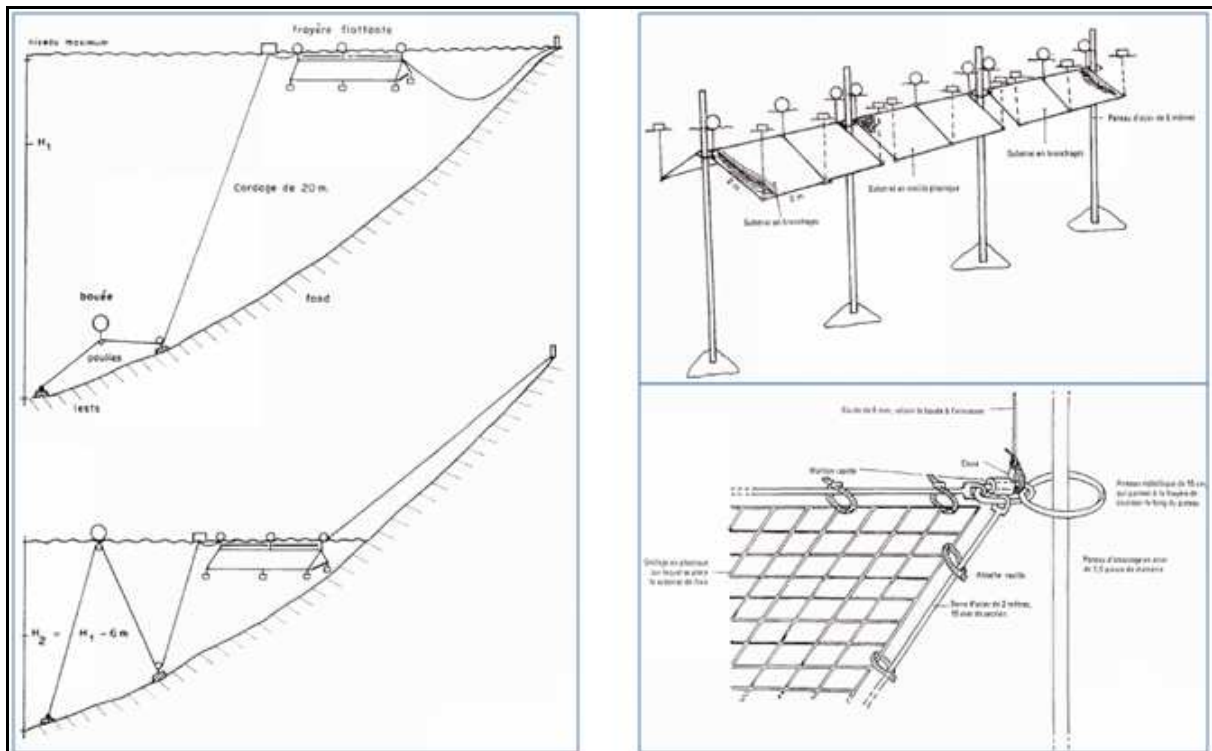


Figure 10 : Système de frayère artificielle flottante suivant le niveau d'eau (à gauche) et système de frayère artificielle flottante coulisant le long de poteaux fixés (à droite) (Gillet, 1989)

Les frayères artificielles flottantes doivent idéalement être robustes pour pouvoir résister aux vagues et courants, avoir une profondeur d'immersion et une inclinaison du substrat facilement modifiables (cela permet éventuellement d'attirer plusieurs espèces successivement) et être aisées à transporter et à installer. Installer ces structures dans des sites abrités, protégés des vagues, des courants et des débris charriés par les crues augmente leur chance de persistance. Il faut aussi prendre en compte les zones d'érosion et d'activité de loisir. L'utilisation de frayères artificielles est indiquée dans les plans d'eau présentant des frayères naturelles très dégradées (exemple : retenue à fort marnage artificiel).

Les frayères artificielles synthétiques ont l'avantage d'être réutilisables, légères, disponibles toute l'année et facilement nettoyables (Tissot and Gilbert, 2016). Elles peuvent être composées de polypropylène avec natte géosynthétique tridimensionnelle, de treillis plastique ou de gazon artificiel en plastique et sont immergées à des profondeurs variables selon les espèces et objectifs visés (Gillet, 1989; Tomson *et al.*, 2010; Dumonceau and Gilles, 2012).

Les frayères artificielles végétalisées ont quant à elles une durée de vie de 1 à 4 mois, sont plus lourdes et plus compliquées à entretenir (Tissot and Gilbert, 2016). Les matériaux utilisés pour réaliser des frayères artificielles doivent être denses pour retenir les œufs mais également suffisamment aérés pour que l'eau puisse circuler au travers. Il est aussi important qu'ils résistent le plus longtemps possible au colmatage et à l'immersion longue et/ou répétée. La plupart des principales espèces piscicoles lacustres (espèces suivies dans l'étude de Gillet (1989) : le brochet, la perche et le gardon) sont relativement éclectiques par rapport à la nature du substrat qui recueille les œufs mais sont exigeantes concernant sa forme et sa profondeur d'immersion. Parmi ces matériaux, Gillet (1989) a testé des branches d'environ 1 m de long de conifères (feuillage persistant et dense) : l'épicéa (*Picea excelsa*), le genévrier (*Juniperus communis*) et le cyprès (*Cupressus glabra*). Les branches d'épicéa sont les moins chères et les plus efficaces pour le brochet, le genévrier est presque aussi efficace, ce qui n'est pas le cas pour le cyprès. De plus, différentes espèces viennent pondre successivement sur les mêmes frayères. Toutes les espèces acceptent de poser leurs œufs sur ces structures artificielles mais avec des comportements différents vis-à-vis des frayères flottantes selon l'espèce.

- Frayères semi-naturelles

Les frayères semi-naturelles sont principalement utilisées pour améliorer la reproduction du brochet même si elles peuvent aussi concerner d'autres espèces. Elles sont constituées d'une digue avec un système de vidange et fonctionnent comme suit. La frayère protégée par la digue est mise en eau (janvier-mars) pour permettre l'entrée des individus (adultes géniteurs). La digue est ensuite fermée durant la période de marnage ; la frayère est maintenue en eau et à niveau stable permettant l'incubation des œufs et le développement des juvéniles. Les géniteurs de la frayère peuvent être pêchés et relâchés dans le plan d'eau pour éviter le cannibalisme. Enfin, la frayère est vidangée en début d'été, les juvéniles sont éventuellement capturés et relâchés dans d'autres zones afin d'éviter le cannibalisme. La végétation peut ensuite se redévelopper jusqu'à la prochaine mise en eau ([Figure 11](#)).

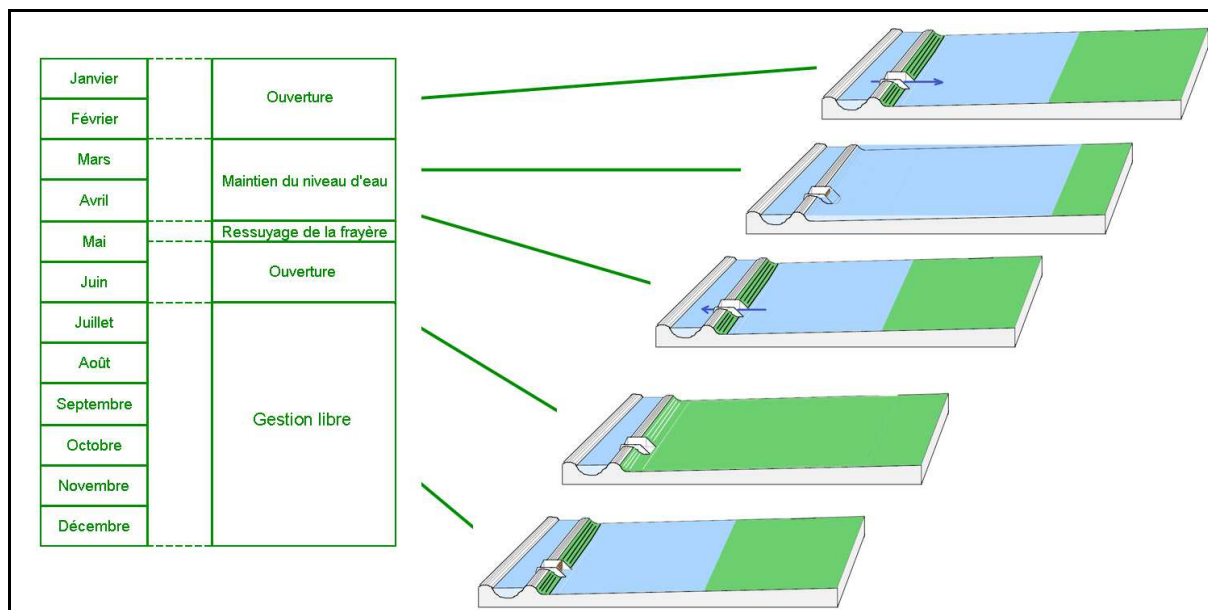


Figure 11 : Principe de fonctionnement d'une frayère semi-naturelle ; exemple issu de la mise en eau d'une zone en contact avec un cours d'eau (vanne) et calendrier pouvant varier tout en respectant les étapes (FDPPMA 17)

Enfin, les mesures de restauration d'habitats (création de lônes, végétalisation de berges, installation de radeaux végétalisés) constituent une approche moins ciblée sur la reproduction piscicole. La création de lônes (zones peu profondes bordées de végétation) peut s'effectuer par construction d'une digue à l'entrée d'un bras mort existant afin de contrôler le niveau d'eau de celui-ci ou par remodelage/creusement de la berge. Cette technique est similaire dans son fonctionnement à celle de la frayère semi-naturelle. Elle est peu courante actuellement mais permet une protection des habitats aquatiques et une diversification des zones rivulaires associées. La végétalisation nécessite quant à elle l'utilisation de végétaux adaptés au marnage, qui puissent résister aux phases immergées et émergées plus ou moins longues au cours de l'année. Le choix des espèces à planter ou semer dépend également de l'objectif de l'aménagement (paysager, fonctionnel, écologique) et les techniques de génie écologique sont choisies et testées en fonction des contraintes du site (Fraissé, 1999). Enfin, les radeaux végétalisés sont des structures flottantes semi-rigides recouvertes de plantes aquatiques qui servent de zone de reproduction pour les poissons phytophiles mais constituent également un habitat pour de multiples espèces (aquatiques ou terrestres : insectes, amphibiens, oiseaux). Le système racinaire procure une zone refuge propice au développement des larves et alevins et constitue une source d'alimentation. Pareillement à la végétalisation, il est important de choisir les espèces adaptées au milieu et indigènes (exemple : iris et carex). Comme la création de lônes, les radeaux sont encore peu utilisés en retenue.

Le choix des techniques est à réaliser selon les objectifs à atteindre. Chacune possède avantages et limites mais peu de suivis ont été effectués ce qui limite une comparaison objective. Néanmoins, il semble intéressant d'un point de vue écologique de privilégier la création de lônes et de frayères semi-naturelles ainsi que la végétalisation. Si la modification des rives s'avère compliquée ou impossible les frayères artificielles et radeaux végétalisés constituent une solution adaptée. Notons que toutes les techniques nécessitent un investissement important en termes de moyens humains et financiers (Tissot and Gilbert, 2016).

2.4. Méthodes de suivi

Les suivis d'opérations de restauration sont indispensables pour évaluer l'efficacité des actions menées. Ils sont cependant peu nombreux et, lorsqu'ils sont existants, ils concernent souvent l'année suivant les travaux mais pas le long-terme et comportent rarement des états initiaux complets. Ils peuvent être réalisés en s'appuyant sur des protocoles scientifiques mais aussi uniquement par observations visuelles (les deux pouvant être complémentaires). De plus, des données sont parfois perdues suite à des changements de personnel qu'il faut donc anticiper au maximum pour assurer de bonnes conservation et traçabilité des données (Navarro and Stroffek, 2015).

Différentes méthodes/techniques de suivi sont retrouvées dans la littérature ; elles sont plus ou moins documentées avec des résultats obtenus à partir des retours d'expérience partiels et variables (Jeudy *et al.*, 2012b).

Concernant la faune (diversification d'habitats et renforcement des populations), la mesure de l'utilisation du milieu créé et l'évaluation du succès reproducteur, de la survie et du comportement des individus peuvent passer par des inventaires d'espèces présentes et l'évaluation de la diversité spécifique. Notons que ce point est principalement axé sur les communautés piscicoles (Jeudy *et al.*, 2012b).

D'autre part, afin d'évaluer l'efficacité des actions de protection des berges (lutte contre l'érosion non naturelle), la mesure de la vitesse d'érosion et de la reprise de la végétation (issues des actions en génie végétal) sont utilisées (Jeudy *et al.*, 2012b).

Les différents bioindicateurs utilisés dans le cadre de la DCE sont une base à laquelle on peut recourir lors de suivis de restauration pour évaluer l'état et les trajectoires des communautés de diatomées, macrophytes, macro-invertébrés, oligochètes et poissons. Concernant le suivi des communautés de macro-invertébrés, une méthode conforme à la DCE a en outre été développée afin d'évaluer les dégradations morphologiques des zones littorales lacustres (Miler *et al.*, 2013). Cette méthode est basée sur un ensemble de données couvrant plusieurs régions à l'échelle européenne (Allemagne, Irlande, Suède, Italie, Danemark, Finlande, Royaume-Uni). Elle utilise un protocole d'échantillonnage standardisé pour obtenir deux indices multi-métriques. Des améliorations doivent encore être apportées afin de valider ces indices et d'appliquer la méthode à large échelle de manière pratique : l'intégration des indices à l'échelle du plan d'eau (et non pas de la station), l'élargissement des données, pour une plus grande précision, afin d'éviter un effet de la saison d'échantillonnage et un effet de l'état trophique du plan d'eau, ainsi que l'élargissement et la diversification des données à d'autres pays, types de plans d'eau et régions géographiques pour rendre la méthode plus robuste.

Le suivi des communautés piscicoles fait davantage l'objet d'intérêt. Afin d'avoir une indication directe de l'activité de reproduction des poissons, les larves sont utiles et permettent un suivi sur le long-terme, notamment dans le cadre d'actions de restauration d'habitats de reproduction. Les larves constituent un excellent indicateur de qualité de ceux-ci et fournissent une mesure directe du succès reproducteur. Il est cependant intéressant de comprendre les structures spatiales et temporelles des communautés de larves de poisson pour réduire les efforts d'échantillonnage tout en ayant une méthode efficace (Pritt *et al.*, 2015). Lors du suivi, il est important de garder à l'esprit que la reproduction des poissons dépend notamment de la photopériode, de la température, de la concentration en oxygène, du substrat de ponte, de la protection que fournit la zone de ponte, ou encore du régime hydrologique et climatique (Stefan *et al.*, 1995; Dumonceau and Gilles, 2012). La survie des larves pendant les premières semaines de vie dépend également fortement des facteurs climatiques (Gillet, 1989).

Les méthodes de suivi des communautés piscicoles reposent sur plusieurs techniques reprises ci-après. Bien que des approches basées sur l'emploi de filets puissent être mises en œuvre et fournir des données fiables dans certaines circonstances, nous privilégions ici les techniques d'échantillonnage n'induisant pas de mortalité et le moins de perturbations possible pour les individus.

2.4.1. LA CAPTURE ET L'IDENTIFICATION D'INDIVIDUS

Il s'agit principalement de techniques d'échantillonnage passives, c'est-à-dire qui se basent sur le mouvement des poissons vers les pièges. Les techniques actives ont pour principe l'utilisation de matériel manipulé par l'homme allant à l'encontre des poissons (exemple : pêche électrique) (Siron, 2015).

- **La pêche électrique** (Olivier *et al.*, 1996; Rigaud *et al.*, 2008; Tomson *et al.*, 2010; Paillisson, 2015; Siron, 2015)

La pêche électrique consiste à établir un champ électrique (ondes sphériques) entre une cathode (pôle négatif) et une anode (pôle positif) plongées dans l'eau. Le courant induit une nage forcée des individus vers l'anode. En se rapprochant de celle-ci, ils entrent en tétanie. Ils sont alors capturés avec une épuisette et sortis du champ électrique. Ils récupèrent ensuite petit à petit toute leur mobilité. Les individus peuvent ensuite être identifiés, pesés et mesurés. La manipulation doit être rapide pour limiter les désagréments et les conditions de mise en œuvre doivent être appropriées pour éviter les mortalités.

Deux méthodes existent afin d'échantillonner les communautés piscicoles. D'une part, la pêche électrique en continu, où l'échantillonnage s'effectue sur une zone d'habitat homogène délimitée, notamment en rive, et d'autre part, l'échantillonnage ponctuel d'abondance (EPA) où la pêche électrique est réalisée par points (l'anode est lancée et remontée à la verticale du point), ceux-ci étant représentatifs d'une certaine étendue spatiale (exemple : surface de 1 m²). Dans les deux cas, la pêche peut s'effectuer à pied ou à partir d'un bateau, avec un appareil portatif ou non (différents modèles existants). C'est une méthode adaptée aux milieux peu profonds.

Cette technique présente une grande efficacité de capture et un faible taux de mortalité. Elle nécessite toutefois un matériel approprié (wadders, gants isolants, etc.), une formation du personnel et un minimum de trois personnes. Enfin, il est important de prendre en compte plusieurs éléments influençant l'efficacité de l'échantillonnage : l'intensité décroissante du champ électrique avec l'éloignement par rapport à l'anode, la turbidité, la hauteur d'eau, la température et surtout la conductivité de l'eau, ainsi que l'espèce, la position et la taille des individus (la méthode semble moins efficace sur les petits poissons – espèce, stade de vie).

- **La capture de juvéniles par le biais de verveux** (Roul and Besse, 2013; Rimond and Lechêne, 2014; Siron, 2015; PNR_Seine-Normande, 2016)

Les verveux sont des pièges pouvant être simples ou doubles (**Figure 12**). Les verveux simples sont constitués d'un filet en forme d'entonnoir avec deux ailes permettant de rabattre les poissons vers le fond. Les verveux doubles sont constitués de deux entonnoirs reliés par un filet (paradière centrale) rabattant les individus d'un côté ou de l'autre, vers les entonnoirs. Les entonnoirs sont formés de

plusieurs cerceaux de taille décroissante, reliés entre eux, et empêchant la sortie des poissons. Chaque extrémité des verveux est fixée avec un piquet, la partie supérieure des ailes ou de la paradière possède des flotteurs, la partie inférieure est lestée. La taille des mailles est variable (de 1.5 mm à 15 mm), homogène sur tout le filet (exemple : 4 mm) ou décroissante de l'entrée vers le fond du piège (exemple : verveux DCE de 15 à 8 mm). La longueur du verveux peut également varier.

Ce type de piège permet de cibler les poissons se déplaçant le long des berges. Les verveux sont donc intéressants à utiliser en zone littorale, dans les eaux de faible profondeur et dans les eaux calmes (notamment contrainte possible de colmatage pour les petites tailles de maille).



Figure 12 : Verveux double et son système de série d'entonnoir (Pôle Onema-Irstea, 2016)

- **La capture de juvéniles/alevins par le biais de pièges, avec appâts lumineux** (Olivier *et al.*, 1996)

Ces pièges (Figure 13) sont constitués de petites cages en Plexiglass de 0.7 m de long, de 0.2 m² de surface d'entrée et un double système d'entonnoir avec des fentes de 1.5 cm permettant de piéger les individus. Un corps mort fixé à une corde permettant de régler la profondeur et deux flotteurs sont attachés au dispositif. Enfin, une source lumineuse (bâtonnet phosphorescent ou lampe de plongée) est placée dans le fond du piège pour effectuer l'échantillonnage de nuit (pose au crépuscule, relève en début de matinée). Les individus ciblés par ces dispositifs sont les poissons juvéniles dont la taille se situe entre 3 et 7 cm. La méthode d'échantillonnage des alevins dans cette gamme de taille est pertinente à utiliser car ces individus sont trop grands ou trop petits pour être capturés respectivement avec des filets à ichtyoplancton ou des filets maillants.

Ces engins sont de petite taille et assez faciles à mettre en œuvre, ils semblent donc assez bien adaptés pour la réalisation de répliquats spatiaux et temporels dans le contexte de suivis. La zone d'échantillonnage, quant à elle, n'est pas limitée avec ce dispositif en termes de profondeur (pleine eau ou zone littorale peu profonde). Une détermination des pôles d'attraction du lac peut cependant être nécessaire selon la stratégie d'échantillonnage choisie.

Enfin, la période d'échantillonnage doit être déterminée en fonction des espèces ciblées et des conditions météorologiques particulières (si c'est le cas). Dans le cas d'une période inappropriée, l'interprétation des résultats doit en tenir compte (exemple : période trop précoce et individus de taille insuffisante pour être capturés).

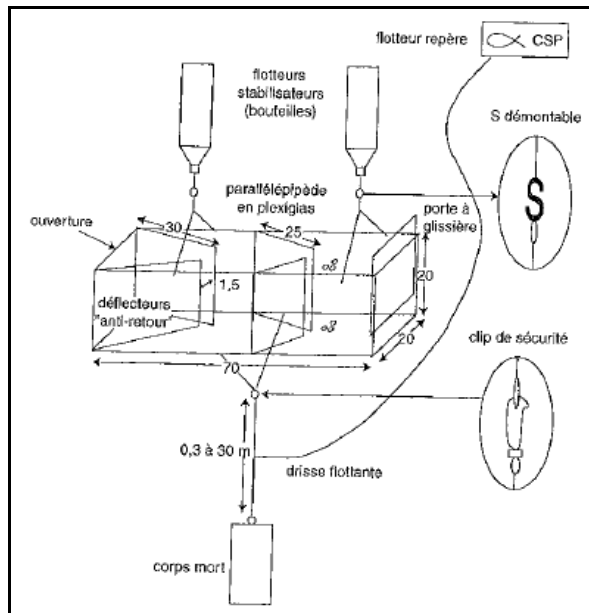


Figure 13 : Schéma de conception des pièges à alevins (dimensions en cm) (Olivier *et al.*, 1996)

- **La capture de juvéniles/alevins par le biais de Care®** (ECOCEAN; Fonbonne *et al.*, 2015)

Le Care® est un piège lumineux développé, initialement en milieu marin, pour capturer des larves et post-larves de poissons ainsi que des invertébrés. Il est composé d'un filet conique en PVC avec un collecteur en fin de cône et d'un caisson flottant pour la source lumineuse se positionnant juste sous la surface (Figure 14). Une bouée, avec corde et poids mort, est relié au système afin de le positionner à l'endroit voulu.

Le principe du Care® est basé sur le phototropisme, c'est-à-dire que les larves et juvéniles sont attirés par les sources lumineuses, qui jouent un rôle lors de la recherche de nourriture. Il dépend également du thigmotropisme, comportement des individus qui, au contact d'un objet flottant, descendent le long de celui-ci (phénomène existant en milieu marin, à valider en milieu dulcicole).

Le système s'est vu testé en eau douce récemment et fournit de bons résultats. Il nécessite un approfondissement afin de valider son efficacité en tant que technique de suivi. Notons également qu'il nécessite une profondeur permettant au minimum le déploiement du piège (longueur de base : 280 cm, adaptable mais peu propice aux zones littorales).

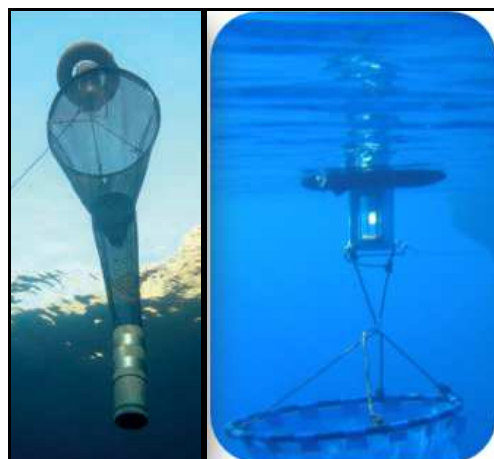


Figure 14 : Care® vu du dessous (à gauche) avec son caisson flottant contenant la source lumineuse (à droite) (ECOCEAN)

2.4.2. L'UTILISATION DE L'ADN ENVIRONNEMENTAL

(Ficetola *et al.*, 2008; Valentini *et al.*, 2009; Dejean *et al.*, 2011; Jerde *et al.*, 2011; Miaud *et al.*, 2012; Marranca *et al.*, 2015; SpyGen, 2017)

L'ADN environnemental (ADNe) peut être contenu dans l'eau, le sol, les fèces ou autres excréments libérées dans l'environnement par les organismes et permet la détection d'espèces sans avoir besoin de les capturer. Sa persistance dans l'environnement dépend de sa vitesse de dégradation (biotique et abiotique), ainsi que de la température du milieu et de l'intensité lumineuse. En milieu aquatique, il persiste moins d'un mois, voir uniquement quelques jours.

L'ADNe n'est actuellement pas utilisé dans le cadre de suivi d'actions de restauration mais plutôt comme méthode complémentaire d'inventaire de la biodiversité, de détection d'espèces invasives ou d'espèces rares menacées. Il est également parfois utilisé afin de déterminer l'origine de populations. L'utilisation de l'ADNe possède ses limites mais est une possibilité à considérer pour le futur et permet déjà de déterminer des abondances, des classes d'âge, des tailles et le sexe d'individus présents dans le milieu. Le taux de détection de l'ADN dans l'environnement est bon, la technique efficace, mais il reste encore du développement à réaliser concernant l'identification, la qualité d'échantillonnage (contamination, etc.), les stratégies d'échantillonnage, l'analyse des résultats, la construction de bases de données, des améliorations des techniques génétiques, etc. Peut-être une méthode pourra-t-elle être développée pour suivre l'évolution de la diversité génétique au niveau d'une station précise avant/après travaux.

2.4.3. L'OBSERVATION ET L'IDENTIFICATION D'INDIVIDUS

- **L'observation subaquatique (plongée en apnée ou avec bouteille)** (Feral, 2013; Manny *et al.*, 2015; Auquitaine_Landes_Récifs, 2016; Lemar_UMR6539, 2016)

L'usage de la plongée scientifique dans le contexte professionnel (que ce soit une vocation scientifique ou autre) est soumis à une réglementation (décret n° 2011-45 du 11 janvier 2011) qui définit les qualifications requises pour la pratique et instaure quatre classes de plongeurs. Des adaptations selon les structures (laboratoire, université, etc.) existent et, dans tous les cas, il est obligatoire de suivre les dispositions concernant la formation, l'encadrement, les équipements, la pratique et le suivi médical. Cette pratique est donc soumise à un certain nombre de contraintes dont il faut tenir compte.

Elle est cependant répandue notamment en milieu marin côtier (chercheurs, ingénieurs, techniciens) à des fins de collecte de matériel vivant, de mise en œuvre d'expérimentations, de prise de vue photographiques ou vidéos et d'observations visuelles (identification d'espèces, description de substrats, etc.) avec prises de notes sur des fiches immergeables. Un minimum de 2 plongeurs est requis et des protocoles sont à établir en fonction des objectifs fixés.

- **l'enregistrement vidéo** (Tomson *et al.*, 2010; Schobernd *et al.*, 2014; Manny *et al.*, 2015; Struthers *et al.*, 2015)

Les premières unités de caméras subaquatiques datent des années 60 et mesuraient environ 1 m de haut, 0.5 m de diamètre. Elles nécessitaient un enregistreur et une batterie basés hors de l'eau. Elles n'étaient donc pas très pratiques pour une large utilisation. Dans les années 90 et 2000, les caméras digitales portables ont commencé à être développées mais possédaient néanmoins quelques

contraintes telles qu'une courte durée de vie des batteries, le besoin d'un boîtier de protection ou encore une taille encombrante. De plus, elles n'étaient pas non plus forcément adaptées aux environnements mouvementés.

Actuellement, on peut voir la présence de caméras d'action (Action Camera, exemple : GoPro, Garmin, etc.) grâce au développement de la technologie d'imagerie et aux systèmes mécaniques innovants. Elles sont beaucoup utilisées dans le cadre de sports extrêmes et intéressent maintenant les chercheurs. Ces caméras présentent un certain nombre d'avantages : un bon rapport coût-efficacité, de la polyvalence, une carte mémoire de grande capacité, des images haute résolution, des lentilles grand-angle (« fisheye lenses », 180°) ou un système de lentilles rotatives ou un système de multiples lentilles (plusieurs angles). Elles sont durables, peu intrusives et résistantes aux chocs et à la pression. De plus, il existe la possibilité d'avoir une option flexible de programmation afin de réaliser des enregistrements différés. Le choix de modèle doit être réfléchi en fonction du coût et du niveau de résolution dont on a besoin pour l'étude. Il est également utile de se poser plusieurs questions, avant le déploiement, relatives aux conditions minimales de milieu (transparence de l'eau), à la fixation de la caméra, à l'endroit où on souhaite la placer, si elle nécessite une source lumineuse artificielle supplémentaire et s'il faut utiliser plusieurs caméras.

Enfin, les caméras produisent des données qu'il faut ensuite exploiter. Cependant, ce sont des données qui peuvent être difficiles à analyser et coûteuses en temps. De plus, il peut exister des problèmes de perception de signal visuel à cause de différents facteurs (panne de batterie, image floue, problème de luminosité ou turbidité, problème lié à la profondeur, biofouling, vandalisme, etc.). En termes de temps d'analyse, il est possible d'effectuer des sous-échantillonnages et d'ensuite extrapoler. L'inconvénient est la possibilité de passer outre d'informations importantes ou de généraliser trop fortement. De plus, il est fondamental de bien réaliser le plan d'échantillonnage car il existe un risque fort de compter plusieurs fois le même individu passant de manière répétée dans le champ de vision de la caméra (si pas de moyen de l'identifier clairement).

Schobernd *et al.* (2014) ont utilisé deux mesures : le « nombre maximum de poissons dans une image donnée durant l'intervalle de visionnement » (MaxN) et le « nombre moyen de poissons observés dans une série d'instantanés pris durant un intervalle de visionnement » (MeanCount). Ils ont déterminé le rapport de ces mesures avec l'abondance réelle des poissons dans le milieu, à l'aide une caméra unidirectionnelle et fixe (il existe d'autres approches telles que des caméras avec leurre ou des caméras à rotation). Les résultats montrent que le MeanCount est représentatif de l'abondance réelle. Tandis que le MaxN sous-représente les changements de celle-ci.

2.4.4. LA DETECTION DES INDIVIDUS PAR TELEMETRIE OU HYDROACOUSTIQUE

(Moursund *et al.*, 2003; Scheuerell and Schindler, 2004; Daroux *et al.*, 2014; Roy, 2014; Tušar *et al.*, 2014; Bothmann *et al.*, 2016)

La télémétrie fait appel à des procédés radioélectriques ou acoustiques afin de mesurer des distances. Le positionnement et déplacement de poissons peuvent donc être déterminés au moyen de signaux (marques et émetteurs). La portée de ceux-ci dépend cependant de plusieurs facteurs tels que la conductivité, la température, la méthode de positionnement des dispositifs, etc.

Le principe est de fixer un émetteur sur les individus à suivre et de mettre en place un réseau d'hydrophones (détectant les signaux dans le milieu) afin de pouvoir détecter les poissons dans un certain rayon de l'hydrophone ou les localiser par triangulation (un individu détecté par trois hydrophones voit sa position déterminée – [Figure 15](#)). Il faut donc, d'une part, capturer les individus

et les marquer (anesthésie et intervention chirurgicale pour placer l'émetteur) et, d'autre part, mettre en place un réseau d'hydrophones synchronisés dans le milieu de façon à couvrir la zone d'échantillonnage définie. A cela s'ajoutent des enregistreurs de température nécessaires à la bonne estimation de la vitesse du son dans l'eau, un GPS et un logiciel permettant la gestion des données obtenues. La méthode est intéressante pour quantifier l'attractivité d'un site, même si c'est une image partielle dans la mesure où tous les poissons ne peuvent pas être marqués. Cependant, elle est relativement lourde à mettre en place pour des suivis à appliquer à large échelle. De plus, elle implique une intervention au niveau des individus.

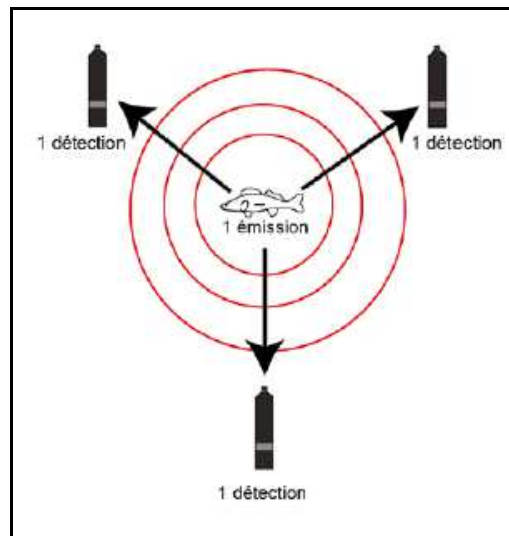


Figure 15 : Détection d'un individu par triangulation (Roy, 2014)

L'hydroacoustique est quant à elle une méthode utilisant uniquement les propriétés du son dans l'eau. Elle peut être utilisée dans le cadre plus général de la détermination de la morphologie des plans d'eau et de la disponibilité des habitats (exemple de matériel : échosondeur BIOSonics DT6000) ou, plus spécifiquement, pour étudier les communautés de poissons (détection, identification, mesure, description du comportement) (exemple de matériel : sonar haute fréquence DIDSON - Dual-frequency Identification Sonar).

Le principe est basé sur l'émission d'ondes acoustiques dont les échos produits par les individus sont ensuite renvoyés vers l'appareil de mesure qui les capte, les localise et les caractérise. Cette technique présente l'avantage d'être peu intrusive et d'être adaptée aux conditions de mauvaise visibilité (nuit, turbidité). Néanmoins, le traitement des données est chronophage et elle semble peu efficace concernant les individus de petite taille (taille détectée entre 10 à 60 cm pour le sonar DIDSON par exemple) et présente des limites en milieu peu profond. Notons que la détection et l'estimation de la taille dépendent de la taille réelle des individus, de la distance par rapport au transmetteur et de l'orientation du corps (les individus perpendiculaires au faisceau d'ondes sont bien détectés (en tout cas, leur taille bien estimée), au contraire des individus dont l'alignement est parallèle au faisceau).

3. Premières réflexions sur la réalisation de protocoles de suivis

Cette partie de document concerne un début de travail qui se poursuivra au cours de l'année 2017. Il ne s'agit pas de méthodes de suivi et protocoles aboutis, mais bien de tests et réflexions quant aux meilleurs moyens d'évaluer l'efficacité d'opérations de restauration. Une phase exploratoire (visant les démarches exhaustives, idéales) et une phase de mise en application adaptée aux réalités de terrain seront distinguées.

3.1. S'inspirer du suivi scientifique minimal des cours d'eau

Afin de procéder à des suivis harmonisés et cohérents, il est intéressant de s'inspirer des méthodes de suivi scientifique minimal des cours d'eau (Malavoi and Souchon, 2010). Des constats généraux ont été faits par les auteurs. Ceux-ci identifient notamment un problème de diagnostic préalable (on se focalise sur les symptômes et pas sur les altérations des processus à large échelle), un souci de définition d'objectifs mesurables, des difficultés de prendre en compte les temps de réponse des bioindicateurs et de différencier l'effet de l'action de restauration de celui d'autres facteurs environnementaux (climat, hydrologie, thermie, etc.). Il est donc nécessaire de guider la mise en place de suivis scientifiques minimaux homogènes à l'échelle nationale.

Il s'agit tout d'abord d'effectuer un diagnostic par une étude préalable afin de déterminer les éléments du fonctionnement naturel, les altérations hydromorphologiques existantes et les dysfonctionnements liés. Ensuite la station à restaurer doit être décrite et bénéficier d'un état initial. Si celui-ci est impossible, un proxy peut être utilisé en prenant une station similaire altérée et non restaurée (solution alternative). Une station témoin (ne subissant pas l'altération) doit idéalement être également choisie. Ces stations devant être les plus représentatives possible du milieu à restaurer.

Lorsque l'on réalise un suivi, il existe une difficulté à déterminer la trajectoire du fonctionnement hydromorphologique. D'une part, car il peut se traduire par des trajectoires différentes selon les différents groupes biologiques (invertébrés, poissons et macrophytes, par exemple, ont leur réponse propre) et, d'autre part, car ces trajectoires ne sont pas forcément linéaires et peuvent être influencées par les événements hydrologiques peu fréquents (crues, étiages), l'échelle spatiale de l'opération de restauration, la qualité de l'eau, etc... Malgré ces difficultés, il faut s'assurer qu'au cours des années de suivi, il y a une trajectoire d'amélioration.

Différents compartiments peuvent être suivis : les paramètres physico-chimiques de base (température, oxygène dissous, pH, conductivité, transparence) ainsi que les compartiments hydromorphologique (protocoles de description standardisé) et biologique (phytoplancton, zooplancton, macrophytes, macro-invertébrés, poissons). Des prises de vue, à partir de positions déterminées et stables au cours du temps (approche visuelle – exemple en plan d'eau : suivi de la dynamique de roselières (Dienst *et al.*, 2004)), avant, pendant et après travaux sont également intéressantes pour les aspects scientifiques et de communication. Afin de suivre les compartiments biologiques, il est important de poser préalablement des hypothèses et d'établir une stratégie d'échantillonnage. Idéalement, le suivi se compose d'un état initial et d'un état post-travaux. Concernant les cours d'eau et les compartiments « macro-invertébrés » et « poissons », les mesures sont prévues pendant trois ans avant les travaux et jusqu'à sept ans après travaux (cela, étant donné le temps différent de réponse des communautés). Les protocoles sont à standardiser au maximum, pour une utilisation à large échelle (nationale). De plus, il est nécessaire d'anticiper la validation et la bancarisation des données ainsi que de prévoir une synthèse et un retour d'expérience (Malavoi and Souchon, 2010).

3.2. Premiers tests de méthodes

Au cours de l'année 2016, plusieurs méthodes de suivi ont été testées afin d'élaborer des protocoles. Bien que ce ne soit pas le seul compartiment à suivre, nous nous sommes concentrés sur le suivi des poissons juvéniles/alevins. Deux tests ont été effectués ; ils sont exposés ci-après mais leurs résultats seront analysés en détail en 2017.

Les deux tests se sont déroulés sur trois jours/deux nuits consécutifs respectivement du 28 au 30 juin et du 06 au 08 septembre 2016, avec des plans d'échantillonnage légèrement différents. Le plan d'eau choisi est l'étang des Aulnes à Saint-Martin-de-Crau (13). La station d'étude (Figure 16) est constituée d'une zone d'enrochements à proximité de la mise à l'eau suivie d'une roselière.

Les méthodes choisies parmi les différentes possibilités existantes sont (Figures 17 et 18):

- la pêche électrique par points
- la capture de juvéniles par le biais de verveux (maille de 4 mm)
- la capture d'alevins/juveniles par le biais de pièges lumineux en zone littorale
- la capture de larves/alevins/juveniles par le biais de Care ® adapté à la zone pélagique
- le suivi par caméra subaquatique



Figure 16 : Station d'étude constituée d'enrochements et d'une roselière sur l'étang des Aulnes (13)

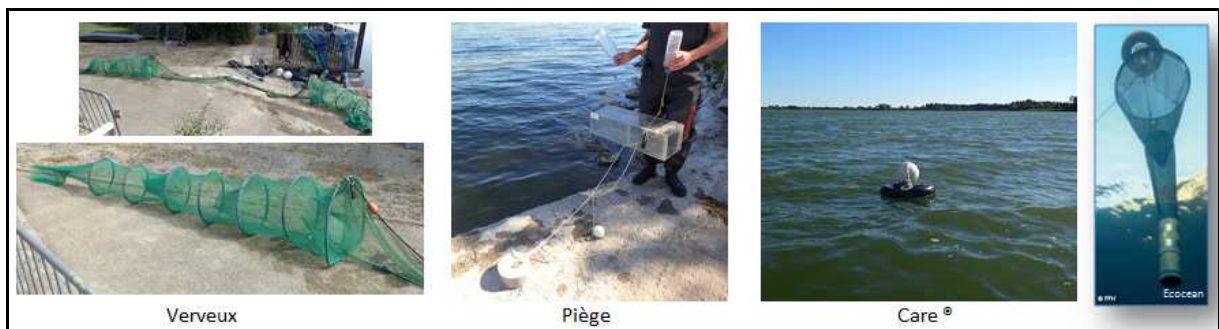


Figure 17 : Trois types de pièges utilisés lors des premiers tests de suivi de poissons juvéniles/alevins (Verveux, Pièges lumineux pour zone littorale, Care ® pour zone pélagique)

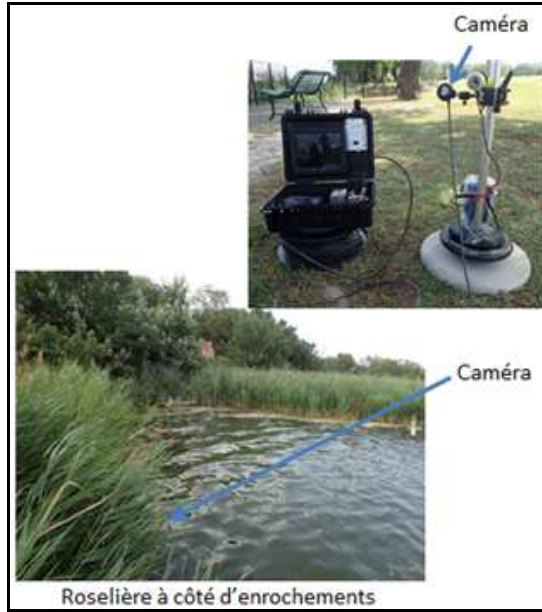


Figure 18 : Système d'enregistrement par caméra subaquatique

4. Enquête et création d'un réseau de sites pilotes

Un des objectifs du projet « Restauration hydromorphologique des plans d'eau » est de mettre en place un réseau de sites pilotes sur lesquels mesurer l'impact d'actions de restauration sur le long terme. Pour cela, une enquête nationale a été effectuée auprès de différents acteurs potentiels. En effet, c'est ainsi que nous avons pu identifier des opérations de restauration prévues dans un futur proche. La prochaine étape est d'analyser les diverses possibilités par échanges avec les personnes de contact pour, finalement, faire une sélection des collaborations envisageables. Actuellement, le nombre de sites potentiels avec projet(s) prévu(s) dans le futur, ciblés sur l'hydromorphologie, s'élève à 18. A ceux-ci s'ajoutent 12 sites de type gravière à l'échelle nationale.

L'objectif idéal de ce réseau de sites pilotes étant de regrouper un ensemble de retours d'expériences basés sur des suivis les plus standardisés possibles (en partant du diagnostic avec état initial jusqu'à un suivi minimal optimisé), le choix des sites se fera en 2017.

4.1. Méthodologie

L'enquête a été réalisée par le biais d'un questionnaire (envoyé par courrier électronique, cf. annexe) reprenant, d'une part, des questions d'ordre général ou conceptuel et, d'autre part, des questions précises sur les projets réalisés, en cours ou prévus. Les organismes ayant été contactés sont les suivants :

- ONEMA (Office national de l'eau et des milieux aquatiques) : délégations interrégionales (DiR) auxquelles il a été demandé de relayer l'enquête vers les services départementaux (SD),
- Agences de l'Eau,
- FDPPMA (Fédérations départementales pour la pêche et la protection des milieux aquatiques),
- Services environnementaux des DREAL (Directions régionales de l'environnement, de l'aménagement et du logement),
- EPTB (Etablissements publics territoriaux de bassin),
- Structures porteuses des SAGE (Schémas d'aménagement et de gestion de l'eau),
- Syndicats de lac,
- Pôle relais Zones humides,
- Parcs naturels régionaux (PNR) et Réserves naturelles de France (RNF),
- Concessionnaires (Union Nationale des Producteurs de Granulats, Société du Canal de Provence, Compagnie d'Aménagement des Coteaux de Gascogne)

4.2. Résultats de l'enquête – questions d'ordre général ou conceptuel

Le taux de réponse à l'enquête est de 27 %, ce qui permet d'avoir un aperçu intéressant des points de vue des différents interlocuteurs en termes de restauration de plans d'eau et nous pouvons lister un certain nombre de projets dans l'optique de proposer des sites pilotes.

Parmi les interlocuteurs contactés, 13 % ne sont pas concernés par le sujet, 5 % n'ont pas de projets à renseigner mais ont rempli le questionnaire selon les possibilités et 9 % ont complété le questionnaire en fournissant des références de projet (Figure 19).

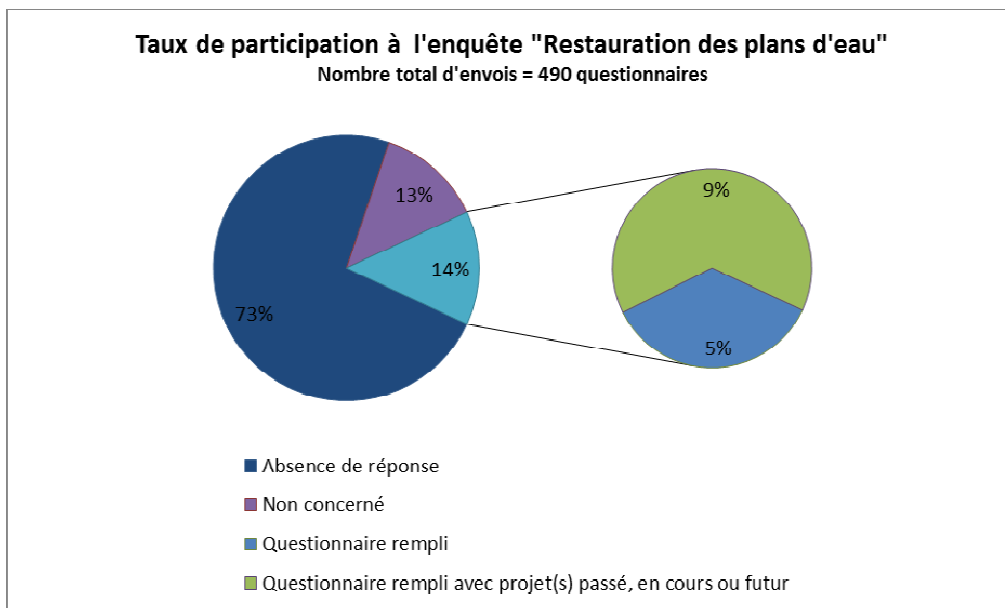


Figure 19 : Taux de participation à l'enquête

Parmi les 14 % d'interlocuteurs ayant rempli le questionnaire, avec ou sans projet(s) précisé(s) (n = 71) (Figure 20), l'échantillon de réponses est dominé pour près d'un tiers des fédérations de pêche et, plus généralement, largement dominé par des structures gestionnaires.

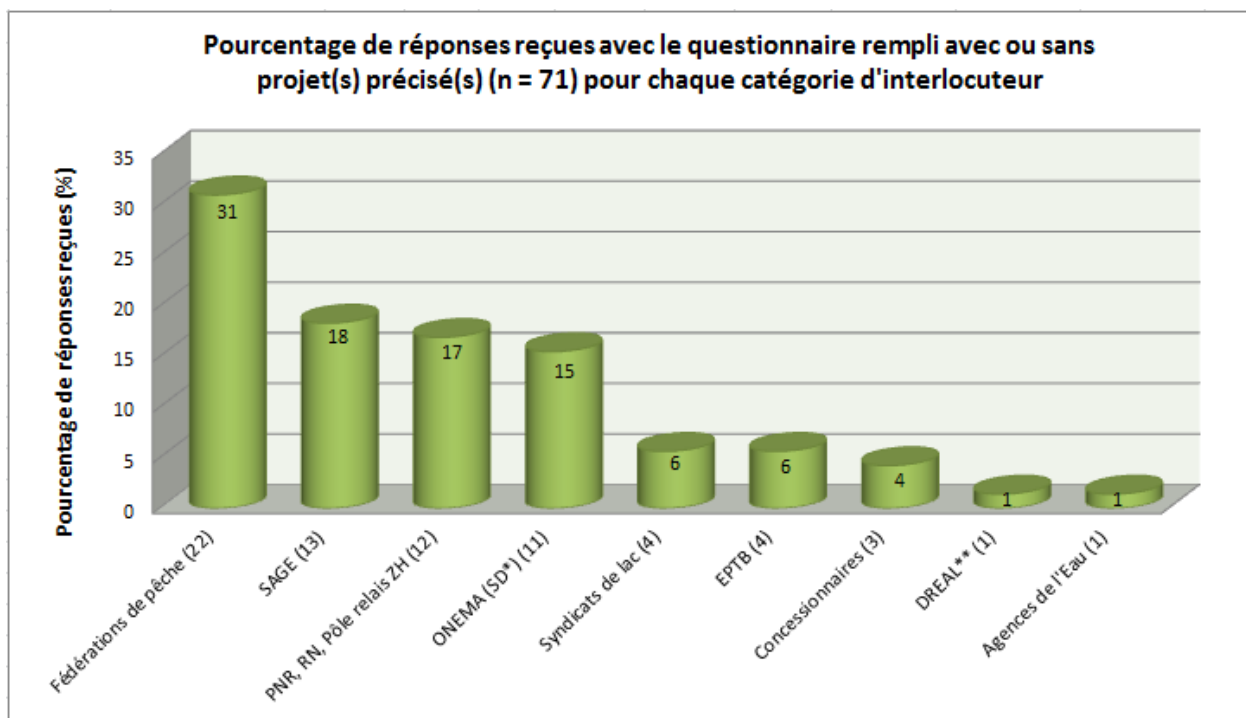


Figure 20 : Pourcentage de réponses avec le questionnaire rempli par catégorie d'interlocuteur (le nombre entre parenthèse à côté du nom des structures correspond au nombre de réponses reçues) ; SAGE (Schéma d'aménagement et de gestion de l'eau), PNR (Parc naturel régional), RN (Réserve naturelle), ZH (Zone humide), ONEMA - SD (Office national de l'eau et des milieux aquatiques - Services départementaux : * 42 ayant reçu le questionnaire), EPTB (Etablissement public territorial de bassin), DREAL (Direction régionale de l'environnement, de l'aménagement et du logement - ** plusieurs services par DREAL – total = 18).

La prise en compte des plans d'eau prend en moyenne 21 % du temps des services, dont un quart environ dédié à la restauration hydromorphologique / des habitats (Figure 21). Mis en regard de la faible proportion de masses d'eau que représentent les plans d'eau (4% en France), le temps qui leur est consacré est au final important. Par ailleurs, la restauration hydromorphologique / des habitats semble d'actualité depuis une dizaine d'années en moyenne.

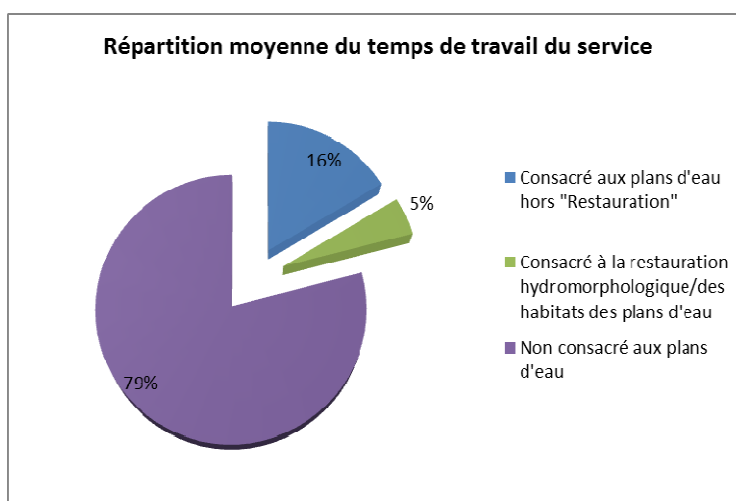


Figure 21 : Répartition moyenne du temps de travail

Un résultat important concerne la distinction entre plans d'eau naturels et artificiels. En effet, une très grande majorité des interlocuteurs (72 %) ne fait pas (ou ne ferait pas) la différence dans le cadre de la restauration (**Figure 22**). Cette observation doit être soulignée car un certain nombre de commentaires met pourtant en évidence une réflexion quant au concept même de restauration des plans d'eau ; sans surprise, le concept étant remis en question dans le cas des plans d'eau artificiels pour lesquels l'état d'origine pourrait consister en l'effacement du plan d'eau.

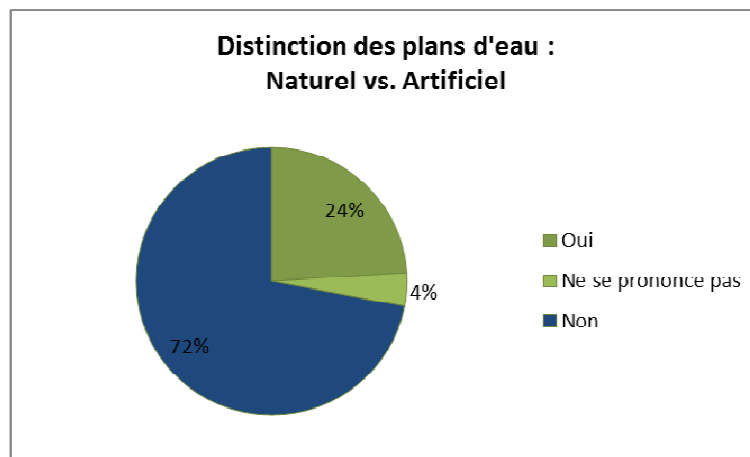


Figure 22 : Distinction du type de plans d'eau

En conséquence logique, dans le concept de restauration hydromorphologique, le retour à l'état écologique d'origine est très peu considéré comme définition appropriée de la restauration. Notons que l'atténuation des impacts négatifs et la mise en œuvre d'actions d'amélioration de la qualité d'eau, des services et des usages correspondent à une vision de la restauration assez répandue. Enfin, de façon réaliste et cohérente avec les objectifs concrets, le retour à un état proche de l'état d'origine (milieu peu perturbé) et, davantage encore, le rétablissement d'une caractéristique naturelle ou d'une fonctionnalité altérée sont les définitions qui correspondent le plus au concept de restauration (**Figure 23**).

Concepts de restauration hydromorphologique

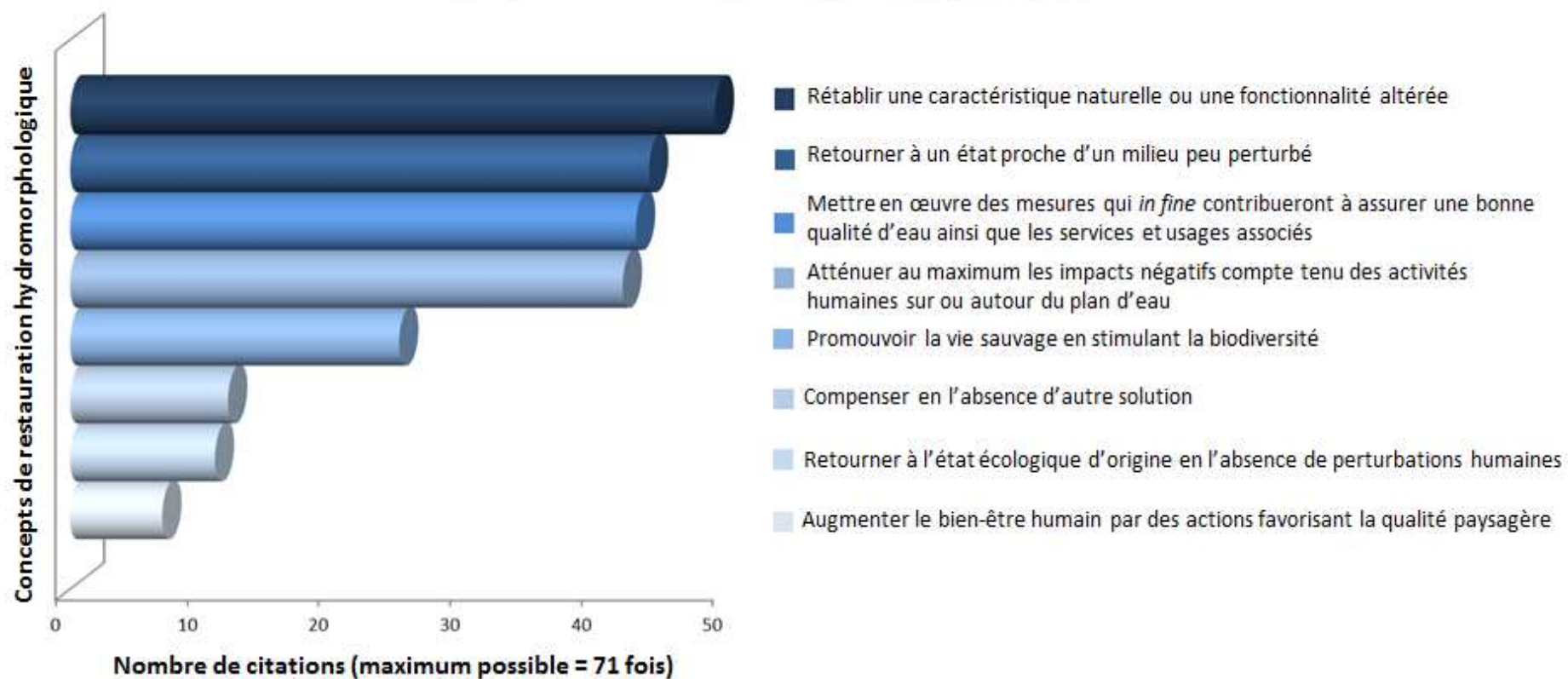


Figure 23 : Concepts de restauration par ordre d'importance

Parmi les objectifs concrets au sein des services contactés, on constate que favoriser la qualité paysagère et/ou certaines activités semble le moins important des objectifs. D'un point de vue plus global, la gestion des risques est considérée avec attention. Quant à l'élimination des espèces « indésirables » et à l'atteinte des objectifs DCE, elles sont importantes mais ne constituent pas des priorités. Au contraire, le rétablissement des caractéristiques physiques, hydrologiques ou fonctionnelles est considéré comme l'objectif concret majeur des actions de restauration hydromorphologique. Enfin, favoriser la biodiversité générale ainsi que spécifiquement les peuplements biologiques sont des objectifs très importants (Figure 24).

Dans les objectifs qualifiés de « très importants », « Rétablir des fonctions... » est de loin le plus cité, suivi par « Favoriser la biodiversité générale... » et « Favoriser des peuplements ciblés... » qui sont tout de même deux fois moins cités. « Atteindre le bon état ou potentiel... » et « Gérer les risques... » viennent ensuite à égalité alors que qualité paysagère et élimination d'espèces indésirables sont peu cités.

Parmi les objectifs « importants », tous ceux liés à l'écologie sont cités à la même fréquence alors que « Gérer les risques... » et « Favoriser la qualité paysagère... » le sont nettement moins. Ces deux derniers objectifs sont un peu plus fréquemment qualifiés d'« assez importants ».

Objectifs concrets de restauration hydromorphologique au sein des services par ordre d'importance

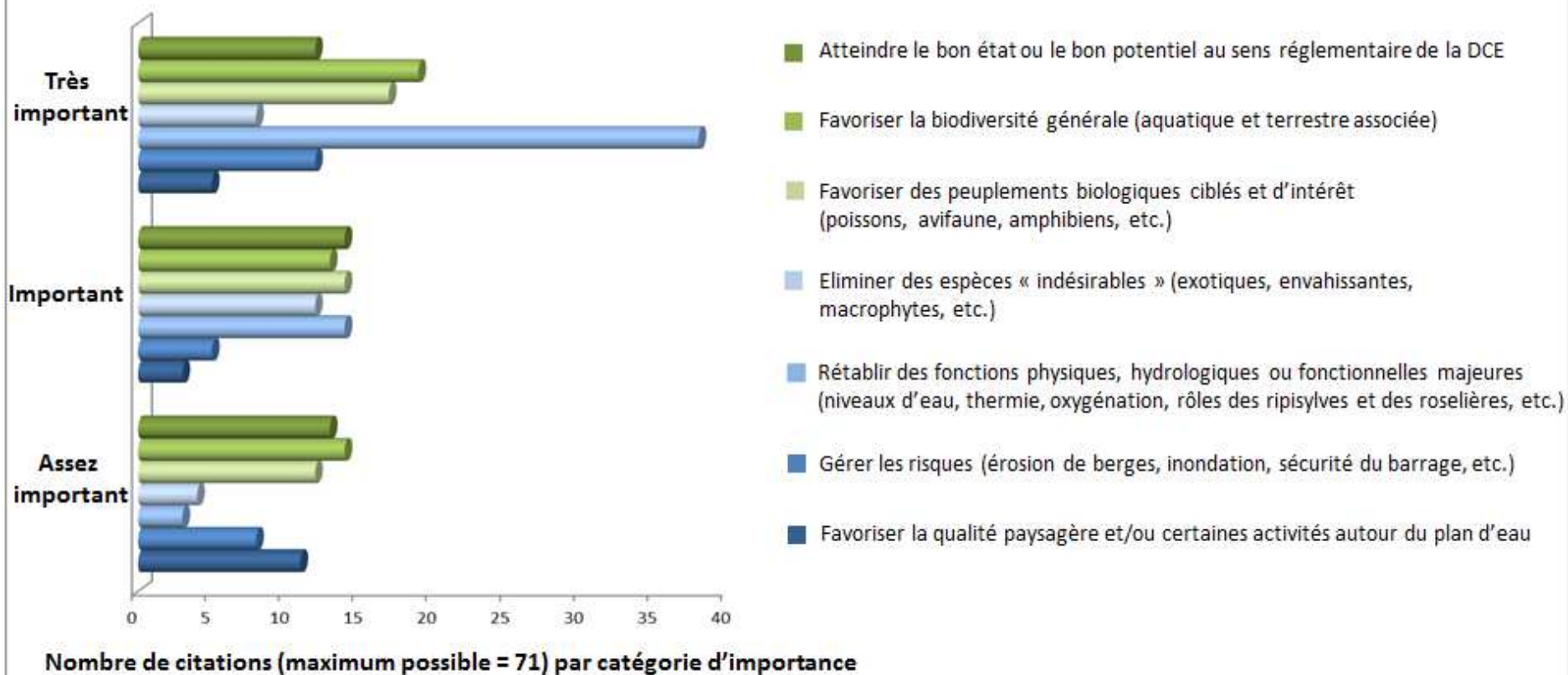


Figure 24 : Objectifs concrets de la restauration hydromorphologique par ordre d'importance

Toujours concernant l'aspect concret, les critères pour juger qu'un plan d'eau a besoin d'être restauré ou non (**Figure 25**) et les critères utilisés pour juger de la réussite ou de l'échec d'une action de restauration (**Figure 26**) sont résumés ci-dessous.

On retrouve l'importance accordée aux compartiments biologiques (surtout aux peuplements piscicoles – encadrés oranges) et physiques ou fonctionnels (encadrés verts). Il ressort également qu'afin d'évaluer si les objectifs fixés ont été atteints, il faut mesurer l'évolution du ou des critères qui ont justifié la mise en place de l'action, par le biais d'une comparaison entre un état initial et un suivi post-travaux. Enfin, dans le cas de l'évaluation, l'aspect fonctionnel revient à différents niveaux et régulièrement parmi les critères :

- Retour vers un état fonctionnel proche de l'initial et/ou du témoin, compte tenu des contraintes existantes sur le site
- Fonctionnalité et état du plan d'eau par rapport à son origine ou à son usage
- Fonctionnalité écologique restaurée
- Fonctionnalité des zones de reproduction piscicole
- Fonctionnalité vis-à-vis de l'espèce repère définie (brochet le plus souvent)
- Fonctionnement hydromorphologique
- Etat de la chaîne trophique

L'**état de la qualité biologique** fait partie des éléments les plus cités. L'évolution de la faune, la présence et le taux de colonisation d'espèces envahissantes sont également mentionnés. Les inventaires, les suivis DCE ou locaux et l'utilisation d'espèces indicatrices sont cités comme outils, tout comme l'intérêt pour une approche bactériologique ou encore la comparaison d'observations par rapport à un état antérieur.

L'intérêt pour l'**état des peuplements piscicoles** est fortement représenté dans l'ensemble des réponses ; qu'il s'agisse de l'aspect qualitatif (diversité spécifique), quantitatif (densité, taille), structurel ou dynamique (dont reproduction naturelle).

L'**état de la qualité physico-chimique** (et son évolution) revient parmi les critères les plus cités, avec notamment les mesures types (oxygène dissous, nutriments, transparence, etc.).

Les phénomènes de pollution, spécifiquement d'eutrophisation et de bloom algal, sont mentionnés.

L'analyse des sédiments est aussi évoquée.

Les aspects de fonctionnement des plans d'eau viennent ensuite de manière variée dans les réponses. Le **fonctionnement général** ainsi que l'état des lieux limnologique (stratification, physico-chimie) sont proposés. Un **diagnostic technique approprié** est préconisé.

La **morphologie**, l'état des **berges** (morphologie, présence/absence de ripisylve/roselière) et l'état des lieux des **habitats** ainsi que l'étude **bathymétrique** (au besoin) constituent des critères importants. Les degrés de **comblement** et **d'envasement** sont également repris parmi les réponses fréquentes.

Le **fonctionnement hydraulique** avec notamment des mesures de **débit** et la présence ou absence de **variations de niveaux d'eau / marnage** naturel(les) (saisonniers) ou artificiel(les) sont mentionnés dans quelques réponses.

Enfin, la présence de zones humides à proximité ou de **connexions** avec d'autres plans d'eau ou cours d'eau constituent également des critères.

Quelques autres critères d'ordre plus général sont proposés : les **enjeux** historiques, économiques, touristiques, la **vocation** du plan d'eau, les **usages et pressions** (perturbation ou abandon des usages), les **intérêts** écologiques et hydrologiques du plan d'eau, son **potentiel de renaturation** en fonction des coûts et des enjeux, la présence de **risques** d'un point de vue sécurité, l'**aspect visuel** (dégradation des berges, végétation aquatique et rivulaire envahissante ou en régression), l'**opportunité d'intervention**, les **aspects réglementaires et politiques** (sollicitation des élus et des partenaires institutionnels) ou encore l'utilisation, comme outils, de l'analyse diachronique d'anciennes photos/cartes.

Figure 25 : Critères permettant de juger du besoin d'actions de restauration

L'état (évolution/réponse) du **compartiment biologique** fait partie des principaux critères ; l'utilisation d'**indicateurs** est préconisée pour évaluer l'amélioration de l'**état de la faune** (invertébrés, poissons, avifaune) et de la biodiversité en général. On retrouve dans cette catégorie l'accomplissement du **cycle biologique** des espèces cibles, la reproduction d'espèces vulnérables ou patrimoniales et l'absence d'espèces indésirables.

L'intérêt pour l'**état et la dynamique des peuplements piscicoles** est fortement marqué : capacité de recrutement, présence de reproductions naturelles, inventaire piscicole post-reproduction, observation d'œufs ou d'alevins (notamment d'espèces phytophiles), augmentation de la biodiversité piscicole, mesure des densités surfaciques et pondérales des populations et diversité, répartition de la biomasse et recrutement des espèces phytophiles.

L'**évolution de la végétation** est également prise en compte : inventaire floristique, développement d'herbiers de macrophytes, taux de reprise d'une espèce envahissante d'une année à l'autre.

L'évolution et l'amélioration de l'**état physico-chimique** sont mentionnées, avec au moins la présence de paramètres acceptables pour la faune aquatique la plus grande partie de l'année et sur la majorité du plan d'eau.

La mesure de la turbidité est soulignée tout comme l'hétérogénéité de la profondeur du plan d'eau et l'analyse des sédiments.

La qualité **physique** du milieu est reprise plusieurs fois dans les réponses.

L'intérêt pour l'**évolution de l'habitat** est marqué, notamment avec la caractérisation des habitats présents avant et après les travaux (comparaison des cartographies) et les observations subaquatiques d'occupation des habitats implantés.

L'évolution de l'**état des berges** est également citée : morphologie, stabilité/érosion, reprise de la végétation.

L'aspect **hydraulique** revient aussi avec la mesure des **débits**, le suivi des **niveaux d'eau** et la capacité du plan d'eau à recevoir et restituer de l'eau tout au long de l'année.

Parmi les critères plus généraux, on retrouve : la **pérennité/durabilité** des aménagements réalisés, la **réduction de l'impact** négatif, l'**équilibre paysager** hydro-écologique, mais également la **dimension sociale**, notamment l'engagement des propriétaires, la satisfaction du propriétaire par rapport à l'usage du plan d'eau, la perception des usagers, l'implication et l'acceptation par les acteurs locaux, l'amélioration de l'aspect visuel, le retour/satisfaction des pêcheurs.

Figure 26 : Critères permettant de juger de la réussite ou de l'échec d'une action de restauration

Afin de réaliser les actions de restauration, les commanditaires ou maîtres d'ouvrages sont différents selon la catégorie d'interlocuteurs, bien que certains soient présents à différents niveaux (**Figure 27**).

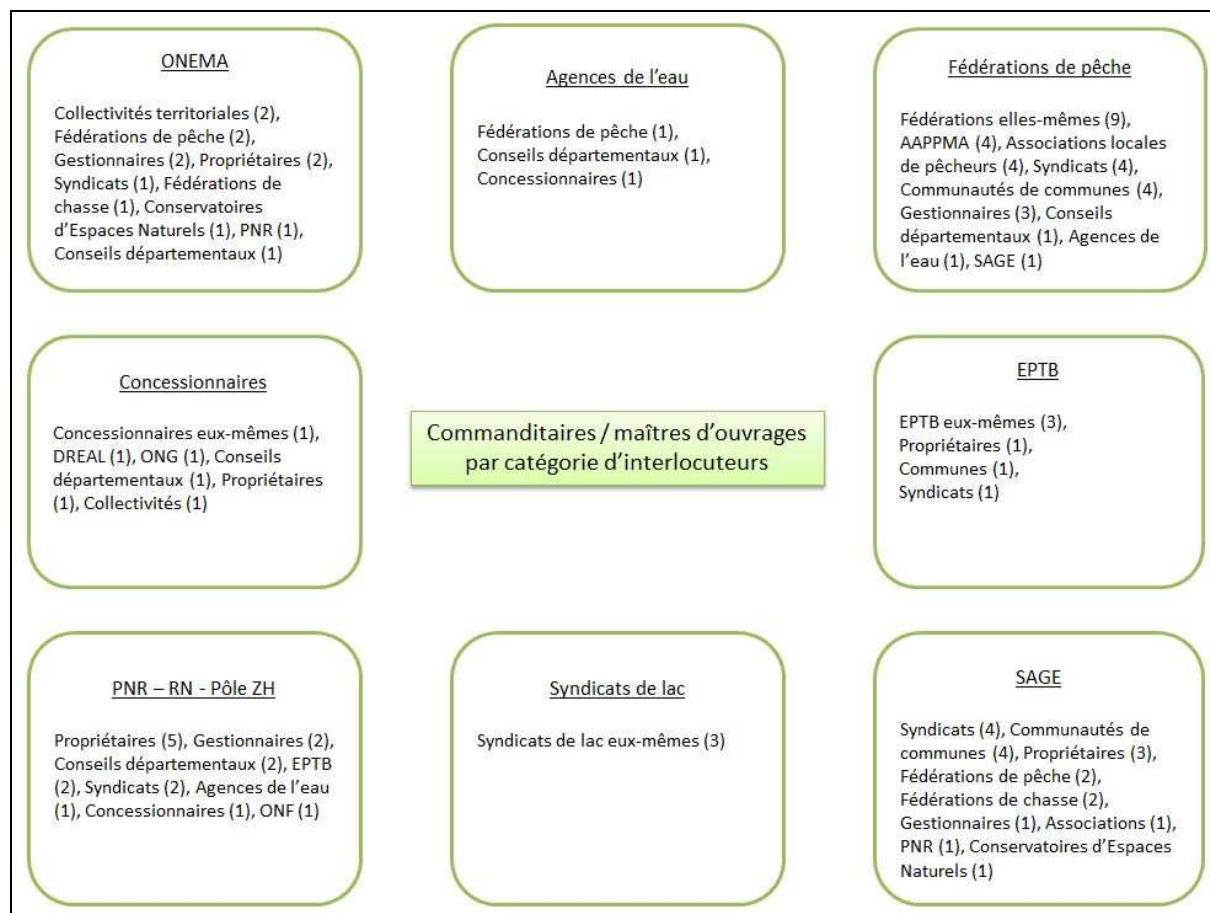


Figure 27 : Catégories d'interlocuteurs et leurs commanditaires ou maîtres d'ouvrages

Pour terminer, cette enquête met en avant un certain nombre de besoins en termes de connaissances et de moyens (repris ci-dessous) pour agir dans le cadre de projets de restauration hydromorphologique en plan d'eau.

Des outils

- Retours d'expériences sur :
 - la restauration d'habitats dans des plans d'eau artificiels
 - la limitation des impacts des plans d'eau artificiels
 - exemple de gestion artificielle mais fonctionnelle de niveau d'eau
 - la déconnexion et la restauration de petits plans d'eau
 - la conception, le dimensionnement et la mise en place d'ouvrages de répartition des débits en tête de plan d'eau
 - les techniques de gestion permettant de conserver un plan d'eau tout en limitant son impact sur les cours d'eau à l'aval et en développant les habitats patrimoniaux sur le plan d'eau
- Guide de type « Comprendre pour agir »
- Recueil de techniques innovantes
- Bases techniques
- Techniques et leur efficacité selon le type de plan d'eau
- Actions envisageables selon le type de problème
- Méthode d'évaluation de l'impact d'un aménagement (positif ou négatif)
- Suivis possibles et conseils sur les indicateurs de suivi
 - Indicateurs normalisés (dans le cadre DCE)
 - Indicateurs de suivi biologique pour plans d'eau à fort marnage
 - Indicateurs permettant de corrélérer qualité de l'eau et biologie des milieux aquatiques
 - Indices biotiques et physiques permettant de mieux caractériser le fonctionnement d'un plan d'eau
- Mise en place d'un réseau de personnes ressources qualifiées et échanges d'expérience / plateforme d'échanges
- Moyens financiers
- Matériel de mesure, de vidéo-surveillance, etc.,
- Habilitations

Des formations

- Limnologie (fonctionnement du plan d'eau, typologie, peuplements biologiques, stratification)
- Végétation rivulaire/aquatique des plans d'eau

Des informations

- Connaissances générales
- Stratégie de territoire
- Rapport coût/bénéfice
- Impacts amont/aval d'un plan d'eau (évaporation, thermie, eutrophisation, chaîne trophique...)
- Impacts cumulés des ouvrages
- Impacts du marnage
- Moyen de compenser au mieux la déconnexion des habitats littoraux liée au marnage
- Possibilités d'optimisation de la qualité hydro-écologique de plans d'eau artificiels subissant du marnage

- Restauration d'habitats piscicoles
- Travaux d'amélioration de la capacité d'accueil pour la faune piscicole (immersion d'habitats, îlots végétalisés, aménagement des berges...)
- Zones de frayères et zones refuges vis-à-vis des oiseaux migrateurs
- Suivis scientifiques de populations piscicoles
- Moyens de capture d'alevins afin de définir la réussite de reproduction des différentes espèces
- Méthodes d'évaluation des peuplements piscicoles (ADN environnemental ?) autres que la pêche à l'électricité et les techniques de pêche au filet
- Impacts de la gestion piscicole (pêche : pratiques, empoisonnement, prises)

- Végétalisation des berges
- Techniques de génie végétal en milieu lacustre

Des informations (suite)

- Suivi de bras mort : quel compartiment suivre et quelles techniques de gestion ?
- Diagnostic des étangs (typologie, existence de dispositif de gestion des niveaux, dispositifs de vidange, existence d'une gestion, présence d'espèces invasives)
- Pour les zones humides tourbeuses de plaine : méthodologie, expertise, état initial, diagnostic, écologie, hydromorphologie des cours d'eau et plan d'eau
- Intérêt/Risques de techniques « plus curatives » (traitement in situ, oxygénation)
- Pour des plans d'eau artificiels : gain d'une connexion, gain d'une augmentation substantielle du débit réservé (dans quelle proportion du débit naturel)?

- Réflexion sur la notion de station d'étude de littoral lacustre (définition, composition,...)
- Définition d'une trame de cahier des charges pour réaliser une expertise approfondie d'ouvrage ancien de retenues (digue empierré)
- La productivité des plans d'eau en termes de biomasse animale et végétale
- Les capacités auto épuratoires des plans d'eau, la fixation et l'absorption des flux de nutriments
- Comment imposer un débit réservé sur les plans d'eau dont le débit amont est inférieur à quelques litres/seconde ?
- Intérêt/Risques de la biomanipulation dans un but de restauration de milieux (contrôle des chaînes alimentaires dans l'écosystème « lac »)
- Compléments sur la phytoépuration

5. Conclusion et perspectives

Nous sommes au début d'un projet relativement ambitieux visant à construire un réseau de plans d'eau pilotes sur lesquels des projets de restauration hydromorphologique vont être menés et pour lesquels les méthodes de suivi (état initial et post-travaux) seront harmonisées.

Les retours d'enquête et la participation au colloque Plans d'eau (novembre 2016 à Aix-en-Provence) confirment l'intérêt porté par les gestionnaires pour ces écosystèmes. Le rétablissement de caractéristiques naturelles et de fonctionnalités altérées correspond au concept de restauration et aux objectifs concrets considérés comme très importants.

En termes d'actions de restauration, les plans d'eau sont à un stade moins avancé que les cours d'eau. Afin de travailler de manière efficace, il est utile de prendre note des points forts et des points faibles retrouvés lors des opérations et suivis d'opérations de restauration en cours d'eau, tout en tenant compte des spécificités des cours d'eau.

La restauration hydromorphologique des plans d'eau se concentre autour de six groupes de techniques et beaucoup de travail est encore à réaliser concernant les méthodes et protocoles de suivi. L'harmonisation à l'échelle nationale demandera de la vigilance car les types de plans d'eau sont variés et le nombre de sites pilotes peu élevé pour l'instant. En effet, la plupart des plans d'eau en France sont artificialisés et les régions présentent des caractéristiques fort variées (hydro-écorégions, géologie, occupation des sols, altitude, etc.). La communication dans le cadre de ce projet est également à considérer avec attention.

Au cours de l'année 2017, il s'agira donc d'établir un plan des démarches minimales à suivre idéalement (diagnostic, définition des stations, état initial, suivi long-terme, définition des compartiments à suivre, mise à disposition des protocoles) et de cibler les approches opérationnelles en vue d'une application au plus tôt sur les sites pilotes, dont la sélection aura été effectuée en parallèle.

6. Références

6.1. Bibliographie

- Ahrenstorff, T.D., Sass, G.G., Helmus, M.R., **2009**. *The influence of littoral zone coarse woody habitat on home range size, spatial distribution, and feeding ecology of largemouth bass (Micropterus salmoides)*. Hydrobiologia 623, 223-233.
- Alleaume, S., Argillier, C., **2012**. *Corila : Corridors Rivulaires Lacustres (version 2012)*. Irstea, Aix-en-Provence, p. 22.
- Alleaume, S., Lanoiselée, C., **2010**. *Bathymétrie - Protocole de levé bathymétrique - V1*. Cemagref, Aix-en-Provence.
- Alleaume, S., Lanoiselée, C., Argillier, C., **2012a**. *AlBer : Protocole de caractérisation des Altérations des Berges (version 2012)*. Irstea, Aix-en-Provence, p. 30.
- Alleaume, S., Lanoiselée, C., Heyd, C., Argillier, C., **2012b**. *Charli : Protocole de Caractérisation des HABitats des Rives et du Littoral (version 2012)*. Irstea, Aix-en-Provence, p. 30.
- Amemiya, T., Enomoto, T., Rossberg, A.G., Takamura, N., Itoh, K., **2005**. *Lake restoration in terms of ecological resilience: A numerical study of biomanipulations under bistable conditions*. Ecology and Society 10.
- Amigues, J.-P., Chevassus-au-Louis, B., **2011**. *Evaluer les services écologiques des milieux aquatiques : enjeux scientifiques, politiques et opérationnels*. In: Onema (Ed.). Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie - MEDDE, p. 172.
- Angelier, E., **2000**. *Ecologie des eaux courantes*. Technique & Documentation, p. 199.
- Aquitaine_Landes_Récifs, **2016**. *Nos actions - L'océan pour la vie - Aquitaine Landes Récifs*.
- Bänziger, R., **1995**. *A comparative study of the zoobenthos of eight land-water interfaces (Lake of Geneva)*. Hydrobiologia 300-301, 133-140.
- Bothmann, L., Windmann, M., Kauermann, G., **2016**. *Realtime classification of fish in underwater sonar videos*. Applied Statistics 65, 565-584.
- Bouchoucha, M., Darnaude, A.M., Gudefin, A., Neveu, R., Verdoit-Jarraya, M., Boissery, P., Lenfant, P., **2016**. *Potential use of marinas as nursery grounds by rocky fishes: insights from four Diplodus species in the Mediterranean*. Marine Ecology Progress Series 547, 193-209.
- Bouni, C., **2014**. *Comment développer un projet ambitieux de restauration d'un cours d'eau ? Retours d'expériences en Europe, un point de vue des sciences humaines et sociales*. Office National de l'Eau et des Milieux Aquatiques (ONEMA), p. 28.
- Capderrey, C., Olivier, J.M., Moussard, S., Foussard, V., Bacq, N., **2016**. *Retours d'expériences de restauration écologique en milieu estuarien - Analyse de la littérature scientifique publiée*. Onema - Université de Rouen - GIP Seine-Aval, p. 92.
- Chéry, P., Lee, C., Commagnac, L., Thomas-Chéry, A.L., Jalabert, S., Slak, M.F., **2014**. *Impact de l'artificialisation sur les ressources en sol et les milieux en France métropolitaine*. Cybergeographie : European Journal of Geography.
- Chocat, B., **2013**. *Ingénierie écologique appliquée aux milieux aquatiques - Pourquoi ? Comment ?* In: Onema (Ed.), p. 357.
- CNFSH, **1996**. *Hydrosystème*. (Comité National Français des Sciences Hydrologiques).
- Colas, F., Chauvet, E., **2015**. *Vers une évaluation fonctionnelle de la restauration des écosystèmes lotiques dégradés*. EcoLab - Laboratoire Ecologie Fonctionnelle et Environnement, CNRS UMR 5245 - Université Paul Sabatier (Toulouse), p. 48.
- Coops, H., Beklioglu, M., Crisman, T.L., **2003**. *The role of water-level fluctuations in shallow lake ecosystems - Workshop conclusions*. Hydrobiologia 506-509, 23-27.

- Coops, H., Hosper, S.H., **2002**. *Water-level Management as a Tool for the Restoration of Shallow Lakes in the Netherlands*. Lake and Reservoir Management 18, 293-298.
- Daguet, J., Munch, L., **2015**. *Evolution de la qualité biologique et piscicole de zones littorales lacustres - Restauration de la roselière du Bout du Lac d'Annecy et remodelage des berges d'une station lémanique*. UFC - Université de Franche-Comté ; Onema ; Chrono Environnement, p. 130.
- Daroux, A., Martignac, F., Guillard, J., **2014**. *Utilisation de la caméra acoustique DIDSON pour le suivi en rivière des poissons migrateurs*. La Cahier des Techniques de l'INRA. INRA, p. 8.
- Dejean, T., Valentini, A., Duparc, A., Pellier-Cuit, S., Pompanon, F., Taberlet, P., Miaud, C., **2011**. *Persistence of Environmental DNA in Freshwater Ecosystems*. PlosOne 6 4.
- Dienst, M., Schmieder, K., Ostendorp, W., **2004**. *Effects of water level variations on the dynamics of the reed belts of lake Constance*. Limnologica 34, 29-36.
- Dumonceau, F., Gilles, J., **2012**. *Projet d'optimisation de l'efficacité des frayères artificielles flottantes et mise en place d'actions complémentaires visant à assurer le recrutement des poissons phytophiles dans les lacs de l'Eau d'Heure - Rapport final*. Wallonie ; Maison wallonne de la pêche, p. 140.
- ECOCEAN, *Catalogue produits Ecocean - Habitats artificiels à fonctions écologiques et solutions de repeuplement*. p. 16.
- Feral, J.P., **2013**. *Plongée scientifique - La réglementation de la plongée scientifique*. Institut Méditerranéen de Biodiversité et d'Ecologie marine et continentale (IMBE).
- Ficetola, G.F., Miaud, C., Pompanon, F., Taberlet, P., **2008**. *Species detection using environmental DNA from water samples*. Biology Letters 4, 423-425.
- Fonbonne, S., Lecaillon, G., Lassus, R., Santoul, F., Plasseraud, O., Cucherousset, J., **2015**. *Guide d'identification des jeunes stades de poissons d'eau douce*. In: ECOCEAN, A.d.I.E.A.-G., Pôle Eau (Ed.), p. 27.
- Fraissé, T., **1999**. *Protection et végétalisation des zones de marnage des plans d'eau - Guide méthodologique*. Agence de l'eau Rhône-Méditerranée-Corse - AERMC, p. 53.
- Furey, P.C., Nordin, R.N., Mazumder, A., **2006**. *Littoral benthic macroinvertebrates under contrasting drawdown in a reservoir and a natural lake*. Journal of the North American Benthological Society 25, 19-31.
- Gafny, S., Gasith, A., Goren, M., **1992**. *Effect of water level fluctuation on shore spawning of *Mirogrex terraesanctae* (Steinitz), (Cyprinidae) in Lake Kinneret, Israel*. Journal of Fish Biology 41, 863-871.
- Gillet, C., **1989**. *Réalisation de frayères artificielles flottantes pour les poissons lacustres*. Hydroécologie Appliquée 1/2, 145-193.
- Gulati, R.D., Pires, L.M.D., Van Donk, E., **2008**. *Lake restoration studies: Failures, bottlenecks and prospects of new ecotechnological measures*. Limnologica 38, 233-248.
- Hellsten, S., Dudley, B., **2004**. *Hydromorphological pressures in lakes*. p. 6.
- Heyd, C., Alleaume, S., Argillier, C., **2012**. *BAVELA, Bassin Versant Lacustre : Méthode de délimitation et extraction de données spatiales*. Irstea, Aix-en-Provence, p. 24.
- Jerde, C.L., Mahon, A.R., Chadderton, W.L., Lodge, D.M., **2011**. *"Sight-unseen" detection of rare aquatic species using environmental DNA*. Conservation Letters 4, 150-157.
- Jeudy, C., Krithari, L., Meistermann, S., Blake, G., **2012a**. *Synthèse des retours d'expériences des projets de restauration mis en oeuvre sur les plans d'eau des bassins Rhône Méditerranée et Corse - Recueil de fiches*. Agence de l'Eau Rhône Méditerranée et Corse - AERMC ; Sciences et Techniques de l'Environnement - S.T.E., p. 316.
- Jeudy, C., Krithari, L., Meistermann, S., Pericat, A., **2012b**. *Synthèse des retours d'expériences des projets de restauration mis en oeuvre sur les plans d'eau des bassins Rhône Méditerranée et Corse - Rapport final (phase 3)* Agence de l'Eau Rhône Méditerranée et Corse - AERMC ; Sciences et Techniques de l'Environnement - S.T.E., p. 152.

- Jurca, T., Donohue, L., Laketić, D., Radulović, S., Irvine, K., **2012**. *Importance of the shoreline diversity features for littoral macroinvertebrate assemblages*. *Fundamental and Applied Limnology* 180, 175-184.
- Klapper, H., **2003**. *Technologies for lake restoration*. *Journal of Limnology* 62, 73-90.
- Leira, M., Cantonati, M., **2008**. *Effects of water-level fluctuations on lakes: An annotated bibliography*. *Hydrobiologia* 613, 171-184.
- Lemar_UMR6539, **2016**. *La plongée scientifique - Moyens analytiques - Laboratoire des sciences de l'environnement marin*.
- Loisselle, S.A., Bracchini, L., Cózar, A., Dattilo, A.M., Rossi, C., **2005**. *Extensive spatial analysis of the light environment in a subtropical shallow lake, Laguna Iberá, Argentina*. *Hydrobiologia* 534, 181-191.
- Malavoi, J.-R., Souchon, Y., **2010**. *Construire le retour d'expérience des opérations de restauration hydromorphologique - Eléments pour une harmonisation des concepts et des méthodes de suivi scientifique minimal - Volet hydromorphologie - Hydroécologie Onema Cemagref*, p. 95.
- Manny, B.A., Roseman, E.F., Kennedy, G., Boase, J.C., Craig, J.M., Bennion, D.H., Read, J., Vaccaro, L., Chiotti, J., Drouin, R., Ellison, R., **2015**. *A scientific basis for restoring fish spawning habitat in the St. Clair and Detroit rivers of the Laurentian Great Lakes*. *Restoration Ecology* 23, 149-156.
- Marranca, J.M., Welsh, A.B., Roseman, E., **2015**. *Genetic effects of habitat restoration in the Laurentian Great Lakes: An assessment of lake sturgeon origin and genetic diversity*. *Restoration Ecology* 23, 455-464.
- McLean, M., Roseman, E.F., Pritt, J.J., Kennedy, G., Manny, B.A., **2015**. *Artificial reefs and reef restoration in the Laurentian Great Lakes*. *Journal of Great Lakes Research* 41, 1-8.
- MEDD, **2005**. *Circulaire DCE 2005/11 relative à la typologie nationale des eaux de surface (cours d'eau, plans d'eau, eau de transition et eaux côtières) en application de la directive 2000/60/DCE du 23 octobre 2000 du Parlement et du Conseil établissant un cadre pour une politique communautaire dans le domaine de l'eau*. In: Ministère de l'Ecologie, d.D.D. (Ed.), p. 18.
- MEDDE, **2012**. *Présentation de la stratégie nationale pour la biodiversité 2011-2020*. Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie - <http://www.developpement-durable.gouv.fr/Présentation-generale-de-la.html>.
- MEEM, **2015**. *Mise en oeuvre de la DCE et politique locale de l'eau*. Ministère de l'Environnement, de l'Energie et de la Mer.
- Miaud, C., Taberlet, P., Dejean, T., **2012**. *ADN "environnemental" : un saut méthodologique pour les inventaires de la biodiversité*. *Sciences Eaux & Territoires - La revue d'Irstea*. Irstea, p. 4.
- Miler, O., Porst, G., McGoff, E., Pilotto, F., Donohue, L., Jurca, T., Solimini, A., Sandin, L., Irvine, K., Aroviita, J., Clarke, R., Pusch, M.T., **2013**. *Morphological alterations of lake shores in Europe: A multimetric ecological assessment approach using benthic macroinvertebrates*. *Ecological Indicators* 34, 398-410.
- Montuelle, B., Clémens, A., **2015**. *Le tour des grands lacs alpins naturels en 80 questions*. In: *L'Eau*, G.-G.d.r.R.-A.s.l.l.e. (Ed.). Observatoire des lacs alpins - OLA, ZABR - Zone Atelier Bassin du Rhône, p. 201.
- Moursund, R.A., Carlson, T.J., Peters, R.D., **2003**. *A fisheries application of a dual-frequency identification sonar acoustic camera*. *ICES Journal of Marine Science* 60, 678-683.
- Munch, L., Raymond, J.-C., **2015**. *Contribution à l'évaluation de l'altération hydromorphologique des plans d'eau des bassins Rhône-Méditerranée et Corse*. Onema, p. 58.
- Navarro, L., Stroffek, S., **2015**. *Restaurer le bon état des plans d'eau - Bilan de l'efficacité des actions engagées et recommandations*. SDAGE Rhône Méditerranée, p. 33.

- Nicolas, D., Reynaud, N., Argillier, C., Baudoin, J.M., **2015**. *Caractérisation de la qualité hydromorphologique des plans d'eau*. Pôle Onema-Irstea d'Aix-en-Provence - Hydro-écologie des plans d'eau, p. 93.
- Olivier, G., Degiorgi, F., Come, G., Raymond, J.-C., **1996**. *Echantillonnage des alevins en milieu lacustre : deux techniques utilisées selon un protocole standard*.
- ONEMA, **2010**. *La restauration des cours d'eau, Recueil d'expériences sur l'hydromorphologie*. p. 364.
- Onema, **2016**. *Préserver et restaurer l'hydromorphologie et la continuité des cours d'eau*.
- Paillisson, J.M., **2015**. *La biodiversité piscicole des marais du Brivet de 2004 à 2014*. Université de Rennes, p. 66.
- Passeron, R., Barla, C., **2013**. *Implantation de frayères artificielles favorisant la reproduction naturelle du peuplement piscicole du parc naturel départemental du lac du Broc*. Fédération départementale Pêche 06, p. 21.
- PNR_Seine-Normande, **2016**. *Le Parc en action - Les techniques de pêches scientifiques*.
- Poulain, T., Guillard, J., Argillier, C., **2011**. *Détermination des substrats lacustres par hydroacoustique : application au suivi de qualité morphologique*. Journal des Sciences Halieutiques et Aquatiques 3, 67-71.
- Pritt, J.J., Roseman, E.F., Ross, J.E., DeBruyne, R.L., **2015**. *Using Larval Fish Community Structure to Guide Long-Term Monitoring of Fish Spawning Activity*. North American Journal of Fisheries Management 35, 241-252.
- Rebière, D., Argillier, C., Roy, R., **2012**. *Caractérisation environnementale de la retenue des Bariousses (Treignac, Corrèze)*. Institut national de Recherche en Sciences et Technologies pour l'Environnement et l'Agriculture - Irstea ; Agence de l'Eau Adour-Garonne - AEAG ; EDF, p. 48.
- Rigaud, C., Roqueplo, C., Masse, J., Le Barh, R., **2008**. *Indicateurs du niveau de présence de l'Anguille européenne (A. anguilla) dans le Marais poitevin - Bilan des campagnes 2002-2008*. Irstea, p. 62.
- Rimond, F., Lechêne, A., **2014**. *Intérêt des zones intertidales et rivulaire de la Gironde comme habitats des poissons et des macrocrustacés - Importance pour l'accueil des juvéniles et potentiel de restauration par dépoldérisation*. Irstea - Onema, Irstea, p. 34.
- Rosenberg, D.M., McCully, P., Pringle, C.M., **2000**. *Global-Scale Environmental Effects of Hydrological Alterations : Introduction*. BlioScience - September 2000 50, 6.
- Roul, M., Besse, T., **2013**. *Suivi de l'anguille dans les marais salés atlantiques - Synthèse méthodologique*. Loire Grands Migrateurs, LOGRAMI, p. 20.
- Rowan, J.S., Carwardine, J., Duck, R.W., Bragg, O.M., Black, A.R., Cutler, M.E.J., Soutar, I., Boon, P.J., **2006**. *Development of a technique for Lake Habitat Survey (LHS) with applications for the European Union Water Framework Directive*. Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems 16, 637-657.
- Roy, R., **2014**. *Distribution spatiale et activité des poissons en milieu lacustre : impacts des facteurs environnementaux à partir d'une approche multi-échelle. Application à la retenue des Bariousses*. Ecole doctorale Sciences de l'environnement - Ecologie. Aix-Marseille Université, p. 224.
- Scheuerell, M.D., Schindler, D.E., **2004**. *Changes in the spatial distribution of fishes in lakes along a residential development gradient*. Ecosystems 7, 98-106.
- Schobernd, Z.H., Bacheler, N.M., Conn, P.B., **2014**. *Examining the utility of alternative video monitoring metrics for indexing reef fish abundance*. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences 71, 464-471.
- SER, *Society for Ecological Restoration*.
- SIAEBVELG, **2007**. *Etude préalable à l'entretien du réseau hydrographique des Lacs Médocains - phase 2*. SIAEBVELG, p. 42.

- SILA, **2016**. *Restauration des roselières*. Syndicat Mixte du Lac d'Annecy - SILA.
- Siron, M., **2015**. *Inventaire et analyse des suivis piscicoles en marais*. Faculté des Sciences Fondamentales et Appliquées. Université de Poitiers, p. 75.
- Søndergaard, M., Jeppesen, E., Lauridsen, T.L., Skov, C., Van Nes, E.H., Roijackers, R., Lammens, E., Portielje, R., **2007**. *Lake restoration: Successes, failures and long-term effects*. Journal of Applied Ecology 44, 1095-1105.
- SpyGen, **2017**. *Qu'est-ce que l'ADNe ?*
- Stefan, H.G., Hondzo, M., Eaton, J.G., McCormick, J.H., **1995**. *Validation of a fish habitat model for lakes*. Ecological Modelling 82, 211-224.
- Struthers, D.P., Danylchuk, A.J., Wilson, A.D.M., Cooke, S.J., **2015**. *Action Cameras : Bringing Aquatic and Fisheries Research into View*. Fisheries 40, 502-512.
- Tissot, L., Gilbert, P., **2016**. *Etude des solutions pour pallier l'influence du marnage des retenues sur les poissons*. Grenoble - EDF, LABORATOIRE NATIONAL D'HYDRAULIQUE ET ENVIRONNEMENT, GESTION HYDRO-ENVIRONNEMENTALE DES OUVRAGES, p. 35.
- Tomson, T., Calonnier, E., Dumonceau, F., **2010**. *Projet d'optimisation de l'efficacité des frayères artificielles flottantes et mise en place d'actions complémentaires visant à assurer le recrutement des poissons phytophiles dans les lacs de l'Eau d'Heure*. Service public de Wallonie -SPW ; Maison wallonne de la pêche p. 156.
- Tušer, M., Frouzová, J., Balk, H., Muška, M., Mrkvička, T., Kubečka, J., **2014**. *Evaluation of potential bias in observing fish with a DIDSON acoustic camera*. Fisheries Research 155, 114-121.
- UFBAG, AEAG, **2014**. *Guide technique pour la restauration des frayères à brochet*. Union des Fédérations pour la pêche et la protection du milieu aquatique du Bassin Adour-Garonne - UFBAG ; Agence de l'eau Adour-Garonne - AEAG, p. 24.
- Valentini, A., Pompanon, F., Taberlet, P., **2009**. *DNA barcoding for ecologists*. Trends in Ecology and Evolution 24, 110-117.
- Wantzen, K.M., Rothhaupt, K.O., Mörtl, M., Cantonati, M., G.-Tóth, L., Fischer, P., **2008**. *Ecological effects of water-level fluctuations in lakes: An urgent issue*. Hydrobiologia 613, 1-4.
- Wasson, J.G., Chandesris, A., Pella, H., Sauquet, E., Mengin, N., **2006**. *Appui scientifique à la mise en oeuvre de la Directive Européenne Cadre sur l'Eau*. Typologie des cours d'eau de France métropolitaine. Cemagref, p. 62.
- Wasson, J.G., Malavoi, J.-R., Maridet, L., Souchon, Y., Paulin, L., **1998**. *Impacts écologiques de la chenalisation des rivières* Etudes - Gestion des milieux aquatiques, p. 158.
- Weatherhead, M.A., James, M.R., **2001**. *Distribution of macroinvertebrates in relation to physical and biological variables in the littoral zone of nine New Zealand lakes*. Hydrobiologia 462, 115-129.
- Weaver, M.J., Magnuson, J.J., Clayton, M.K., **1997**. *Distribution of littoral fishes in structurally complex macrophytes*. Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences 54, 2277-2289.
- Winfield, I.J., **2004**. *Fish in the littoral zone: Ecology, threats and management*. Limnologia 34, 124-131.
- Yamamoto, K.C., Freitas, C.E.D.C., Zuanon, J., Hurd, L.E., **2014**. *Fish diversity and species composition in small-scale artificial reefs in Amazonian floodplain lakes: Refugia for rare species?* Ecological Engineering 67, 165-170.
- Yotte, A., **2016**. *Note de présentation du projet de diversification des habitats - Retenue de Filheit (09)*. Fédération départementale Pêche 09, p. 12.

6.2. Figures

Figure 1 : Termes regroupés sous le nom « plan d'eau » : lac, retenue, gravière, étang, mare	9
Figure 2 : Illustration de la zone littorale lacustre (Lachavanne <i>et al.</i> 1985)	10
Figure 3 : Contexte environnemental (exemples) dont dépendent les écosystèmes plans d'eau : hydro-écorégions (Wasson <i>et al.</i> , 2006), géologie (Chéry <i>et al.</i> , 2014) et occupation des sols (UE – Ifen, CORINE Land Cover, 2000).....	13
Figure 4 : Schéma représentant la dynamique des écosystèmes aquatiques (Wasson <i>et al.</i> , 1998) .	14
Figure 5 : Plans d'eau répertoriés dans la base de données nationale (Pôle Onema-Irstea, 2016) ...	16
Figure 6 : Protocoles de caractérisation de l'hydromorphologie des plans d'eau aux différentes échelles existantes (Nicolas <i>et al.</i> , 2015)	17
Figure 7 : Catégories d'objectifs possibles dans le cadre de projets de restauration (Pôle Onema-Irstea, 2016)	18
Figure 8 : Altérations des plans d'eau au niveau global, au niveau du bassin versant et au niveau du plan d'eau (Munch and Raymond, 2015)	21
Figure 9 : Biohut ® de différents types selon l'endroit de mis en place (ECOCEAN)	29
Figure 10 : Système de frayère artificielle flottante suivant le niveau d'eau (à gauche) et système de frayère artificielle flottante couissant le long de poteaux fixés (à droite) (Gillet, 1989)	30
Figure 11 : Principe de fonctionnement d'une frayère semi-naturelle ; exemple issu de la mise en eau d'une zone en contact avec un cours d'eau (vanne) et calendrier pouvant varier tout en respectant les étapes (FDPPMA 17)	32
Figure 12 : Verveux double et son système de série d'entonnoir (Pôle Onema-Irstea, 2016)	35
Figure 13 : Schéma de conception des pièges à alevins (dimensions en cm) (Olivier <i>et al.</i> , 1996)....	36
Figure 14 : Care ® vu du dessous (à gauche) avec son caisson flottant contenant la source lumineuse (à droite) (ECOCEAN)	36
Figure 15 : Détection d'un individu par triangulation (Roy, 2014)	39
Figure 16 : Station d'étude constituée d'enrochements et d'une roselière sur l'étang des Aulnes (13)	41
Figure 17 : Trois types de pièges utilisés lors des premiers tests de suivi de poissons juvéniles/alevins (Filets verveux, Pièges lumineux pour zone littorale, Care ® pour zone pélagique)	41
Figure 18 : Système d'enregistrement par caméra subaquatique.....	42
Figure 19 : Taux de participation à l'enquête	44
Figure 20 : Pourcentage de réponses avec le questionnaire rempli par catégorie d'interlocuteur (le nombre entre parenthèse à côté du nom des structures correspond au nombre de réponses reçues) ; SAGE (Schéma d'aménagement et de gestion de l'eau), PNR (Parc naturel régional), RN (Réserve naturelle), ZH (Zone humide), ONEMA - SD (Office national de l'eau et des milieux aquatiques - Services départementaux : * 42 ayant reçu le questionnaire), EPTB (Etablissement public territorial de bassin), DREAL (Direction régionale de l'environnement, de l'aménagement et du logement - ** plusieurs services par DREAL – total = 18).	45
Figure 21 : Répartition moyenne du temps de travail.....	45
Figure 22 : Distinction du type de plans d'eau	46
Figure 23 : Concepts de restauration par ordre d'importance.....	47
Figure 24 : Objectifs concrets de la restauration hydromorphologique par ordre d'importance	49
Figure 25 : Critères permettant de juger du besoin d'actions de restauration	51
Figure 26 : Critères permettant de juger de la réussite ou de l'échec d'une action de restauration	52
Figure 27 : Catégories d'interlocuteurs et leurs commanditaires ou maîtres d'ouvrages	53

7. Annexes

Questionnaire envoyé lors de l'enquête au printemps 2016.

Objectifs : Recueil d'informations et de retours d'expérience – Sélection de sites pilotes potentiels

Contact : celine.marchand@irstea.fr

Retour du questionnaire : 31 mai 2016

Informations générales

Nom :
Prénom :
Fonction :
Organisme :
Service :
Nombre de personnes (ETP) du service :
Localisation :
Etendue territoriale des actions du service :
Mail de contact¹ :

Contexte – Votre service et ses missions

1. Quel est la proportion du temps consacré aux plans d'eau² dans votre service ?

0 %	10 %	20 %	30 %	40 %	50 %	60 %	70 %	80 %	90 %	100 %

2. Si votre service est concerné par les plans d'eau, dans quelle proportion est-il concerné par leur restauration hydromorphologique/des habitats³ ?

0 %	10 %	20 %	30 %	40 %	50 %	60 %	70 %	80 %	90 %	100 %

3. Depuis combien d'années ?

¹ Personne concernée pour une éventuelle future collaboration

² Tous types de plans d'eau

³ Relative aux écoulements, au niveau d'eau, au temps de résidence, à la connexion avec les nappes souterraines, à la profondeur, au substrat, aux rives et visant directement ou indirectement l'amélioration de l'état des communautés biologiques (piscicoles, invertébrées, végétales)

Concepts – Votre vision de la restauration

4. Faites-vous (ou feriez-vous) la distinction entre plan d'eau naturel et artificiel dans le cadre de la restauration (par exemple, pour la définition des objectifs à atteindre) ?

OUI	NON

5. De manière concrète, quels sont vos objectifs de restauration hydromorphologique ? Classez les trois objectifs que vous considérez comme étant les plus importants (3 : assez important, 2 : important, 1 : très important).

Atteindre le bon état ou le bon potentiel au sens réglementaire de la DCE	
Favoriser la biodiversité générale (aquatique et terrestre associée)	
Favoriser des peuplements biologiques ciblés et d'intérêt (poissons, avifaune, amphibiens, etc.)	
Éliminer des espèces « indésirables » (exotiques, envahissantes, macrophytes, etc.)	
Rétablir des fonctions physiques, hydrologiques ou fonctionnelles majeures (niveaux d'eau, thermie, oxygénation, rôles des ripisylves et des roselières, etc.)	
Gérer les risques (érosion de berges, inondation, sécurité du barrage, etc.)	
Favoriser la qualité paysagère et/ou certaines activités autour du plan d'eau	
Ne sais pas	

Remarque :

6. Pour vous, à quoi correspond le concept de restauration hydromorphologique ? *Cochez une ou plusieurs réponses et n'hésitez pas à détailler votre vision.*

Retourner à l'état écologique d'origine en l'absence de perturbations humaines	
Retourner à un état proche d'un milieu peu perturbé	
Atténuer au maximum les impacts négatifs compte tenu des activités humaines sur ou autour du plan d'eau	
Rétablir une caractéristique naturelle ou une fonctionnalité altérée	
Compenser en l'absence d'autre solution	
Promouvoir la vie sauvage en stimulant la biodiversité	
Mettre en œuvre des mesures qui in fine contribueront à assurer une bonne qualité d'eau ainsi que les services et usages associés	
Augmenter le bien-être humain par des actions favorisant la qualité paysagère	
Tous	
Autre	
Ne sais pas	

Détails :

Opérationnel – Dans le cadre de vos missions

7. Quels sont les critères que vous utilisez pour juger qu'un plan d'eau a besoin d'être restauré ou non ?

8. Quels sont les critères que vous utilisez pour juger de la réussite ou de l'échec d'une action de restauration ?

9. Qui sont les commanditaires/maîtres d'ouvrage des opérations de restauration vous concernant ?

10. Quelles sont les actions de restauration hydromorphologiques/des habitats réalisées, en cours ou prévues au sein de votre service ?

Nom du plan d'eau	Titre explicite de l'action	Action de restauration			Catégorie de l'action	
		Réalisée	En cours	Prévue	Physique ⁴	Biologie ⁵

Remarque :

⁴ Modifications de la morphologie du plan d'eau (profondeur, substrat, rives) ; Exemple : suppression de berges artificielles

⁵ Favorisation directe des communautés biologiques (habitat, nurserie, zone d'alimentation) ; Exemple : création de frayères artificielles



Pôle Onema-Irstea d'Aix-en-Provence
« Hydro-écologie des plans d'eau »
3275 route de Cézanne - CS 40061
13182 Aix en Provence Cedex



11. Parmi les projets de restauration hydromorphologique réalisés ou en cours : précisez, si possible, les éléments repris dans le tableau ci-dessous, en priorité pour les projets les plus complets (avec diagnostic et/ou état initial et/ou suivi) (copiez-collez le tableau selon le nombre de projets) :

Projet 1	
Nom du plan d'eau	
Département et Commune	
Coordonnées ⁶	
Plan d'eau DCE (> 50 ha) : O/N	
Plan d'eau : Naturel/Artificiel	
Type ⁷	
Profondeur maximale	
Marnage : O/N (si oui : amplitude)	
Usages ⁸	
Objectifs	
Diagnostic ⁹ : O/N (si oui : précisez)	
Etat initial : O/N (si oui : compartiments étudiés)	
Suivi : O/N (si oui : compartiments étudiés)	
Techniques	
Emprise spatiale (linéaire/surface)	
Durée (début-fin) du projet et des travaux	
Budget	
Maître d'ouvrage	
Documents disponibles : O/N (si oui, références)	

⁶ De préférence : WGS 84 (degré décimal) ou Lambert 93

⁷ Lac, Retenus, Etang, Gravière, Autre

⁸ Hydroélectricité (H), Potabilité (P), Extraction (E), Irrigation (I), Navigation (N), Baignade (B), Pêche loisir (Pl)/professionnelle (Pp), Chasse (C), Réserve protégée (R)

⁹ La cause du (des) dysfonctionnement(s) a-t-elle été identifiée ? (Avant de définir les objectifs de l'action et les moyens nécessaires pour y remédier)

5



Pôle Onema-Irstea d'Aix-en-Provence
« Hydro-écologie des plans d'eau »
3275 route de Cézanne - CS 40061
13182 Aix en Provence Cedex



Commentaires :

6



Pôle Onema-Irstea d'Aix-en-Provence
« Hydro-écologie des plans d'eau »
3275 route de Cézanne - CS 40061
13182 Aix en Provence Cedex



12. Parmi les projets de restauration hydromorphologique prévus : précisez, si possible, les éléments repris dans le tableau ci-dessous, en priorité pour les projets avec diagnostic et/ou état initial et/ou suivi prévus (copiez-collez le tableau selon le nombre de projets) :

Projet 1	
Nom du plan d'eau	
Département et Commune	
Coordonnées	
Plan d'eau DCE (> 50 ha) : O/N	
Plan d'eau : Naturel/Artificiel	
Type	
Profondeur maximale	
Marnage : O/N (si oui : amplitude)	
Usages	
Objectifs	
Diagnostic : O/N (si oui : précisez)	
Etat initial : O/N (si oui : compartiments étudiés)	
Suivi : O/N (si oui : compartiments étudiés)	
Techniques	
Emprise spatiale (linéaire/surface)	
Durée (début-fin) du projet et des travaux	
Budget	
Maître d'ouvrage	
Prêt pour une implication/collaboration (sans engagement) : O/N	

7



Pôle Onema-Irstea d'Aix-en-Provence
« Hydro-écologie des plans d'eau »
3275 route de Cézanne - CS 40061
13182 Aix en Provence Cedex



Commentaires :

8



Pôle Onema-Irstea d'Aix-en-Provence
« Hydro-écologie des plans d'eau »
3275 route de Cézanne - CS 40061
13182 Aix en Provence Cedex



13. Si vous n'avez pas de projets de restauration hydromorphologique prévus : connaissez-vous des projets d'aménagements susceptibles d'avoir des impacts négatifs sur des plans d'eau (exemple : construction de berge artificielle, projet de modification de gestion de niveau d'eau, infrastructures de type port, etc.) ? Si oui, merci de préciser :

14. Avez-vous des besoins en termes de connaissances et/ou de moyens pour agir dans le cadre de projets de restauration hydromorphologique en plan d'eau ? Si oui, quels sont-ils ?

Merci pour votre participation !

Onema
Hall C – Le Nadar
5 square Félix Nadar
94300 Vincennes
01 45 14 36 00
www.onema.fr

Irstea – Groupement d'Aix-en-Provence
Unité Recover – Equipe Freshco
3275 route de Cézanne CS 40061
13182 Aix-en-Provence Cedex 5
04 42 66 99 10
www.irstea.fr

Projet « Restauration et mitigation des plans d'eau », C. Marchand, S. Westrelin, J-M. Baudoin