

Aout 2021

Retours d'expérience des mesures de restauration écologique en estuaire de Seine

Alexandre DUVAL

Etudiant Master 2 Gestion de l'Environnement parcours GBET

Encadrant du stage : **Manuel MUNTONI**



SYNTHESE

Résumé

L'estuaire de la Seine compte parmi les milieux les plus riches écologiquement en matière d'habitats naturels, d'espèces et de fonctions écologiques. Cette richesse est pourtant compromise, puisqu'il fait aussi partie des milieux les plus anthropisés. Toutes les activités industrielles, portuaires, urbaines et agricoles sont à l'origine de la perte d'un grand nombre de ses habitats naturels. Depuis une trentaine d'années maintenant, la pratique de la restauration écologique a pour vocation de compenser les impacts de ces activités anthropiques, en recréant ou réhabilitant les milieux naturels perdus ou dégradés. Le contexte estuarien étant complexe à la fois environnementalement et anthropiquement, il existe un réel besoin de faire progresser la pratique de restauration écologique, en capitalisant un maximum de retours d'expérience sur les mesures déjà effectuées en estuaire de Seine. Ces retours d'expérience doivent permettre de faire ressortir les difficultés que peuvent rencontrer les porteurs de projets ainsi que les bonnes pratiques à mettre en œuvre.

Cette étude a recensé 33 mesures de restauration écologique menées en estuaire de Seine (1990-2021) pour en proposer un bilan. Elle a permis de faire ressortir des difficultés dans l'application d'une stratégie globale de restauration à l'échelle de l'estuaire, avec des projets opportunistes et déconnectés les uns des autres. La restauration écologique en estuaire de Seine se déroule principalement dans un cadre réglementaire de compensation d'impacts, et vise la recréation d'habitat, ce qui dans le meilleur des cas, permet seulement de rester à un même niveau de fonctionnalité écologique. Les objectifs de restauration sont bien souvent définis de manière peu précise et incomplète et les suivis écologiques mis en place post-restauration ne permettent pas d'évaluer correctement l'efficacité des mesures. A l'aide d'une analyse bibliographique, il est proposé dans cette étude, des lignes directrices pour orienter les futurs porteurs de projet sur la mise en place d'une mesure de restauration écologique.

Mots clés

Estuaire, restauration écologique, habitats naturels, fonctionnalité écologique, recréation, réhabilitation

Abstract

The Seine estuary is heavily influenced by anthropogenic pressures such as industrial, port, agricultural and urban activities. All these activities are at the origin of the loss of many habitats and influence the ecological functioning of the estuarine environment. During the last thirty years, several projects of ecological restoration have been realized to compensate, at least partially, the impacts induced by these activities, by recreating or rehabilitating estuarine habitats.

However, no studies so far have analyzed the strengths and weaknesses of the projects realized in the Seine estuary from the planning phase until their realization and ecological monitoring. In order to better understand the restoration dynamics in the estuary, this work aims to describe and characterize how the ecological restoration is implemented in the Seine estuary and highlight the difficulties that may be encountered and the good practices to be implemented while setting up a restoration project.

33 restoration projects (1990-2021) were inventoried and analyzed. Most of the projects appear scattered and disconnected from each other. Ecological restoration in the Seine estuary takes place mostly in a regulatory framework. Ecological restoration goals are often imprecise and incomplete and the ecological monitoring of the projects does not allow to evaluate completely the success of restoration. Using a bibliographic analysis, guidelines are suggested to guide future projects holders

Key words

estuary, ecological restoration, natural habitats, ecological functionality, recreation, rehabilitation

TABLE DES MATIERES

SYNTHESE	2
1. CONTEXTE ET OBJECTIF GENERAL	8
1.1 Les estuaires	8
1.2 La restauration écologique	9
1.3 Réalisation d'un projet de restauration écologique	9
1.4 Les objectifs du stage	10
2. LA DEMARCHE	12
2.1 Structure de la démarche	12
2.1.1 Collecte des données	12
2.1.2 Analyse des données	13
2.1.3 Formalisation des retours d'expérience (REX)	13
3. CARACTERISATION DES PROJETS DE RESTAURATION	15
3.1 Le contexte de la restauration écologique dans l'estuaire de la Seine	15
3.2 Typologie des mesures de restauration écologique	17
3.3 Les coûts de la restauration écologique dans l'estuaire de la Seine.	19
3.4 Les surfaces concernées par la restauration	22
3.5 Les objectifs de restauration écologique	24
3.6 Les suivis écologiques post restauration	27
3.7 La gestion des milieux post restauration	29
4. RETOURS D'EXPERIENCE	31



4.1 REX 1 : La restauration écologique en estuaire de Seine se concrétise principalement en réponse à de nouveaux projets d'aménagement induisant des impacts	31
4.2 REX 2 : La restauration écologique des habitats fortement dégradés nécessite un effort économique important (mais qu'il faut relativiser par rapport aux coûts totaux du projet et de ses impacts)	32
4.3 REX 3 : Les mesures de restauration concernent pour la plupart des surfaces relativement faibles et sont localisées principalement en plaine alluviale	32
4.4 REX 4 : Une définition des objectifs trop généraliste et difficile	33
4.5 REX 5 : Des suivis écologiques qui ne permettent pas une bonne évaluation des résultats des mesures de restauration écologique	35
4.6 REX 6 : Le fonctionnement autonome des sites restaurés n'est pas toujours garanti	37
5. CONCLUSION ET PERSPECTIVES	38
6. BILAN PERSONNEL	40
7. LISTE DES REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES	41
8. GLOSSAIRE	43
9. ANNEXES	45

TABLE DES ILLUSTRATIONS

Figure 1 Degré d'anthropisation en estuaire de Seine.....	8
Figure 2 Étape dans la réalisation d'une mesure de restauration	10
Figure 3 Étapes préalables la formalisation des retours d'expérience	12
Figure 4 Répartition des projets de restauration analysés dans le cadre de l'étude	15
Figure 5 Distribution temporelle du nombre de projets de restauration écologique réalisés dans l'estuaire de la Seine	16
Figure 6 Analyse Factorielle Multiple	18
Figure 7 Dépenses allouées aux mesures de restauration écologique entre 1990 et 2021	19

Figure 8 Coût des projets par type de restauration écologique.....	20
Figure 9 Coût par hectare des mesures de restauration écologique dans les milieux intertidaux (rouge) et de la plaine alluviale (vert).....	21
Figure 10 Nombre de mesures de restauration par classe de surface	22
Figure 11 Surfaces totales restaurées par type de restauration	23
Figure 12 Surfaces restaurées en plaine alluviale et en zone intertidale	24
Figure 13 Occurrence des classes d'objectif sur l'ensemble des projets	25
Figure 14 Occurrence des groupes biologiques visés par la restauration	26
Figure 15 Répartition des projets sur la base des suivis écologiques réalisés post-restauration	27
Figure 16 Occurrence des groupes biologique les plus fréquents dans les suivis écologiques	28
Figure 17 Pourcentage de projets présent dans chaque classe d'indicateurs.....	29
Figure 18 Type d'entretien nécessaire après restauration.....	30



Structure d'accueil / Groupement d'Intérêt Public Seine-Aval

Ce stage s'est déroulé au sein du GIP Seine-Aval, un groupement d'intérêt public créé en 2003 et financé par onze membres (le Conseil Régional de Normandie, l'Agence de l'Eau Seine-Normandie, HAROPA Ports, les Conseils Départementaux du Calvados, de Seine-Maritime et de l'Eure, Le Havre Seine Métropole, la Métropole Rouen Normandie, France Chimie Normandie, les communautés d'agglomérations Caux Seine Agglo et Seine-Eure).



Le GIP Seine-Aval coordonne et finance des études et des travaux de recherche diversifiés (qualité de l'eau et des sédiments, état de santé de la flore et de la faune, restauration des milieux estuarien, etc...) sur l'estuaire de la Seine, dans le but d'acquérir des connaissances et de comprendre son fonctionnement environnemental.

Le GIP Seine Aval est amené à développer des outils décisionnels, permettant d'accompagner ses membres dans leurs projets actuels et futurs mais aussi à valoriser et permettre le transfert des connaissances acquises vers les décideurs, les aménageurs, la communauté scientifique et le grand public.

Remerciements

Je tiens à remercier toutes les personnes ayant contribué de près ou de loin, au succès de ce stage et à la rédaction de ce rapport. Notamment mon maître de stage, **Mr Manuel Muntoni, chargé de mission en restauration écologique**, pour son encadrement, ces conseils et le partage de son expertise durant toute cette période de stage.

Je remercie également toute l'équipe du GIP Seine-Aval (**Elise Avenas, Pascale Vincent, Nicolas Bacq, Eric l'Ebrellec, Cédric Fisson et Jean Philippe Lemoine**) pour leur accueil, leurs conseils et l'aide apportée à la rédaction et la relecture du rapport.

1. CONTEXTE ET OBJECTIF GENERAL

1.1 Les estuaires

Les estuaires sont des milieux soumis à de fortes variabilités environnementales (gradient de salinité, température, variations des niveaux d'eau), qui résultent de la rencontre entre eaux douces et salées, au gré des marées (Costanza *et al.*, 1993). Cette dynamique physico-chimique très spécifique se traduit par une mosaïque d'habitats très diversifiée, notamment le long du gradient latéral entre lit mineur et lit majeur / plaine alluviale (Capderrey *et al.*, 2016; Lavabre & Fisson, 2013; Muntoni, 2020). Ces milieux font partie des plus productifs au monde (production primaire et secondaire, (Costanza *et al.*, 1993) et remplissent de nombreuses fonctions écologiques (fonction de nourricerie, de reproduction pour l'ichtyofaune et l'avifaune, d'épuration des eaux, etc.) (Capderrey *et al.*, 2016; Lavabre & Fisson, 2013). De nombreux services écosystémiques, comme par exemple le maintien des ressources halieutiques, la protection face aux risques d'inondation ou encore la bonne qualité des eaux, dépendent du bon fonctionnement écologique de l'écosystème estuarien.



Figure 1 Degré d'anthropisation en estuaire de Seine

L'estuaire de la Seine, long de 170 km et défini comme zone soumise à la marée, est délimité en amont par le barrage de Poses et en aval par la baie de Seine. Comme beaucoup d'estuaires à travers le monde, l'estuaire de la Seine fait partie des milieux les plus anthropisés (Amara, 2011; Lobry, 2004; Muntoni, 2020), (Figure 1). De par sa position stratégique et sa forte productivité, de nombreuses activités urbaines, industrielles, portuaires, agricoles se sont développées et intensifiées autour du fleuve depuis le XIXème siècle. Les pressions exercées par ces activités ont conduit à de nombreuses altérations physiques et chimiques des milieux

estuariens qui ne peuvent alors plus supporter toutes les fonctions qui leur sont liées (Fisson *et al.*, 2014; Muntoni, 2020).

La restauration des milieux estuariens de la Seine représente alors un enjeu prioritaire pour le développement durable du territoire, que ce soit au moyen des initiatives écologiques locales ou bien dans le cadre réglementaire (ex. doctrine Eviter, Réduire, Compenser (ERC), objectif “Zéro Perte Nette de biodiversité”).

1.2 La restauration écologique

Au sens strict, la restauration écologique vise un retour en arrière du milieu vers un écosystème historique, avant influence des impacts anthropiques. Cette définition n'est pas réaliste dans le contexte estuarien et dans un sens plus large, la **restauration écologique** est définie comme « une action intentionnelle qui initie ou accélère l'auto-réparation d'un écosystème qui a été dégradé, endommagé ou détruit » (McDonald *et al.*, 2016). Au sens large, le terme restauration écologique peut être employé pour indiquer toute mesure visant à améliorer l'état écologique afin d'augmenter leur contribution au fonctionnement estuarien global. Différents types de mesures s'inscrivent dans cette définition :

- **Réhabilitation** : dans le cas où la suppression des pressions anthropiques n'est pas envisageable, une telle mesure vise plutôt à rétablir la fonctionnalité du système, et insiste sur la récupération des processus écologiques du système en tentant de faire coexister un bon fonctionnement écologique avec les usages à la base des perturbations ;
- **Réaffectation / re-création** : en présence d'un degré trop élevé de dégradation ayant compromis irréversiblement le fonctionnement de l'écosystème, la réaffectation prévoit la mise en place d'un nouveau système avec des fonctions autres que celles du système de départ ;
- **Rajeunissement** : vise à faire revenir un écosystème à un stade antérieur de sa succession ;
- **Renaturation**, qui a pour objectif de redonner une vocation plus naturelle à un site dégradé.

1.3 Réalisation d'un projet de restauration écologique

Idéalement, un projet de restauration écologique devrait se dérouler de la manière suivante (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**) :

- Élaboration d'un **diagnostic** du site qui permet de mettre en avant les dysfonctionnements. *Quelles altérations du fonctionnement écologique constate-t-on sur le site ? Quelles sont les causes qui déterminent ces altérations ?*
- Identification des **priorités de restauration** à différentes échelles. *Quel habitat/fonction restaurer en priorité (surtout dans un système soumis à différentes pressions) ?*

- Déclinaison des priorités à l'échelle du site et **définition des objectifs** de restauration du projet.
- Élaboration d'une mesure de restauration pour répondre à ces objectifs (génie écologique, etc...). *Quelles caractéristiques doit-on rechercher dans le site restauré ?*
- Réalisation des travaux
- Mise en place des **suivis écologiques** post-restauration et **évaluation du projet** permettant de faire remonter des retours d'expérience sur la réalisation de la mesure de restauration. *Quelle trajectoire écologique le système a-t-il pris ? La restauration était-elle efficace ? Quels sont les bénéfices écologiques à différents pas de temps ?*

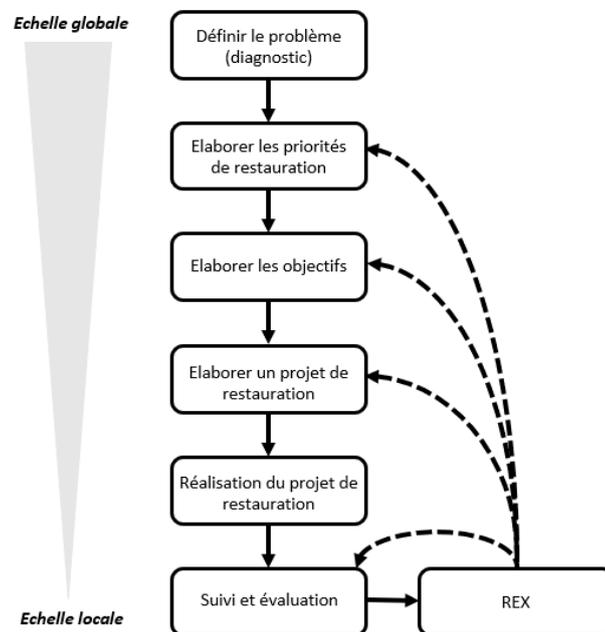


Figure 2 Étape dans la réalisation d'une mesure de restauration (Muntoni, 2020)

1.4 Les objectifs du stage

Afin de fournir des éléments utiles à la mise en place d'une stratégie globale de restauration de l'estuaire de la Seine, le **GIP Seine Aval**, a engagé en collaboration avec la DREAL Normandie, la mise en place du projet REPERE (Référentiel partaGE sur les Priorités de restauration des fonctionnalitEs des milieux estuaRiEns de la vallée de Seine-Aval, <https://www.seine-aval.fr/publication/etude-repere/>). Ayant d'une part déjà identifié **les priorités de restauration à l'échelle de l'estuaire** (Muntoni, 2020), il est maintenant question

d'identifier les points critiques qui, lors de la phase de planification et de mise en place d'un projet de restauration, peuvent influencer sur sa réussite.

Quels sont les points critiques dans la réalisation d'une mesure de restauration efficace ? Comment définit-on des objectifs ? Quels suivis met-on en place ? Comment évalue-t-on la pertinence du projet ?

Afin de répondre à ces questions, il est nécessaire de formaliser et capitaliser un maximum de retours d'expérience (REXs) des mesures de restauration en estuaire de Seine.

C'est donc dans ce cadre que se déroule ce stage sur les REXs des mesures de restauration écologique en estuaire de Seine au sein du GIP Seine-Aval, en partenariat avec la DREAL Normandie.

L'objectif de ce travail est de fournir aux porteurs de projets, un support décisionnel qui leur permettra d'accompagner la réussite des opérations, de la phase de réflexion du projet, à la mise en place des suivis.

Plus précisément, cet objectif se décline en plusieurs **sous-objectifs** :

1. Fournir des **éléments de réflexion sur chaque étape de la mise en place d'une mesure de restauration écologique** (définition des objectifs, mise en place des suivis post-restauration, évaluation de la mesure, etc...)
2. Formaliser une vision globale à travers l'**analyse quantitative et qualitative sur l'état de la restauration des milieux estuariens** de la Seine (surfaces et types de milieux restaurés, coûts, objectifs et suivis les plus fréquents, etc...)
3. Mettre en évidence l'évaluation de l'efficacité des mesures de restauration ainsi que les difficultés rencontrées tout au long de leur réalisation



2. LA DEMARCHE

2.1 Structure de la démarche

Le présent travail s'est basé sur une démarche articulée en trois étapes (Figure 3). Dans un premier temps, une mise à jour de la base de données sur la restauration écologique en estuaire de Seine du GIP Seine-Aval a été effectuée. Dans un deuxième temps, les données ont été analysées afin de décrire et caractériser l'ensemble des projets de restauration pour lesquelles des informations ont été collectées. Enfin, dans un troisième temps, le travail a consisté à formaliser les REXs et fournir des recommandations pour les différentes étapes d'une mesure de restauration (définition des objectifs, utilisation d'indicateurs spécifiques, réalisation d'un bilan, etc...) afin d'améliorer la planification et la mise en place des projets de restauration.

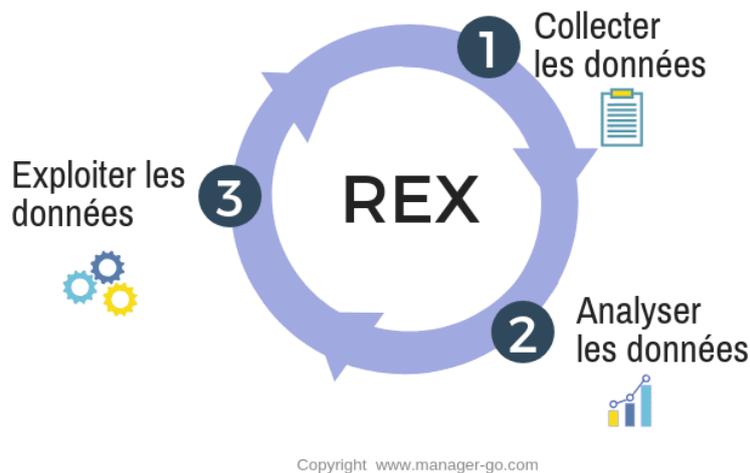


Figure 3 Étapes préalables la formalisation des retours d'expérience

2.1.1 Collecte des données

2.1.1.1 Récupération des informations de l'ancienne base de données du GIP Seine-Aval

A partir de la base de données du GIP Seine-Aval, la première partie du travail a concerné la collecte d'informations sur les projets de restauration effectués dans l'estuaire avant 2013 (date de la dernière mise à jour de la base de données). Cette phase a permis d'un côté de recenser toute l'information déjà disponible sur d'anciens projets et de l'autre, de mettre en évidence quels types d'informations devaient être collectés sur les nouveaux projets (post 2013).

2.1.1.2 *Elaboration d'un questionnaire et réalisation des entretiens*

Afin de collecter les informations concernant les projets menés depuis 2013, des entretiens ont été menés sur la base d'un questionnaire (Annexe). Cette étape a été menée en articulation avec le stage mené par Mme Miléna Guillemois au sein de la DREAL Normandie intitulé "Propositions de mesures de restauration écologique sur l'estuaire de la Seine dans le cadre du projet REPERE". Ce questionnaire a été créé de manière à satisfaire les besoins en informations des deux stages.

Pour ce faire, 27 acteurs du territoire susceptibles d'avoir réalisé des projets de restauration écologique ont été contactés afin de renseigner le questionnaire. Les questions portaient sur les principaux axes caractérisant un projet de restauration, notamment le contexte de la mesure, sa planification (objectifs et mise en place), le type de suivis réalisés et le bilan du projet.

2.1.1.3 *Intégration des informations dans la BDD restauration du GIP Seine-Aval*

En complément, une analyse bibliographique de la documentation relative aux différents projets a été réalisée. Un important travail d'homogénéisation, de catégorisation et d'organisation des informations a été effectué afin de faciliter leur implémentation, leur gestion et leur utilisation dans la base de données. Les informations ont été ainsi organisées sous forme d'une base de données MS Access (ou PostGIS) afin d'en faciliter l'exploitation dans les phases suivantes du projet.

2.1.2 *Analyse des données*

Sur la base des projets recensés, une méta-analyse a été privilégiée. Une Analyse Factorielle Multiple (AFM) a été réalisée afin d'identifier une typologie des différents types de projets et ainsi identifier les variables (quantitatives et/ou qualitatives) qui structurent les groupes. Sur la base des résultats obtenus, des analyses descriptives ont été effectuées afin d'alimenter les retours d'expériences. A partir des différents objectifs établis (cf. §1.4), des analyses dédiées ont été réalisées afin d'obtenir des informations concernant :

- Le contexte (mesure réglementaire dans le cadre ERC, de mise en conformité liée au SDAGE, initiative volontaire, etc.)
- Les coûts (cumulés, par unité de surface selon habitat...)
- Les surfaces et les types de milieux concernés par la restauration
- Les objectifs (spécifiques, fonctionnels, habitats)
- Les suivis écologiques (type et nombre d'indicateurs)

2.1.3 *Formalisation des retours d'expérience (REX)*

Les résultats principaux issus de l'analyse des données ont été déclinés sous forme de retours d'expérience. Ces REX ont pour objectif de mettre en avant les tenants et les aboutissants des projets de restauration, depuis leur planification jusqu'à l'évaluation de leur



DEMARCHE

succès, en passant par leur mise en œuvre. Des éléments de réflexion sont ensuite données pour guider les futurs porteurs de projet.

3. CARACTERISATION DES PROJETS DE RESTAURATION

3.1 Le contexte de la restauration écologique dans l'estuaire de la Seine

Au total, 33 projets de restauration écologique¹ ont été recensés pour l'estuaire de la Seine (Figure 4, Annexe 2), pour la période comprise entre 1990 et 2021 (14 étaient déjà présentes dans la base de données du GIP Seine-Aval et toutes n'ont pas nécessité d'entretien auprès des acteurs).

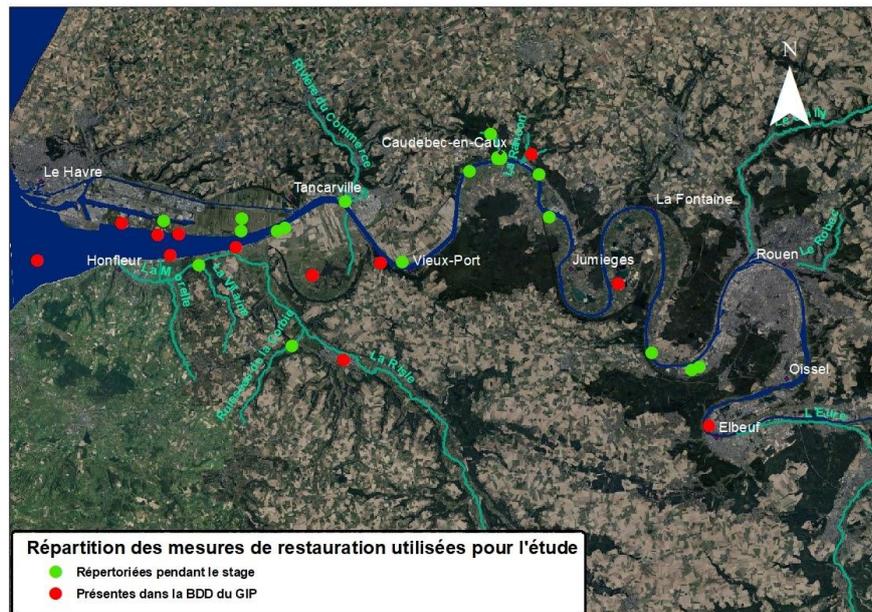


Figure 4 Répartition des projets de restauration analysés dans le cadre de l'étude

¹ En lien avec la définition de restauration écologique fournie auparavant, les projets de "renaturation de berges" qui consistent à végétaliser des berges ou à ajouter des enrochements et dont la principale vocation est la protection face aux inondations ou encore la protection face à l'érosion, ne rentrent pas dans le cadre de notre travail. Certains projets sont encore en cours ou en phase de réflexion et d'autres étaient trop éloignés géographiquement de la Seine pour que l'on considère cela comme de la restauration estuarienne. Pour 5 projets (concernant principalement des mesures de restauration de continuité écologique sur les cours d'eau), il n'a pas été possible de récupérer les informations et ils n'ont donc pas été intégrés aux analyses (Erreur ! Source du renvoi introuvable.).

RÉSULTATS

Depuis 1990, il est possible d'observer une croissance du nombre de mesures (Figure 5). Seuls 2 projets de restauration écologique ont été réalisés entre 1990 et 2000, contre 31 mesures effectuées entre 2000 et 2021, soit 95% du total des mesures de restauration écologique dans l'estuaire.

Les mesures effectuées dans le cadre des obligations réglementaires représentent 82% des tous les projets réalisés. 18 projets de restauration ont été effectués dans le cadre des obligations réglementaires liées à la séquence ERC (Eviter, Réduire, Compenser), principalement réalisés par des aménageurs publics et 9 concernent la restauration de continuité écologique des cours d'eau (RCE), dans le cadre d'une mise en conformité réglementaire (ex : suppression de seuil empêchant la libre circulation piscicole), principalement effectués par des collectivités et syndicat mixte. Sur l'ensemble, seuls 18% des projets sont issus d'initiatives locales volontaires visant à améliorer le fonctionnement des milieux estuariens.

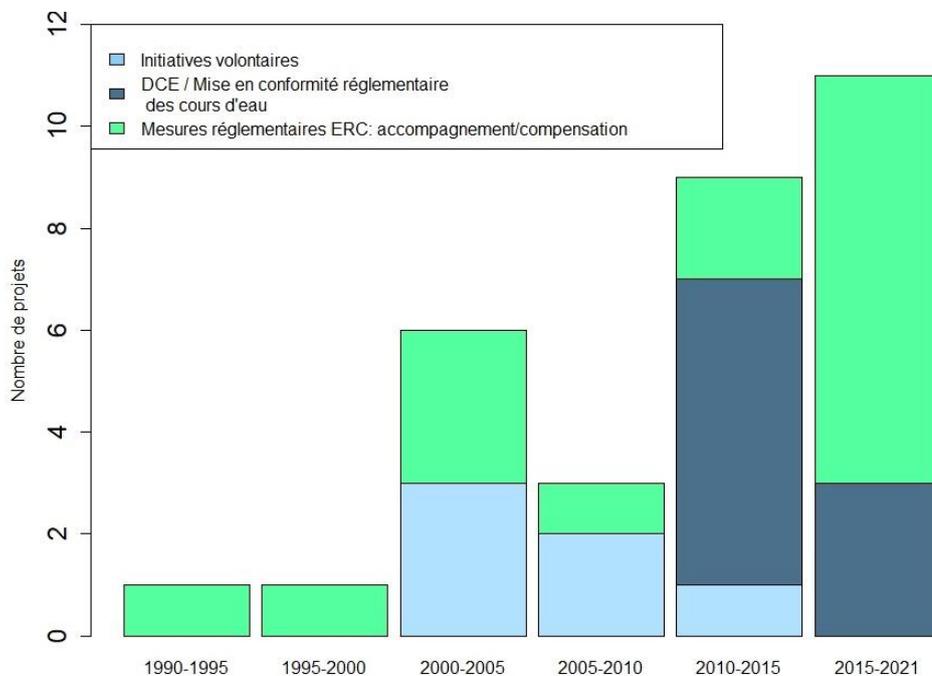


Figure 5 Distribution temporelle du nombre de projets de restauration écologique réalisés dans l'estuaire de la Seine (n = 31 projets)



3.2 Typologie des mesures de restauration écologique

Une Analyse Factorielle Multiple (AFM) sur les données quantitatives et qualitatives a été utilisée pour réaliser une typologie des mesures de restauration écologique menées dans l'estuaire (Figure 6).

Plusieurs types de variables ont été intégrés dans l'analyse, notamment :

- Des variables discrètes qualitatives :
 - Type de restauration : restauration de la continuité écologique, réhabilitation d'habitat, réaffectation/re-création d'habitat
 - Zonation : alluviale, intertidale ou aquatique pour les cours d'eau affluents de la Seine
 - Contexte réglementaire : ERC, RCE/SDAGE, initiative locale
- Des variables quantitatives :
 - Coûts
 - Surfaces²
 - Degré d'ambition des objectifs³

² Pour les mesures effectu es dans le cadre RCE, s'agissant du linéaire du cours d'eau restauré et non pas des surfaces, elles ont été int gr es à l'analyse sans l'information spatiale les concernant.

³ Pour chacune des mesures une note de 1   3 a été attribu e. 1 pour les mesures consid r es comme les moins ambitieuses en matière de restauration de milieux estuariens, elles correspondent à des mesures d'entretien de milieux d j   existant (ex : Curage de la Grand'Mare, Gestion des niveaux d'eau pour favoriser les prairies humides du Hode). Le niveau 2 correspond aux mesures nécessitant la création de milieux qui ne sont cependant pas connectés à la Seine (ex : restauration de prairie humide par connexion à la nappe alluviale). Le niveau 3 est considéré comme le plus ambitieux puisqu'il vise la création de milieux connectés directement à la Seine et donc soumis aux conditions estuariennes (Ex : Suppression d'une digue pour recrer des vasières).



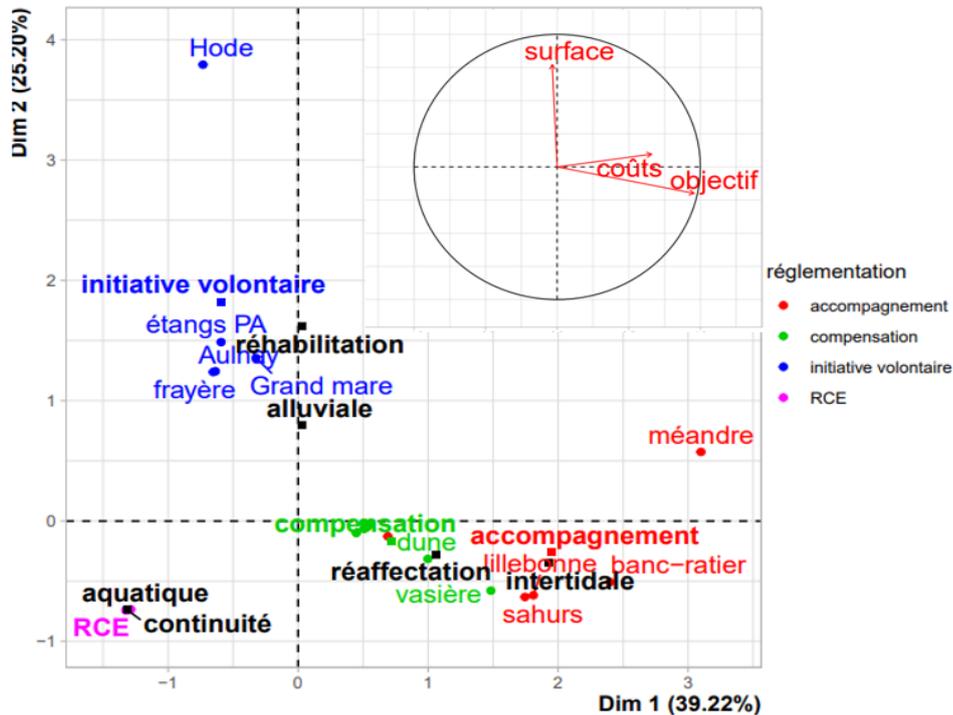


Figure 6 Analyse Factorielle Multiple (n = 26 projets)

L'analyse permet de distinguer 3 groupes principaux, qui coïncident aux différents contextes de mise en place des mesures de restauration (ERC, initiative volontaire, RCE dans le cadre du SDAGE). L'axe 1 (inertie 40%) est corrélé positivement au degré d'ambition des objectifs de restauration et aux coûts du projet, alors que l'axe 2 (inertie 25%) est corrélé positivement aux surfaces restaurées. Les mesures liées à la séquence ERC (principalement de la re-création de milieux), semblent être les mesures les plus ambitieuses en matière d'objectif (notamment les mesures d'accompagnement), mais ne représentent pas les surfaces restaurées les plus importantes, à l'inverse des mesures d'initiatives volontaires (principalement de la réhabilitation), qui représentent les surfaces les plus importantes, avec un degré d'ambition peu élevé ainsi que des coûts moindres. Les mesures de restauration de continuité des cours d'eau analysées dans cette étude, font aussi partie des mesures les moins coûteuses. Cependant, cette condition appartient exclusivement aux projets recensés dans le territoire estuarien dans le cadre de ce projet et n'est pas représentative des coûts liés à la restauration de la continuité écologique. En fait, dans le territoire normand, plusieurs sont les exemples de mesures de restauration de la continuité écologique très coûteuses, comme par exemple l'effacement du barrage de la Madeleine dans la Risle (3,6 M €) ou du barrage de Martot. Les mesures RCE répertoriées concernent principalement la réhabilitation d'une continuité longitudinale sur les cours d'eau, via la destruction de seuils, remplacés par des rampes en enrochement (facilitation du passage pour la faune piscicole) ou encore via la remise dans un lit fossile du cours d'eau.

3.3 Les coûts de la restauration écologique dans l'estuaire de la Seine.

L'analyse des coûts des projets⁴ qui ont été réalisés depuis 1990 dans l'estuaire de la Seine (Figure 7), montre un incrément dans les dépenses allouées à la restauration écologique à partir des années 2000. Sur un total de 56 M € alloués à la restauration écologique, 90% des dépenses ont concerné les mesures effectuées dans le cadre de la séquence ERC. Un pic d'investissement de 36 M € est observable sur la période comprise entre 2000 et 2005. Ceci correspond principalement aux mesures de compensation et d'accompagnement, réalisées par le port du Havre avec la construction de Port 2000 (Figure 5).

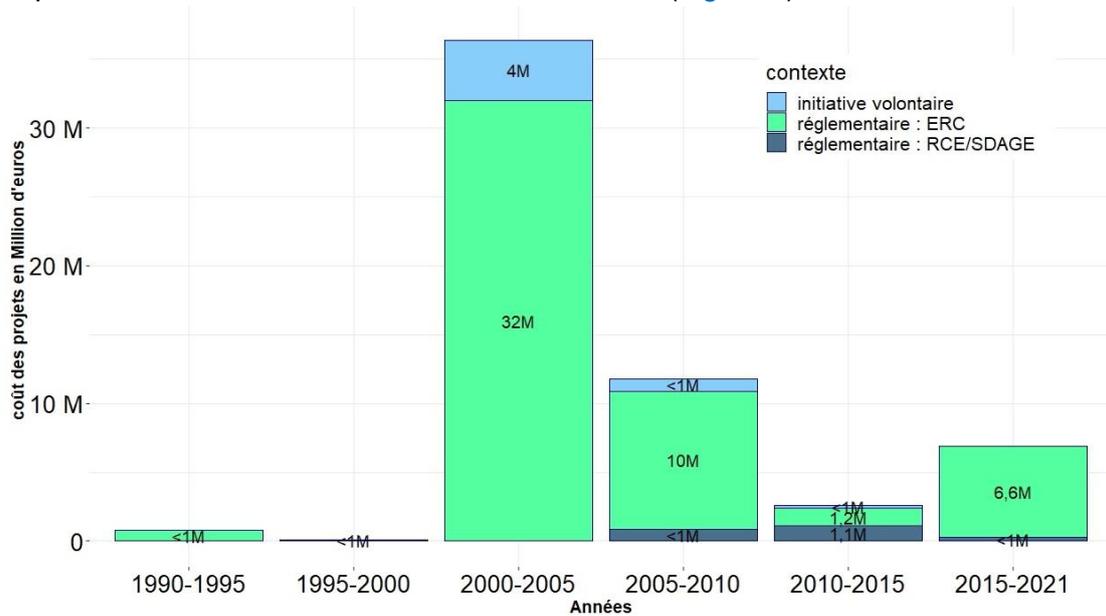


Figure 7 Dépenses allouées aux mesures de restauration écologique entre 1990 et 2021 (n = 28 projets)

L'analyse des coûts en fonction des types de restauration écologique (Figure 8), montre que les mesures de réaffectation ou recréation de milieux (ex : création d'un reposoir pour limicole en pleine mer, création d'un méandre artificiel, comblement d'une ballastière, etc...), sont les mesures les plus coûteuses dans l'estuaire de la Seine.

⁴ Il s'agit ici des coûts pour la réalisation de la mesure en tant que telle (étude, planification et réalisation), sans inclure les coûts annexes (gestion post-restauration, suivis écologiques, etc...)

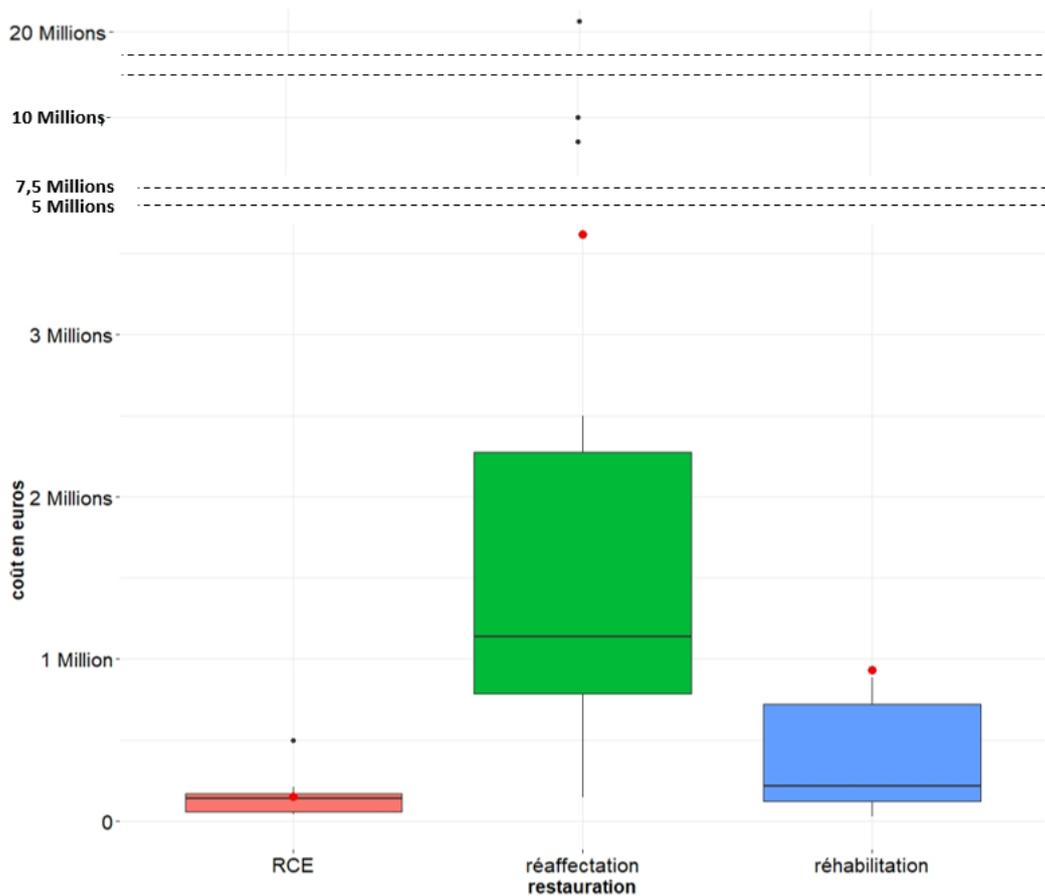


Figure 8 Coût des projets par type de restauration écologique⁵. Une rupture d'échelle a été créée afin de faciliter la lecture du graphique (n = 28 projets)

Dans le cadre des mesures recensées lors de cette étude, il est possible de constater que les coûts de la réaffectation/récréation d'habitats sont 2 à 6 fois plus élevés par rapport aux autres.

La réaffectation/récréation d'habitats concerne principalement la zone intertidale (Figure 6). La comparaison des coûts de restauration en plaine alluviale avec ceux de la zone intertidale

⁵ Une mesure RCE est une mesure de restauration de continuité (écologique mais aussi hydro-sédimentaire) sur un cours d'eau (effacement de seuil, création de rampe, aménagement d'un exutoire, etc...). Une mesure dite de réaffectation ou re-création, est une mesure de création d'habitats différents de l'occupation du sol pré-restauration (ex. réaffectation d'une culture intensive en prairie humide). Une mesure de réhabilitation vise à améliorer la fonctionnalité d'un milieu ou habitat déjà existant (ex. amélioration du caractère humide sur une prairie déjà existante).

montre que les coûts moyens par hectare de surface restaurée (Figure 9), sont inférieurs pour les habitats de la plaine alluviale (120K €) en comparaison avec les habitats en zone intertidale (500K €). Ceci peut s'expliquer par les difficultés techniques imposées par la mise en place des mesures de restauration en milieu intertidale (marnage, difficulté d'accès par la terre ou accès depuis le fleuve, etc.).

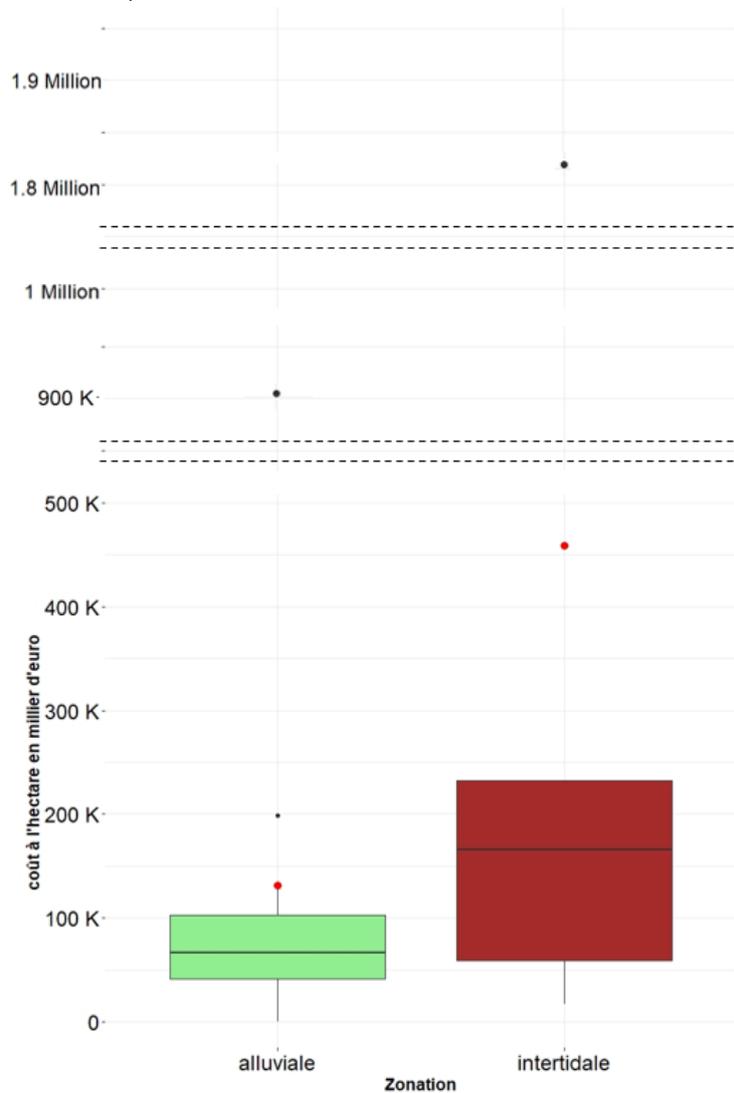


Figure 9 Coût par hectare des mesures de restauration écologique dans les milieux intertidaux (rouge) et de la plaine alluviale (vert). Le coût moyen des projets est représenté par le point rouge. Une rupture d'échelle a été créée afin de faciliter la lecture.

3.4 Les surfaces concernées par la restauration

En classant toutes les mesures via les surfaces concernées par la restauration, il est possible d'observer que 40% des mesures de restauration concernent des surfaces⁶ de moins de 10 ha (9 projets) (Figure 10). Le nombre de mesures décroît avec l'augmentation des classes de surface et seulement trois projets visent à restaurer des surfaces relativement importantes (respectivement 84, 123 et 900 ha).

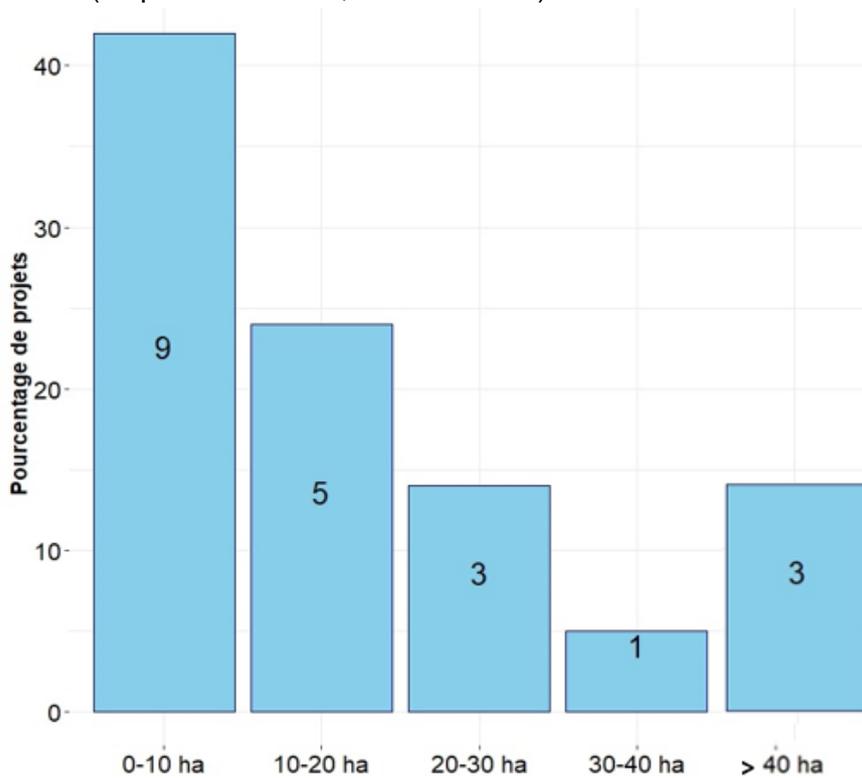


Figure 10 Nombre de mesures de restauration par classe de surface (n = 22 projets)

⁶ Les surfaces ont été calculées en prenant en compte les surfaces impliquées par les travaux de génie écologique (lorsque l'information était connue) et les surfaces bénéficiant directement de l'action de restauration, visées lors de la planification et réalisation du projet. Par exemple, pour le projet d'accompagnement de Port 2000 concernant la création du chenal environnemental, 123 ha totaux ont été comptabilisés (23 ha liés à la création du chenal environnemental + 100 ha de vasières restaurées). Lorsque le type d'habitat à restaurer n'était pas précisé (ex. restauration d'une zone humide), ce dernier a été classé sur la base d'une analyse spatiale complémentaire en tenant compte de sa localisation géographique. Les zones humides restaurées dans le lit mineur ont été ainsi classées en tant que "zones intertidales" et celles restaurées au sein du lit majeur en tant que "zones alluviales".

RÉSULTATS

Afin de mettre en perspective l'entité des surfaces restaurées, les pertes surfaciques d'habitat estuariens estimées lors des précédents travaux depuis 1973 (Muntoni, 2020), s'élèvent à approximativement 1500 ha pour les vasières et 5500 ha pour les milieux prairiaux. Il est aussi important de rappeler que face à ces pertes, les mesures de récréation d'habitat ont concerné seulement 180 ha. En revanche, 1130 ha d'habitats ont bénéficié de mesures de réhabilitation visant l'amélioration de leur fonctionnement (Figure 11).

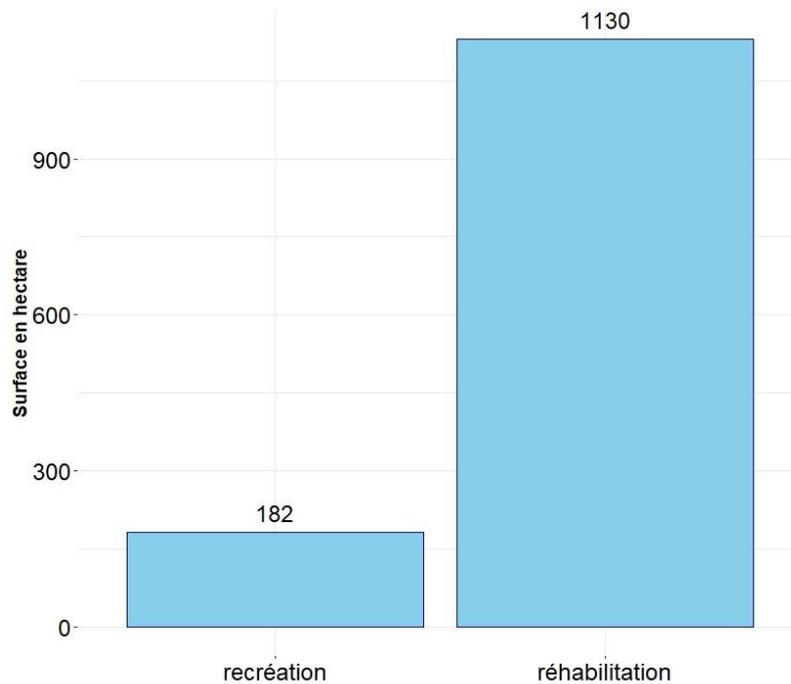


Figure 11 Surfaces totales restaurées par type de restauration (n = 22 projets)

L'analyse des surfaces restaurées pour chaque type d'habitat (Figure 12), montre que les mesures de restauration ont été réalisées davantage dans les milieux de la plaine alluviale. Sur un total d'approximativement 1400 ha restaurés, plus de 1200 ha ont concerné la plaine alluviale, soit environ 10 fois plus par rapport aux milieux intertidaux (environ 160 ha). Plus précisément, la restauration des prairies humides représente presque la totalité des mesures menées en plaine alluviale, avec environ 900 ha réhabilités. Pour ce qui concerne la zone intertidale, les efforts se sont concentrés davantage sur la restauration des vasières (140 ha restaurés).

RÉSULTATS

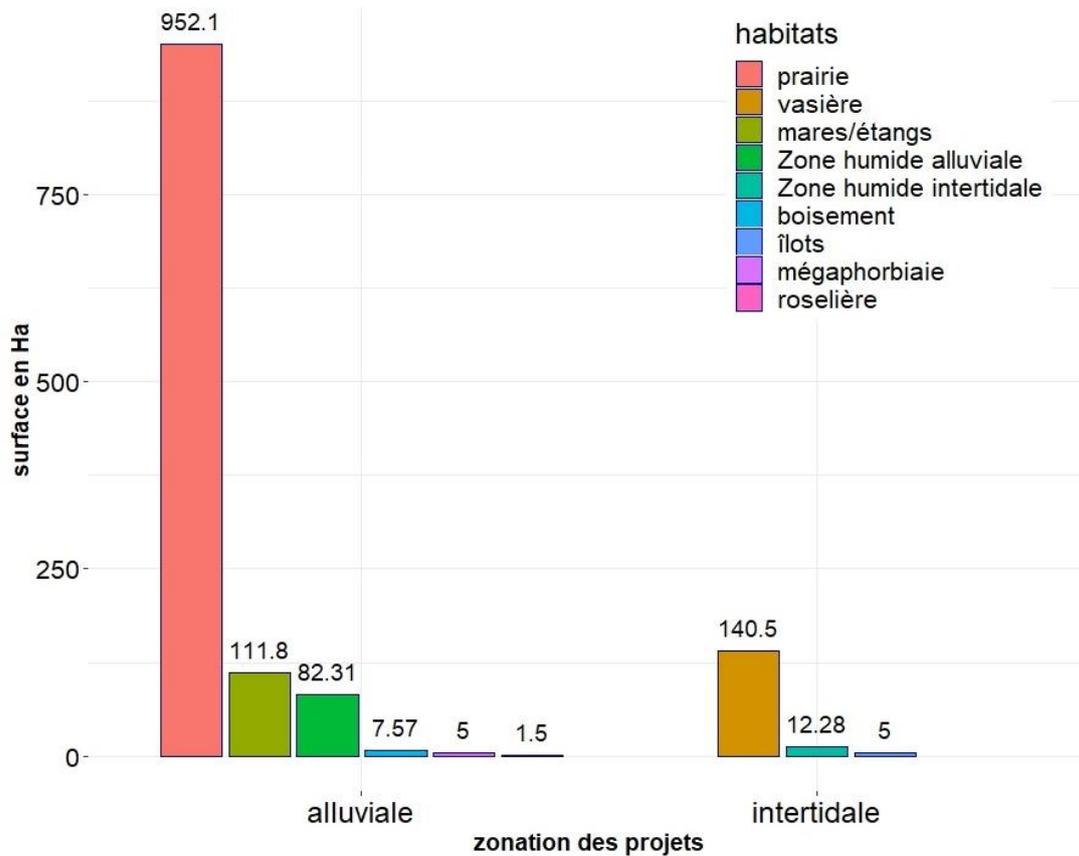


Figure 12 Surfaces restaurées en plaine alluviale et en zone intertidale⁷ (n = 22 projets)

3.5 Les objectifs de restauration écologique

Un des objectifs de cette étude est de caractériser les objectifs de restauration des et leur déclinaison dans l'ensemble des mesures. Pour une telle finalité, les objectifs ont été classés par degré de précision, du plus généraliste au plus précis⁸ (Figure 13).

⁷ Les classes "Zone humide alluviale" et "Zone humide intertidale", ont été utilisé lorsque l'objectif d'habitat n'était pas précisé (Création d'une zone humide comme seule indication) ou lorsque la mesure visait un ensemble d'habitats caractéristiques de la plaine alluviale ou de la zone intertidale (ex : Restauration d'une mosaïque d'habitats intertidaux comprenant vasière, roselière, etc... Sur X ha).

⁸ La précision des objectifs augmente avec la définition de fonctions écologiques précises ainsi que des espèces précises ciblées (ex : brochet, Petit Gravelot, scirpe triquètre, etc...).



Près de 45% des mesures de restauration écologique sont orientées par des objectifs généralistes. Dans ces cas, la mesure ne vise pas d'habitat particulier ni de fonctions écologiques ni un groupe taxonomique précis (ex : restauration d'une zone humide pour favoriser l'accueil de la biodiversité). 40% des mesures précisent l'habitat (une prairie, une vasière, une roselière, etc...). 20% des mesures détaillent des objectifs précis en matière de fonctionnalité (Figure 14, principalement vis à vis de l'avifaune), exclusivement en lien avec un ou plusieurs groupes faunistiques (ex : restauration d'une zone de repos pour limicoles ou encore d'une frayère à brochets). 20% des mesures décrivent une ou plusieurs espèces cibles (floristiques ou faunistiques) et 6% mettent en avant les objectifs les plus précis (habitat+fonction+espèce(s) cible(s)).

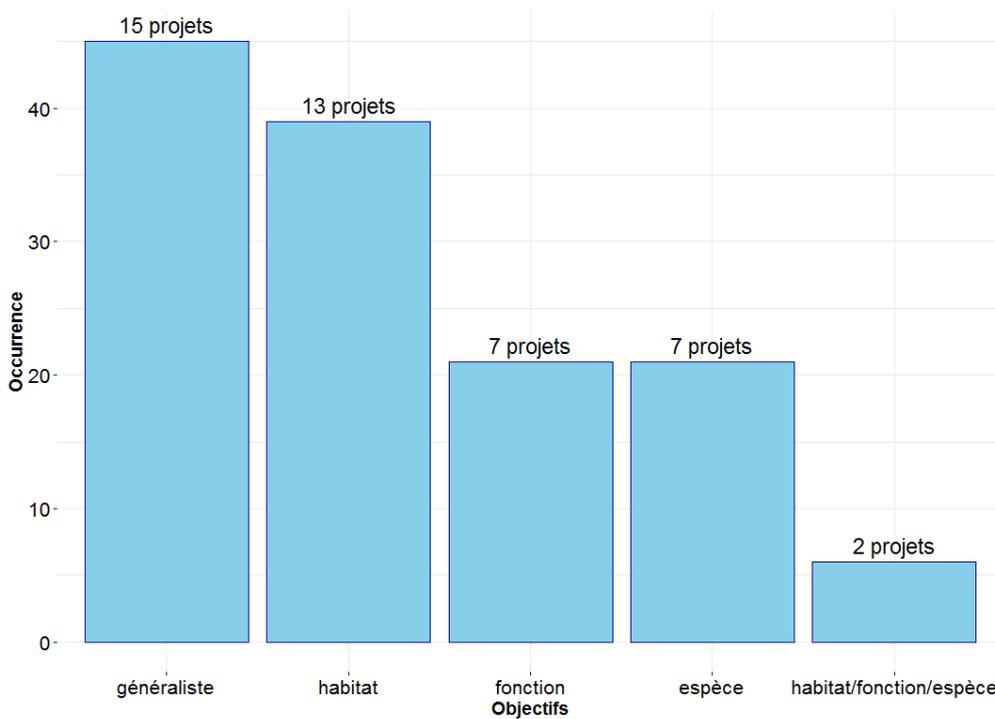


Figure 13 Occurrence des classes d'objectif sur l'ensemble des projets (du plus généraliste, au plus précis⁹) (n = 32 projets)

⁹ Un objectif classé comme "habitat/fonction/espèce" représente ce qu'il y a de plus précis, ou plus détaillé, avec un habitat ou plusieurs habitats cibles ainsi que des fonctions écologiques précises (qui ne se limitent pas à l'accueil de tel ou tel groupe biologique) et une ou plusieurs espèces spécifiques.

Les objectifs à vocation faunistique, et plus précisément concernant l'avifaune et l'ichtyofaune, apparaissent dans 60% des projets¹⁰ (Figure 14). 20% des projets présentent des objectifs mettant en avant des enjeux floristiques, notamment la restauration des assemblages typiques des zones humides.

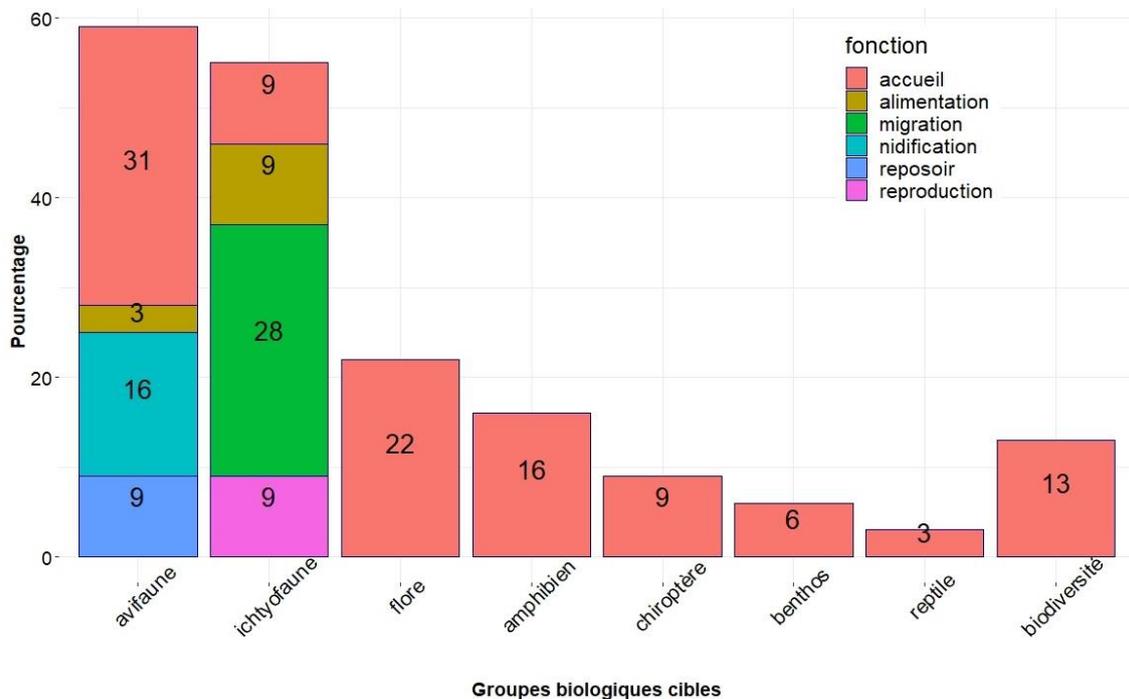


Figure 14 Occurrence des groupes biologiques et fonctions visées par la restauration (n = 28 projets). Un projet peut cibler une ou plusieurs espèces précises parmi un des groupes biologiques et pas nécessairement l'ensemble du groupe en question

D'autres groupes biologiques sont parfois visés (amphibien, chiroptère, zoobenthos, etc...), cependant avec une faible représentativité, sur l'ensemble des projets (de 3 à 16 %). Concernant les fonctions écologiques ciblées par la restauration, elles sont détaillées lorsqu'il

¹⁰ Si la majorité des projets visent à favoriser un ou plusieurs groupes faunistiques, il ne s'agit pas de fonctions précises (souvent l'objectif est de favoriser l'accueil de l'avifaune par exemple, ou encore faciliter le passage de la faune piscicole). Une fonction précise (reposoir, nourricerie, frayère, etc...), n'est précisée que dans 20% des cas (Figure 13), (la fonction migration, qui consiste à faciliter la libre circulation des poissons en rétablissant la continuité d'un cours d'eau, n'est pas ici considérée comme une fonction « précise »).

La classe biodiversité est utilisée pour des projets dont l'objectif est d'améliorer la capacité d'accueil de l'ensemble de la biodiversité, sans distinction.

s'agit de l'avifaune et l'ichtyofaune (Figure 14). Les fonctions écologiques les plus récurrentes sont alors la migration pour la faune piscicole (30% des cas), la nidification pour l'avifaune (16% des cas) ou encore les fonctions d'alimentation, de reproduction ou de reposoir (9% d'occurrence pour chacune de ces fonctions).

Ces constats sur la définition des objectifs de restauration sont à mettre en relation avec les types de projets et d'obligations dont ils découlent. Les objectifs visant des espèces précises doivent être le plus souvent relevés de la réglementation concernant la protection des espèces. Or cette réglementation se base sur les connaissances acquises sur les différents groupes taxonomiques à l'époque de la parution des arrêtés ministériels, ce qui explique, par exemple, une forte dominance des objectifs faunistiques par rapport aux autres groupes ou fonctions. Ces objectifs ont vocation à répondre à une exigence réglementaire et non à guider un projet de restauration écologique. Ceci peut représenter une limite forte pour la cohérence des projets de restauration qui ont lieu dans le cadre de la compensation.

3.6 Les suivis écologiques post restauration

25 projets présentent des suivis post restauration (Figure 15). Dans la plupart des cas (14 projets), ces suivis s'inscrivent dans les démarches liées au contexte réglementaire du projet de restauration (ex. ERC, avec obligation de résultats).

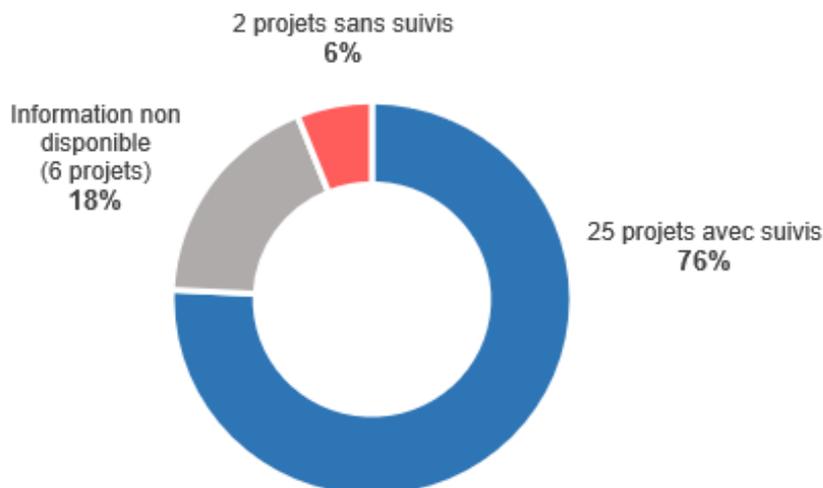


Figure 15 Répartition des projets sur la base des suivis écologiques réalisés post-restauration

Sur l'ensemble des suivis écologiques répertoriés dans l'étude, 73% sont à vocation faunistique, 12% sont floristiques et 14% abiotiques¹¹ (ensemble des paramètres physiques, chimiques, hydromorphologiques, topo-bathymétriques du site). Aucun projet de restauration ne s'intéresse aux processus biogéochimiques (production primaire, stockage de carbone, dénitrification, etc...). Parmi les suivis faunistiques, l'avifaune et l'ichtyofaune sont les plus représentés (respectivement 60% et 50% d'occurrence sur l'ensemble des projets (Figure 16). 50% des projets incluent un suivi de flore et 35% un suivi sur les paramètres physico-chimiques (abiotiques).

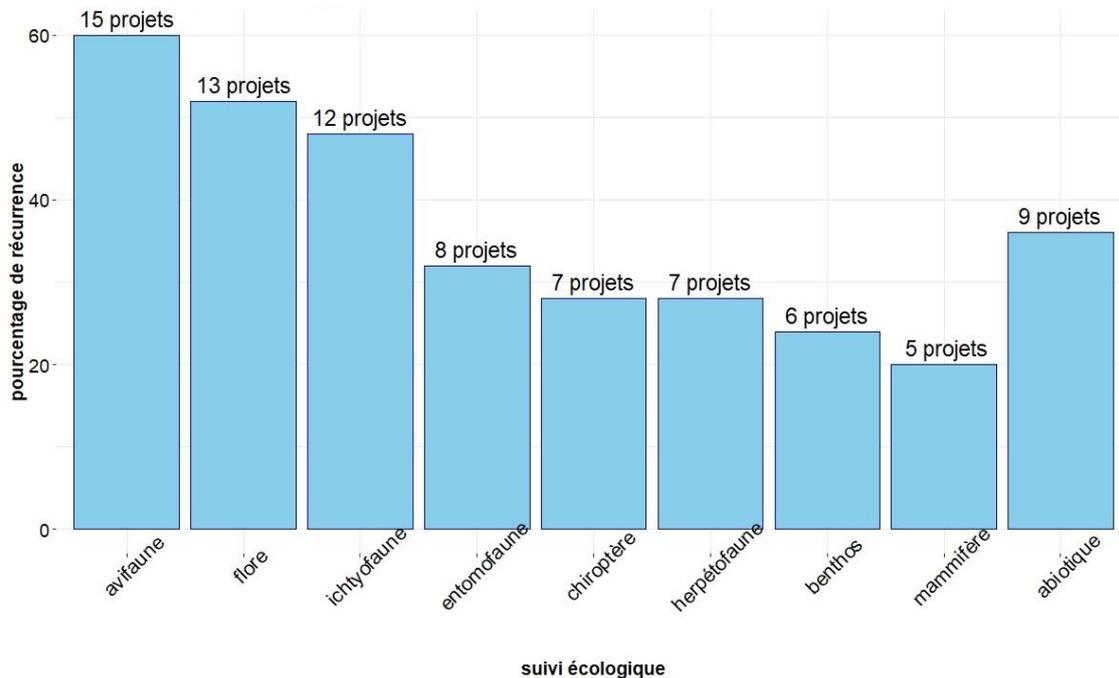


Figure 16 Occurrence des groupes biologique les plus fréquents¹² dans les suivis écologiques (n = 25 projets)

¹¹ Il s'agit de la fréquence sur le total des suivis répertoriés pour les 25 projets (il peut y avoir dans un même projet 5 suivis faunistiques, 1 floristique et 1 abiotique, par exemple)

¹² Sont considérés comme indicateurs, les entités faisant l'objet des suivis écologiques. Ces derniers ont tous été regroupés par groupe biologique (avifaune, ichtyofaune, flore, etc...). Si un projet se concentre principalement sur les limicoles par exemple, ce dernier est classé dans le groupe d'indicateurs avifaune. Les indicateurs abiotiques regroupent tous les éléments physico-chimiques du milieu étudié (morphologie, granulométrie, qualité des eaux, bathymétrie, etc...)

Le nombre d'indicateurs utilisés dans les suivis post restauration permet de voir comment est évalué le projet. A savoir, si les projets sont évalués dans leur ensemble, à l'aide d'un panel d'indicateurs (richesse, abondance, biomasse, pour un groupe taxonomique ou une espèce donnée, ou encore des indicateurs abiotiques) ou bien ne se concentrent que sur quelques-uns (Figure 17).

Pour 50% des mesures de restauration, les suivis se concentrent sur moins de 3 indicateurs¹³ et près de 65% des mesures ont moins de 6 indicateurs. L'ensemble de ces indicateurs étant majoritairement représenté par les différents groupes faunistiques (avifaune, ichtyofaune, chiroptère, etc...), très peu par la flore et les paramètres abiotiques (Figure 16) et pas du tout par des indicateurs de fonctions biogéochimiques.

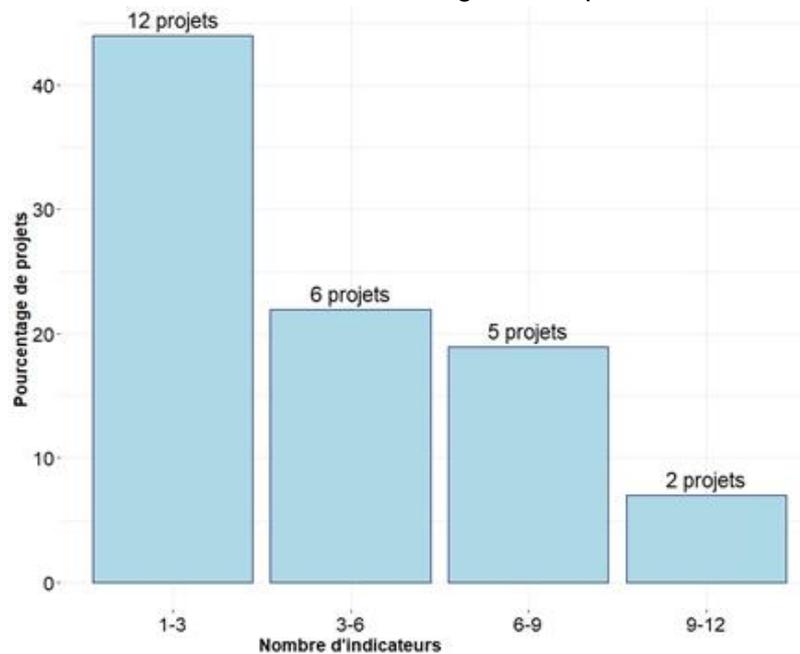


Figure 17 Pourcentage de projets présent dans chaque classe d'indicateurs (n = 25 projets)

3.7 La gestion des milieux post restauration

Dans 70 % des cas, un entretien de la végétation est régulièrement réalisé. Il s'agit de pâturage ou fauchage sur prairie, roselière, etc..., ou encore d'entretien de la végétation pour

¹³ Une nouvelle fois, c'est le groupe biologique suivi qui est comptabilisé comme un seul indicateur et pas les paramètres mesurés (richesse spécifique, abondance par espèce, biomasse, etc...). Si un projet mesure la richesse spécifique et l'abondance des limicoles, un seul indicateur avifaunistique a été retenu. De même si par exemple, un coefficient d'abondance-dominance et la richesse spécifique sont mesurés pour la flore.

garder des milieux tels que les fossés, mares ou filandres ouverts. Dans 16 % des cas, une gestion des espèces exotiques envahissantes¹⁴ est réalisée ou prévue (la problématique des EEE revient dans l'ensemble des mesures de restauration). 12% des mesures nécessitent une gestion hydraulique constante (via des clapets ou des buses), pour assurer leur bon fonctionnement et 8% des mesures prévoient la réalisation de curage (entretien de mares, filandres, etc...).

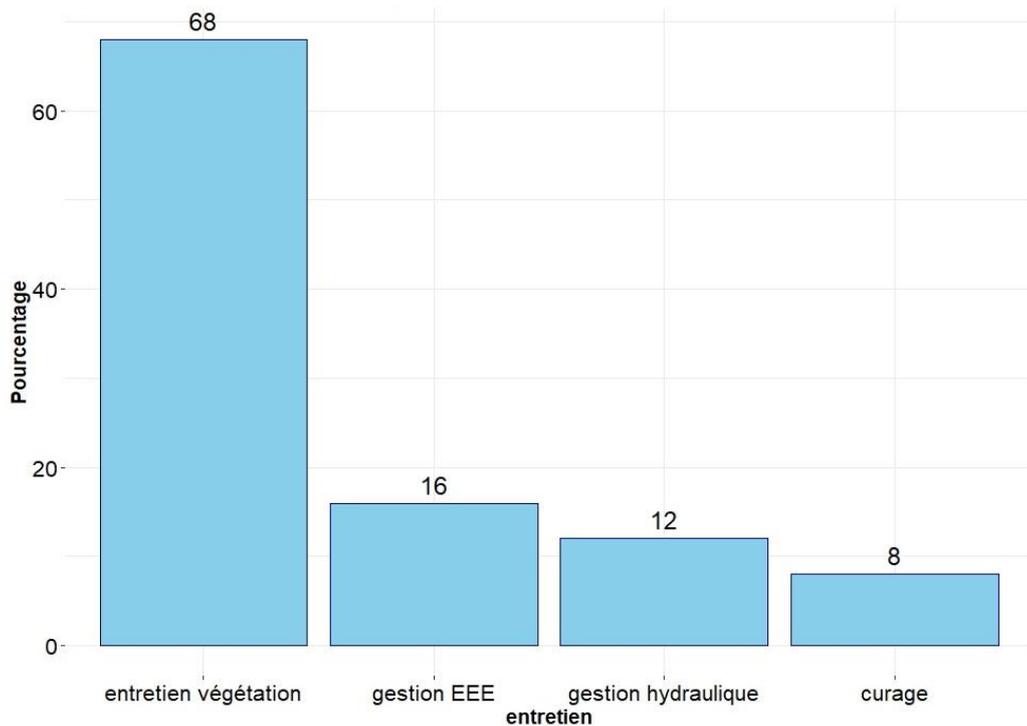


Figure 18 Type d'entretien nécessaire après restauration

¹⁴ Dans 16% des cas, il est mentionné avant la mise en place du projet, qu'une gestion des EEE est prévue, même si la problématique des EEE est récurrente sur l'ensemble des projets

4. RETOURS D'EXPERIENCE

4.1 REX 1 : La restauration écologique en estuaire de Seine se concrétise principalement en réponse à de nouveaux projets d'aménagement induisant des impacts

Parmi la totalité des projets recensés, 82% des projets de restauration écologique ont été mis en œuvre dans le cadre des obligations réglementaires (Figure 4). Plus précisément, 66% des mesures ont été réalisées en relation avec l'application de la doctrine ERC (compensation et/ou accompagnement). Ceci suggère que, depuis les années 2000, **la restauration écologique en estuaire de Seine est utilisée principalement en tant qu'outil de compensation pour pallier aux impacts engendrés par des nouveaux aménagements.**

L'objectif de la séquence ERC est de compenser les impacts environnementaux engendrés par les projets d'aménagement du territoire sur l'environnement qui ne peuvent être ni évités ni réduits. La loi de 2016 consacre à la compensation un chapitre spécifique au sein du code de l'environnement (articles L163-1 à L163-5), lui assignant notamment « un objectif d'absence de perte nette, voire de gain de biodiversité » et précisant que les mesures de compensation « doivent se traduire par une obligation de résultat et être effectives pendant toute la durée des atteintes » (Sartre & Doussan, 2018). Cependant, même si la compensation trouve son champ d'application à l'échelle d'un projet, elle s'intègre moins bien à des échelles plus globales, notamment pour des milieux fortement anthropisés qui nécessitent une restauration surfacique et fonctionnelle importante pour résorber les effets cumulés des aménagements passés (Muntoni, *comm. pers.*). **En effet, dans le cadre de la compensation en estuaire de Seine, les effets cumulés des projets sont rarement pris en compte.** Or, plusieurs études (Ducrotoy & Dauvin, 2008; Muntoni, 2020; Rochette et al., 2010) ont montré que l'estuaire de la Seine a subi au fil des années des pertes surfaciques non négligeables qui ont entraîné d'importantes pertes en termes de fonctionnalité. C'est seulement à partir de la fin de la première décennie des années 2000, avec la mise en place de la doctrine "no net loss" (Bigard et al., 2020), que le cadre réglementaire environnemental a imposé une attention particulière aux pertes environnementales et aux mesures finalisées à contrepeser ces pertes. Cependant, avant la mise en place de ce cadre, une multitude de projets passés ayant impacté le fonctionnement environnemental de l'estuaire n'ont pas été dédommagés.

La majorité des projets, pour la plupart réalisés dans ce cadre réglementaire, vise à compenser les pertes engendrées par les différents projets d'aménagement, au cas par cas,

sans une réelle prise en compte des effets cumulés¹⁵, ni d'une stratégie globale de restauration écologique. Même dans le meilleur des scénarios, avec des mesures de compensation efficaces et capables de contrebalancer les pertes surfaciques et fonctionnelles des projets d'aménagement récents, les surfaces fonctionnelles de l'estuaire resteraient équivalentes et la restauration selon une référence historique resterait inatteignable.

4.2 REX 2 : La restauration écologique des habitats fortement dégradés nécessite un effort économique important (mais qu'il faut relativiser par rapport aux coûts totaux du projet et de ses impacts)

Les mesures qui prévoient la récréation d'un habitat se révèlent être plus coûteuses que celles qui prévoient la réhabilitation d'habitats déjà existants (Figure 6). Ceci est surtout vrai dans le cadre de la récréation des habitats intertidaux, pour lesquels les techniques de génie écologique à mettre en œuvre se révèlent être plus complexes et souvent plus coûteuses.

Les analyses effectuées sur les projets recensés lors de cette étude montrent que, en lien avec le REX 1, **les moyens financiers plus importants pour la restauration écologique dans l'estuaire de la Seine ont été déployés pour la mise en place de mesures de compensation et/ou accompagnement dans le cadre de la séquence ERC.** Cependant, lorsque les moyens financiers utilisés pour les projets de compensation, sont comparés avec ceux des principaux projets d'aménagement à l'origine des impacts, il ressort qu'en moyenne, **le coût des mesures environnementales ne représente que le 7% du budget total du projet** (Annexe).

4.3 REX 3 : Les mesures de restauration concernent pour la plupart des surfaces relativement faibles et sont localisées principalement en plaine alluviale

A l'échelle de l'estuaire, **un nombre important de projets concerne la restauration de surfaces de taille limitée (<10 ha).** Les projets sont souvent réalisés indépendamment les uns des autres, de manière opportuniste, puisque la disponibilité foncière des terrains est rendue complexe, de par les nombreux usagers du territoire. Les espaces allouables à la restauration sont alors limités en nombre et en surface. Malgré l'intérêt écologique avéré des

¹⁵ Les effets cumulés sont l'ensemble des impacts consécutifs induits sur un milieu par les différents aménagements ou activités anthropiques (Holl & Howarth, 2001). La quantification des impacts cumulés et la calibration de mesures de compensation s'avèrent particulièrement compliqués dans les milieux impactés par plusieurs aménagements consécutifs.



milieux intertidaux (alimentation, nourricerie, épuration, production primaire, etc...) (Capderrey et al., 2016), la restauration de ces milieux apparaît encore difficile. Cela peut s'expliquer par plusieurs facteurs : difficulté technique accrue en zone intertidale (marnage, batillage, érosion, tempête, etc...), coûts plus élevés (Figure 6), disponibilité des terrains et contraintes liées aux usages.

Il est reconnu dans la littérature que, afin de garantir une nette amélioration du fonctionnement écologique, **il est nécessaire de restaurer de grandes étendues surfaciques et d'assurer la mise en cohérence des différentes mesures réalisées à l'échelle de l'estuaire** (Ducrotoy & Dauvin, 2008). Des projets de plus grande ampleur, réunissant plusieurs acteurs, permettraient de restaurer de plus grandes surfaces (plusieurs centaines voire milliers d'hectares), plus intéressantes que de petites surfaces éparpillées et déconnectées entre elles (Gann et al., 2019; Moreno Mateos et al., 2015; Simenstad et al., 2005; Teichert et al., 2018), dans une logique de continuité et de complémentarité écologique.

En France, plusieurs initiatives telles que le plan Rhône ou plus récemment le projet REPERE sur l'estuaire de la Seine, essaient de fournir une vision partagée par tous les acteurs du territoire afin d'alimenter une stratégie globale et cohérente à des échelles plus larges que le projet local. Le besoin d'une stratégie globale pour la gestion et la restauration de l'estuaire de la Seine a été évoqué par le monde scientifique depuis plusieurs décennies (Dauvin, Ducrotoy, etc) afin de sortir de la "tyrannie des petits projets de restauration" (Romana, ex-président du Conseil Scientifique de l'estuaire de la Seine, comm. pers.). En effet, les résultats de ce travail confirment ultérieurement ce besoin. **Seules 18% des mesures sont articulées entre elles¹⁶ et se basent sur une approche fonctionnelle globale et cohérente à l'échelle de l'estuaire.**

4.4 REX 4 : Une définition des objectifs trop généraliste et difficile

L'analyse a démontré **un manque de précision dans la définition des objectifs** avec d'une manière générale, des objectifs ne définissant pas précisément d'habitat(s), alors qu'il est nécessaire, pour guider le génie écologique de manière efficace, de bien définir les caractéristiques biotiques (communauté spécifique) et abiotiques (paramètres physico-chimiques) des milieux que l'on cherche à restaurer. Les objectifs écologiques sont majoritairement faunistiques et ciblent un ensemble de groupes biologiques peu diversifié (principalement l'avifaune et l'ichtyofaune), sans pour autant détailler quelle partie de leur cycle de vie devrait être favorisée et donc quelles caractéristiques rechercher dans l'habitat recrée sur la base des préférences écologiques des espèces et de leur maintien dans le temps.

¹⁶ Lorsque 2 mesures sont géographiquement proches et s'articulent entre elles ou sont complémentaires en matière d'objectifs d'habitats ou surfaciques (ex : création de l'île du ratier en complément du reposoir sur dune). Trois paires de mesures répondant à ces conditions ont été identifiées (6 projets sur les 33, soit 18%).

Cette imprécision peut s'expliquer par un manque de connaissances robustes des relations abiotiques-biotiques des milieux estuariens (Capderrey et al., 2016). Ceci se traduit dans une difficulté corollaire à identifier les leviers de restauration d'ordre physique (facteurs environnementaux à recréer et ou pérenniser) ou bio-écologique (ex. préférences écologiques pour les espèces, continuité écologique entre habitats, etc).

Dans le cadre de la compensation, les objectifs de la mesure visent à compenser les pertes engendrées par les différents projets d'aménagements, sur des étendues surfaciques souvent limitées par la disponibilité foncière. De plus, si les impacts ne sont pas précisément définis (en termes d'habitat, fonctions ou espèces impactées) lors des études d'impact, cela se peut se répercuter sur les objectifs de restauration. En effet, ne sont pas rares en estuaire de Seine les cas d'objectifs qui ne s'attardent qu'à la recréation de surface d'un habitat ou encore d'une « zone humide » sans pour autant avoir comme objectif la restauration d'un habitat précis, de toutes les fonctions qui y sont liés, et des composantes biotiques et abiotiques qui la caractérisent (Capderrey et al., 2016). En général, les maîtres d'ouvrage disposent d'un site sur lequel il faut faire tenir l'ensemble des exigences réglementaires (ex. compensation, patrimonialité, etc.), ce qui peut représenter une limite forte pour la cohérence des projets vis-à-vis d'une stratégie globale de restauration.

La restauration au sens strict, qui consiste à revenir en arrière pour amener le site vers son état historique, n'apparaît pas dans ce contexte un objectif réaliste, ni réalisable, car les contextes socio-économique et écologique actuels sont bien différents de ceux passés et que l'information écologique sur l'état historique des sites n'est pas complète et ne pourrait pas être utilisée comme état de référence (Hobbs, 2007)

L'utilisation d'un site de référence, lui-même fonctionnel, en tant qu'objectif à atteindre pour le milieu à restaurer, est fortement recommandé dans la littérature (Cadier et al., 2020; Ruiz-Jaen & Aide, 2005; Capderrey et al., 2016 ; SER, 2004). Il est cependant très difficile, dans le cadre de l'estuaire de la Seine, de trouver ces sites de références. En effet, l'estuaire de la Seine est un système complexe et "stressé" par les différentes pressions environnementales et anthropiques (Elliott & Quintino, 2007). Ces pressions conditionnent l'état écologique et structurel du site de référence qui pourrait être sélectionné et implique une caractérisation des relations pressions-fonctionnement écologique du site qui reste complexe. Définir un site de référence nécessiterait de comprendre l'ensemble de ces caractéristiques et de son fonctionnement, en lien avec les pressions anthropiques qui lui sont inféodées (Muntoni, 2020b).

La définition correcte des objectifs doit permettre de guider efficacement la restauration et le génie écologique employé (Capderrey et al., 2016). Sans objectifs clairement définis, il est difficile de mettre en place un suivi permettant d'évaluer des indicateurs pertinents et ainsi le succès de la restauration (Guerrero et al., 2017; Hobbs, 2007; Waltham et al., 2020).

Un objectif idéalement défini (Annexe), devrait être quantifiable et mesurable (ex : surfaces, fréquence d'inondation, richesse spécifique, types d'assemblage, densités, etc...) dans le temps, grâce aux suivis écologiques (Gann et al., 2019; Gotje et al., 2007). Il devrait être de viser l'atteinte d'un état stable, résilient et pérennisé dans le temps (Gann et al., 2019; Hastings, 2016). Il se doit aussi d'être réaliste vis à vis des conditions environnementales et

l'utilisation de modèles de simulation (notamment hydraulique), pourrait pallier ces incertitudes (Capderrey et al., 2016; Lamouroux et al., 2015).

Pour résumer, lors de la phase de planification de la mesure, il serait pertinent :

1 : Définir un objectif en accord avec une stratégie globale de restauration et le plus possible en accord avec les usagers du site d'étude (Guerrero et al., 2017; Martin, 2017).

2 : Définir le ou les habitat(s) à restaurer. *Quelles altérations souhaitons-nous résorber ? Quel habitat ? Sur quelle surface ? Avec quelles caractéristiques biotiques (communauté spécifique) et abiotiques (paramètres physico-chimiques) ?*

3 : Définir le ou les sous-objectifs fonctionnels cibles et quantifiables (mesurables par les suivis écologiques). *Quelles fonctions écologiques et/ou biogéochimiques (nidification, frayère, alimentation, stockage de carbone, épuration de l'eau, productivité, etc...) ? Pour quel(s) groupe(s) biologique(s) ou quelle(s) espèce(s) ?*

4 : Rechercher la pérennité du milieu, ne pas fixer de limite de temps et avoir pour objectif l'atteinte d'un état de stabilité structurelle et fonctionnelle satisfaisant et résilient (Andel et al., 2012).

5 : Mettre en place une stratégie de gestion adaptative du milieu permettant de faire évoluer les objectifs en fonction des pressions environnementales et anthropiques futures (Gann et al., 2019 ; Gotje et al., 2007).

4.5 REX 5 : Des suivis écologiques qui ne permettent pas une bonne évaluation des résultats des mesures de restauration écologique

La mise en place des suivis est une étape indispensable pour l'évaluation d'une mesure de restauration (Ducrotoy & Dauvin, 2008). C'est cette dernière qui permettra de vérifier si et dans quelle mesure les objectifs sont atteints, comme déjà constaté lors de travaux menés dans d'autres estuaires (ex. Cadier et al., 2020), les acteurs de la restauration sont confrontés à un manque de connaissances sur la méthodologie à suivre pour la mise en place des suivis qui permettent a posteriori d'évaluer la mesure.

Dans le cadre des projets effectués en estuaire de Seine, **les suivis visent bien souvent un nombre d'indicateurs faible et ne permettent pas d'évaluer globalement l'évolution du site restauré** (ensemble des groupes taxonomiques du site ainsi que les aspects abiotique et biogéochimique).

La grande majorité des mesures de restauration ne font pas l'objet de protocoles de suivi réguliers et définis clairement dans le temps (des inventaires peuvent être fait avec des fréquences plus ou moins élevées et en termes spatiaux et temporels). D'une manière générale, les milieux sont suivis les premières années, puis avec une fréquence moindre (tous les 5 ans, 10 ans, etc...). Pour les projets réalisés dans le cadre d'une mesure compensatoire, un bilan est généralement effectué au bout de 3 à 5 années de suivi, afin de permettre l'évaluation et la validation de la mesure par les services de l'État sur la base des résultats obtenus.

Même si les suivis étaient réalisés sur des périodes assez longues, la majorité des projets (83%) s'est déroulée il y a moins de 15 ans, sur du court et moyen terme. Cette période de temps est globalement trop faible¹⁷ pour évaluer efficacement la mesure de restauration. Dans un contexte aussi complexe que le système estuarien, les temps de réponse et l'atteinte d'un état souhaité peuvent varier de quelques années à quelques décennies (Cadier et al., 2020; Capderrey et al., 2016; Moreno Mateos et al., 2015).

La capacité d'évaluer dans le temps les trajectoires écologiques du système suite à la restauration et le succès de la mesure est essentielle afin de mettre en place une **gestion adaptative**¹⁸ des sites restaurés (Annexe). D'autre part, ceci permet d'alimenter les retours d'expérience afin d'améliorer le processus de planification et de mise en œuvre de la restauration écologique.

Bien que des suivis englobant les processus morphologiques, abiotiques, écologiques et biogéochimiques soient recommandés dans la littérature (Gotje et al., 2007 ; Cadier et al., 2020; Ruiz-Jaen & Aide, 2005; Wortley et al., 2013), notamment par la Société Internationale pour la Restauration Écologique (SER), seulement une minorité des projets utilisent un panel d'indicateurs comprenant à la fois des paramètres abiotiques ou morphologiques (physico-chimie, granulométrie, bathymétrie/topographie, etc...), ainsi que des paramètres écologiques (faunistique ou floristique). Ceci peut s'expliquer par les difficultés logistiques et les coûts élevés par rapport à l'application d'un trop grand nombre d'indicateurs.

Les fonctions liées aux différents processus biogéochimiques tels que le stockage de carbone ou encore le potentiel de dénitrification, qui représentent aussi des services écosystémiques pour l'homme (Wortley et al., 2013), ne sont pas implémentées dans les suivis, malgré leur importance dans l'évaluation de l'évolution d'un milieu restauré (Cadier et al., 2020).

L'évaluation des projets est donc très difficile à réaliser (manque d'objectifs, d'indicateurs et de temps de suivi sur le long terme). Si les objectifs sont trop simplistes et peu précis, le risque est de pouvoir difficilement évaluer de façon objective et robuste l'efficacité de la mesure et donc le degré de son succès. L'information sur l'expression du maximum de potentialité écologique du milieu n'est pas connue du fait du manque de recul et du manque d'indicateurs nécessaires à évaluer l'ensemble des compartiments biotiques et abiotiques, du milieu

¹⁷ Il est possible de considérer le court terme à moins de 10 ans, le moyen terme entre 10 et 20 ans et le long terme à 50 ans (Ducrotoy & Dauvin, 2008).

¹⁸ La gestion adaptative est une prise en compte des incertitudes quant à l'évolution du milieu post-restauration, notamment du fait des possibles perturbations anthropiques ou environnementales susceptibles d'impacter le milieu (Rist et al., 2013). Une stratégie de gestion adaptative doit permettre au gestionnaire de concevoir une nouvelle stratégie, permettant l'atteinte des objectifs initiaux, ou encore d'orienter et modifier ces objectifs écologiques en fonction de l'évolution des paramètres environnementaux et anthropiques influent sur le milieu (Andel et al., 2012).



restauré (Capderrey et al., 2016 ; Gotje et al., 2007). Ce manque de précision dans la définition des objectifs, combinées avec des suivis écologiques pas assez réguliers et sur des périodes trop courtes, ne permettent tout simplement pas de faire un bilan du succès des mesures de restauration écologique (Wortley et al., 2013).

Pour résumer, les suivis devraient permettre :

1 : D'évaluer la restauration de l'habitat. Les caractéristiques abiotiques et biotiques précédemment définies sont-elles présentes ?

2 : D'évaluer la restauration des fonctions écologiques pour les groupes biologiques ou les espèces cibles en appréhendant leur cycle de vie

3 : D'évaluer la restauration jusqu'à l'atteinte du milieu souhaité, stable et pérennisé.

4 : D'évaluer l'ensemble des gains écologiques du milieu, sur la base de la rationalisation des indicateurs, en lien avec leur coût (Wortley et al., 2013 ; Ruiz-Jaen & Aide, 2005, Annexe 6)

4.6 REX 6 : Le fonctionnement autonome des sites restaurés n'est pas toujours garanti

L'ensemble des mesures de restauration d'habitats effectuées, à l'exception des mesures de restauration de la continuité écologique des cours d'eau (RCE), nécessitent un entretien ou une gestion, post-restauration (Figure 18). Théoriquement, la restauration devrait accompagner la reprise d'un fonctionnement autonome et devrait garantir la résilience des milieux restaurés face aux différentes perturbations qui peuvent survenir dans un contexte estuarien, ainsi qu'être pérennisés dans le temps, sans aucune assistance (Ruiz-Jaen & Aide, 2005 ; SER, 2004). Un certain nombre de mesures **nécessitent des entretiens réguliers afin de maintenir le milieu restauré en place** (ex. curage régulier des filandres). Ceci dépend du fait que les dysfonctionnements concernent d'échelles spatiales plus larges par rapport à la mesure réalisée et qui nécessitent des approches plus globales pour être résolus (ex : volume oscillant trop faible pour maintenir l'auto-curage de la filandre). Dans d'autres cas, une gestion des niveaux d'eau (via des clapets, des buses), est nécessaire pour maintenir un caractère humide souhaitable au maintien du milieu souhaité. La restauration écologique dans l'estuaire de la Seine ne s'arrête donc pas à la simple recréation d'un milieu à l'instant T, mais plutôt à la mise en place d'un plan de gestion qui permettra de maintenir le milieu créé. Une assistance anthropique est alors nécessaire, pour figer un milieu en dehors des dynamiques naturelles estuariennes (Ducrotoy & Dauvin, 2008). Le jour où la gestion s'arrêtera, le milieu visé par la restauration finira par disparaître. Ce qui pose des questions quant à la pérennité de ces milieux restaurés sur le moyen et long terme, ainsi que sur la pertinence de tels projets par rapport à la restauration de milieux naturels estuariens.

5. CONCLUSION ET PERSPECTIVES

Au total, 33 projets de restauration ont été répertoriés et analysés lors de cette étude.

Des retours d'expériences ont pu être mis en évidence, ainsi que les difficultés liées à la planification et la réalisation des mesures de restauration et la mise en place d'une stratégie globale à l'échelle de l'estuaire. Le contexte environnemental et socio-économique de l'estuaire de la Seine étant très complexe, la restauration écologique de ses milieux naturels l'est tout autant.

Si d'un côté ce travail a permis de capitaliser ces retours d'expérience, de l'autre il a permis d'alimenter et redynamiser la base de données de restauration écologique du GIP Seine-Aval, qui pourra ainsi être mise à jour régulièrement par les nouveaux projets. Un des livrables de ce travail a consisté donc à valoriser ces données, afin de les rendre accessibles aux futurs porteurs de projet, pour que ces derniers puissent y trouver des éléments de réponse et des pistes pour la mise en place des mesures de restauration les plus pertinentes par rapport à leurs objectifs.

La restauration écologique est un sujet vaste et dense et chaque retour d'expérience présenté ici, mériterait d'être le sujet d'une analyse ou d'une étude plus approfondie, qu'il n'a pas été possible de réaliser pendant ces 6 mois de stage.

Une évaluation de l'efficacité des mesures de restauration était initialement prévue, mais du fait du manque d'un suivi environnemental systématique dans la plupart des projets, cet objectif d'évaluation s'est révélé être non atteignable. Ils existent en effet, de notables progrès à faire dans la définition d'un panel des indicateurs de suivi écologique qui soient à la fois pertinents et facilement applicables pour mesurer l'efficacité des projets de restauration.

De plus, il est important de poursuivre les efforts visant à améliorer notre compréhension du fonctionnement des milieux estuariens et des interactions abiotiques-biotiques qui les caractérisent. En effet, la restauration écologique base ses fondements sur la maîtrise des leviers qui régissent ce fonctionnement. En découle que le choix de mesures de restauration plus pertinentes vis-à-vis d'un objectif écologique, et donc les caractéristiques abiotiques et biotiques à rechercher pour y répondre, nécessitent d'être encore partiellement éclairées par l'avancement des connaissances scientifiques. Dans ce contexte, la mise en place de sites ateliers de restauration identifiés dans le cadre du projet REPERE, sera l'occasion d'améliorer les connaissances sur les techniques de restauration écologique et leur efficacité à différents pas de temps et sera susceptible d'apporter des nouveaux retours d'expérience, dans les années à venir.

Malgré les avancées effectuées dans la mise en œuvre d'une stratégie de restauration écologique de l'estuaire de la Seine et le nombre croissant de projets observé, l'exploitation du réel potentiel de restauration de l'estuaire peut encore être améliorée. Elle devra nécessairement être amorcée politiquement, pour lever tous les verrous fonciers et les conflits d'usage dans le territoire, qui empêchent aujourd'hui la mise en place d'une stratégie globale et partagée par tous les acteurs. Cet essor pourrait permettre la mise en place de projets d'ampleur et en cohérence réciproque, regroupant plusieurs acteurs et aménageurs du territoire. En parallèle, la prise en compte dans le cadre réglementaire des spécificités

CONCLUSION

estuariennes pourrait améliorer et faciliter la mise en place des projets et stratégies de restauration écologique.

Enfin, la thématique du changement climatique n'est pas prise en compte dans les projets réalisés en estuaire de Seine et remet en cause leur pérennité. Ce qui est restauré aujourd'hui, doit l'être de manière résiliente, de façon à donner aux milieux estuariens, la capacité à s'adapter aux futures conditions climatiques. Une réflexion poussée serait à mener quant à l'intégration du changement climatique dans la restauration écologique. Face à la "crise écologique" avec laquelle nous sommes actuellement confrontés, ce facteur pourrait être une source de motivation supplémentaire pour restaurer des surfaces écologiquement fonctionnelles, qui d'un côté permettent de préserver la valeur implicite de la nature et de la biodiversité et de l'autre, continueront à fournir des services écosystémiques essentiels pour l'Homme. Ceci représente un futur challenge auquel devra faire face la société.

6. BILAN PERSONNEL

Cette première expérience professionnelle de 6 mois, au sein du GIP Seine-Aval, m'aura donné une grande expérience en matière de restauration écologique et m'aura permis de mettre un pied dans ce domaine, notamment dans un contexte bien particulier qu'est l'estuaire de la Seine.

Étudier de nombreux projets, puis en discuter avec les différents acteurs et porteurs de projet, m'aura permis de comprendre les tenants et les aboutissants de la restauration écologique dans un milieu aussi anthropisé et marqué par les activités urbaines, industrielles, portuaires, etc... Comprendre que la mise en place d'une mesure de restauration n'est pas si simple et que les enjeux écologiques se doivent d'être replacés dans le contexte socio-économique local et que la concertation avec les différents usagers est plus qu'importante. La restauration écologique est à la fois un défi scientifique, technique, sociologique et économique.

L'encadrement scientifique fourni par l'équipe du GIP Seine-Aval a permis d'accompagner de manière rigoureuse, la rédaction d'un rapport complet et dense, sur un sujet aussi vaste que peut l'être la restauration écologique en estuaire de Seine.

D'un point de vue pratique, cette étude m'a permis d'apprendre à gérer de nombreuses données (relatives aux projets), notamment statistiquement. Cependant il n'aura pas été aisé de récupérer l'ensemble des informations souhaitées pour l'ensemble des projets, notamment les plus anciens. Traiter un ensemble de données aussi vaste aura nécessité un effort non négligeable de catégorisation et donc possiblement une perte de précision.

Enfin, la mise en place du confinement et du télétravail pendant les premiers mois de stage n'aura finalement pas représenté une difficulté. Cela correspondait à une phase de réunions avec les différents acteurs et de traitement des données, parfaitement réalisable à domicile.



7. LISTE DES REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Amara, R. (2011). Impact de la pollution sur les écosystèmes côtiers : Exemple de la Manche orientale. *Vertigo - la revue électronique en sciences de l'environnement, Hors-série 9*, Article Hors-série 9. <https://doi.org/10.4000/vertigo.10990>
- Bigard, C., Regnery, B., Pioch, S., & Thompson, J. D. (2020). De la théorie à la pratique de la séquence Éviter-Réduire-Compenser (ERC) : Éviter ou légitimer la perte de biodiversité ? *Développement durable et territoires. Économie, géographie, politique, droit, sociologie, Vol. 11, n°2*, Article Vol. 11, n°2. <https://doi.org/10.4000/developpementdurable.17488>
- Capderrey, C., Olivier, J.-M., Foussard, V., & Bacq, N. (2016). *Analyse de la littérature scientifique publiée*. 92.
- Costanza, R., Kemp, W. M., & Boynton, W. R. (1993). *Predictability, Scale, and Biodiversity in Coastal and Estuarine Ecosystems: Implications for Management.pdf*. http://www.robertcostanza.com/wp-content/uploads/2017/02/1993_J_Costanza_Predictabilty_Ambio.pdf
- Ducrotoy, J.-P., & Dauvin, J.-C. (2008). Estuarine conservation and restoration : The Somme and the Seine case studies (English Channel, France). *Marine Pollution Bulletin*, 57(1), 208-218. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2008.04.031>
- Elliott, M., & Quintino, V. (2007). The Estuarine Quality Paradox, Environmental Homeostasis and the difficulty of detecting anthropogenic stress in naturally stressed areas. *Marine Pollution Bulletin*, 54(6), 640-645. <https://doi.org/10.1016/j.marpolbul.2007.02.003>
- Fisson, C., Leboulenger, F., Lecarpentier, T., Moussard, S., & Ranvier, G. (2014). L'ESTUAIRE DE LA SEINE : ÉTAT DE SANTÉ ET ÉVOLUTION. *Fascicule Seine-Aval 3.1*, 48.
- Gann, G. D., McDonald, T., Walder, B., Aronson, J., Nelson, C. R., Jonson, J., Hallett, J. G., Eisenberg, C., Guariguata, M. R., Liu, J., Hua, F., Echeverría, C., Gonzales, E., Shaw, N., Decler, K., & Dixon, K. W. (2019). International principles and standards for the practice of ecological restoration. Second edition. *Restoration Ecology*, 27(S1), S1-S46. <https://doi.org/10.1111/rec.13035>
- Gotje, W., Cleveringa, J., Steijn, R., & Esselink, P. (2007). *Restoration of estuarine habitats. What determines success or failure?* <https://doi.org/10.13140/2.1.3414.6081>
- Guerrero, A. M., Shoo, L., Iacona, G., Standish, R. J., Catterall, C. P., Rumpff, L., Bie, K. de, White, Z., Matzek, V., & Wilson, K. A. (2017). Using structured decision-making to set restoration objectives when multiple values and preferences exist. *Restoration Ecology*, 25(6), 858-865. <https://doi.org/10.1111/rec.12591>
- Hastings, A. (2016). Timescales and the management of ecological systems. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 113(51), 14568-14573. <https://doi.org/10.1073/pnas.1604974113>
- Hobbs, R. (2007). Setting Effective and Realistic Restoration Goals: Key Directions for Research. *Restoration Ecology*, 15, 354-357. <https://doi.org/10.1111/j.1526-100X.2007.00225.x>
- Holl, K., & Howarth, R. (2001). Paying for Restoration. *Restoration Ecology*, 8, 260-267. <https://doi.org/10.1046/j.1526-100x.2000.80037.x>

- Lamouroux, N., Gore, J. A., Lepori, F., & Statzner, B. (2015). The ecological restoration of large rivers needs science-based, predictive tools meeting public expectations: An overview of the Rhône project. *Freshwater Biology*, 60(6), 1069-1084. <https://doi.org/10.1111/fwb.12553>
- Lavabre, J., & Fisson, C. (2013). *Les habitats naturels de l'estuaire de la Seine*. 78.
- Lobry, J. (2004). *Quel référentiel de fonctionnement pour les écosystèmes estuariens ? : Le cas des cortèges de poissons fréquentant l'estuaire de la Gironde* [These de doctorat, Bordeaux 1]. <http://www.theses.fr/2004BOR12890>
- Martin, D. M. (2017). Ecological restoration should be redefined for the twenty-first century. *Restoration Ecology*, 25(5), 668-673. <https://doi.org/10.1111/rec.12554>
- McDonald, T., Gann, G. D., Jonson, J., & Dixon, K. W. (2016). *INTERNATIONAL STANDARDS FOR THE PRACTICE OF ECOLOGICAL RESTORATION – INCLUDING PRINCIPLES AND KEY CONCEPTS*. 48.
- Moreno Mateos, D., Meli, P., Vara-Rodríguez, M., & Aronson, J. (2015). Ecosystem response to interventions: Lessons from restored and created wetland ecosystems. *Journal of Applied Ecology*. <https://doi.org/10.1111/1365-2664.12518>
- Muntoni, M. (2020). *REPERE : Référentiel partagE sur les Priorités de restauration des fonctionnalités des milieux estuariens de la vallée de Seine-Aval*. (Rapport réalisé par le GIP Seine-Aval.). <https://www.seine-aval.fr/wp-content/uploads/2020/12/Muntoni-2020-Rapport-REPERE.pdf>
- Rist, L., Felton, A., Samuelsson, L., Sandström, C., & Rosvall, O. (2013). A New Paradigm for Adaptive Management. *Ecology and Society*, 18(4), art63. <https://doi.org/10.5751/ES-06183-180463>
- Rochette, S., Rivot, E., Morin, J., Mackinson, S., Riou, P., & Le Pape, O. (2010). Effect of nursery habitat degradation on flatfish population: Application to *Solea solea* in the Eastern Channel (Western Europe). *Journal of Sea Research*, 64(1), 34-44. <https://doi.org/10.1016/j.seares.2009.08.003>
- Sartre, X. A. de, & Doussan, I. (2018). Introduction. La fabrique de la compensation écologique, un approfondissement de la modernisation écologique ? *Natures Sciences Sociétés*, Vol. 26(2), 129-135.
- Simenstad, C., Tanner, C., Crandell, C., White, J., & Cordell, J. (2005). Challenges of habitat restoration in a heavily urbanized estuary: Evaluating the investment. *Journal of Coastal Research*, 21.
- Teichert, N., Carassou, L., Sahraoui, Y., Lobry, J., & Lepage, M. (2018). Influence of intertidal seascape on the functional structure of fish assemblages: Implications for habitat conservation in estuarine ecosystems. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, 28(4), 798-809. <https://doi.org/10.1002/aqc.2914>
- Waltham, N. J., Elliott, M., Lee, S. Y., Lovelock, C., Duarte, C. M., Buelow, C., Simenstad, C., Nagelkerken, I., Claassens, L., Wen, C. K.-C., Barletta, M., Connolly, R. M., Gillies, C., Mitsch, W. J., Ogburn, M. B., Purandare, J., Possingham, H., & Sheaves, M. (2020). UN Decade on Ecosystem Restoration 2021–2030—What Chance for Success in Restoring Coastal Ecosystems? *Frontiers in Marine Science*, 0. <https://doi.org/10.3389/fmars.2020.00071>

8. GLOSSAIRE

AFM : L'analyse Factorielle Multiple permet d'utiliser à la fois des variables quantitatives et qualitatives, pour mettre les individus sur un même plan. Les variables qualitatives sont traitées avec une Analyse des Correspondances Multiples (ACM) et les variables quantitatives sont traitées avec une Analyse des Composantes Principales (ACP)

Fonctions écologiques : services relatifs au cycle de vie des organismes ou d'ordre physico-chimique, résultants des interactions entre compartiments biotiques et abiotiques, au sein d'un habitat ou d'un écosystème.

Gestion adaptative : pratique de gestion des milieux restaurés, qui grâce aux suivis écologiques, doit permettre au porteur de projet de mettre en place une nouvelle stratégie pour atteindre les objectifs fixés initialement ou pour atteindre de nouveaux objectifs écologiques en phase avec les conditions environnementales et anthropiques du milieu.

Habitat : entité géographique et, écologique caractérisée par des composantes biotiques (faune, flore, etc..) et abiotiques (salinité, température, granulométrie, etc...), support de vie pour les organismes qui lui sont spécifique

Indicateur : un indicateur environnemental est un élément biotique ou abiotique qui permet d'évaluer l'état d'un écosystème.

Zone intertidale : la zone intertidale correspond à l'estran, la zone de l'estuaire soumise à marnage (découverte à marée basse et recouverte à marée haute)

Plaine alluviale : La plaine alluviale correspond au lit majeur de l'estuaire, il correspond au lit maximum que peut occuper le cours d'eau pendant les plus hautes eaux.

Productivité primaire : production de matière organique végétale, issue de la photosynthèse

Productivité secondaire : production de biomasse par les organismes consommateurs de la production primaire (herbivores, détritivores, décomposeurs, etc...)

Ressources halieutiques : ressources vivantes (notamment poisson), des milieux aquatiques marins ou d'eau douce.

Séquence ERC (Éviter, Réduire et Compenser) : Cette séquence s'applique aux projets d'aménagement soumis à évaluation environnementale et a pour objectif d'éviter toute atteinte à l'environnement, par l'évitement, la réduction ou encore la compensation des impacts (objectif Zéro Perte Nette).



Services écosystémiques : biens et services que l'homme peut tirer du fonctionnement des écosystèmes.

SDAGE : Le Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SDAGE), est un outil de planification visant à assurer la gestion de la ressource et des écosystèmes aquatiques, à l'échelle des grands bassins hydrographiques.



9. ANNEXES

Annexe 1 Liste des acteurs contactés pour la collecte des données

Acteurs	Réponse
Maison de l'estuaire	Oui
Grand Port Maritime du Havre	Oui
Grand Port Maritime de Rouen	Oui
Parc Naturel Régional de Boucles de la Seine Normande	Oui
Département de l'Eure	Oui
Fédération de pêche FDAAPPMA 27	Oui
Fédération de pêche FDAAPPMA 76	Oui
Syndicat Mixte du Bassin versant Caux Seine	Oui
Métropole Rouen Normandie	Oui
Caux Seine Agglo	Oui
Communauté d'agglomération Seine-Eure	Incomplète
Carriers	Oui
Conseil Général 76	Oui
SIBVR	Non
SM rivières de la Lézarde et affluents	Non
SM Vallée du Cailly	Incomplète
CCPHB	Oui
CEN Normandie	Oui

FNE Normandie	Non
GRAPE	Non
SOS mal de Seine	Oui
Département du Calvados	Non
Roumois Seine	Oui
Chambre agriculture Normandie	Non
Conservatoire du Littoral	Non
SAGE 6 Vallées	Incomplète
SMBV Austreberthe Saffimbec	Non

Annexe 2 Liste des projets utilisés dans l'étude

Projets	Maître d'ouvrage
RCE Ambion Exutoire	SMBVCS
RCE Ambion Seuil de la rue du 8 mai	SMBVCS
RCE Sainte Gertrude moulin d'Ansgoth	SMBVCS
RCE Sainte Gertrude Exutoire	SMBVCS
RCE Sainte Gertrude Seuil Thomas bazin	SMBVCS
RCE Sainte Gertrude Seuil Boieldieu	SMBVCS
RCE renaturation Fontenelle	SMBVCS



Remise en prairie humide d'une parcelle du marais Vernier	GPMR
Restauration d'une frayère à brochet	FDAAPPMA 76
Création du reposoir sur dune	GPMH
Restauration sur la commune de Sahurs – Site « les petits saules »	GPMR
Aménagement du seuil du moulin Rica sur la Corbie	FDAAPPMA 27
Restauration sur le site de la darse de Lillebonne et la rivière de Commerce	GPMR
Création d'une mare sur une parcelle perchée et reconnexion d'un petit boisement (MC Saint-Wandrille)	GPMR
Restauration écologique de la Douillere à La Mailleraye-sur-Seine	GPMR
Reconnexion de prairies à la Seine pour recréation de zones intertidales et vasières (MC Petiville)	GPMR
Renaturation et recréation de fosses pour redynamisation hydraulique du site (MA Vatteville)	GPMR
Restauration du marais de l'Aulnay	GPMR
Aménagement de corridors écologiques à Grand-Couronne-Moulineaux	GPMR
Restauration de la rivière la Vilaine	Département 27
Amélioration de la continuité écologique des prairies du Hode	Maison de l'estuaire
Réhabilitation du site Millenium Inorganic Chemicals (MIC) du Hode	GPMH
Restauration de 21 ha de prairies au Marais Vernier	GPMH
Restauration écologique expérimentale de la ballastière d'Yville	GPMR / carriers
Création de diguettes à vocation hydraulique	Maison de l'estuaire

Création d'une zone humide à la carrière de Trouville-La-Haule	GPMR
Création de l'Île du banc-du-Ratier	GPMH
Création du méandre-aval	GPMH
Restauration des étangs de Pont-Audemer	Commune P-A
Restauration de la Grand'mare	PNRBSN
Restauration d'une filandre existante : la vasière artificielle	CCIH
Aménagement de brèches dans les digues basses nord et sud	GPMR
Restauration de terrain à vocation agricole en milieux humides et prairies	GPMH

Annexe 3 Questionnaire appliqué à la collecte des données

Contexte du projet	<p>1 - Localisation</p> <p>2 - Statut réglementaire du site (ZNIEFF, PNR, Réserve naturelle, Natura 2000, etc.)</p> <p>3 - Qui est le maître d'ouvrage ?</p> <p>4 - Y-avait-il un COFIL ? avec qui ?</p>
Contexte réglementaire	<p>5 - La mesure est-elle réglementaire ? (Mise en conformité réglementaire, mesure compensatoire, d'accompagnement) ou est-ce une initiative locale volontaire ?</p> <p>6 - Si la mesure est compensatoire. Pour quel projet et type d'aménagement (urbain, portuaire, etc...). Quels impacts doit-elle compenser (surface impactée, milieux / fonctions écologiques concernés).</p> <p>7- Quelles sont les procédures, les dossiers qui ont été nécessaire à la mise en place du projet ? (Services instructeurs ?)</p>
	8 - Quelle est la surface globale à restaurer ?

Objectifs de restauration du projet	<p>9 - Un état des lieux du milieu a-t-il été défini avant la réalisation du projet ?</p> <ul style="list-style-type: none"> - État de dégradation du milieu - Etat de la faune et de la flore ? Réalisation d'inventaires ? Quels paramètres mesurés (Richesse spécifique, abondance, etc...) ? <p>10 - Quelles altérations écologiques avez-vous constaté sur le site du projet ? (Exemple : Diminution de surface, Érosion des berges, Discontinuités écologiques, etc...)</p>
Travaux/génie écologique	<p>13 - Quels types de travaux avez-vous réalisés ?</p> <ul style="list-style-type: none"> - Objectifs de chaque opération - Début et fin et des travaux <p>14 - Contraintes particulières (météo, gestion des déchets, balisage du chantier) ? Besoin de pallier à des problèmes de pollution ou d'espèces patrimoniales ou protégées présentes sur le site ?</p> <p>15 - coûts des travaux ainsi que de l'ensemble de la mesure</p> <p>16 - Procédure / réglementation à respecter ? (Exemple : loi sur l'eau, autorisation ICPE, dérogation, etc...)</p>
Suivis écologiques	<p>17 - Quels suivis écologiques ont été mis en place après les travaux ? A partir de quand ? Selon quel protocole / fréquence ? Quels paramètres sont suivis ? Résultats des suivis disponibles ?</p>
Evaluation du succès ou de l'efficacité / bilan	<p>18 – Considérez-vous la mesure comme un succès ou un échec ? Au bout de combien de temps avez-vous fait ce constat ? Selon quels critères / indicateurs / expertise vous basez vous ?</p> <p>19 - Etat du milieu post restauration (milieux / surfaces / fonctions)</p> <p>20 - Si la mesure s'est avérée ne pas fonctionner comme prévu. Pour quelles raisons ? L'avez-vous reprise en main ou avez-vous laissé tomber ?</p> <p>21 - Avez-vous constaté des limites à la mise en place de la mesure ? Notamment sociétales (population réfractaire), économiques (coûts trop élevés), etc...</p>

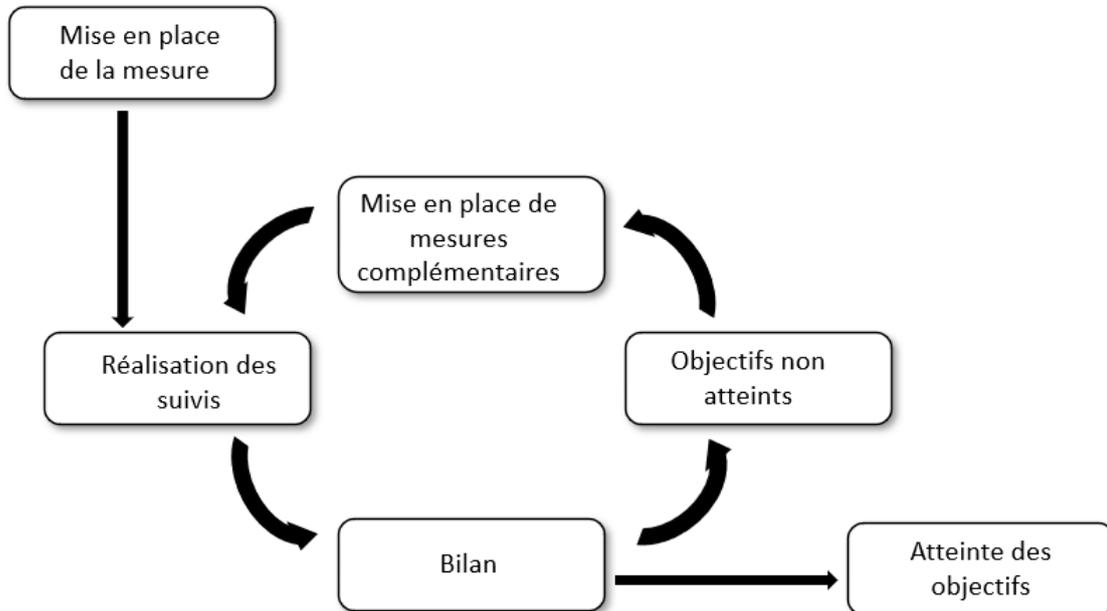
Annexe 4 Coûts totaux du projet et dépenses allouées pour la réalisation des mesures liées à la séquence ERC

Aménagement	Coût aménagement	Coût des mesures environnementales	Pourcentage
Port 2000	≈800 000 000	≈40-50 000 000	5%
Amélioration des accès maritime	≈207 000 000	≈ 5 000 000	2.5%
PLPN3	≈15 000 000	≈3 000 000	20%
Amélioration des accès du pont de Tancarville	≈80 000 000	≈1 000 000	1.25%

Annexe 5 Liste des indicateurs à suivre en contexte estuarien, adaptée de la SER et Cadier et al., 2020.

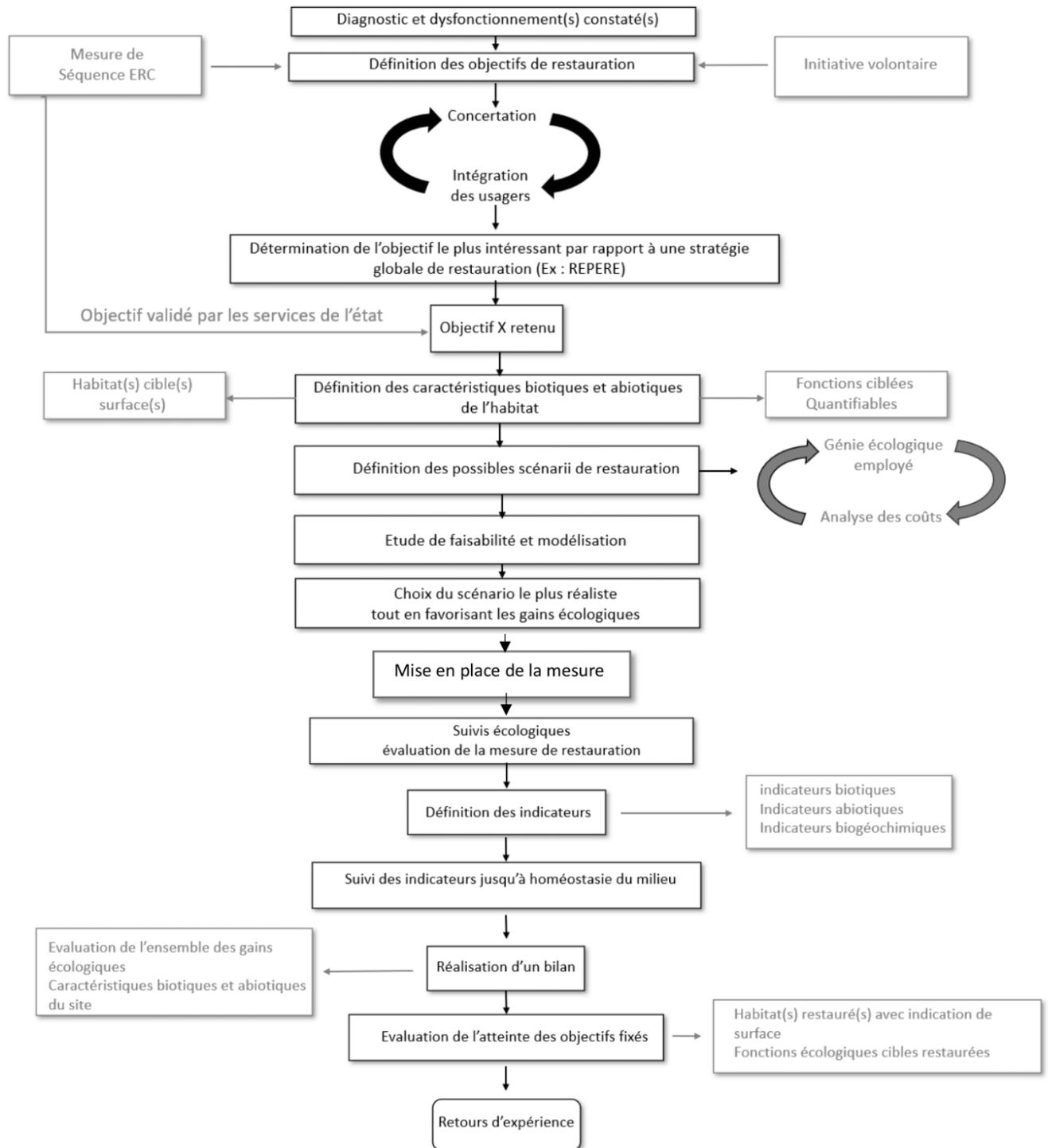
Catégories d'indicateurs	Indicateurs et exemples de paramètres
Indicateurs écologiques	Habitats Végétation (richesse spécifique, abondance, biomasse) Faune (richesse spécifique, abondance, biomasse de chaque groupe faunistique) Bactéries (richesse spécifique et abondance) Algues (Richesse spécifique et abondance)
Indicateurs abiotiques	Du substrat : toutes variables physico-chimiques De l'eau : toutes variables physico-chimiques
Indicateurs biogéochimiques	Productivité primaire / secondaire Stockage de carbone Cycle des nutriments et dénitrification

Annexe 6 Intégration de la stratégie de gestion adaptative dans la mise en place d'une mesure de restauration



Lorsque les retours d'expérience sont établis et si les objectifs ne sont pas atteints, la stratégie de gestion adaptative ainsi que le bilan des suivis, doivent permettre au porteur de projet de mettre en place des mesures complémentaires jusqu'à atteindre les objectifs de restauration de manière pérenne ou encore définir de nouveaux objectifs si besoin (Capderrey et al., 2016).

Annexe 7 Synthèse de la mise en place et de l'évaluation d'une mesure de restauration





REPERE

COMPRENDRE - PARTAGER - RESTAURER

 POUR PLUS D'INFORMATIONS SUR LE GIP SEINE-AVAL

www.seine-aval.fr

CONTACT

Groupement d'Intérêt Public Seine-Aval
Hangar C – Espace des Marégraphes
CS 41174
76176 ROUEN Cedex 1
Tél : 02 35 08 37 64
gipsa@seine-aval.fr

En cas d'utilisation de données ou d'éléments de ce rapport, il devra être cité sous la forme suivante :

DUVAL Alexandre. 2021. **Retours d'expérience des mesures de restauration écologique en estuaire de Seine**. Rapport de stage de Master 2 en Gestion de l'Environnement parcours GBET. GIP Seine-Aval. 57 pp.

Le GIP Seine-Aval ne saurait être tenu responsable d'évènements pouvant résulter de l'utilisation et de l'interprétation des informations mises à disposition.

Pour tout renseignement, veuillez contacter le GIP Seine-Aval.

Les membres financeurs du GIP Seine-Aval sont :