

Retour d'expériences sur les actions de restauration hydromorphologique réalisées sur le bassin versant de la Vilaine et évaluation spécifique des travaux de recharge granulométrique



Stage effectué à l'Institution d'Aménagement de la Vilaine

Sous l'encadrement scientifique de Nathalie Pécheux

Du 2 mars au 1 septembre 2015

Remerciements

En premier lieu, je voudrais tout naturellement remercier Mme Solène MICHENOT, Présidente de l'Institution d'Aménagement de la Vilaine (EPTB-Vilaine) et son directeur, M. Jean-Luc JEGOU de m'avoir accueilli dans leur structure pour ce stage de six mois.

Je tiens à remercier tout particulièrement Nathalie Pécheux ma maître de stage, pour m'avoir choisi comme stagiaire mais surtout pour sa disponibilité, son investissement et ses bons conseils tout au long de l'élaboration de ce rapport. Merci encore pour son aide précieuse dans la relecture de ce présent rapport et pour sa gentillesse. Un grand merci à Cédric Briand, pour son aide sur les analyses statistiques et pour ses idées toujours bienvenues pour l'exploitation des données.

Je voudrais également remercier l'ensemble du personnel de l'IAV, pour leur accueil chaleureux dans une ambiance sympathique et agréable en continu. Un remerciement chaleureux pour Julien Gayraud, Florent Lefetey et Aurore Lebreton, qui étaient mes collègues de la « casa panda », où la bonne humeur était constamment présente. Merci particulier à Benjamin Magand, ce cartographe d'exception.

Ensuite, je tiens à remercier les différents acteurs de la gestion de l'eau pour m'avoir permis d'affiner mon étude et s'y être intéressés, notamment Mikaël LeBihan de l'ONEMA, qui m'a beaucoup guidé sur la réalisation de l'évaluation des travaux de recharge granulométrique. Un merci particulier à Florian Guérineau de la Fédération de pêche (35), pour son analyse pertinente sur les restaurations de cours d'eau. Je remercie l'accueil l'ensemble des techniciens de rivières et des partenaires que j'ai pu rencontrer à travers mon stage, pour leur partage de connaissances du terrain et leur accueil chaleureux.

Enfin, un merci pour Yann Lalanne et Franck D'amico coresponsables du Master DYNEA pour l'animation du master, pour leurs compétences, gentillesse et transfert de connaissances très appréciables.

Liste des abréviations

BV : Bassin Versant

CARHYCE : CARctérisation HYdromorphologique des Cours d'Eau

CLE : Commission Locale de l'Eau

D50 : Diamètre médian (50% des particules ont un diamètre inférieure à cette valeur)

DCE : Directive Cadre sur l'Eau

Hpb : Hauteur de pleins bords

K : Coefficient de rugosité de Strickler

Lpb : Largeur de pleins bords

PAGD : Plan d'Aménagement et de Gestion Durable

Qpb : Débit de pleins bords

SAGE : Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux

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

SIG : Système d'Information Géographique

Table des matières

Introduction	1
1. Synthèse bibliographique sur l'hydromorphologie	2
1.1. Qu'est-ce que l'hydromorphologie	2
1.2. L'hydromorphologie, indispensable pour le bon fonctionnement écologique d'un cours d'eau	3
1.3. La dégradation hydromorphologique des cours d'eau	4
1.3.1. Les causes principales de dégradation	4
1.3.2. Les conséquences sur le fonctionnement des cours d'eau	5
1.4. La restauration hydromorphologique	5
1.4.1. Dans quels cas restaurer ?	6
1.4.2. Les niveaux d'interventions	7
1.4.3. Un regard particulier sur la recharge granulométrique	7
1.5. Où en est-on des suivis de restauration ?	8
2. Contexte général de la présente étude	8
2.1. Présentation du bassin versant de la Vilaine	8
2.2. Le Sage Vilaine point de départ de la présente étude	9
3. Connaissances des actions de restaurations morphologiques sur le bassin versant de la Vilaine	10
3.1. Recueil des informations auprès des acteurs du territoire	10
3.1.1. Présentation des acteurs sollicités	10
3.1.2. Collecte des données	10
3.2. Restitution des informations collectées	11
3.2.1. Bilan technique sur les actions recensées	11
3.2.2. Bilan des perceptions des techniciens rivières	14
3.3. Analyse des informations collectées	14
4. Étude de la recharge granulométrique	16
4.1. Matériel et méthodes	16
4.1.1. Les sites d'études	16
4.1.2. Méthodologie employée	17
4.1.3. Outils d'analyses	18
4.2. Résultats	19
4.3. Discussion	24
Conclusion	28
Bibliographie	29
Annexe	

Liste des figures et tableaux

Figure 1 : Principe d'équilibre dynamique (Lane, 1955)	2
Figure 2 : Résumé des principales causes de perturbations (Le Bihan, 2013)	4
Figure 3 : Structures administratives : Opérateurs de bassins.....	10
Figure 4 : Situation géographique des différents types de suivis de travaux de restaurations pratiqués sur le Bassin versant de la Vilaine.....	13
Figure 5 : Localisation des sites étudiés sur le Bassin Versant Vilaine.....	16
Figure 6 : Réalisation d'une ACP sur deux plans factoriels.....	19
Figure 7 : Étude du rapport Lpb/Hpb pour les sites de Référence, restauré et dégradé.....	20
Figure 8 : Surface de BV en fonction du rapport Lpb/Hpb.....	21
Figure 9 : Évolution du débit de pleins bords en fonction de la surface de bassin versant	22
Figure 10 : Étude des différents faciès d'écoulement présents sur les stations étudiées avant et après travaux.....	22
Figure 11 : Répartition par ordre croissant des 50 éléments granulométriques relevés sur chaque station selon la méthode de Wolman.....	23
Tableau 1 : D'après, le tableau de synthèse de Boudot-Grimaud 2013, (Wasson <i>et al.</i> , 1998 ; Malavoi & Adam, 2007 ; Dasonville, 2010)	5
Tableau 2 : Synthèse des informations collectées sur les actions de restauration morphologiques (Informations détaillés de chaque action relevées Annexe 3).	12
Tableau 3 : Les principales difficultés rencontrées par les techniciens rivières pour la mise en place et la réalisation d'une restauration.....	14
Tableau 4 : Synthèse des éléments relevés sur le terrain. Chaque variable étudiée est détaillée dans le protocole Annexe 4.....	18

Table des annexes

Annexe 1 : Extrait du PAGD

Annexe 2 : Etat d'avancement des différents contrats de restauration

Annexe 3 : Détail des actions de restauration identifiées

Annexe 4 : Protocole recharge granulométrique

Annexe 5 : Fiche terrain des données qualitatives

Annexe 6 : Jeu de données

Annexe 7 : Analyse discriminante pour chaque variable

Introduction

La dégradation continue des écosystèmes fluviaux et la perte de la biodiversité aquatique se sont intensifiées au milieu du XX^{ème} siècle. Le développement urbain, industriel et agricole et les différentes politiques d'aménagement qui en découlent, en sont les principaux responsables. Les systèmes aquatiques d'eau douce en ont été victimes en connaissant d'importantes agressions morphologiques : construction de barrages transversaux et de digues, exploitation de matériaux alluvionnaires, protection artificielles de berges, travaux de rectification, recalibrage, curage etc...

Au cours des années 1990, un lien important est réalisé entre la morphologie des rivières, les écoulements et les paramètres biologiques. La prise en compte de l'hydromorphologie, apparaît dans les textes avec la directive 2000/60/CE du 23 octobre 2000 du parlement et conseil européen, dite « directive cadre sur l'eau » qui fixe comme objectif aux Etats membres l'atteinte du bon état écologique des cours d'eau pour 2015. Le "bon état écologique" est la résultante d'une exigence environnementale sur la qualité des milieux et de leurs fonctionnalités écologiques. Son évaluation prend en compte le "bon état physico-chimique" ainsi que le "bon état biologique", les caractéristiques hydromorphologiques n'étant pas directement prises en compte. Elles sont en revanche considérées comme facteur explicatif de l'état biologique.

Sur le bassin de la Vilaine, la morphologie des cours d'eau constitue le principal risque de non atteinte du bon état et, de fait, représente un des enjeux majeurs du SAGE. Une dynamique de restauration des cours d'eau s'est d'ores et déjà instaurée. Pour autant, beaucoup de questions se posent encore sur l'intérêt écologique et la faisabilité technique de ces actions. La technique de recharge granulométrique, en particulier, soulève de nombreuses interrogations. Les programmes de restauration de cours d'eau prévoient en effet de la déployer sur des linéaires importants alors que son efficacité et les conditions de sa mise en œuvre ne sont pas encore clairement établies.

L'objectif de la présente étude est donc d'initier le travail sur ce sujet en réalisant un retour d'expériences sur les actions de restauration morphologique mises en œuvre sur le bassin et une évaluation des premiers travaux de recharge granulométrique.

Dans un premier temps, une synthèse bibliographique permet de présenter le rôle essentiel de l'hydromorphologie, les altérations qu'elle subit et la restauration qui peut être envisagée. Dans un second temps, est présenté, un retour d'expériences des opérations de restauration hydromorphologique pratiquées sur l'ensemble du bassin versant de la Vilaine. Enfin, une évaluation spécifique des travaux de recharge granulométrique est réalisée. Elle vise, d'une part, à vérifier l'apport de ces travaux en termes d'incision de cours d'eau, de capacité de débordement et de diversification des écoulements ; d'autre part, à préciser les conditions de sa mise en œuvre.

1. Synthèse bibliographique sur l'hydromorphologie

1.1. Qu'est-ce que l'hydromorphologie

Cette discipline de recherche datant du milieu du XX^{ème} siècle (Wolman, 1954 ; Lane, 1955 ; Strahler, 1957 ; Leopold *et al.*, 1964) est issue du grec « *Hydro* » (eau), « *Morpho* » (forme) et « *Logos* » (étude). L'hydromorphologie des cours d'eau désigne l'étude des formes qui résultent des processus physiques régissant le fonctionnement des cours d'eau, ainsi que des pressions exercées par les hommes sur ces milieux (Malavoi & Bravard, 2010).

Les cours d'eau sont des systèmes naturels évolutifs conditionnés par l'interaction d'une série de composantes dans le temps et l'espace (Elosegi *et al.*, 2010). Des phénomènes physiques et biologiques qui constituent la dynamique fluviale, expliquent les évolutions de la forme des rivières et de leurs habitats. La compréhension de la dynamique fluviale est essentielle pour préserver ces phénomènes qui sont un des moteurs de la biodiversité de l'hydrosystème (ONEMA, 2010).

Dans des conditions naturelles relativement constantes, les rivières tendent à établir une combinaison de dynamique stable entre deux types de variables (Schumm, 1977) :

- Les variables de contrôles : c'est à l'échelle du bassin versant que s'expriment concrètement les deux variables de contrôle majeures de la dynamique fluviale que sont le débit liquide (Q) et le débit solide (Qs) (charge de fond principalement). Elles sont sous la dépendance des événements météorologiques et de l'état des bassins, qui conditionnent la genèse et la transmission des flux d'eau et de matière (Malavoi & Bravard, 2010).
- Les variables de réponses : elles permettent à la rivière de modeler sa morphologie en fonction des fluctuations des variables de contrôle. Elles interviennent à l'échelle du tronçon de cours d'eau. Les principales variables de réponses sont la géométrie du lit à pleins bords (largeur et profondeur), le profil en long (la pente moyenne du lit), et le style fluvial (sinuosité).

Du fait des nombreuses variations hydrologiques, un cours d'eau est en perpétuelle évolution. De nombreux paramètres physiques se modifient : largeur, profondeur moyenne, profil de pente, faciès d'écoulement, forme de tracé (Adam *et al.*, 2008). Il est tout à fait normal d'observer sur une rivière dite « stable », des phénomènes d'érosion ou de dépôt, des migrations de méandres, l'exhaussement ou l'encaissement ponctuel du lit (Adam *et al.*, 2008). Au contraire, tous ces phénomènes, ces « pulsations », sont la preuve que le cours d'eau est bel et bien à la recherche de son équilibre (Wasson *et al.*, 1998). La relation entre le débit liquide et le débit solide constitue un principe d'autorégulation des écoulements : si une ou plusieurs variables sont modifiées, nécessairement il va se produire des changements sur une ou toutes les autres variables de façon à rétablir l'équilibre entre les processus d'érosion, transport et sédimentation (Leopold *et al.*, 1964 ; Schumm, 1971 ; Malavoi *et al.*, 2011).

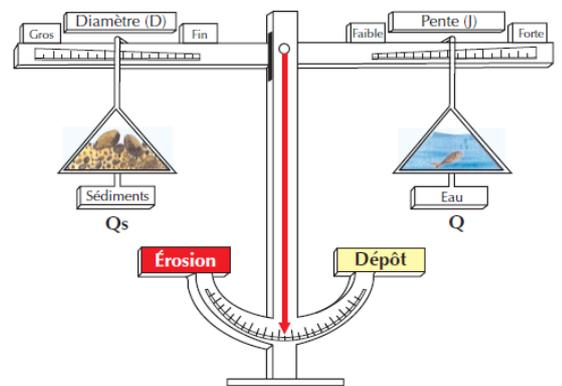


Figure 1 : Principe d'équilibre dynamique (Lane, 1955)

Ces phénomènes de dépôt et d'érosion sont décrits par la balance de Lane (1955), représentant le principe d'équilibre dynamique (Figure 1). De manière très simplifiée, la dynamique fluviale peut donc être présentée comme l'oscillation permanente de l'aiguille d'une balance dont l'un des plateaux serait rempli de sédiments grossiers (variable Q_s), et l'autre d'eau (variable Q) (Malavoi *et al.*, 2011).

1.2. L'hydromorphologie, indispensable pour le bon fonctionnement écologique d'un cours d'eau

La Directive Cadre sur l'Eau définit le bon état écologique des masses d'eau par rapport à des critères biologiques et physico-chimiques. L'état hydromorphologique quant à lui, n'est pas utilisé comme un indicateur dans l'évaluation des masses d'eau. Cependant, la DCE l'intègre comme étant un facteur explicatif de l'état biologique. Il est clairement établi aujourd'hui que le bon fonctionnement écologique des cours d'eau et de leurs corridors passe par la préservation des processus géodynamiques naturels et des caractéristiques géomorphologiques qui en résultent (Malavoi & Bavard, 2010).

La notion d'habitat aquatique peut se définir comme l'espace physique utilisé par les organismes pour accomplir leurs fonctions vitales (reproduction, alimentation, migration) (Navratil, 2005).

L'hydromorphologie détermine conjointement dans l'espace et dans le temps, toute la diversité de l'habitat aquatique (Souchon *et al.*, 2002). D'après le recueil de l'ONEMA (2010), les paramètres hydromorphologiques qui soutiennent les paramètres biologiques sont :

- les conditions morphologiques : diversité des profondeurs, de la largeur de la rivière, du substrat du lit et de la végétation des rives ;
- la continuité écologique de la rivière : montaison et dévalaison des espèces aquatiques ; flux de sédiments, connexions avec les annexes hydrauliques ;
- le régime hydrologique : respect de débits minimums d'étiage, présence de crues morphogènes avec un temps de retour de un à trois ans en général, connexions avec les eaux souterraines.

Nous pouvons distinguer trois niveaux emboîtés de complexité, trois échelles majeures qui génèrent chacune une diversification sur la structure physique de l'habitat :

- l'échelle **régionale** du bassin, celle des différents types de vallées générées par les grandes formes géomorphologiques et la structure hiérarchisée du réseau hydrographique.

- l'échelle **linéaire** du tronçon, celle des séquences d'unités morphologiques créées dans une vallée par la dynamique fluviale.

- l'échelle **ponctuelle** du faciès, qui détermine les combinaisons substrat-écoulement. Il s'agit de l'échelle du micro-habitat qui comprend les structures d'abris des organismes.

De plus, la notion du River Continuum Concept (RCC, Vannote *et al.*, 1980) établit le postulat que les variables physiques présentent un gradient longitudinal des conditions d'habitat contrôlant la composition des communautés biologiques.

En conclusion, il est important de retenir que les êtres vivants sont fortement dépendants de l'habitat physique dans lequel ils se trouvent. La dynamique naturelle est essentielle pour la construction, l'entretien et la régénération des habitats des communautés aquatiques. Il est donc nécessaire de pouvoir évaluer l'état de ces processus, les éléments susceptibles de les perturber, pour les relier avec les incidences sur la biologie afin de se donner les moyens d'atteindre les objectifs visés par la DCE (IRSTEA, 2015).

1.3. La dégradation hydromorphologique des cours d'eau

1.3.1. Les causes principales de dégradation

Depuis le milieu du XX^{ème} siècle et l'intensification du développement économique des sociétés humaines, les systèmes aquatiques d'eau douce ont subi de fortes pressions. C'est ainsi que des milliers de kilomètres de cours d'eau français ont vu leurs caractéristiques géomorphologiques (géométrie, substrats,...) et leurs processus géodynamiques fortement altérés par des interventions anthropiques diverses (Malavoi, 2006) :

- **chenalisations excessives** (recalibrage, rectification, endiguement), se traduisant notamment par une banalisation des caractéristiques abiotiques des milieux aquatiques.
- **extractions de matériaux** avec pour conséquence l'incision du lit mineur, la disparition du substrat alluvial et l'affaissement de la nappe d'accompagnement.
- **implantations de barrages et de seuils** avec des effets nombreux et variés tels que le ralentissement voire le blocage des migrations piscicoles, l'atténuation du transit sédimentaire, la création de longs plans d'eau en amont en lieu et place des faciès d'écoulement naturels, l'augmentation du réchauffement de l'eau en été, etc.

La figure 2, représente les principaux travaux d'aménagement qui ont été pratiqués en France. Les altérations physiques qui en résultent constituent un risque majeur de non atteinte du bon état écologique des cours d'eau.

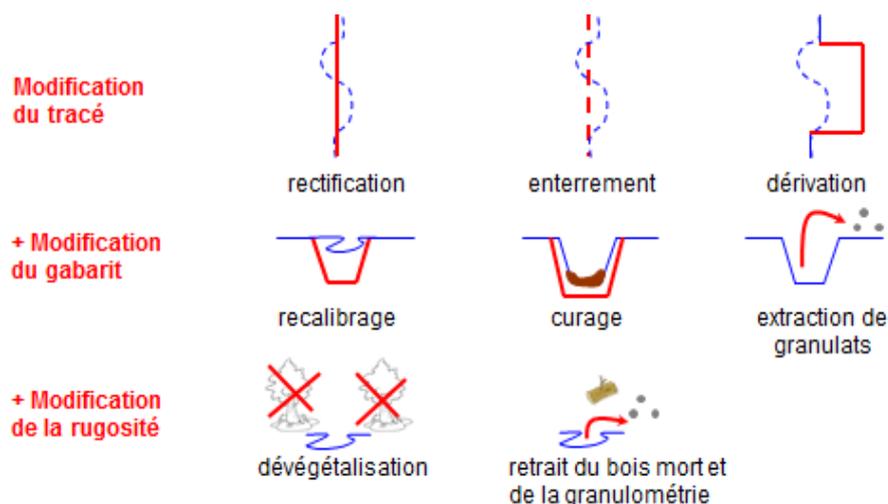


Figure 2 : Résumé des principales causes de perturbations (Le Bihan, 2013)

1.3.2. Les conséquences sur le fonctionnement des cours d'eau

Par nature, ces aménagements dégradent les habitats des cours d'eau et de la plaine alluviale et diminuent les capacités de réajustements morphologiques du cours d'eau pourtant nécessaires au bon fonctionnement écologique des rivières. Cela se traduit par des impacts sur les compartiments hydrologique, physique et écologique du cours d'eau, qui sont résumés dans le tableau 1 :

Tableau 1 : D'après, le tableau de synthèse de Boudot-Grimaud 2013, (Wasson *et al.*, 1998 ; Malavoi & Adam, 2007 ; Dassonville, 2010)

Propriétés atteintes	Altérations
Hydrologique	Variations brutales et fréquentes du débit, accentuation des régimes hydrologiques perte d'étanchéité, modification des relations nappes/rivières, augmentation ou réduction de la fréquence des crues, déconnexion entre le lit mineur et ses annexes hydrauliques [...]
Physique	Réduction de la sinuosité, profondeurs et largeurs peu variées, élargissement du lit mineur, incision du lit mineur, blocage de la dynamique latérale, homogénéisation des faciès d'écoulement, perturbation du transit sédimentaire, surcharge en matières en suspension, colmatage, disparition de la ripisylve, modification de la structure des berges [...]
Écologique	Homogénéisation et disparition des habitats, augmentation de la luminosité et de la température de l'eau, diminution de la capacité d'autoépuration, aggravation des effets de l'eutrophisation, appauvrissement des habitats dans le lit majeur, perte de biodiversité ordinaire et remarquable [...]

Un cours d'eau chenalisé est donc affecté dans ses 4 dimensions (longitudinale, verticale, transversale et temporelle). La restauration hydromorphologique des cours d'eau a vu le jour afin de rétablir tout ou une partie des fonctionnalités des cours d'eau dégradés et ainsi répondre à la DCE. La connaissance précise des dysfonctionnements hydromorphologiques observés ainsi que leur origine permet la mise en œuvre d'actions de restauration globales, cohérentes et durables. Un bon diagnostic de dysfonctionnement permettra la mise en lumière des actions de restauration à réaliser (ONEMA, 2010).

1.4. La restauration hydromorphologique

La restauration physique des cours d'eau participe à la réparation de l'intégrité écologique, en rétablissant les processus hydrologiques, géomorphologiques et écologiques (Wohl *et al.*, 2005).

L'atteinte du bon état écologique est largement déterminée par la diversité et la naturalité de la structure du lit mineur, du lit majeur et par les débits du cours d'eau, donc par sa bonne qualité hydraulique et morphologique, laquelle permet d'assurer aux écosystèmes une bonne fonctionnalité. Voici les actions que la circulaire DCE (n°2005-12), relative à la définition du « bon état » et à la constitution des référentiels pour les eaux douces de surface, préconise en termes de morphologie des cours d'eau :

- Le rétablissement ou maintien d'un tracé en plan et de conditions de connectivité latérale du cours d'eau avec ses milieux annexes (prairies inondables, zones humides, bras morts,...) permettant d'assurer aux communautés les conditions d'habitat nécessaires à leur développement et à leur survie durable (en particulier, granulométrie des fonds, vitesses de courant, hauteur d'eau) ;

- Le rétablissement ou maintien d'un état des berges et de la végétation riveraine compatible avec le développement et la survie des organismes correspondant au bon état écologique ;
- Un ajustement du niveau d'intervention en fonction de ce qu'il est nécessaire d'entreprendre pour atteindre le bon état écologique.

1.4.1. Dans quels cas restaurer ?

La réalisation d'un diagnostic à partir de séries de données biologiques, de mesures physiques et d'échanges avec les acteurs du territoire, permet de mettre en évidence la présence, la nature, le degré et l'origine des perturbations et des dégradations qui affectent le cours d'eau. Ce diagnostic doit, dans la mesure du possible, être complété par l'étude des activités et des préoccupations de la société autour du cours d'eau concerné. Les enjeux sociologiques et économiques autour du fonctionnement actuel du cours d'eau doivent être mis en lumière. Ils serviront à la définition des objectifs du projet (ONEMA, 2010).

Quel que soit le constat initial, il convient de se poser les bonnes questions avant d'agir, l'objectif étant de savoir si la restauration est vraiment utile et s'il n'y a pas d'autres solutions envisageables. En effet tous les écosystèmes ont une capacité innée à récupérer et reconstituer leur structure physique. Les processus de rétablissement peuvent donc être longs et les objectifs de gestion peuvent chercher un rétablissement plus rapide par restauration active (Pierron F, 2005). Dans ce cas, la restauration active peut être considérée comme la seule option notamment dans les systèmes moins dynamiques, où les processus sont insuffisants pour recréer les dispositifs naturels si ce n'est à l'échelle des temps géologiques.

Pour exemple, les cours d'eau dont la puissance spécifique est inférieure à 35W/m^2 sont incapables d'un autoajustement en réponse à des aménagements ou des contraintes extérieures. Par contre, les rivières où la puissance dépasse les 100W/m^2 ont une dynamique de modification du tracé fort, qui peut aboutir à la multiplication de chenaux (Petit *et al.*, 2005 ; Malavoi & Bravard, 2010).

Pour chaque projet de restauration, différentes réalisations techniques sont possibles. Le choix de la technique est effectué au cas par cas en prenant en compte le contexte global. Les actions sont souvent combinées. En termes d'échelle, une restauration dite pertinente, selon Malavoi (2006), doit se situer à une échelle supérieure à 100 fois la largeur de pleins bords pour avoir un réel impact sur le cours d'eau.

Enfin, un levier incontournable de la réussite d'un projet de restauration morphologique est son acceptation sociale. En effet, les techniques de restauration de cours d'eau sont relativement nouvelles, et les réticences sociopolitiques face à la remise en cause d'aménagements parfois récents sont encore vivaces, l'apogée des travaux de chenalisation se situant entre 1960-70)(Dassonville, 2010).

1.4.2. Les niveaux d'interventions

Selon Malavoi J-R (2006), il est défini trois grandes catégories d'interventions sur un cours d'eau visant à préserver ou à restaurer un bon fonctionnement morpho-écologique. Si l'état écologique est déjà bon, la « restauration » hydromorphologique n'est pas nécessaire : il faut chercher la simple préservation de l'existant, au travers d'actions préventives (sensibilisation des gestionnaires et usagers, protection réglementaire, maîtrise foncière, etc.), ou par la limitation des dysfonctionnements observés (stabilisation des phénomènes d'incision, meilleure gestion de la qualité de l'eau ou des débits en aval d'un barrage par exemple). Si l'état morphologique est dégradé, 3 niveaux d'ambition de restauration sont distingués :

Niveau R1 : Restauration d'un seul compartiment de l'hydrosystème : Ce niveau de restauration s'applique à un contexte où l'on ne peut réaliser une véritable opération de restauration fonctionnelle, faute de volonté, de moyens ou d'emprise foncière. Il s'agit régulièrement de mettre en place des structures de diversification des écoulements ou d'amélioration des habitats : déflecteurs, micro-seuils, supports et abris pour la faune...

Niveau R2 : Amélioration de tous les compartiments aquatiques et rivulaires, c'est-à-dire le transport solide, l'habitat aquatique, la nappe alluviale et la ripisylve. Ce niveau nécessite une emprise foncière plus importante (de 2 à 10 fois la largeur du lit mineur avant restauration). La reconstruction d'un matelas alluvial, le rehaussement de fond du cours d'eau ou la création d'une légère sinuosité sont des travaux de niveau d'ambition R2. La recharge en granulats peut-être considérée comme un type de travaux de niveau R1 si l'objectif recherché est uniquement la diversification mais R2 si l'objectif est le rehaussement du fond du cours d'eau.

Niveau R3 : Niveau R2 + Restauration de l'espace de mobilité ou de fonctionnalité. C'est la restauration fonctionnelle complète de l'hydrosystème, y compris de la dynamique d'érosion et du lit. L'emprise nécessaire pour que ce niveau d'ambition soit pertinent est au minimum de l'ordre de 10 fois la largeur du lit mineur avant restauration. Le reméandrage (avec recréation d'un nouveau lit) est une technique de restauration de niveau d'ambition R3.

1.4.3. Un regard particulier sur la recharge granulométrique

Cette technique a pour principal objectif, selon Malavoi et ses collaborateurs (2007), de reconstituer ou renforcer la couche d'armure et ainsi limiter l'incision, rétablir un certain transit sédimentaire, améliorer la connexion nappe-cours d'eau, diversifier les habitats et les écoulements du cours d'eau. Les travaux de restauration ne doivent pas s'opposer à la dynamique fluviale mais plutôt faciliter la réactivation des processus naturels.

La nature géologique des granulats doit être identique ou très proche de ce que l'on doit trouver naturellement dans le cours d'eau (Bramard *et al.*, 2010). La recharge du lit doit s'opérer sur une hauteur minimum de 15 à 30 cm, pour favoriser les écoulements hyporhéiques et rétablir le transit sédimentaire vers l'aval (Boutet- Berry *et al.*, 2009). Par ailleurs, la restauration induit une augmentation des échanges verticaux de l'eau entre la surface et les habitats interstitiels, ce qui augmente la profondeur d'hypoxie (Sarriquet *et al.*, 2007).

Les réflexions restent à poursuivre sur le comportement à long terme de cette technique. En effet, la capacité d'érosion latérale n'étant pas restaurée, l'énergie continue de se dissiper de manière verticale et les problèmes initiaux (incision et faiblesse du transit sédimentaire) peuvent ressurgir menaçant la pérennité de l'aménagement (Tassard, 2011).

1.5. Où en est-on des suivis de restauration ?

La restauration en rivière a augmenté de façon exponentielle au cours des dernières décennies. Cependant peu d'évaluations sont menées pour savoir si les projets de restauration, individuellement ou cumulativement ont atteint les objectifs de départ, à savoir améliorer la structure et le fonctionnement des ruisseaux et rivières (Bernhardt *et al.*, 2011).

Ce manque de suivi est notamment révélé par les autorités de l'eau en Bavière qui démontrent que les données ne sont pas disponibles pour déterminer l'échec ou le succès des mesures mises en œuvre pour 86% des projets en raison de l'absence de tout contrôle de l'efficacité (Palmer & Geist, 2013).

Indépendamment de la complexité des projets de restauration, le suivi permet d'enrichir les connaissances sur les facteurs permettant le succès de la restauration (Palmer & Geist, 2013). Cependant, à ce jour, la restauration des ruisseaux est souvent basée sur des essais et des erreurs, sans suivi efficace des améliorations écologiques. Par conséquent, il devient difficile d'identifier la stratégie de restauration la plus efficace pour les futurs projets.

Cependant, il est primordial d'en savoir plus sur l'apport en termes de gain écologique, pour certaines de ces actions de restauration hydromorphologique pour justifier ces dépenses publiques. Dans les pays développés, des sommes importantes sont engagées depuis de nombreuses années pour rétablir le bon état hydromorphologique des cours d'eau. Par exemple, depuis 1990, les Etats-Unis ont investi plus d'un milliard de dollars par an dans la restauration des rivières (Bernhardt *et al.*, 2005)

2. Contexte général de la présente étude

2.1. Présentation du bassin versant de la Vilaine

A cheval sur deux régions (Bretagne, Pays de la Loire) et 6 départements (Morbihan, Ille et Vilaine, Loire Atlantique, Côtes d'Armor, Mayenne, Maine et Loire), le bassin versant de la Vilaine regroupe 527 communes sur plus de 10 000 km². La Vilaine est un fleuve côtier de près de 230 km de la source à l'embouchure. Il prend sa source sur la commune de Juvigné (53) à une altitude de 190m NGF. Le bassin comporte aussi une partie littorale qui s'étend sur 680 km², pour un périmètre de 170 km environ.

Les principaux affluents (d'amont en aval) sont, en rive droite, le Chevré (45 km), l'Ille (47 km), la Flume (34 km), le Meu (85 km), l'Oust (145 km), et le Trévelo (21 km) et, en rive gauche, la Seiche (97 km), le Semnon (73 km), la Chère (66 km), le Don (92 km), et l'Isac (69 km). L'Oust draine une large partie ouest du bassin et présente lui aussi des affluents importants : la Claie, l'Arz en rive droite ; le Lié, le Ninian, l'Yvel et l'Aff en rive gauche.

Avec une population en nette augmentation sur la dernière décennie, les densités importantes de population sont centrées autour des grandes agglomérations (Rennes, Redon, Vitré, Châteaubriant, Ploërmel, Loudéac, etc) et marquent également l'axe fluvial, puisque les communes riveraines de la Vilaine regroupent près de 31% de la population totale du bassin, et celles riveraines de l'Oust 5%. Les 17 communes littorales regroupent quant à elles 4% de la population du bassin de la Vilaine. Les ressources superficielles et souterraines sont précieuses pour les différents usages du territoire : l'eau potable accapare la plus grande partie des volumes prélevés (79%) loin devant l'usage industriel (12%) et agricole (9%).

Le bassin de la Vilaine est caractérisé par un réseau hydrographique dense, en étroite relation avec les nappes alluviales, et de nombreuses zones humides annexes. 60 à 70% du bassin versant de la Vilaine se situe en têtes de bassin, selon les critères du SDAGE Loire-Bretagne (bassins versants des cours d'eau dont le rang de Strahler est inférieur ou égal à 2 et dont la pente est supérieur à 1%).

D'un point de vue géologique le bassin repose sur un socle ancien, le massif armoricain, avec des roches d'origine sédimentaire fortement métamorphisées (grès, schistes, gneiss...) et plutoniques (granites). Les bassins sédimentaires tertiaires et quaternaires sont peu étendus, à l'exception du bassin rennais. Le bassin possède quelques aquifères alluviaux de tailles modérés, ainsi que des aquifères intéressants liés à des bassins géologiques d'origine tertiaire. Les eaux souterraines les plus exploitées restent cependant très liées aux eaux superficielles, que ce soit celle des nappes alluviales ou celles liées au socle altéré.

L'étude besoins/ressources (IAV, 2012) indique que le bassin de la Vilaine est globalement en équilibre, mais avec des marges de manœuvre étroites et une situation contrastée suivant les secteurs, les sous-bassins les plus fragiles étant la Seiche, le Semnon, la Chère, le Don et l'Isac. Les étiages y sont marqués même en l'absence de prélèvements.

2.2. Le Sage Vilaine point de départ de la présente étude

Le premier Sage Vilaine a été approuvé en 2003. Ces objectifs principaux étaient naturellement de lutter contre les pollutions diffuses, protéger et sécuriser la distribution d'eau potable, mieux épurer les rejets domestiques et industriels, vivre avec les crues, etc. Le Sage a été révisé pour le rendre compatible avec le Sdage Loire-Bretagne 2010-2015. Approuvé le 2 juillet 2015, le nouveau Sage intègre désormais des enjeux liés à l'eau et aux milieux aquatiques dans les politiques locales d'aménagement du territoire du bassin versant. Le chapitre cours d'eau repose sur la prise en compte de la morphologie, principal risque de non atteinte du bon état sur le bassin de la Vilaine.

L'une des dispositions du Sage prévoit la réalisation et le suivi d'actions expérimentales de restauration de morphologie afin de mettre en évidence l'intérêt fonctionnel de ces actions et permettre aux gestionnaires d'ajuster leurs actions en conséquence (disposition 45 du PAGD ; Annexe 1). Le présent travail a pour objectif d'ouvrir ce chantier en faisant un premier état des lieux des différentes techniques mises en œuvre sur le territoire et en réalisant une analyse spécifique des travaux de recharge granulométrique.

3. Connaissances des actions de restaurations morphologiques sur le bassin versant de la Vilaine

3.1. Recueil des informations auprès des acteurs du territoire

3.1.1. Présentation des acteurs sollicités

Le SAGE Vilaine préconise que la maîtrise d'ouvrage de l'aménagement et de l'entretien des rivières soit portée par les structures de coopération intercommunale à l'échelle des bassins versants. Cela a contribué à la structuration du territoire en 16 opérateurs de bassin (syndicats ou communauté de communes ou d'agglomération) compétents pour conduire les politiques locales de l'eau (Figure3).

En quelques années, les programmes d'actions sur les milieux aquatiques se sont fortement développés sur le bassin de la Vilaine. Ils sont révélateurs de manière plus générale de la dynamique de projets sur le territoire. Tous sont engagés dans des contrats pluriannuels visant la préservation et la restauration de la qualité de l'eau et des milieux aquatiques. L'avancement des différents contrats diffère suivant les territoires (Annexe 2). Toutefois, il reste des territoires orphelins d'actions : cela concerne en particulier le territoire de Rennes Métropole, le Canut Nord, le Saint Eloi et certains petits affluents directs de la Vilaine. Ces zones sont représentées en blanc sur la figure 3.

D'autres maîtres d'ouvrages peuvent intervenir sur le territoire mais n'ont pas été sollicités pour ce travail. Par ailleurs, quelques personnes ressources (ONEMA, FDAAPPMA,...) ont été contactées afin de s'imprégner de leurs connaissances du territoire, des acteurs et des actions menées.

3.1.2. Collecte des données

Les données collectées portent sur les actions de restauration morphologique menées par les opérateurs de bassins. L'objectif est de dresser un bilan des techniques expérimentées par ces structures afin d'avoir une vision d'ensemble de l'état d'avancement dans ce domaine à l'échelle du bassin versant et de capitaliser l'expérience acquise par les techniciens. Il ne s'agit pas de faire un inventaire exhaustif de toutes les actions menées mais d'identifier les actions phares de chaque opérateur et d'en décrire les modalités techniques de mise en œuvre et l'appréciation du technicien rivière. Seules les actions de restauration morphologique sont concernées ; les actions de restauration de la continuité n'ont pas été recensées. Les informations collectées dans le cadre de cette étude sont limitées aux actions réalisées par ces seize opérateurs de bassins, principaux maîtres d'ouvrages identifiés sur le bassin versant. Au total, onze structures ont été rencontrées pour collecter les informations et visiter certains sites restaurés. Les cinq autres ont été contactées par téléphone.



Figure 3 : Structures administratives : Opérateurs de bassins

3.2. Restitution des informations collectées

3.2.1. Bilan technique sur les actions recensées

Les informations ont été collectées pour 41 actions, parmi les plus ambitieuses ou abouties et pour lesquelles les données étaient disponibles (Annexe 3). Le tableau n°2 présente une synthèse des données collectées dans cette étude.

Tableau 2 : Synthèse des informations collectées sur les actions de restauration morphologiques (Informations détaillées de chaque action relevées Annexe 3).

Type d'action	Objectifs recherchés	Principes de mises en œuvre	Coût moyen [coût min. ; coût max.]/100mL	Matériaux utilisés (Quantité/diamètre)	Sources : Le bassin concerné et (Maître d'ouvrage associés)
Diversifications des écoulements Niveau R1 d'intervention	<ul style="list-style-type: none"> - Diversifier les vitesses d'écoulement en reconstituant un profil en travers moins large - Décolmater le substrat - Recréer un lit mineur d'étiage fonctionnel, permettant un meilleur fonctionnement du cours d'eau sur des débits d'étiage, favorisant les échanges donc une meilleure autoépuration. - Augmenter la teneur en oxygène dissous et limiter le réchauffement de l'eau - Recréer des atterrissements devant les épis - Créer des sous-berges en redirigeant les écoulements grâce aux épis 	<p>La majorité des techniques employées sur le territoire pour dynamiser les écoulements sont la pose d'épis en roche, de mini-seuils en étranglement, de blocs épars, de risbermes minérales ou végétales.</p> <p>N.B : Les épis sont orientés vers l'amont afin d'avoir une efficacité optimale (Importance de l'étanchéité des épis pour créer des atterrissements en amont). Pour étanchéifier les aménagements, il est important d'apporter une granulométrie variée afin de combler les interstices entre les plus gros blocs.</p>	Coût moyen = 1200€ HT [616€ ; 3 344€]	En moyenne : 16 T/100 mL Blocs compris entre 0-400 mm voir 600 mm	<ul style="list-style-type: none"> • Meu (SI Meu) • Oust Amont et Lié (CIDERAL) • Semnon (SIBSemnon) • Marais de Redon (CCPR) • Ille et Illet (BVILLE et illet) • Vilaine Amont (SIBVilaine Amont) • Seiche (SIBV Seiche) • Aff (SMGBO)
Recharge minérale en tâche Niveau R1 d'intervention	<ul style="list-style-type: none"> - Diversifier les écoulements - Décolmater le substrat - Reconstituer le matelas alluvial - Restaurer la connexion avec les annexes hydrauliques - Rehausser la ligne d'eau afin que le cours d'eau puisse dissiper son énergie 	<p>Cette technique consiste à apporter du substrat pour resserrer le lit d'étiage et créer des bancs alluviaux alternés.</p> <p>La plupart des maîtres d'ouvrages commencent par déposer en premier une grosse granulométrie au fond du cours d'eau qui est ensuite recouverte par une plus petite granulométrie (cailloux, graviers).</p> <p>Rehaussement de 30 et 90cm : En moyenne 30 à 50 cm.</p>	Coût moyen = 2000€ HT [1 429€ ; 1 743€]	En moyenne : 30 T/100 mL , environ 20 m³ / 100 mL Répartition : - Armature du fond = Blocs (100-150mm) - Cailloux (40-80mm) - Saupoudrage = Graviers (4-10mm et 20-60mm)	<ul style="list-style-type: none"> • Mès et Pont-Mahé (CAP-Atlantique) • Marais de Redon (CCPR)
Recharge minérale en dôme Niveau R2 d'intervention	<ul style="list-style-type: none"> - Diversifier les écoulements - Décolmater le substrat - Rehausser la ligne d'eau afin que le cours d'eau puisse dissiper son énergie 	<p>Cette technique consiste à recharger les radiers déjà existants.</p> <p>La quantité de substrats à apporter est définie en fonction des caractéristiques du cours d'eau.</p>	Une seule donnée : 2400€		<ul style="list-style-type: none"> • Isac (SMABVIsac)
Recharge minérale en plein Niveau R2 d'intervention	<ul style="list-style-type: none"> - Restaurer la connexion avec les annexes hydrauliques - Recréer une armature sur le fond du lit mineur - Reconstituer le matelas alluvial - Rehausser la ligne d'eau afin que le cours d'eau puisse dissiper son énergie - Diversifier les écoulements 	<p>Cette technique consiste à recharger le cours d'eau en substrat pour reconstituer le matelas alluvial et rehausser le fond du cours d'eau. La quantité de substrats à apporter est définie en fonction des caractéristiques du cours d'eau. La plupart des maîtres d'ouvrages commencent par déposer en premier une grosse granulométrie au fond du cours d'eau qui est ensuite recouverte par une plus petite granulométrie (cailloux, graviers).</p> <p>Dans certains cas, le rechargement est complété par quelques blocs pour favoriser la diversification des écoulements.</p> <p>Rehaussement de 30 à 90cm : En moyenne 30 à 60 cm.</p> <p>N.B : Certains maîtres d'ouvrages préfèrent déposer des granulats de différents diamètres séparés et faire le mélange sur place. D'autres préfèrent que le mélange soit fait en carrière</p>	Coût moyen = 3026€ HT [3 351€ ; 5 200€]	En moyenne : 160 T/100 mL , environ 100 m³/100 ml soit Pourcentage de répartition : armature du fond : Pierre (80%), (100-150mm) - Graviers (10%), (4/10mm et 20/60mm) - Cailloux (5%), (40-80mm) - Sables (5%)	<ul style="list-style-type: none"> • Pénerf (SMGPNR Golfe du Morbihan) • Vilaine Amont (SIBVilaine Ava)
Remise du cours d'eau dans son talweg d'origine et reméandrage Niveau R3 d'intervention	<ul style="list-style-type: none"> - Remettre le cours d'eau dans son talweg initial - Recréer une section d'écoulement adaptée au débit de plein bord) - Améliorer les connexions latérales par la reconnexion du cours d'eau à sa nappe d'accompagnement - Diversifier les faciès d'écoulement et les habitats aquatiques (tracé sinueux le plus proche de celui d'origine avec un espace de mobilité important) - Améliorer les capacités auto-épuratoires par la présence d'échanges entre zone hyporhéique et surface 	<p>Chronologie des étapes principales :</p> <ul style="list-style-type: none"> - Recherche de l'ancien tracé (lecture de paysage, cartes ou photos aériennes anciennes, relevés topographiques) - Terrassement du nouveau lit - Rechargement granulométrique : Création d'une armature de fond par apport de nouveaux matériaux et couche de finition (utilisation des matériaux de l'ancien lit et/ou apports extérieurs) - Mise en place d'une ripisylve (ou régénération naturelle) - Pose de clôtures (si besoin) 	Coût moyen = 5000€ HT [2 680€ ; 9 333€]	Très variable d'un site à l'autre (souvent utilisation des matériaux de l'ancien lit)	<ul style="list-style-type: none"> • Oust Amont et Lié (CIDERAL) • Trévelo (SIBVTrévelo) • Aff (SMGBO) • Seiche (SIBV Seiche)
Technique couplées Niveau R3 d'intervention	<i>Permet de multiplier les objectifs propres à chaque action et d'en augmenter l'efficacité.</i>	Types d'actions combinées : Recharge + déblai-remblai Diversification des écoulements + recharge minérale Retalutage de berge + recharge en tâche Remise du cours dans son talweg + recharge			<ul style="list-style-type: none"> • Semnon (SIBSemnon) • Trévelo : SIBVT • Oust Amont et Lié : CIDERAL

Cette synthèse n'a pas l'ambition de décrire la manière idéale de réaliser telle ou telle technique. L'objectif est de synthétiser les modalités techniques des actions mises en place par les maîtres d'ouvrages. Différentes techniques ont été expérimentées, avec une certaine variabilité de mise en œuvre pour une même technique, en réponse à des situations différentes.

Le niveau d'ambition selon la classification de Malavoi J-R., (2006) des actions relevées oscille entre 1 et 3. Cependant, les actions du niveau R1 sont majoritaires avec la diversification des écoulements et la recharge en tâche. Le niveau R2 est atteint pour les sites où les techniques de recharge en plein et en dôme ont été appliquées. Enfin, 5 sites connaissent un niveau d'ambition R3, avec la remise du cours d'eau dans son talweg initial et le reméandrage. Certaines actions sont combinées (recharge et déblai-remblai, remise dans le talweg et recharge, etc...), ce qui semble améliorer leur efficacité.

Les coûts sont assez hétérogènes, cela s'explique facilement par la diversité des situations qui induit notamment une diversité en termes de quantités de matériaux utilisés pour un même type d'action. Il est difficile d'interpréter les coûts, c'est juste un ordre d'idée. En revanche les tailles granulométriques sont relativement identiques d'un site à l'autre.

A noter que seulement, 25% des sites identifiés présente un suivi (biologique, physico-chimique et/ou hydromorphologique) des travaux de restaurations (Figure 4). De nombreux suivis sont réalisés à l'échelle de la masse d'eau par les syndicats mais très peu pour évaluer l'effet d'une restauration.

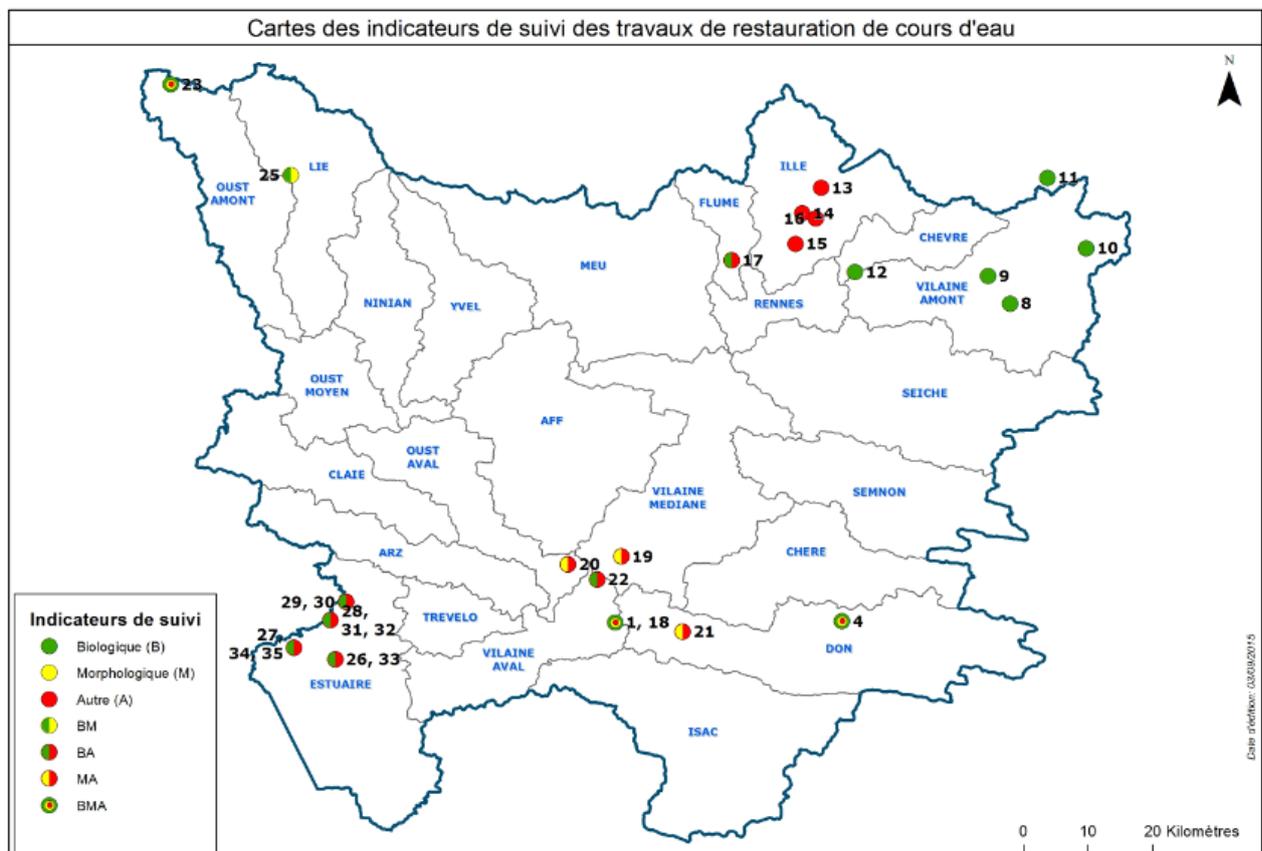


Figure 4 : Situation géographique des différents types de suivis de travaux de restaurations pratiqués sur le Bassin versant de la Vilaine

3.2.2. Bilan des perceptions des techniciens rivières

Lors de la collecte des données, les techniciens de rivières ont pu s'exprimer sur la perception qu'ils avaient des actions réalisées et sur les difficultés qu'ils ont pu rencontrer. Cela n'a pas fait l'objet d'une enquête approfondie mais permet toutefois de tirer quelques enseignements de ces expériences. Ces perceptions sont synthétisées dans le tableau 3 ci-dessous :

Tableau 3 : Les principales difficultés rencontrées par les techniciens rivières pour la mise en place et la réalisation d'une restauration

<p style="text-align: center;">Technique</p> <ul style="list-style-type: none">-Technique pas toujours adaptée aux altérations du cours d'eau-Nécessité de prévoir l'installation (accessibilité, localisation des zones de dépôts des matériaux, clôtures...) et le repli du chantier (remise en état)-Difficulté pour estimer les quantités précises de matériaux à apporter	<p style="text-align: center;">Politique et acceptation sociale</p> <ul style="list-style-type: none">-Acceptation sociale du projet de restauration reste difficile-Avoir des sites vitrines pour convaincre les élus, les usagers, les riverains et le monde agricole-Concertation à ne pas sous-estimer-Les élus attendent des résultats rapides : peut engendrer une certaine précipitation dans la mise en place des actions
<p style="text-align: center;">Diagnostics/suivis</p> <ul style="list-style-type: none">-Manque de diagnostics initiaux sur les tronçons de cours d'eau concernés-Préconisations des bureaux d'études sur la restauration à mettre en place souvent trop généralistes (manque de détails propres à chaque cours d'eau et de recommandations au cas par cas)	<p style="text-align: center;">Expérience</p> <ul style="list-style-type: none">-Manque d'expérience qui a pu poser des difficultés pour les premiers chantiers (notamment, manque d'expérience dans la conduite de chantiers, manque de connaissances techniques sur la dynamique réelle des cours d'eau restaurés, peu de recul quant aux techniques utilisées)Elle tend toutefois à s'estomper

3.3. Analyse des informations collectées

Les résultats relevés montrent qu'une réelle dynamique de restauration des cours d'eau est en marche sur le bassin versant de la Vilaine. En effet, différents types d'actions ont été mis en place, avec des niveaux d'ambitions différents. Cinq actions très ambitieuses de remise du cours d'eau dans le talweg et de réméandrage ont été réalisées.

Ce territoire possède une force pour la mise en commun des connaissances sur la restauration hydromorphologique qui évoluent sans cesse. Ce premier travail permet de capitaliser un certain nombre d'informations techniques issues de l'expérience des techniciens de rivières et contribuera au partage de connaissances sur le bassin.

L'observation des données collectées auprès des maîtres d'ouvrage permet d'avancer quelques recommandations techniques.

Tout d'abord, pour tout aménagement, il est primordial de respecter l'énergie fluviale du cours d'eau, et en aucun cas de réinventer le cours d'eau restauré. Ces aménagements sont faits pour

accompagner une dynamique et un potentiel naturel. Il est primordial de mener une restauration en respectant les caractéristiques propres à chaque cours d'eau, afin de restaurer sa dynamique fluviale tout en pérennisant les effets induits par la restauration.

De plus, une restauration doit être réalisée en se projetant dans l'avenir, pour voir comment elle peut agir positivement dans le temps en favorisant la création d'habitats notamment. Par exemple, la pose d'un épi qui dirige préférentiellement les écoulements vers une berge constituée d'un bon système racinaire va offrir au cours d'eau la création de nouveaux habitats et augmenter la capacité d'accueil de ce dernier en recréant des sous-berges. Il est donc essentiel dans une restauration de se soucier en permanence de l'équation entre la dynamique du cours d'eau et les habitats.

Le constat sur les suivis de travaux de restauration est plutôt négatif. Le peu de sites suivis est le résultat d'un manque de temps, de protocoles adaptés aux objectifs des travaux,... C'est un axe de travail important qu'il conviendrait de développer pour les années suivantes sur le territoire, car il est essentiel de pouvoir démontrer par des résultats chiffrés l'impact des travaux sur le milieu. Il est primordial d'adapter le suivi aux objectifs de l'action. Pour cela, il est possible de s'appuyer sur la typologie réalisée par la délégation Anjou-Maine de l'Agence de l'eau Loire-Bretagne (2015), pour le suivi des Contrats Territoriaux Milieux Aquatiques. De plus, la pertinence du choix de la station à suivre, la réalisation d'un état initial, la définition du pas de temps entre deux campagnes de suivi adapté à la réactivité du milieu, sont quelques-unes des recommandations qu'il faudrait prendre en compte dans le cadre d'une harmonisation des suivis de travaux.

L'acceptation sociale est apparue à plusieurs reprises comme un frein aux projets de restauration morphologique. Il est en effet difficile de faire évoluer la perception qu'ont les usagers de leur rivière. Généralement, les blocages sont liés à des erreurs sur des projets passés, à des incompréhensions ou à un défaut d'informations.

Enfin, l'emprise foncière est ressortie comme étant la variable la plus contraignante pour les techniciens de rivières. De quel espace réel dispose-t-on autour de la rivière pour restaurer le cours d'eau ? Des acquisitions ou des redistributions de parcelles peuvent-elles être envisagées ? L'instauration d'un dialogue entre les différentes parties semble être la clé pour atteindre ces objectifs. Un réel effort de communication, de vulgarisation adaptée aux différents usagers est donc à faire.

Cette partie montre qu'un manque de connaissance subsiste sur l'évaluation d'un succès ou non d'une action de restauration. C'est dans cette optique, qu'un travail spécifique d'évaluation de la technique de recharge granulométrique a été effectué dans le cadre de cette étude. Le but est de poursuivre l'acquisition de données tout en multipliant l'analyse de cours d'eau ayant connu une restauration.

4. Étude de la recharge granulométrique

La méthode de restauration hydromorphologique par recharge sédimentaire artificielle consiste à déverser dans le lit des granulats de taille identique à un cours de référence (ou à des cours d'eau de même type) en quantité suffisante et du même type géologique tout en évitant au maximum l'apport de fines. Les objectifs recherchés sont de reconstituer ou renforcer la couche d'armure et ainsi limiter l'incision, rehausser le fond du lit mineur, rétablir un certain transit sédimentaire, diversifier les habitats et les écoulements (Malavoi *et al.*, 2007).

La recharge granulométrique est une technique très utilisée comme action de restauration hydromorphologique. De nombreux travaux de ce type sont prévus dans les programmes de restauration en cours ou à venir. Sur le bassin de la Vilaine, cela représente un linéaire cumulé d'environ 170 km inscrits dans les Déclarations d'Intérêt Général. De nombreuses questions se posent autour de la pérennité de cette action dans le temps et des bénéfices écologiques qui en découlent. C'est dans ce contexte, qu'il a été décidé d'évaluer les premiers travaux de recharge réalisés sur le bassin versant de la Vilaine. Les principaux objectifs de la présente étude sont :

- Étudier le comportement de la recharge dans le cours d'eau après x années en comparaison avec un état avant travaux (évolution de la granulométrie, hauteur du lit, colmatage, alternance des faciès...)
- Analyser globalement le gabarit du cours d'eau, notamment par le débit de pleins bords, et le rapport largeur de pleins bords sur Hauteur de pleins bords (Lpb/Hpb), pour détecter une amélioration ou la persistance d'une altération après les travaux

4.1. Matériel et méthodes

Cette étude repose sur un protocole simplifié (Annexe 4) visant à réaliser une évaluation spécifique des opérations de recharge granulométrique. Elle est organisée en fonction des deux objectifs principaux de la recharge : le rehaussement du cours d'eau et la diversification des écoulements.

4.1.1. Les sites d'études

L'objectif était de recenser les travaux de restauration terminés ayant utilisés comme méthode la recharge granulométrique et pouvant convenir à cette présente étude. 80% des sites étudiés sont de rangs 2 ou 3 selon la classification de Strahler.

La campagne d'échantillonnage s'est déroulée sur l'ensemble du bassin versant de la Vilaine. Quelques sites d'échantillonnage se situent à l'extérieur du bassin versant de la Vilaine, afin de compléter le jeu de données (Figure 5).

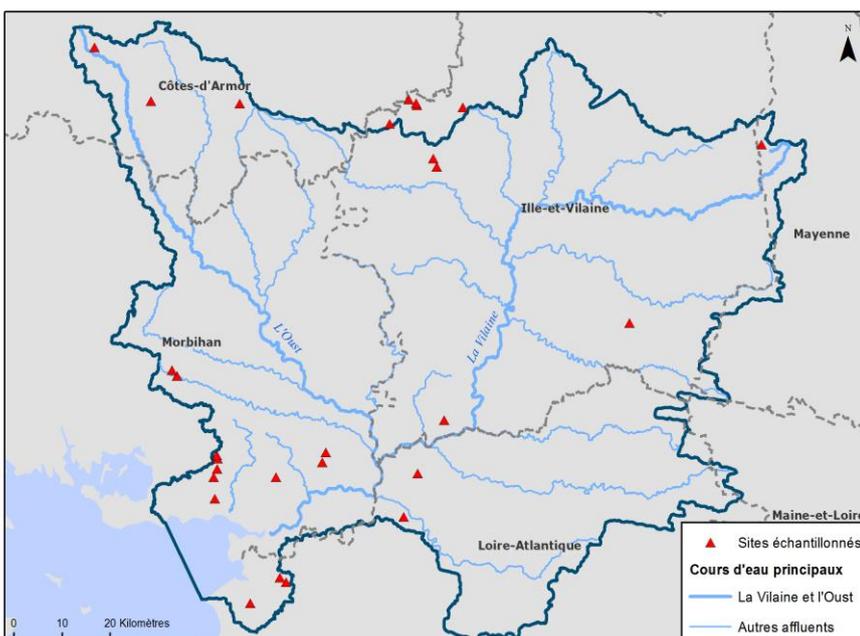


Figure 5 : Localisation des sites étudiés sur le Bassin Versant Vilaine

L'étude des sites restaurés a pris en compte trois techniques de recharge granulométrique :

- La recharge en plein : 40% des sites
- La recharge en tâche : 56% des sites
- La recharge en dôme : 4% des sites

Le regroupement des trois techniques a été nécessaire pour obtenir un jeu de données suffisant pour mener des analyses. Il a été estimé que ces trois méthodes étaient assez proches en termes d'objectifs et de technicité pour les regrouper.

La phase de terrain s'est déroulée de mi-mai à mi-juillet.

4.1.2. Méthodologie employée

L'évaluation des travaux de recharge granulométrique repose sur un protocole élaboré en lien étroit avec l'Onema (Délégation interrégionale Bretagne - Pays de la Loire), et reprend certains indicateurs hydromorphologiques du protocole CARHYCE ainsi que des indicateurs complémentaires.

Chaque site se compose d'une station restaurée et d'une station de référence décrivant l'état avant travaux quand cela était possible. Aucun site ne disposait d'informations assez précises, sur l'état hydromorphologique avant travaux permettant une comparaison avec notre protocole. Le protocole a donc été appliqué juste en amont de la station restaurée représentant l'état avant travaux aux dires du technicien de rivière. Cela n'a été possible que pour 13 sites, les autres présentant des caractéristiques hydromorphologiques trop différentes du tronçon restauré.

Chaque station s'étend sur une longueur minimale de 30 mètres ou de 14 fois la largeur de pleins bords pour les cours d'eau supérieur à 2 m de large. L'emplacement des stations correspond à la zone la plus représentative de l'ensemble du linéaire en termes de représentativité des faciès, de sinuosité et de contraintes latérales. Cinq transects sont définis par station et ils sont positionnés au niveau des faciès d'écoulements les plus représentatifs de la station.

Dans un premier temps des données qualitatives ont été collectées auprès des opérateurs de bassin. Elles portaient sur les caractéristiques du cours d'eau restauré et les modalités techniques de l'action de restauration (Annexe 5). Ces données sont relevées dans l'objectif d'expliquer les résultats obtenus à l'issue du protocole.

Dans un second temps, des données quantitatives ont été collectées sur le terrain, pour chaque station. Elles sont synthétisées dans le tableau 4 :

Tableau 4 : Synthèse des éléments relevés sur le terrain. Chaque variable étudiée est détaillée dans le protocole Annexe 4.

Échelle du relevé ou de l'observation	Objectifs de mesure	Descripteurs utilisés	Références bibliographiques
Ensemble de la Station	Étudier la sinuosité	Distance écologique (m)/ distance euclidienne (m)	Mathieu, 2010
	Estimer le coefficient de rugosité selon la formule de Cowan « k » (pour le calcul du débit de pleins bords)	Matériaux constitutifs de la berge Degré d'irrégularité Variations de sections Présence d'obstacles Végétation du lit et des berges Méandrement	Méthode de Cowan
	Diversité des faciès d'écoulement	Somme des longueurs de chaque type de faciès (plat, radier, profond)	Malavoi & Souchon, 2002
	Donner la pente de la ligne d'eau	Différence d'altitude amont-aval	Méthode CARHYCE
Transect	Décrire les caractéristiques physiques du cours d'eau	Largeur de pleins bords Hauteur de pleins bords Largeur de base Périmètres des berges	Adaptation de la méthode CARHYCE
	Synthétiser les formes de sections	largeur de pleins bords/Hauteur de pleins bords	Malavoi & Bravard, 2010
	Déterminer la gamme granulométrique	Mesures granulométriques de dix éléments sur chaque transect. Étude de la D50 (médiane) Étude du rapport D16/D84 valeurs correspondants à 16% (D16) et à 84% (D84) de la fréquence cumulée	Inspiré de la méthode de (Woolman, 1954)
Uniquement sur radier	Mesurer et observer le colmatage de surface	Méthode Archambaud	Archambaud

De plus, un jeu de données issu de cours d'eau de référence a été utilisé pour l'exploitation des résultats. Ces données caractérisent à l'échelle stationnelle des cours d'eau de tête de bassin versant armoricains de rang de Strahler 1, en situation de référence hydromorphologique. Elles ont été produites par l'ONEMA dans le cadre de deux stages (Jan A, 2013 ; Bossis M, 2014). L'objectif était de caractériser le fonctionnement hydromorphologique des cours en tête de bassin versant en situation de référence puis de construire des indicateurs permettant de comparer tout cours d'eau avec cette situation de référence et d'en évaluer le degré de perturbation. Les variables de ce jeu de données étant en grande partie les mêmes que les nôtres, elles ont pu être utilisées pour comparer les résultats entre sites de références, sites dégradés et sites restaurés.

4.1.3. Outils d'analyses

Un travail de cartographie a été réalisé pour connaître précisément la surface de bassin versant des points échantillonnés. Les calculs de surface de bassin ont été réalisés avec le logiciel ArcGIS qui possède un jeu d'outils hydrologie permettant de modéliser la circulation d'eau à travers une surface. L'ensemble des traitements statistiques (tests, ACP, corrélations et régressions) a été effectué à l'aide du logiciel R.

4.2. Résultats

L'analyse des résultats (Annexe 6) se décompose en deux grandes parties reprenant les deux principaux objectifs de travaux de recharge granulométrique :

- Le rehaussement du fond de cours d'eau
- la diversification des écoulements

Un regard sur les données avec une Analyse en Composantes Principales

Après l'étude de l'éboullis des valeurs propres, les trois premiers axes, expliquant 67% de l'inertie total, ont été retenus pour l'analyse.

Le premier plan factoriel, résume 50,6% d'informations portées par les axes F1 (27,9%) et F2 (22,7%) (Figure 6). Ce pourcentage est assez élevé pour pouvoir faire une analyse pertinente des données. L'axe F1 semble être structuré par deux variables physiques du cours d'eau à savoir la Hauteur de pleins bords (Hpb) et le débit de pleins bords (Qpb). La largeur de pleins bords a également une forte participation pour cet axe. L'axe F2, quant à lui, est majoritairement construit à partir de la variable surface de bassin versant « surf ». La D50 est la variable qui forme majoritairement l'axe 3.

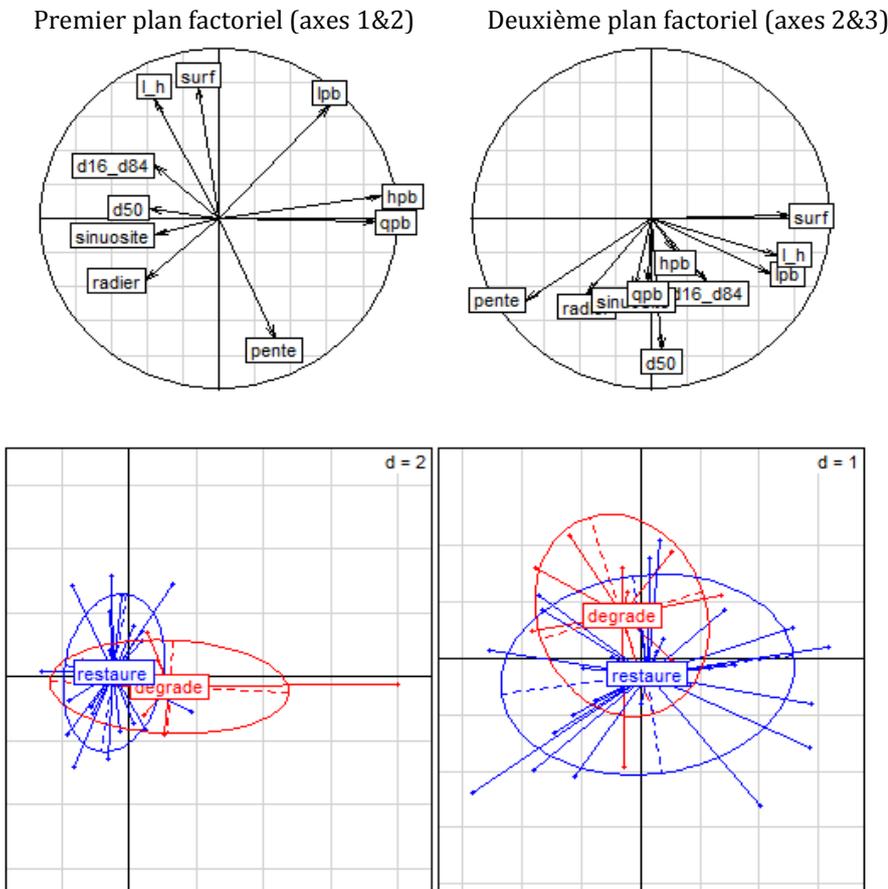


Figure 6 : Réalisation d'une ACP sur deux plans factoriels

Toutefois, les deux groupes sont peu différenciés par l'ensemble des variables analysées. Quelques tendances semblent se dégager. Tout d'abord, sur le premier plan factoriel, les stations restaurées expliquent majoritairement la construction de l'axe 2, avec une D50 plus élevée et une sinuosité plus importante.

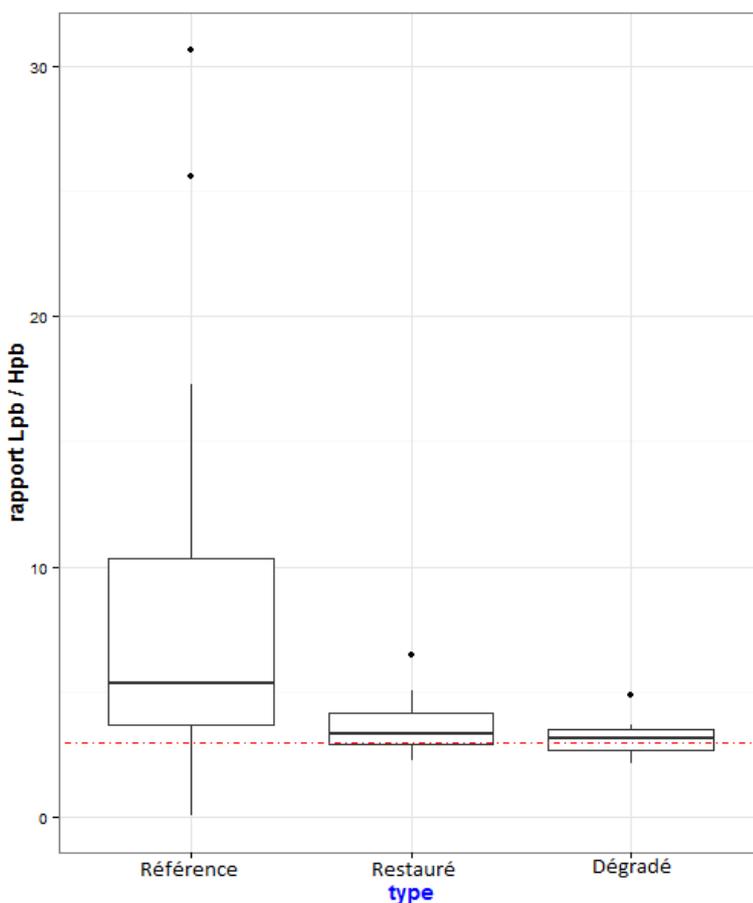
Ensuite la fonction s.class utilisé sous R a permis de représenter les centres de gravité de chaque groupe et le lien entre un échantillon et son groupe d'appartenance.

Il en ressort que les stations dégradées (en rouge) et les stations restaurées (en bleu) sont séparées.

C'est la station du Croiseau qui étire fortement l'axe 1 des cours d'eau dégradés par une forte hauteur de pleins bords et un débit de pleins bords également plus élevés, car ce cours d'eau est fortement altéré.

Une analyse discriminante (Annexe 7), a ensuite permis de visualiser les variables qui différencient le plus les stations restaurées et dégradés. Il en ressort une différence assez conséquente pour les variables physiques avec : Hpb et le rapport Lpb/Hpb. Mais également pour la D50 et le pourcentage de radier qui évoluent différemment entre un site restauré et un site dégradé.

Le rehaussement du fond de cours d'eau



Le rehaussement du fond de cours d'eau a été étudié (Figure 7) en observant le rapport entre la largeur de pleins bords (Lpb) et la hauteur de pleins bords (Hpb) pour les stations de référence, dégradées et restaurées. Une seule valeur moyenne a été retenue pour chaque site. La moyenne est issue des mesures effectuées sur les cinq transects.

Le trait en pointillé rouge représente la valeur 3 du rapport Lpb/Hpb, c'est une valeur empirique représentant un seuil de rupture qui sera détaillé en discussion.

Figure 7 : Étude du rapport Lpb/Hpb pour les sites de Référence, restauré et dégradé.

La valeur de la médiane est de 3 pour les stations dégradées, 3,3 pour les stations restaurées et de 5,3 pour les stations de référence.

La plus grande variabilité est observée pour les stations de référence avec des valeurs oscillant entre (30,62 et 0,09). Elle est moindre pour les sites restaurés (6,51 et 2,43) et plus faible encore pour les stations dégradées (4,9 et 2,16).

Le rapport Lpb/Hpb, a ensuite été étudié en fonction de la surface de bassin versant de chacun des sites (Figure 8). Cette nouvelle interprétation du rapport Lpb/Hpb, confirme les résultats de la figure 5. Les cours d'eau de référence se différencient en ayant un rapport Lpb/Hpb globalement plus important avec de nombreux sites situés entre 5 et 15. De plus, en comparaison avec leur situation avant travaux les sites restaurés présentent une valeur moyenne de ce rapport supérieure de 14%. La restauration augmente logiquement ce ratio en diminuant la profondeur de pleins bords.

La valeur de hauteur de pleins bords prise seule, diminue pour les cours d'eau restaurés en passant d'une moyenne de 0,95 m à 0,72 m après restauration.

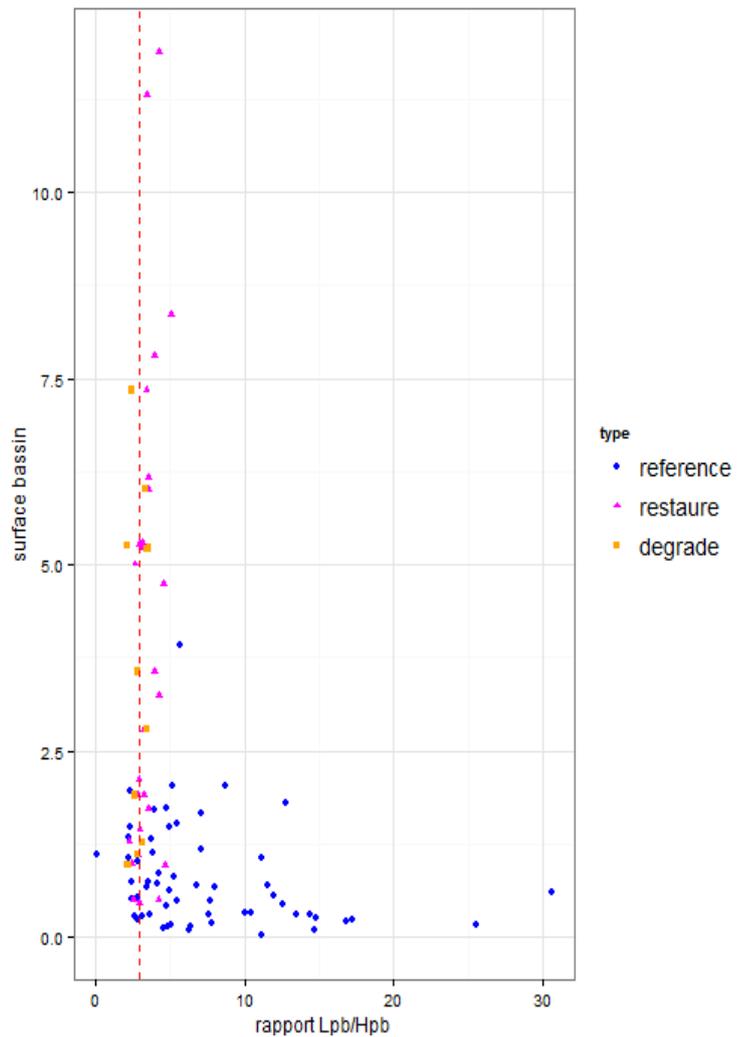


Figure 8 : Surface de BV en fonction du rapport Lpb/Hpb

N.B : Sur les figures 8 et 9, trois sites ont été retirés de l'analyse pour les raisons suivantes : *STAT_014_Le_Pont_ST_pierre* et *STAT_015_Le_scave* pour la non-disponibilité de leur surface de bassin versant respective. Enfin, le choix a été fait de retirer de l'analyse le site de l'Arz (*STAT_019_Arz*), cours d'eau avec une surface de BV de 20 km² jugée trop importante par rapport aux autres sites cela rendrait les graphiques illisibles. Ici, sont donc représentés 27 stations restaurées avec 10 stations « dégradées » et les 58 stations de référence.

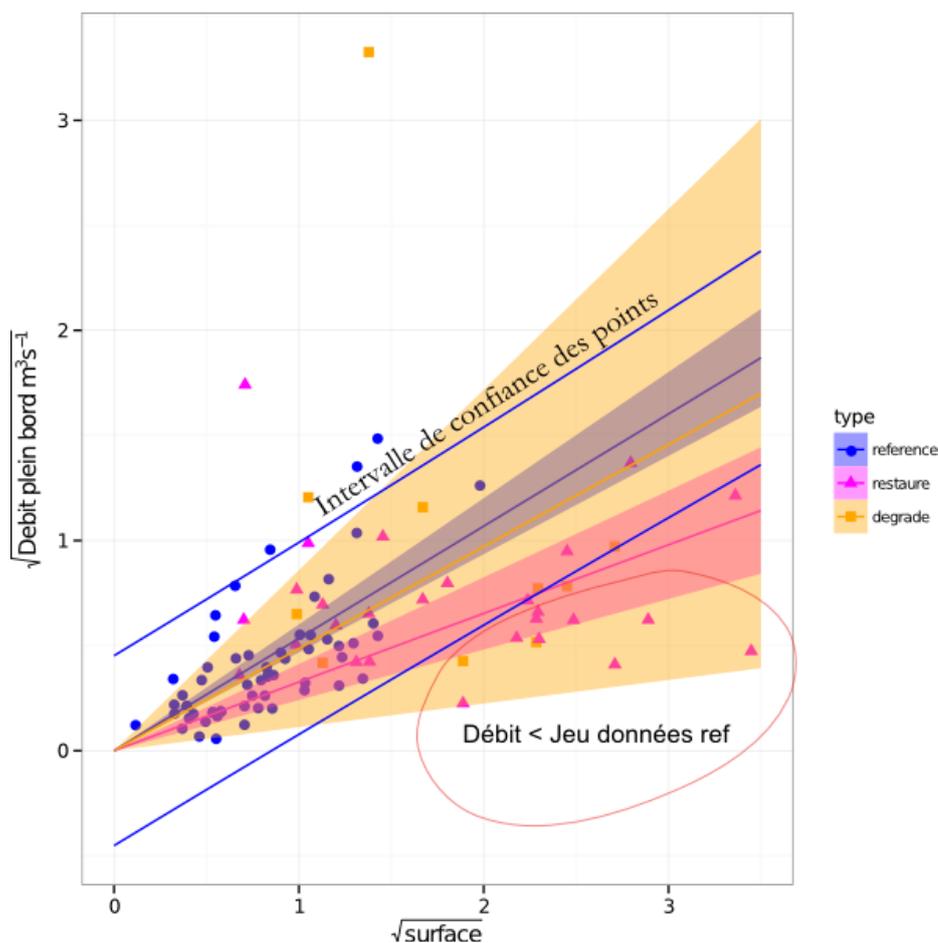


Figure 9 : Évolution du débit de pleins bords en fonction de la surface de bassin versant

Pour les stations du jeu de données, il existe une relation entre la racine des débits de pleins bords et la racine des surfaces de bassins versant. La transformation à la racine carrée des données permet de normaliser les résidus et d'avoir une meilleure lecture et compréhension (Figure9).

Les coloris jaunes, bleus et rouges représentent les intervalles de confiance des trois droites. Le faible nombre de stations dégradées (10 seulement) explique que l'intervalle de confiance de la droite jaune soit très large.

Partant du principe qu'il existe une relation entre le bassin versant et le débit de pleins bords la régression linéaire des trois situations a été forcée à passer par zéro.

L'intervalle de confiance des points du jeu de données de référence est défini par les droites bleues sur le graphique. L'hypothèse de départ veut que les points des sites dégradés se situent en dehors de cet intervalle. Or, au vu de ce graphique il n'existe aucune différence significative, pour les débits de pleins bords entre les sites restaurés et les sites dégradés (les intervalles de confiance ne sont pas séquentes).

Objectif de la diversification

Les stations dégradées sont composées majoritairement par des plats lents (52%) (Figure 10). Les plats courants et les radiers, répartis à parts égales, représentent quant à eux 43% du linéaire.

Sur les stations restaurées, les faciès lotiques (plats courants et radiers), occupent une plus grande part avec 56% du linéaire dont 38% de radiers.

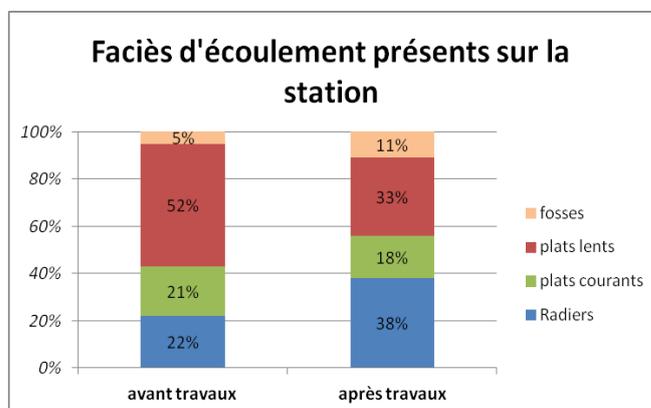


Figure 10 : Étude des différents faciès d'écoulement présents sur les stations étudiées avant et après travaux

La répartition des types de faciès évoluent considérablement entre l'avant et l'après travaux.

La granulométrie présente sur les stations restaurées et dégradées sont analysées en observant les 50 éléments granulométriques prélevés sur chacun des sites (Figure 11). Deux tendances se dégagent, au vu des résultats. D'une part les stations dégradées ont une D50 plus faible que les stations restaurées. La valeur moyenne des éléments granulométriques retrouvés est de 14 mm. Selon l'échelle granulométrique de Wentworth modifiée (Annexe 4), ce sont des graviers grossiers. Après restauration les cours d'eau ont une taille granulométrique qui a été augmentée, avec une moyenne de D50 autour des 29mm, on parle alors de cailloux fins.

A noter également, que le rapport D16/D84 est également plus élevé pour les sites restaurés (0,24) par rapport à la situation avant travaux (0,13).

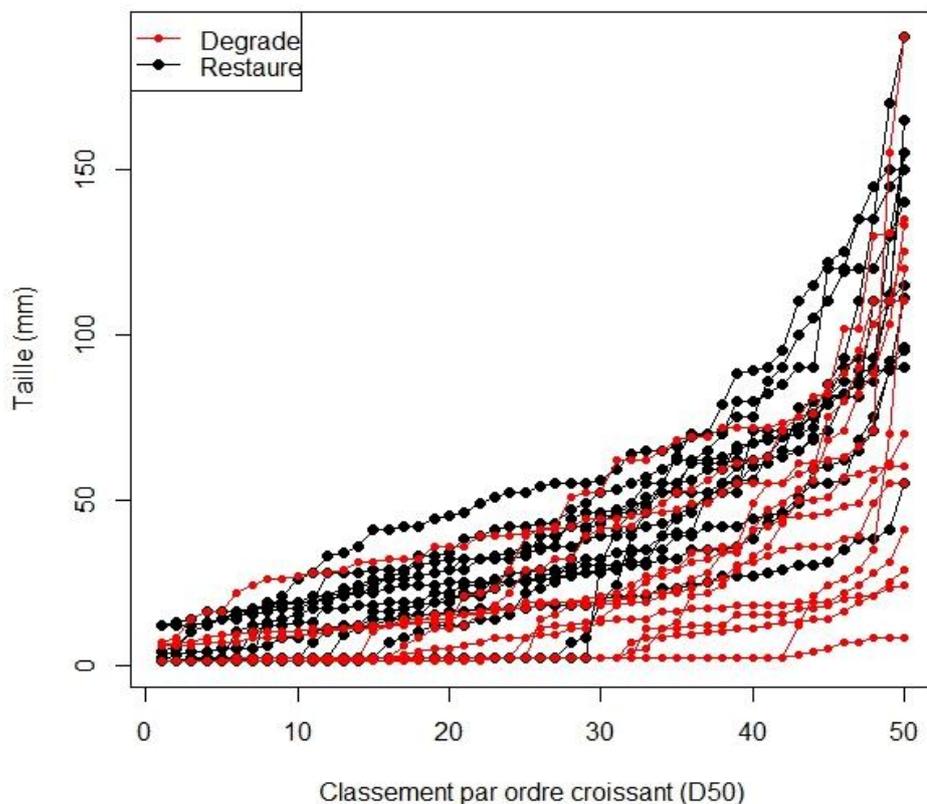


Figure 11 : Répartition par ordre croissant des 50 éléments granulométriques relevés sur chaque station selon la méthode de Wolman (annexe...)

Enfin, sur trois sites restaurés aucun élément granulométrique qualifié de fines n'a été relevé. La somme granulométrique commence respectivement avec des valeurs de 19 mm (STAT_012_La_Championnaie), 17 mm (STAT_017_Quéhugan), et 14 mm (STAT_010_Grâce-Uzel).

A noter également, que sur deux sites (STAT_021_Pont_du_Guesdon et STAT_016_Guy_Renault), des ruptures d'écoulement ont été observée.

A propos du colmatage, les résultats montrent, que la restauration diminue le colmatage avec une valeur moyenne de 3,1 avant travaux et de 2,6 après les travaux.

4.3. Discussion

L'évaluation des travaux de recharge granulométrique montre à travers les différents résultats quelques tendances, mais peu de résultats réellement significatifs. Plusieurs raisons seront évoquées au cours de cette discussion.

L'Analyse en composantes principales (Figure 6), permet d'observer les premières tendances de notre jeu de données et confirme la corrélation entre certaines variables physiques (Hpb et Qpb) des cours d'eau échantillonnés, un résultat relativement attendu. Le deuxième plan factoriel est intéressant, et montre que la D50 est une variable qui discrimine fortement les cours d'eau restaurés des dégradés. Les sites restaurés ont connu une nette augmentation de leur taille granulométrique par rapport aux dégradés. Ce résultat est en adéquation avec la granulométrie qui a été apportée par les maîtres d'ouvrage lors de la restauration.

De plus, l'analyse discriminante (annexe 7), confirme une différence conséquente entre un état restauré ou dégradé pour les variables D50 et pourcentage de radiers sur la station, et dans une moindre mesure pour la hauteur de pleins bords et le rapport largeur de pleins bords sur hauteur de pleins bords. Ce résultat résume bien l'ensemble des variables fortement influencées par la mise en place d'une restauration.

Arrêt de l'incision et rehaussement du fond du lit

Tout d'abord, l'étude du rapport Lpb/Hpb montre que les stations de référence ont un ratio majoritairement plus élevé et que leurs valeurs sont plus dispersées.

Pour les têtes de bassins versant (rang 1et 2), il est souvent observé de façon empirique une rupture autour de la valeur $Lpb/Hpb = 3$.

- Les cours d'eau en équilibre présentent généralement une valeur supérieure ou égale à 3.
- Les cours d'eau incisés présentent généralement une valeur inférieure à 3

L'observation du rapport Lpb/Hpb (Figure 7), confirme que les cours de référence, dits « en équilibre », présentent des rapports assez élevés que l'on ne retrouve pas sur les deux autres types de cours d'eau. Les cours d'eau restaurés et dégradés s'agglomèrent plutôt autour de la valeur 3. De plus, les stations restaurées se différencient des stations dégradées par des valeurs de Hpb moins importantes. Même si la différence n'est pas flagrante, l'incision a été diminuée, ce qui confirme l'une des hypothèses de départ. De plus, la granulométrie est majoritairement représentée par les cailloux grossiers et fins (D50) sur les sites restaurés, et confirme que les granulats déposés n'ont pas quitté le site de recharge. La restauration a permis de recréer une couche d'armure sur l'ensemble des cours d'eau restaurés, essentielle pour la protection de la faune benthique sous-jacente et pour limiter l'incision des cours d'eau. Il faudrait toutefois suivre les stations restaurées pendant plusieurs années pour vérifier que la reconstitution du matelas alluvial a été efficace et que l'incision a été stoppée de manière pérenne. De plus, le rehaussement des cours d'eau semble être insuffisant dans certains cas pour obtenir un débord plus précoce et permettre ainsi au cours d'eau de dissiper son énergie plus rapidement.

Plusieurs études ont montré l'existence d'une relation entre la valeur du débit à plein bord et la taille du bassin versant (Petit & Daxhelet, 1989 ; Malavoi & Bravard, 2010). C'est dans cette idée que le graphique n°9 a été construit. Le jeu de données ne montre toutefois aucune différence significative entre les stations dégradées et les stations restaurées.

Contrairement à nos attentes, les débits de pleins bords des sites de référence sont plus importants que ceux des sites restaurés. Cette différence peut s'expliquer par le fait que de nombreux sites de références se situent dans le massif Armoricaïn où la pluviométrie est plus importante et le chevelu plus dense que sur le bassin de la Vilaine.

Enfin, il faut rester prudent quant aux valeurs de débits de pleins bords. En effet, l'estimation du coefficient de rugosité est très subjective dans sa détermination, représentant un biais important dans le calcul du débit. De ce fait, les valeurs de débit de pleins bords sont à prendre avec précaution dans l'interprétation des résultats.

Diversification des écoulements

Les résultats sur la diversité des faciès confortent l'hypothèse de départ quant à une augmentation de la diversification des écoulements. La recharge granulométrique augmente sensiblement la part de radiers tout en diminuant les zones de plats lents. Ce diagnostic est plutôt intéressant notamment pour ces zones de radiers essentielles pour le développement des espèces rhéophiles (truite, chabot, goujon,...). Cela permet au cours d'eau de retrouver une alternance plus variée de faciès, même si cela reste limité aux linéaires restaurés.

En opposition à l'état avant travaux qui était composé majoritairement par des sables et des graviers fins, la granulométrie sur les stations restaurées est majoritairement représentée par des cailloux grossiers et fins. Cette couche d'armure reformée favorise les échanges avec la zone hyporhéique. Cette zone est essentielle dans les têtes de bassin versant, où les nitrates sont en effet consommés par dénitrification microbienne en présence de matière organique et en absence d'oxygène (Knowles, 1982). De plus, les substrats grossiers associés à ces faciès, perméables et oxygénés, sont les zones les plus productives en invertébrés. En effet, dans leur étude, Merz et Ochikubo Chan (2005), évoquent que la richesse taxonomique augmente sur le gravier apporté dans le cours d'eau progressivement au cours des six premières semaines et que la biomasse, quant à elle, est identique voire supérieure comparativement à des cours d'eau non restaurés.

Trois sites étaient dépourvus de graviers fins (STAT_012_La_Championnaie, STAT_017_Quéhugan et STAT_010_Grâce-Uzel). Pourtant suite à l'analyse des données qualitatives, ils ont bien reçu des fines lors de la recharge. L'absence de fines peut être due à l'échantillonnage ou bien à un départ des sédiments les plus fins en raison de vitesses d'écoulement excessives (Figure 11). En outre, une infiltration de l'écoulement a été observée sur deux sites (STAT_021_Pont_du_Guesdon et STAT_016_Guy_Renault). Cela peut s'expliquer pour l'un des sites par l'absence de fines. Il semble logique de supposer qu'une granulométrie très variée est essentielle pour combler les interstices entre les gros éléments granulométriques et éviter l'infiltration des écoulements sous le matelas alluvial reconstitué. Cette observation est toutefois insuffisante pour conclure sur les raisons de l'infiltration, d'autant que d'autres variables physiques pourraient expliquer cette situation (le débit, la pente, la puissance spécifique).

Également, l'étude du rapport D16/D84, montre l'homogénéité des classes granulométriques présentes. La distribution de la gamme granulométrique est plus étalée pour les cours d'eau dégradés que pour les cours d'eau restaurés. Les cours d'eau restaurés ont un rapport deux fois plus élevés que ceux dégradés. Cela prouve que la restauration conduit à une certaine homogénéisation de la granulométrie.

Le colmatage observé sur les stations restaurées est moindre que sur les stations dégradées, ce qui confirme que la restauration morphologique pourrait avoir une incidence sur le niveau de colmatage du cours d'eau. Il faut cependant rester prudent à l'égard de ce paramètre qui évolue plutôt en fonction des spécificités locales (géologie, pente, occupation des sols, ripisylve). De plus, la méthode d'Archambaud (2005), basée sur une observation visuelle, est subjective et peut induire un biais observateur. Il est donc impossible d'établir une comparaison entre différents sites dès lors que l'opérateur est différent.

La technique de recharge étudiée dans cette étude, semble vraiment favorable pour une augmentation de la diversification des écoulements ce qui favorise la multiplication d'habitats benthiques récepteur d'une faune piscicole et macrobenthique plus variée et plus dense. Enfin, il convient de respecter la géologie du cours d'eau en y apportant uniquement des cailloux provenant de carrière locale.

Limites de l'étude

Une analyse sur 30 sites a été choisie pour effectuer des analyses statistiques. Les 30 stations restaurées ont été trouvées, mais la comparaison avec la situation avant travaux a été effectuée pour seulement 13 sites. La taille de l'échantillon étant restreinte, il convient donc de rester prudent dans l'analyse des résultats. De plus, il existe une certaine variabilité entre les stations restaurées liée aux variantes de la technique de recharge (en tâche, en dôme, en plein) et à la combinaison, pour certains sites, à d'autres techniques (remise dans le talweg, reméandrage).

L'année de réalisation des travaux est importante dans l'interprétation des résultats. En effet, une restauration trop récente ne peut faire l'objet d'une évaluation très pertinente. L'optimum aurait été d'appliquer ce protocole sur des sites dont les travaux datent de deux ans ou plus, puisque les crues dites « morphogènes » ont une probabilité de se produire tous les 2 à 3 ans. Elles sont à l'origine de la construction de la géométrie « moyenne » du cours d'eau et de la régénération des formes fluviales (Leopold *et al.*, 1964). Dans notre cas, seule la moitié des stations restaurées ont une ancienneté suffisante. Ce facteur temps est pourtant primordial pour voir la réaction du cours d'eau et la répartition spatiale des matériaux apportés.

Enfin, les sites de référence sont localisés à l'extérieur du bassin de la Vilaine, ce qui peut induire un biais lors de la comparaison avec les stations dégradées et restaurées.

Perspectives d'évolution possible de cette technique et propositions d'amélioration du suivi

Tout d'abord, les résultats confirment que la technique de recharge granulométrique n'est pas adaptée aux cours d'eau trop incisés. Cela obligerait en effet à apporter une quantité trop importante de matériaux pour retrouver un gabarit de cours d'eau fonctionnel. Au vu des sites étudiés, il peut être préconisé de ne pas dépasser une hauteur de recharge de 50 cm. Au-delà, les effets escomptés semblent peu efficaces et très peu adaptés pour contrer les altérations.

Pour les cours d'eau trop incisés, il pourrait alors être envisagé de coupler la recharge à une autre technique telle que le retalutage de berges. Cela contribuerait à rehausser le fond du lit tout en permettant de retrouver un lit d'étiage et une diversification des écoulements. Pour augmenter une capacité de débordement, il faudrait envisager une action plus ambitieuse, telle que la création d'un nouveau lit.

Pour les sites adaptés à la technique de restauration par recharge, une alternative à la technique pourrait être de mettre en place différentes gammes granulométriques réparties de façon segmentée sur l'ensemble du tronçon restauré. Le cours d'eau avec sa force physique pourrait ainsi mobiliser et répartir les différents diamètres granulométriques en fonction de sa puissance. Le mélange granulométrique se ferait alors plus naturellement. De plus, les chantiers de recharge semblent souvent trop propres. Or, l'abondance de branches et de racines dans les petits cours d'eau amplifie l'effet tampon en freinant les écoulements (Wipfli *et al.*, 2007). Il serait donc intéressant de coupler la recharge à l'apport de bois dans le lit.

En termes de suivi, le protocole élaboré dans le cadre de cette étude pourrait être utilisé pour suivre l'évolution des futurs sites de recharge. Il conviendrait dans ce cas de réaliser un état initial (n-1), un état travaux (n) et de le reproduire ensuite à n+2 ou n+3 (après la première crue morphogène) et n+5, toujours sur la même station pour tenir compte de l'effet temporel. Il pourrait être mené par deux personnes en une heure par site. Ce suivi permettrait de mieux comprendre, analyser et réagir sur les variables qui influencent le plus une recharge granulométrique. Une adaptation de ce protocole pourrait également servir pour les autres techniques de restauration morphologique.

Enfin, il faut signaler que des linéaires importants de recharge en plein ont été réalisés sur le bassin de la rivière de Pénerf. Le bilan de ce programme de restauration, qui se termine cette année, donnera certainement des pistes intéressantes quant à l'utilisation de cette technique.

Conclusion

Le retour d'expériences sur les actions de restauration morphologique a permis de confirmer qu'une réelle dynamique de restauration des cours d'eau est en marche sur le bassin versant de la Vilaine, que ce type d'actions tend à se multiplier, avec un niveau d'ambition important pour certaines d'entre elles. Ce retour d'expériences contribue au partage de connaissances souhaité par la Clé du Sage Vilaine.

L'évaluation des travaux de recharge granulométrique tend à confirmer l'intérêt de cette technique pour stopper et réduire l'incision du lit et diversifier les écoulements. En revanche, elle n'a pas permis de mettre en évidence une réelle amélioration de la capacité de débordement. Pour les futurs projets, il conviendrait de limiter cette technique aux sites qui ne sont pas trop incisés et de la combiner avec d'autres techniques telles que le retalutage de berges et l'apport de bois dans le lit. L'analyse reste toutefois limitée par un nombre restreint de sites échantillonnés, la variabilité dans les conditions de mise en œuvre de la technique entre les différentes stations et le manque de recul pour les travaux les plus récents.

Les actions de restauration morphologiques permettent de recréer des processus et des habitats qui conditionnent la présence et le maintien des communautés aquatiques garantes du bon état écologique. Toutefois, il est difficile de juger du réel gain écologique sans suivi. Le suivi de certaines actions ambitieuses, en collaboration avec des équipes de recherche offrirait des perspectives intéressantes. Cela permettrait de mettre en évidence l'intérêt écologique des actions de restauration et pourrait aider les gestionnaires à ajuster les actions aux caractéristiques typologiques des cours d'eau du bassin. En outre, des suivis simples pourraient être mis en place par les opérateurs de bassin eux-mêmes, en régie, pour démontrer l'intérêt des actions mises en œuvre.

Il semble illusoire d'envisager une restauration efficace, permettant d'atteindre le bon état sans intervenir sur l'emprise foncière, au niveau du cours d'eau (remise dans le talweg, reméandrage) voire sur le bassin versant (drainage, dispositifs anti-érosifs). La multiplication des travaux de restauration ambitieuse de niveau R3 est donc certainement une ligne de conduite à tenir dans les prochaines années malgré les nombreux obstacles qui se présentent face à ce type de restauration.

Enfin, il est encore très difficile pour les gestionnaires de convaincre localement de l'intérêt de ces actions novatrices. La restauration hydromorphologique est aussi une opération économique, sociale, culturelle et politique qui concerne un territoire souvent plus étendu que l'espace des transformations du cours d'eau (Bouni, 2014). Il est donc essentiel de poursuivre ce partage de connaissances en sensibilisant les acteurs locaux et en inscrivant ce type d'opérations dans une vision plus globale de la rivière, de ses usages et de ses fonctionnalités, ce qui revient finalement à redéfinir sa place et son rôle dans le territoire.

Bibliographie

Adam P., Lachat B., Débinais N., 2008. Le génie végétal : un manuel technique au service de l'aménagement et de la restauration des milieux aquatiques, Paris, 290p.

Agence de l'Eau Loire-Bretagne., 2015. Préconisations pour la mise en place de suivis des effets d'actions de restauration écologique en milieux aquatiques, 277p.

Bernhardt E.S. & Palmer M.A., 2011. River restoration: the fuzzy logic of repairing reaches to reverse catchment scale degradation. *Ecol. Appl.* 21, 1926-1931.

Bernhardt E.S., Palmer M.A., Allan J.D., Alexander G., Barnas K., Brooks C. J., Clayton S., Dahm C., Follstad-shah J., Galat D., Gloss S., Goodwin P., Hart D., Hasset B., Jenkinson R., Katz S., Kondolf G.M., Lake P.S., Larve R., Meyer J.L., O'donnell T.K., Pegano L., Powell B., Sudduth E., 2005. Synthesizing U.S. river restoration efforts, *Science*, 308, 636-637.

Bossis M., 2014. Étude de l'hydromorphologie à l'échelle stationnelle des cours d'eau de tête de bassin versant armoricains en situation de référence, Rapport de stage Master 2, ONEMA / Université de Rennes 1, 42p.

Boudot Grimaud T., 2013. Restauration hydromorphologique : les techniques émergentes en Bretagne, Pays de Loire, Rapport de stage de Master 2, ONEMA / Université de Rennes 1, 30 pages.

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. ONEMA. 28 pages.

Boutet Berry L., Bramard M., Gautier J-N., 2009. Restauration hydromorphologique des cours d'eau en zone de plaine ; propositions de suivi sur trois sites : la Clouère (86), le Marolles (37) et la Céphons (36), ONEMA Dir Centre, Agence de l'eau Loire-Bretagne, 41 pages.

Bramard M., Boutet-berry L., Arseno R., Bramard C., Martin M., Bardon E., 2010. La recharge en granulats premiers retours d'expériences sur les travaux menés dans le Centre-Ouest de la France sur des petits cours d'eau, Support pédagogique stage « restauration petits cours d'eau de plaine », Version ONEMA Dir-Orléans-Poitiers MB-15-05-2010, 57 pages.

Dassonville C., 2010. Valorisation des fonctions écologiques liées à l'amélioration morphologique des cours d'eau, CEMAGREF et AgroParisTech, 32 p.

Elosegi A., Diez J., Mutz M., 2010. Effects of hydromorphological integrity on biodiversity and functioning of river ecosystem. *Hydrobiologia.* 657,199-215.

Feld C.K., Birk S., Bradley D.C., Hering D., Kail J., Marzin A., Melcher A., Nemitz D., Pedersen M.L., Pletterbauer F., Pont D., Verdenschot P.F.M., Friberg, N., 2011. From natural to degraded rivers and back again : a test of restoration ecology theory and practice. In: Woodward, G. (Ed.), *Advances in Ecological Research.* Elsevier, London, UK, 119-209.

Jan A., 2013. Etude du fonctionnement hydromorphologique de référence des cours d'eau en tête de bassin versant sur le Massif Armoricaïn, Rapport de stage de Master 2, ONEMA / Université de Rennes 1, 40p.

Knowles R., 1982. Denitrification. *Microbiological Review*, 46, 70p.

Lane E.W., 1955. The Importance of Fluvial Morphology in Hydraulic Engineering, American Society of Civil Engineering, Proceedings, 17 p.

Le Bihan M., 2013. Formation sur la restauration des cours d'eau en tête de bassin versant, Volet « Travaux hydrauliques », Session 1 et 2, ONEMA.

Leopold L.B., Wolman G.M., Miller J.P., 1964. Fluvial Processes in Geomorphology. *W.H. Freeman and Company*, San Francisco. 522 p.

Malavoi J.-R., 2006. Retour d'expériences d'opérations de restauration de cours d'eau et de leurs annexes menées sur le bassin RMC. Agence de l'eau Rhône-Méditerranée et Corse, Document n°05.079-ETU-101, 129 p.

Malavoi J.R. & Adam P., 2007. Les interventions humaines et leurs impacts hydromorphologiques sur les cours d'eau. *Ingénieries*, n° 50, 35-48.

Malavoi J.-R., Adam P., Debiais N., 2007. Manuel de restauration hydromorphologique des cours d'eau. Agence de l'eau Eau Seine Normandie, 64 p.

Malavoi J.R. & Bravard J.P., 2010. Eléments d'hydromorphologie fluviale, ONEMA, 224 p.

Malavoi J.-R., Garnier C., Landon N., Recking A., Baran P., 2011. Eléments de connaissance pour la gestion du transport solide en rivière. ONEMA, Vincennes,

Malavoi J.R. & Souchon Y., 2002. Description standardisée des principaux faciès d'écoulement observables en rivière : Clé de détermination qualitative et mesures physiques. *Bulletin Français de la Pêche et de la Pisciculture*. 365-366. Pages 357-372.

Navratil O., 2005. Débit de pleins bords et géométrie hydraulique : une description synthétique de la morphologie des cours d'eau pour relier le bassin versant et les habitats aquatiques. Cemagref Lyon. Institut National Polytechnique de Grenoble. 308 pages.

ONEMA, 2010. Recueil d'expériences sur l'hydromorphologie, ONEMA, 364 p.

Petit F. & Daxhelet C., 1989. Détermination du débit à pleins bords et de sa récurrence dans différentes rivières de Moyenne et de Haute Belgique. *Bull. Soc. Geog. Liège*. **25**, 69-84.

Palmer & Geist., 2013. Ecological indicators for stream restoration success, *Ecological Indicators*, 30, 106-118.

Petit F., Hallot E., Houbrechts G., Mols J., 2005. Evaluation des puissances spécifiques de rivières de moyenne et de haute Belgique. *Bulletin de la société géographique de Liège*. **46**, 37-50.

Pierron F., 2005. La restauration physique des cours d'eau dans le Nord-Est de la France. CSP, 18 p.

Sarriquet P.E., Bordenave P., Marmonier P., 2007. Effects of bottom sediment restoration on interstitial habitat characteristics and benthic macroinvertebrate assemblages in a headwater stream, *River research and applications*, 23, 815-828.

Schumm S.A., 1971. Fluvial geomorphology ; the historical perspective. In Shen H.W. (éd), *River Mechanics*, Fort Collins, CO, Water Resources Publ.

Schumm S.A., 1977. *The fluvial system*, Water Resources Publications, New-York, 338 p.

Souchon Y., Andriamahefa H., Breil P., Albert M.B., Capra H., Lamouroux N., 2002. Towards new tools for running waters management: coupling between physical and biological researches. *Nature Sciences Societes*, 10(1): 26-41.

Strahler A.N., 1957. Quantitative Analysis of Watershed geomorphology. *Transactions of the American Geophysical Union*. 38, 913-920.

TASSARD A., 2011. Évaluation préliminaire de travaux d'amélioration morphologique de petits cours d'eau (Centre, Poitou-Charentes, Pays de la Loire), Rapport de Master II, ONEMA / Université Blaise Pascal, 65 pages.

Vannote R.R., Minshall G.W., Cummins K.W., Sedell J.R., Cushing C.E., 1980. The river continuum concept. *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 37: 130-137.

Merz J & Ochikubo chan L-K., 2005. Effects of gravel augmentation on macroinvertebrate, assemblages in a regulated california river, *River Res. Applic*, 21: 61-74.

Wasson J.G., Malavoi J.R., Maridet L., Souchon Y., Paulin L., 1998. Impacts écologiques de la chenalisation des rivières, Cemagref éditions, Ministère de l'Environnement, 168 p.

Wipfli M.S., Richardson J.S., Naiman R.J. 2007. Ecological linkages between headwaters and downstream ecosystems: transport of organic matter, invertebrates, and wood down headwater channels. *Journal of the American Water Resources Association (JAWRA)*, 43 : 72-85.

Wohl E., Angermeier P.L, Bledsoe B, Kondolf G.M, MacDonnell, Merritt D.M, Palmer M.A, Poff NL., D. Tarboton D., 2005. *River restoration*, Water Resources Research, 41,

Wolman M. G, 1954. "A Method of Sampling Coarse River-Bed Material." *Transactions, American Geophysical Union*. 35 (6), 951-956.

Webographie :

www.eau-adour-garonne.fr

<http://hydrobio-dce.irstea.fr/cours-deau/hydrromorphologie/> consulté le 20 Juillet 2015

Annexe

Annexe 1 : Extrait du PAGD

Disposition 45 - Réaliser et suivre des actions expérimentales de restauration de la morphologie

Des actions expérimentales de restauration de la morphologie sont menées afin de mettre en évidence leur intérêt fonctionnel et permettre aux gestionnaires d'ajuster les actions aux caractéristiques typologiques des cours d'eau du bassin de la Vilaine.

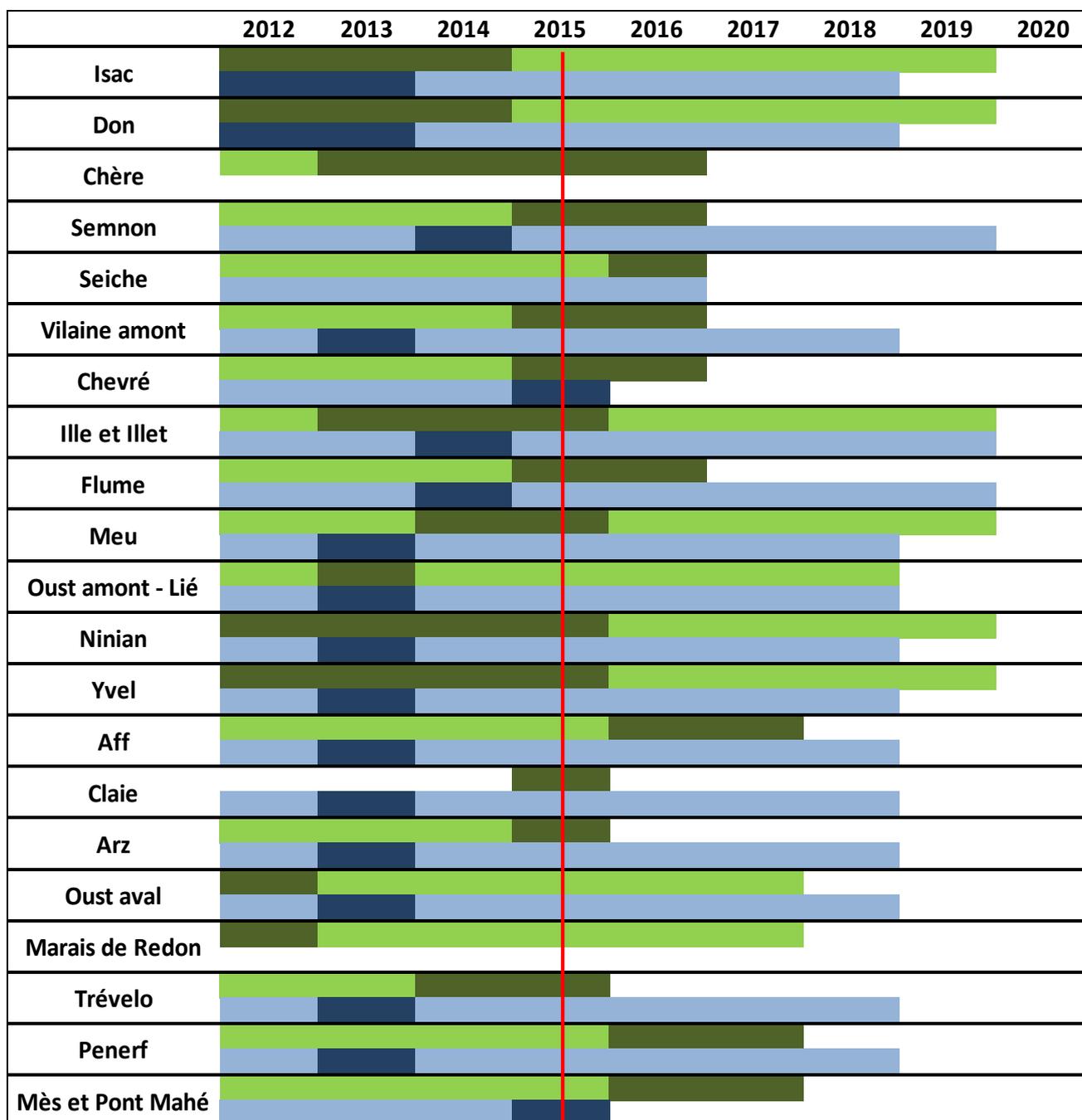
La synthèse de ces expérimentations permet de : fournir une synthèse des connaissances sur l'efficacité des opérations de restauration hydromorphologique ;déterminer quels sont les paramètres (hydromorphologiques, substrat, tenue des berges, ripisylve ...) influant sur l'efficacité d'une opération de restauration ; définir et cartographier les typologies présentes sur le bassin de la Vilaine, si possible en relation avec les facteurs identifiés ci-avant ;réaliser un suivi de détail sur une à plusieurs opérations à priori adaptée(s) à chacune des typologies rencontrées ;examiner les coûts ;mettre en place un suivi avant et après travaux suffisamment précis pour conclure sur l'efficacité des différentes techniques sur chaque typologie étudiée ; calculer, pour chacune des opérations réalisées le seuil d'efficacité technique, c'est-à-dire, le niveau minimal de travaux en deçà duquel l'opération n'a pas d'effet notable sur la qualité morphologique et écologique ; analyser les impacts sur les usages.

L'EPTB lance cette étude dans les deux ans suivant la publication du SAGE. Les expérimentations sont menées en concertation avec les opérateurs de bassins concernés qui choisissent ou non de l'intégrer à leur programme d'actions.

L'EPTB réunit et anime un comité de pilotage, composé des opérateurs de bassin concernés, des structures animatrices de réseaux de techniciens de rivières, des services de police de l'eau, des FDAAPPMA et de l'Agence de l'eau.

A l'issue de ce travail, l'ensemble des résultats est présenté à la CLE, puis mis à la disposition des opérateurs de bassins.

Annexe 2 : Etat d'avancement des différents contrats de restauration



Programmes milieux aquatiques
Contrats territoriaux

Etude
Evaluation

Actions
Actions

Annexe 3 : Détail des actions de restauration identifiées

Nom de l'action	Sous-bassin	Nom du cours d'eau	Localisation du site (commune)	Maître d'ouvrage	Intérêt et objectifs de la restauration	Description technique	Année de réalisation	Prestataire	Matériaux utilisés (Quantité)	Etat avant travaux : longueur, profondeur, profils, rang de Stralher	Etat après travaux : (largeur, profondeur, profil)	Linéaire restauré (mètre linéaire)	Coût total/linéaire (ml)
Diversification des écoulements	Semnon	Maigé	Pancé	Syndicat Intercommunal du Bassin du Semnon	Principaux objectifs : - Diversifier les écoulements par la création de banquettes - Décolmater le substrat - Diversifier les vitesses d'écoulement - Augmenter la teneur en oxygène dissous et limiter le réchauffement de l'eau - Recréer un lit mineur d'étiage fonctionnel, permettant un meilleur fonctionnement du cours d'eau sur des débits d'étiage, favorisant les échanges donc une meilleure autoépuration.	Actions mises en place : - Pose de blocs en enrochement (nature identique à la roche mère : schiste) = création de banquettes minérales	2013	Entreprise PROVERT	Blocs (100/300 mm) associés à un mélange de pierres rondes ou équivalent (ex : refus de criblage), gravillons ronds et petits blocs (0-150 mm)			400 ml	4 820 € HT Soit 1 205 € / 100 ml
Diversification des écoulements	Marais de Redon	Enfer	Guémené Penfao	Communauté de communes du Pays de Redon	Objectifs : - Redynamiser les écoulements - Oxygéner le cours d'eau	Aménagements réalisés : Banquettes minérales, mini-seuils ouverts, blocs épars	2014	CHARIER TP	Matériaux issus de gravières : - Blocs de 200-400 (épiss, seuils ouverts et blocs épars)	Hauteur : 80 cm à 1m Largeur : 1m à 2m		1 610 ml	10 972 € HT Soit 681 € / 100 ml
Diversification des écoulements	Marais de Redon	Moulin neuf	La Chapelle-de-Brain, Renac, Langon	Communauté de communes du Pays de Redon	Principaux objectifs : - Oxygéner le cours d'eau - Diversifier les écoulements - Décolmater les substrats	Aménagements réalisés : épis, mini-seuils ouverts, blocs épars	2014	CHARIER TP	Matériaux issus de gravières : - Blocs de 400-800 (épiss, seuils ouverts et blocs épars)			2 300 ml	16 989 € HT Soit 738 € / 100 ml
Diversification des écoulements	Vilaine Amont	Vilaine	La Roche-Blossac (Vitré)	Syndicat Mixte du Bassin Versant de la Vilaine Amont	Cours d'eau sans aucune dynamique, écoulements uniformes (plat lent) Objectifs principaux : - Diversifier les vitesses d'écoulement - Décolmater le substrat - Augmenter la teneur en oxygène dissous et limiter le réchauffement de l'eau - Reconstituer un profil en travers moins large, favorisant la diversification des écoulements qui diversifie naturellement le substrat - Recréer des atterrissements devant les épis - Créer des sous-berges en redirigeant les écoulements	Technique employée pour dynamiser les écoulements : - Pose d'épis, mini-seuils en étranglement, blocs épars - Les épis sont orientés vers l'amont afin d'avoir une efficacité optimale - Importance de l'étanchéité des épis pour créer des atterrissements en amont	2011	Entreprise DERVENN	30 T de matériaux Blocs 400-600 mm			650 ml	5000€ pour 100ml
Diversification des écoulements	Seiche (Tellé)	Ruisseau de la Blanchetais (médiain)	Orgères	Syndicat Intercommunal du Bassin Versant de la Seiche	Cours d'eau sans aucune dynamique Écoulements uniformes (plat lent) Objectifs principaux : - Apporter une meilleure diversité d'écoulement - Favoriser le décolmatage du substrat en resserrant la section d'écoulement du lit mineur - Favoriser une plus grande biodiversité	Création de risbermes en granulats en respectant une laternance gauche/droite	2012	Dervenn	100 T Brut d'abatage soit 25 T / 100 ml			400 ml	4 400 € HT Soit 1 100 € / 100 ml
Diversification des écoulements	bassin versant de l'AF	Aff cours principal 68 km (Commentaire général sur les restaurations pratiquées sur l'Aff)	Guer/combles sac/quelneuc /Sixt sur Aff/Bruc sur Aff/La chapelle Gaceline/Carentoir/Loutehel	Syndicat Mixte du Grand Bassin de l'Oust	Principaux objectifs : - Oxygéner le cours d'eau - Diversifier les écoulements - Resserrer la section d'écoulement - Décolmater les substrats / resserrer le lit mineur/création d'habitat	- Création d'épis rocheux au moins jusqu'à la moitié du cours d'eau - création de risbermes minérales et végétales - mise en place de blocs épars - rechargement de radier	2011 à 2015	OCRE/REBICHON/NICOLLEAU	Génie végétal : - pieux de châtaignier/saule branchage Blocs de différents diamètres : - blocs de schiste de 500-800 mm - blocs de schiste de 300-400 mm - blocage 0-250 mm	Largeur : plus de 20 m par endroit Hauteur : 1,5m à 2m par endroit Rang de stralher 3 e 4		13 Km	300 000€ TTC/23€ du ml
Diversification des écoulements	Meu	Garun	Brohinière	Syndicat Intercommunal du Bassin Versant du Meu	Objectifs principaux : - Diversifier les vitesses d'écoulement - Augmenter la teneur en oxygène dissous et limiter le réchauffement de l'eau - Reconstituer un profil en travers moins large, favorisant la diversification des écoulements qui diversifie naturellement le substrat. - Recréer des atterrissements devant les épis - Créer des sous-berges en redirigeant les écoulements	Mise en place d'épis grâce à l'apport de blocs			Blocs : diamètre de 30 à 60 cm				
Diversification des écoulements	Meu	Comper	Hou-dit le Vau Roulet à Saint Gonlay	Syndicat Intercommunal du Bassin Versant du Meu	Objectifs principaux : - Diversifier les vitesses d'écoulement - Augmenter la teneur en oxygène dissous et limiter le réchauffement de l'eau - Reconstituer un profil en travers moins large, favorisant la diversification des écoulements qui diversifie naturellement le substrat. - Recréer des atterrissements devant les épis - Créer des sous-berges en redirigeant les écoulements grâce aux épis	Mise en place d'épis grâce à l'apport de blocs			Blocs : diamètre de 30 à 60 cm				
Diversification des écoulements	Oust Amont et Lié	Harmoye	Le bas Kermaux	SyMEOL	Absence totale d'habitats avec des écoulements monospécifiques : une lame d'eau de quelques centimètres de haut sur une largeur trop importante. Principaux objectifs : - diversifier les habitats - favoriser le décolmatage	Diversifier ces écoulements par la mise en place de seuils,risbermes et déflecteurs.	2010	Entreprise OCRE				2500 ml	15 410 € HT Soit 616 € / 100 ml
Diversification des écoulements	Ille et Illet	Ille	Chevaigné	Syndicat Mixte du Bassin Versant de l'Ille et de l'Illet	Cours d'eau sans aucune dynamique, écoulements uniformes (plat lent) Objectifs principaux : - diversifier les vitesses d'écoulement - Augmenter la teneur en oxygène dissous et limiter le réchauffement de l'eau - Reconstituer un profil en travers moins large, favorisant la diversification des écoulements qui diversifie naturellement le substrat.	Technique employée pour dynamiser les écoulements : - Pose d'épis, mini-seuils en étranglement, blocs épars - Les épis sont orientés vers l'amont afin d'avoir une efficacité optimale - Importance de l'étanchéité des épis pour créer des atterrissements en amont	2012		104 T de blocs (400-600mm) Soit 23 T pour 100 ml	Largeur : 8-10 m	Largeur : 8-10 m	450 ml	15 050 € TTC Soit 3 344 € / 100 ml
Diversification des écoulements	Vilaine Amont	Ruisseau du Rabeau	Crapa bourg (Balazé)	Syndicat Mixte du Bassin Versant de la Vilaine Amont	Cours d'eau sans aucune dynamique, écoulements uniformes (plat lent) Objectifs principaux : - Diversifier les vitesses d'écoulement - Décolmater le substrat - Augmenter la teneur en oxygène dissous et limiter le réchauffement de l'eau - Reconstituer un profil en travers moins large, favorisant la diversification des écoulements qui diversifie naturellement le substrat.	Mise en place de : - risbermes et épis, mini-seuils. La largeur du lit mineur à l'étiage est réduit de près de 70%	2015	Entreprise PROVERT	Diamètre 0/150 mm			300 ml	5510€ soit 1830€ pour 100ml
Diversification des écoulements	Don	Cône	Autocross (Saint Vincent des Landes)	Syndicat Mixte du Bassin Versant du Don	Lit élargi, lame d'eau stagnante à l'étiage Objectifs principaux : - resserrer le lit d'étiage - Diversifier les écoulements	- Retalutage des berges - Rechargement du cours d'eau	2015	Entreprise BRUNEAU (exploitant carrière et travaux publics)	338 Tonnes Diamètre: 0-1000 mm	Longueur : 200 ml Berges hautes : 1 à 1,20 m Profil se rapprochant du fossé de remembrement Hauteur d'eau : 0,10 à 0,80 m Rang de Stralher : 2 Largeur : 5 à 7 m	Berges reprofilées avec formation de risbermes, 0,10 à 0,80 m Formation d'un lit d'étiage de 0,30 à 0,80 m	200 ml	5528 € HT soit 2764 € HT / 100 ml
Diversification des écoulements + recharge	Semnon	Roches	Chelun	Syndicat Intercommunal du Bassin du Semnon	Principaux objectifs : - diversifier les écoulements par la création de banquettes - décolmater le substrat - diversifier les vitesses d'écoulement - Augmenter la teneur en oxygène dissous et limiter le réchauffement de l'eau - recréer un lit mineur d'étiage fonctionnel, permettant un meilleur fonctionnement du cours d'eau sur des débits d'étiage, favorisant les échanges donc une meilleure autoépuration. - Recréer des radiers pour augmenter les capacités d'autoépuration du cours d'eau ainsi que de l'habitat	Actions mises en place : - Pose de blocs en enrochement (nature identique à la roche mère : schiste) = banquettes ou atterrissements - Recharge minérale dans le lit mineur = rehaussement du lit mineur	2013	Entreprise PROVERT	Blocs : 130T de 300-600 mm, soit 12,5 T pour 100 ml) Apport minéral : 80T de mélange de pierres rondes ou équivalent (ex : refus de criblage), gravillons ronds et petits blocs (Diamètre des matériaux : 10-130 mm ; 5,25 T pour 66 ml, soit 8T pour 100ml)			950 ml	7 100 € HT Soit 747 € / 100 ml

Recharge en tâche	CAP Atlantique	Signalais	St Molf (en aval de l'étang Cardinal)	CAP Atlantique	Cours d'eau trop large, incisé et très colmaté berges de 1.5 à 2m de hauteur, complètement surdimensionnées L'objectif prioritaire est de recréer de la diversification en rechargeant les radiers et en créant des banquettes afin de resserrer les écoulements notamment en période d'étiage. Objectifs principaux : - Décolmater le substrat - Diversifier les écoulements	Création de banquettes minérales afin de resserrer les écoulements du cours d'eau Recharge de certains radiers existants	2014		173T de pierres (100/150) + 99T de graviers (4/10 et 20/60) pour un total d'environ 272T Soit 18T pour 100ml	Largeur : 1,5-2 m Les berges restent abruties sur la partie amont de la restauration	1 497 ml	25 332 € HT Soit 1 692 € / 100 ml	
Recharge en tâche	Marais de Redon	Moulin Neuf	La Chapelle-de-Brain, Renac, Langon	Communauté de communes du Pays de Redon	Principaux objectifs : - Restaurer la connexion avec les annexes hydrauliques - Rehausser la ligne d'eau - Favoriser le décolmatage	Rehaussement de 30 à 40 cm : - Dans un premier temps, un léger retalutage du haut de berge (sur 1 m de large le long des berges et 50 à 70 cm de profondeur). - Le produit du retalutage est mis au fond du cours d'eau puis recouvert d'un substrat composé de blocs (80%) pour former le fond du cours d'eau et d'un mélange de graviers/cailloux (20%) pour former la partie superficielle du lit mineur.	2014	CHARIER TP	Matériaux issus de gravières : - 20% de bloc (200-400), placés à des endroits stratégiques de manière à stabiliser le lit et éviter l'érosion. - 60% de blocs (50-200) qui forment le gros du rehaussement. - 20% de gravillon (0-40)	420 ml	6 004 € HT Soit 1 429 € / 100 ml		
Recharge en tâche	Marais de Redon	Long Gué	Avessac	Communauté de communes du Pays de Redon	Principaux objectifs : - Oxygéner cours d'eau - Diversifier les écoulements - Décolmater le substrat - Permettre une sortie du lit plus rapide en période de crue.	Rehaussement uniquement de chaque radiers déjà existant de 30 à 40 cm	2014	CHARIER TP	Matériaux issus de gravières • 20% de bloc de 20 cm à 40 cm pour stabiliser le lit et éviter l'érosion des autres blocs. • 60% de bloc compris entre 20 cm à 5 cm de diamètre pour former le gros du rehaussement. • 20 % de gravillon de diamètre 0,5-4cm déposés en surface	750 ml	12 283 € HT Soit 1 637 € / 100 ml		
Rechargement de peignes à sédiments	Arz	Arz	???	Syndicat Mixte du Grand Bassin de l'Oust	Objectifs principaux - Stopper l'élargissement du lit - Favoriser le rechargement naturel des berges avec les sédiments charriés par le cours d'eau - Réduire les surfaces colonisables par la jussie en favorisant la création d'un chenal avec un écoulement plus rapide et de berges sur lesquelles la ripisylve pourra s'installer dans le temps. - Favoriser l'ombrage d'une partie de ces berges	- Fascinage réalisé avec des branches de saules de préférence (diamètre 1 à 5 cm), issues soit de l'entretien des berges, soit acheminées et fournies par l'entreprise. - Ancrage des tiges de saules (diamètre 10 cm à 15 cm) dans les berges (90°) pour avoir une reprise rapide et ainsi pouvoir donner un ombrage sur les peignes. - Ancrage de ces tiges suffisamment profond pour supporter les crues hivernales de l'Arz. - Ligature des peignes avec une corde polypropylène 4 brins (résistance 1 tonne) assez dense pour subir les crues de l'Arz. Corde retirée 1 ou 2 ans après, en fonction du développement de la végétation arborescente.	???	???	???	???	???		
Remise du cours d'eau dans son talweg	Trévele	Bouloterie	Championnaie	Syndicat Mixte du Bassin Versant du Trévele	Cours d'eau déplacé en bordure de parcelle. Principaux objectifs : - Remettre le cours d'eau dans son talweg initial - Recréer une section d'écoulement adaptée au débit de plein bord - Reconnecter le cours d'eau avec les zones humides associées	Les différentes étapes : Lecture paysage + carte napoléonienne (pour retrouver l'ancien tracé) Ensuite, création d'une armature de fond par apport de nouveaux matériaux et finition fond du lit avec les matériaux de l'ancien lit, Remblaiement de l'ancien lit, remplacement d'un ouvrage	juil-05	Bégouin TP	Volume nouveau matériaux : 200 m3 de matériaux (bloc et tir miné) diamètre 0-150 Volume remblai de l'ancien lit : 1450m3 de remblai (100 remorques avec tracteur) 4 buses de diamètre 1000	Hauteur maximale : 3,5 m (à l'origine, la hauteur devait être de 0,5m)	600 ml	23 000 € HT (sur deux ans), soit environ 3833 € / 100 ml	
Remise du cours d'eau dans son talweg	Trévele	Pesle	Kerhervio	Syndicat Mixte du Bassin Versant du Trévele	Cours d'eau déplacé en bordure de parcelle Principaux objectifs : - Remettre le cours d'eau dans son talweg initial - Recréer une section d'écoulement adaptée au débit de plein bord - Reconnecter le cours d'eau avec les zones humides associées - Diversifier les faciès d'écoulement et les habitats aquatiques (tracé sinueux plus proche de celui d'origine avec un espace de mobilité important et un substrat grossier).	- Technique de remise dans le talweg (Relevé topographique + lecture paysage) - Recharge (radier tous les 7 à 8 mètres) La totalité de la granulométrie provient de l'ancien lit : prélèvement de ce substrat et sous-poudrage sur les nouveaux radiers. Utilisation du débardage à cheval car zone trop humide.	2011 (Une semaine de débardage et 2,3 jours de pelle mécanique)	Entreprise OCRE Débardage : Laurent Legalle	Substrat de l'ancien lit avec ajout de quelques gros blocs (600mm) tiré miné dans 2nd partie	Peu de pente	environ 2m de largeur (alternance mouille/radiers: Parfait)	400 ml	2 680 € HT / 100 ml
Remise du cours d'eau dans son talweg	Oust Amont et Lié	Fromenét	St Gilles du Mené (Guillette)	SYMEOL	Cours d'eau déplacé en bordure de parcelle. Objectifs principaux: - Remettre le cours d'eau dans son talweg initial - Retrouver une section d'écoulement adaptée au débit de plein bord - connecter le cours d'eau avec les zones humides associées - Diversifier les faciès d'écoulement et les habitats aquatiques (tracé sinueux plus proche de celui d'origine avec un espace de mobilité important et un substrat grossier). - Permettre le passage piscicole en aval immédiat du nouveau cours d'eau.	Recréer un tracé adapté et un gabarit bien dimensionné. Le nouveau tracé sinueux passe au milieu de la parcelle humide, dans le talweg	2013	Entreprise ARVEN	Apport de granulats de l'ancien lit perché Apport de 35 m3 de 40/80 mm et de 100/200 mm		75 ml		
Remise du cours d'eau dans son talweg	Arz	Croiseau	Plaudren	Syndicat Mixte du Grand Bassin de l'Oust	Le projet concerne 2 tronçons : - tronçon amont : cours d'eau perché, hors talweg - tronçon aval : cours d'eau busé, hors talweg Le projet a consisté à remettre le cours d'eau dans son talweg (avec un débusage préalable pour la partie aval) et à le faire reméandrer. NB : 2 plans d'eau en dérivation sont situés en amont des tronçons restaurés NB 2 : route entre les 2 tronçons restaurés Objectifs principaux : - Restaurer la pente et le profil en long du cours d'eau - Lutter contre les assés du cours d'eau dus à sa situation perchée grâce à sa reconnection avec la nappe d'accompagnement - Diversifier les profils en travers, les écoulements et les habitats du lit mineur (profondeurs, vitesses, substrats)	La chronologie dans la réalisation des travaux : - Terrassement du nouveau lit - Talutage des berges - Reconnexion des trop-pleins d'étangs sur le nouveau tracé - Rechargement granulométrique - Pose de la buse et de la demi-arche - Mise en place d'une ripisylve - Pose de clôtures	2014		250 T de granulats sur 0,40 m d'épaisseur 55 T de blocs pour la stabilisation des ouvrages de franchissement et la connection avec l'ancien lit		450 ml	42 000 € Soit 9 333 € / 100 ml	
Remise du cours d'eau dans son talweg+reméandrage	Seiche (Télié)	Ruisseau de la Blanchetais (amont)	Le Noyer (Orgères)	Syndicat Intercommunal du Bassin Versant de la Seiche	Tracé rectiligne, section d'écoulement sur-élargie par rapport au gabarit de plein bord Projet de remise dans le talweg et reméandrage Objectifs principaux : - Améliorer la dynamique fluviale (section d'écoulement adaptée au débit de plein bord) - Reconnecter le cours d'eau avec les zones humides associées (Amélioration du fonctionnement de la zone humide d'accompagnement et du soutien d'étiage) - Diversifier les faciès d'écoulement, les habitats aquatiques et les berges - Améliorer la qualité de l'eau (restitution de la capacité d'autoépuration du cours d'eau, effet filtre de la zone humide et des plantations par rapport aux cultures proches) - Déconnection du drainage agricole avec le ruisseau (exutoire prolongé vers un fossé et des mares)	1- Creusement de trois mares d'environ 200 m ² chacune d'une profondeur < 0,8 mètre connectée aux fossés agricoles 2- Création d'un fossé agricole perpendiculaire à la parcelle pour l'évacuation des eaux du drain agricole vers les mares 3- Restauration du lit mineur par travaux de déplacement et de reméandrage avec une recharge granulométrique homogène sur 20cm 4- Travaux de retalutage et de recharge granulométrique sur la partie amont du ruisseau (rattrapage de la pente) 5- Plantations d'une ripisylve	2014	HLB Environnement	Recharge granulométrique du nouveau lit avec le substrat de l'ancien lit Ajout de granulats de carrière 20T : -1/3 (6-16 mm) -1/3 (16-31mm) -1/3 (40-80mm)	Forme trapézoïdale -largeur entre 1 et 1,5 m -profondeur d'environ 1,5 m -section d'écoulement disproportionnée par rapport au gabarit de plein bord	largeur : 0,40 m hauteur des berges : 0,35 m	320 ml	16 320 € HT Soit 5 100 € / 100 ml
Restauration d'une annexe hydraulique	Ille et Illet	Ille (canalisée)	Betton St Grégoire (bras de la Charbonnière)	Syndicat Mixte du Bassin Versant de l'Ille et de l'Illet	Il s'agit d'une annexe hydraulique de l'Ille canalisée. L'annexe n'était connectée au canal que par un point en aval, elle était très envasée et la fermeture du milieu se trouvait très avancée. Principaux objectifs : - Améliorer le fonctionnement hydraulique de l'annexe	- Réouverture du milieu - Reprofilage des berges en pente douce - Mise en place d'un pont-cadre (point d'entrée)	mai 2011 et mars 2012					26 400 €	
Retalutage de berges+recharge	Semnon	Maigé		Syndicat Intercommunal du Bassin du Semnon	Principaux objectifs : - Resserrer les écoulements du cours d'eau et diversifier les vitesses d'écoulement - Recréer une diversité d'habitats - Reconnection avec le lit majeur et la zone humide - Limiter l'envasement - Recréer un lit mineur d'étiage fonctionnel - Se rapprocher du gabarit "naturel" : section de plein bord pour un débordement Q2	Adoucissement de la pente des berges à l'aide d'une pelle mécanique + apport de granulométrie	2013	Entreprise PROVERT			250 ml	500 € HT soit 200 € / 100 ml	

Suppression d'ouvrages +diversification des écoulements	La Flume	Flume	Pacé (Moulin de Champagne)	Syndicat Intercommunal du Bassin de la Flume	<p>Constat : Le moulin de Champagne n'était plus en état de fonctionner. L'ouvrage hydraulique était constitué des anciennes vannes de décharge du moulin et d'un déversoir en béton mis en place plus récemment par l'association de pêche locale.</p> <p>Objectifs : Rétablir la continuité écologique Diversifier les écoulements</p>	<p>Démantèlement complet des vannes y compris les potences métalliques Remplacement du déversoir de décharge en béton par des mini-seuils en enrochement Apport de graviers et de blocs et aménagement de déflecteurs</p>			200 T			Pas connu	
Suppression d'ouvrages+diversification des écoulements	La Flume	Flume	Pacé (Pont de Pacé)	Syndicat Intercommunal du Bassin de la Flume	<p>Constat : Le moulin du Pont de Pacé n'était plus en état de fonctionner.</p> <p>Impacts du clapet : -Obstacle à la continuité piscicole et sédimentaire -Différence entre ligne d'eau amont et ligne d'eau aval : 1,2 m -Zone d'influence de l'ouvrage : 970 m</p> <p>Objectifs : -Démantèlement de tous les ouvrages qui composaient le système hydraulique de l'ancien moulin</p>	<p>Reprofilage de berges (670 m) avec création de banquettes végétalisées, Stabilisation des pieds de berges retalutés par des boudins d'hélophytes dans les zones soumises à forte érosion (72 m) et pose de blocs sur 600 m de berges Création de radiers et installation de blocs pour diversifier les écoulements</p>	2012		290 T de blocs et cailloux pour stabilisation des berges et diversification du lit Soit 48 T pour 100ml			670 ml	

Annexe 4 : Protocole recharge granulométrique

Appliqué et testé sur 30 cours d'eau restaurés par la technique de recharge granulométrique, ce protocole est prévu pour être réalisé à 2 personnes en 1 h-1h30.

Le matériel nécessaire comprend :

- Un décamètre de 50 m
- Une règle rigide de 50 cm (précision millimétrique)
- Un jeu de piquets avec son maillet
- Un théodolite avec un trépied et une mire de géomètre
- Un niveau
- Un GPS
- Un appareil photo
- Du matériel de prise de notes (fiches terrain)

Période d'échantillonnage

La saison optimale pour réaliser ce protocole reste l'automne pour des conditions hydrologiques suffisantes et éviter une végétation trop dense qui peut induire des difficultés dans les mesures à effectuer.

Préférentiellement, les conditions d'échantillonnage, comme le préconise de nombreux protocoles comme ceux des inventaires de cours d'eau, doivent se dérouler après une période de 8 jours sans pluie, afin que débit et faciès d'écoulement soient stabilisés.

Délimitation de la station

Les mesures se déroulent à l'échelle stationnelle, sur une longueur minimale de 30 mètres ou de 14 fois la largeur de pleins bords pour les cours d'eau de taille importante (supérieur à 2 m de large). Son emplacement est défini après prospection du linéaire restauré et correspond à la zone la plus représentative de l'ensemble de ce linéaire en termes de représentativité des faciès, de la sinuosité et des contraintes latérales.

Ensuite, il convient d'établir 5 transects répartis de façon équilibré sur l'ensemble de la station délimitée. Le choix du positionnement des transects sur la station s'effectue sur les faciès les plus représentatifs tout en alternant le type de faciès.

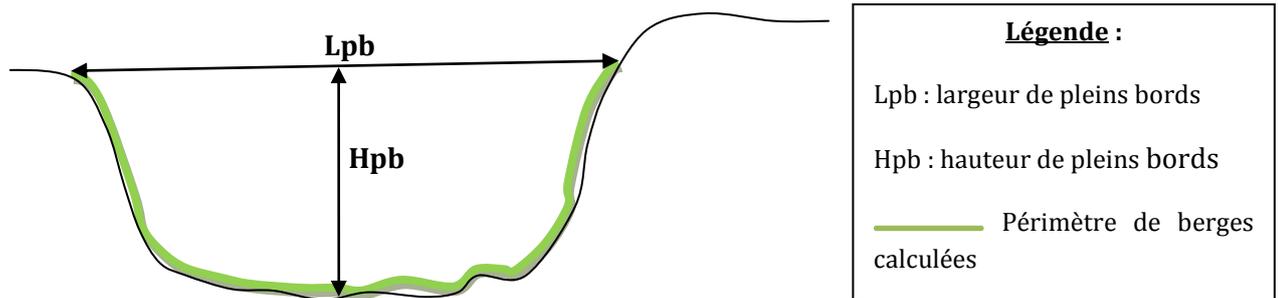
Pour exemple, sur une station de 30 m, en termes de linéarité cumulée de faciès on retrouve :

15 m de plat courant/ 3 m de fosse/ 5m de plat lent/ 7m radier

Il sera établi : 2 transects sur plat courant + 1 sur plat lent + 1 fosse + 1 sur radier

Mesures du gabarit du lit

Des mesures caractérisant la géométrie du lit (largeur plein bord, hauteur plein bord et périmètre plein bord) ont été effectuées pour chaque site d'étude. Elles nous ont permis d'estimer la section plein bord et le rayon hydraulique du cours d'eau, paramètres nécessaires lors du calcul du **débit pleins bords**. Sur chaque transect, la largeur plein bord (Lpb) est mesurée une fois. Cinq mesures de hauteur plein bord (Hpb), uniquement dans le lit mouillé sont ensuite réalisées.



Estimation du débit de pleins bords

Le débit de pleins bords représente la capacité d'écoulement du lit mineur, juste avant de déborder dans la plaine d'inondation (Wolman & Leopold, 1957).

Les différentes mesures associées au gabarit du lit (largeur plein bord (Lpb), hauteur plein bord (Hpb), hauteur totale (HT), et le périmètre des berges) sont des variables qui caractérisent la géométrie du lit. Elles permettent également de calculer le débit de plein bord du cours d'eau.

Calcul du débit plein bord estimé grâce à l'équation de Manning-Strickler (Malavoi *et al*, 2011) :

$$Q_{pb} = S * R_h^{2/3} * i^{1/2} * k$$

Q_{pb} = Débit à pleins bords (m³.s⁻¹)

S = Section plein bord (m²)

R_h = Rayon hydraulique (m) = section de plein bord (m²) / périmètre de plein bord (m)

i = Pente de la ligne d'eau (m/m)

K = Coefficient de rugosité (déterminé grâce à la méthode de Cowan)

Le calcul du coefficient K s'effectue à partir de la formule de Cowan :

$$n = [(n_b + n_1 + n_2 + n_3 + n_4) * m] \text{ avec } K = 1 / n$$

Les coefficients présents expriment les variables suivantes : le matériau constitutif des berges (nb), leur degré d'irrégularité (n1), les variations de la section (n2), la présence d'obstacles (n3), la quantité de végétation des berges et du fond du lit (n4) ainsi que le méandrement (m).

Des qualificatifs décrivant chaque variable sont proposés. Comme des valeurs de coefficients sont associées pour chaque qualificatif, il suffit alors d'appliquer la formule à l'aide des valeurs proposées (les tableaux de valeurs pour chaque coefficient sont détaillés ci-dessous).

Matériau	Taille (mm)	nb	
		Min	Max
Limon	< 0.625	0.025	0.032
Sables	0.625 - 2	0.026	0.035
Graviers	2 - 64	0.028	0.035
Pierres	64 - 256	0.030	0.050
Blocs	>256	0.040	0.070

Valeurs du coefficient nb : le matériau constitutif des berges

n1 : leur degré d'irrégularité

Degré d'irrégularité	n1		Descriptif
	Min	Max	
Paroi lisse	0.000		Comparable au canal le plus lisse possible pour un matériau du lit donné.
Irrégularités légères	0.001	0.005	Comparable à des canaux dragués soigneusement, dans un bon état mais avec des berges légèrement érodées ou affouillées.
Irrégularités modérés	0.006	0.010	Comparable à des canaux dragués à la rugosité modérée à conséquente et aux berges modérément dégradées ou érodées.
Irrégularités importantes	0.011	0.020	Berges de cours d'eau naturels éboulés ou sérieusement dégradées ; Parois sérieusement érodées ou éboulées de canaux de navigation ou de drainage ; surface irrégulière et non profilée de canaux creusés dans le rocher.

n2 : les variations de la section

Variation de la section	n2		Descriptif
	Min	Max	
Progressive	0.000		La taille et la forme de la section en travers changent progressivement.
Alternant occasionnellement	0.001	0.005	Grandes sections et sections réduites alternant parfois, ou bien le courant principal se déplace d'une rive à l'autre en raison des changements de la forme de la section en travers.
Alternant fréquemment	0.010	0.015	Grandes sections et sections réduites alternant fréquemment, ou bien le courant principal se déplace d'une rive à l'autre en raison des changements de forme de la section en travers.

n3 : la présence d'obstacles

Présence d'obstacles	n3		Descriptif
	Min	Max	
Négligeable	0.000	0.004	Quelques obstacles épars, incluant dépôts de débris, souches, racines apparentes, branchages, piles ou rochers isolés, occupant moins de 5% de la section mouillée.
Faible	0.005	0.015	Les obstacles occupent moins de 15% de la section mouillée, et l'espacement entre ceux-ci est tel que la sphère d'influence autour de l'un d'entre eux ne s'étend pas jusqu'à celle de l'obstacle suivant. De plus petits ajustements sont utilisés pour des objets arrondis et lisses que pour des objets anguleux.
Sensible	0.020	0.030	Les obstacles occupent de 15 à 50% de la section mouillée, ou bien l'espace entre ceux-ci est assez réduit pour provoquer le cumul des effets dus à différents obstacles, obstruant ainsi une partie équivalente de la section mouillée.
Très marqué	0.040	0.050	Les obstacles occupent plus de la moitié de la section mouillée, ou bien l'espace entre eux est assez réduit pour générer de la turbulence dans la quasi-totalité de la section.

n4 : la quantité de végétation des berges et du fond du lit

Quantité de végétation	n4		Descriptif
	Min	Max	
Négligeable	0.000		Herbe fauchée ou vesce sur les berges du cours d'eau.
Faible	0.002	0.010	Surface dense d'herbe souple ou plantes aquatiques poussant là où la profondeur de l'eau atteint au moins une à deux fois la taille de la végétation.
Moyenne	0.025	0.050	Gazon poussant là où la profondeur moyenne de l'eau et de une à deux fois la taille de la végétation ; plantes racinaires modérément denses, plantes aquatiques, ou arbres plantés, poussant là où la profondeur moyenne de l'eau est de deux à trois fois la hauteur de la végétation ; végétation modérément dense, buissonnante, comparable à des saules âgés d'un à deux ans en morte saison, ou bien de hautes herbes et plantes à tige souple en haute saison, poussant le long des berges et sans végétation notable sur le fond de cours d'eau dont le rayon hydraulique est supérieur à 60cm.
Importante	0.025	0.050	Gazon poussant là où la profondeur moyenne est environ égal à la hauteur de la végétation ; saules ou peupliers âgés de 8 à 10 ans entremêlés de mauvaises herbes et de buissons (tous sans feuillage) où le rayon hydraulique est supérieur à 60cm ; saules buissonnantes âgés d'un an entremêlés de mauvaises herbes sur les berges (feuillage complet) et pas de végétation notable sur le fond de cours d'eau où le rayon hydraulique est supérieur à 60cm.
Très importante	0.050	0.100	Gazon poussant là où la profondeur de l'eau n'excède pas la moitié de la hauteur de la végétation ; saules buissonnantes d'environ un an entremêlés de mauvaises herbes ou de buissons (feuillage complet) ou roseaux denses poussant sur le fond ; arbres entremêlés de mauvaises herbes et de buissons (feuillage complet).

méandrement (m) :

Méandrement	m	Distance écologique / distance euclidienne
Modéré	1.00	1 – 1.2
Appréciable	1.15	1.2 – 1.5
Important	1.30	> 1.5

De plus, les débits de pleins bords mesurés vont également servi à calculer les **puissances spécifiques** des cours d'eau prospectés.

D'après la formule de la puissance spécifique :

$$\omega = (i * Q_{pb} * 9810) / L_{pb}$$

ω = puissance spécifique à plein bord (W/m^2)

i = pente (m/m)

Q_{pb} = débit spécifique à plein bord (m^3/s)

L_{pb} = largeur de plein bord (m)

Il a été démontré depuis de nombreuses années que les capacités d'ajustement d'un cours d'eau étaient en grande partie fonction de sa puissance spécifique. Les travaux pionniers de Brookes sur ce sujet (1988), repris dans Wasson *et al.* (1998), ont largement défriché le terrain. Les résultats de Brookes permettent d'identifier deux seuils de puissance spécifique :

- un seuil apparait aux environs de $35 W/m^2$, au-dessus duquel la puissance naturelle de cours d'eau anciennement chenalisés a permis a ces derniers de réajuster leurs formes et de retrouver petit a petit une géométrie plus naturelle ;
- un seuil mineur est visible aux environs de $25 W/m^2$, en dessous duquel la dynamique n'a pas permis de retour à la morphologie primitive ;
- les autres valeurs de puissance ne permettent pas d'identifier de seuils supplémentaires

Calcul du rapport Largeur de pleins bords/Hauteur de pleins bords

Le rapport de la largeur sur la profondeur moyenne à pleins bords (noté L_{pb}/H_{pb}). D'un point de vue hydromorphologique, c'est un paramètre typologique indicateur de l'activité géodynamique d'un cours d'eau (Malavoi et Bravard, 2010).

Nous étudierons ce rapport de L_{pb}/H_{pb} moyen de chaque cours d'eau, afin de caractériser l'altération des travaux hydraulique principalement. De plus, la recharge granulométrique a pour objectif de rehausser le fond de cours d'eau est donc d'augmenter le résultat de ce rapport.

Ainsi, les cours d'eau à dynamique plutôt active, caractérisés par des processus érosifs latéraux importants et des apports solides assez élevés, ont des rapports l/p plutôt forts (20 ou plus). Les rivières en tresses ont souvent des rapports l/p proches de 100 ou supérieurs à 100.

Le rapport l/p donne aussi des indications sur la cohésion des berges : plus celles-ci sont cohésives, plus les cours d'eau sont étroits et profonds. Inversement, si les berges sont peu cohésives, les cours d'eau ont tendance à être plus larges et moins profonds.

Mesure des faciès d'écoulement

Ces faciès d'écoulement sont des portions de cours d'eau avec une certaine uniformité structurelle et fonctionnelle générale sur le plan des vitesses, des hauteurs d'eau, de la granulométrie du substrat, de la pente du lit et de la ligne d'eau et des profils en travers (Malavoi & Souchon, 2002).

Chaque type de faciès a été mesuré afin d'obtenir le linéaire total pour chaque type de transect présent sur la station. A savoir, que seulement 4 types de faciès sont pris en compte dans ce protocole : Plat courant, Plat lent, Radier, Fosse (profond).

Mesure de la pente

Sur le plan morphologique, la pente est un paramètre fondamental qui participe à la géométrie du cours d'eau. Elle permet d'exprimer, couplée au débit, une notion de puissance de l'écoulement. C'est aussi un paramètre nécessaire au calcul de la formule de Manning-Strickler, pour déterminer le Q_{pb} .

La pente mesurée dans ce protocole est celle de la ligne d'eau. En cas d'absence d'eau constaté lors des opérations de mesure, la pente mesurée correspondra à celle du lit. La différence d'altitude entre les points amont et aval de la section sera mesurée à l'aide d'un niveau optique.

Les deux points (amont et aval) pris lors de la mesure de la pente devront présenter un faciès d'écoulement identique. Il est conseillé de commencer et de finir par un radier (en cas d'absence de radeaux, effectuez ces mesures sur un plat, il est conseillé d'éviter les fosses). La pente s'exprimera alors comme le rapport de l'altitude entre les deux points amont/aval (m) et la longueur de la station.

Mesure de la granulométrie

Le protocole CARHYCE prévoit de prélever puis mesurer 100 éléments sur le radier le plus grossier de la station, à l'aide d'un instrument de mesure d'une précision millimétrique (type pied à coulisse). Ce même protocole précise qu'en cas de présence de petits radeaux sur le cours d'eau (ce qui est généralement le cas en tête de bassin versant), un prélèvement limité à 50 éléments sera suffisant. Nous nous limiterons donc à cette deuxième option.

Dans ce protocole, la méthode Wolman sera quelque peu modifiée pour être adapté à nos objectifs de départ. En effet, dix éléments seront prélevés sur chacun des 5 transects (10*5 transects = D50) effectués sur la station définie. Le but est de connaître la répartition globale de la granulométrie à l'échelle de la station, en échantillonnant sur les faciès les plus représentatifs de la station. Le prélèvement des éléments ne s'effectuera donc pas uniquement sur des faciès de types radeaux mais également plat courant, plat lent, etc... selon la typologie du cours d'eau.

A chaque point de mesure, l'observateur fera descendre son doigt au fond du lit mouillé, sans regarder l'élément prélevé, afin d'éviter le biais de choisir instinctivement l'élément le plus grossier. Au premier contact du doigt avec le fond du lit, l'observateur remontera l'élément granulométrique à la surface puis le mesurera. La mesure de la granulométrie est effectuée sur le deuxième axe le plus long de chaque élément (exprimée en millimètre).

Nom de la classe granulométrique	Classe de taille (diamètre en mm)	Code
Dalles (dont dalles d'argile)	> 1024	D
Rochers	> 1024	R
Blocs	256 - 1024	B
Pierres grossières	128 - 256	PG
Pierres fines	64 - 128	PF
Cailloux grossiers	32 - 64	CG
Cailloux fins	16 - 32	CF
Graviers grossiers	8 - 16	GG
Gravier fins	2 - 8	GF
Sables	0,625 - 2	S
Limons	0,0039 - 0,0625	L
Argiles	< 0,0039	A

Pour la granulométrie sera observé :

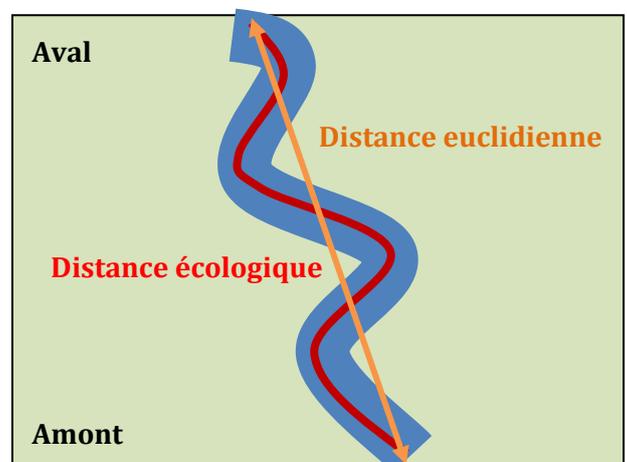
- La D16 : Diamètre maximal correspondant à 16 % de la fréquence cumulée en nombre (mm)
- La D50 : Diamètre médian correspondant à 50% de la fréquence cumulée en nombre (mm)
- La D84 : Diamètre maximal correspondant à 84% de la fréquence cumulée en nombre (mm)

L'Étendue granulométrique sera analysé en autre par le (rapport D16 / D84).

Mesure de la sinuosité

La sinuosité est évaluée au niveau de la station. Elle se calcule en divisant la distance écologique (*distance que parcourt le cours d'eau sur notre station, soit 30m*) par la distance euclidienne (*ligne droite entre le point amont et aval de la station*).

Coefficient de sinuosité = $\frac{\text{Distance écologique (m)}}{\text{distance euclidienne (m)}}$



Mesure du Colmatage

Le CEMAGREF d'Aix-en-Provence (Archambaud *et al.*, 2005) a développé une méthode d'évaluation visuelle sommaire mais reproductible du colmatage de surface et du niveau d'enchâssement des éléments grossiers du substrat. Cette méthode certes très subjective a été utilisée pour quantifier le colmatage. Il est important que la manipulation soit effectuée par le même opérateur afin de limiter le biais d'observation.

Elle consiste à soulever un de ces éléments et à estimer sa facilité d'extraction ainsi que la densité du nuage de fines qui est libéré lors de cette extraction **uniquement sur les radiers**.

Cinq classes de colmatage ont été définies selon ces deux critères :

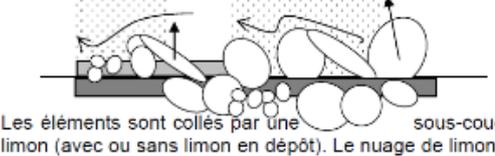
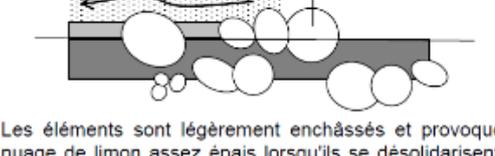
Code 1. Si les éléments se soulèvent facilement, nous attribuons la classe 1. Les éléments sont posés sur la sous-couche granulométrique et ne génèrent pas de nuage de limon lorsqu'ils sont soulevés.

Code 2. Si les éléments se soulèvent plus difficilement, nous attribuons la classe 2 en fonction de la quantité de limon qui se libère dans l'eau sous les éléments. Le nuage généré est peu dense, c'est-à-dire que la couche de surface est collée par une couche de limon légèrement colmatante, qui lie les éléments entre eux.

Code 3. Si les éléments se soulèvent avec un nuage de limon assez épais, nous attribuons la classe 3. Les éléments sont très enchâssés.

Code 4. Si les éléments se soulèvent difficilement, nous attribuons la classe 4. Le nuage de limon produit est très dense. La structure est enchâssée dans une sous-couche très compacte dont l'emprise est forte sur les éléments.

Code 5. Si les éléments ne se soulèvent pas ou très difficilement (structure cimentée ou sous forme d'un dallage) nous attribuons la classe 5. C'est le cas lorsque la granulométrie est recouverte par une épaisse couche de limon, cette classe granulométrique se retrouvant en substrat dominant.

Code	Classes de Colmatage	Représentation du degré de colmatage (lorsque l'on soulève un élément du fond)
1	] 0 - 25%]	 <p>Les éléments sont posés. On peut observer soit un dépôt fin de limons peu colmatant (cas de gauche) soit aucun dépôt (cas de droite)</p>
2	] 25 - 50%]	 <p>Les éléments sont collés par une sous-couche de limon (avec ou sans limon en dépôt). Le nuage de limon qui se soulève est peu dense.</p>
3	] 50 - 75%]	 <p>Les éléments sont légèrement enchâssés et provoquent un nuage de limon assez épais lorsqu'ils se désolidarisent de la sous-couche.</p>
4	] 75 - 90%]	 <p>Les éléments sont très enchâssés et provoquent un nuage épais de limons (accentué ou non par un dépôt de limons)</p>
5	] 90-100%]	 <p>Les éléments sont recouverts de limons et provoquent un nuage très épais (cas de gauche) ou bien sont entièrement cimentés dans la sous-couche et impossibles à soulever (cas de droite)</p>

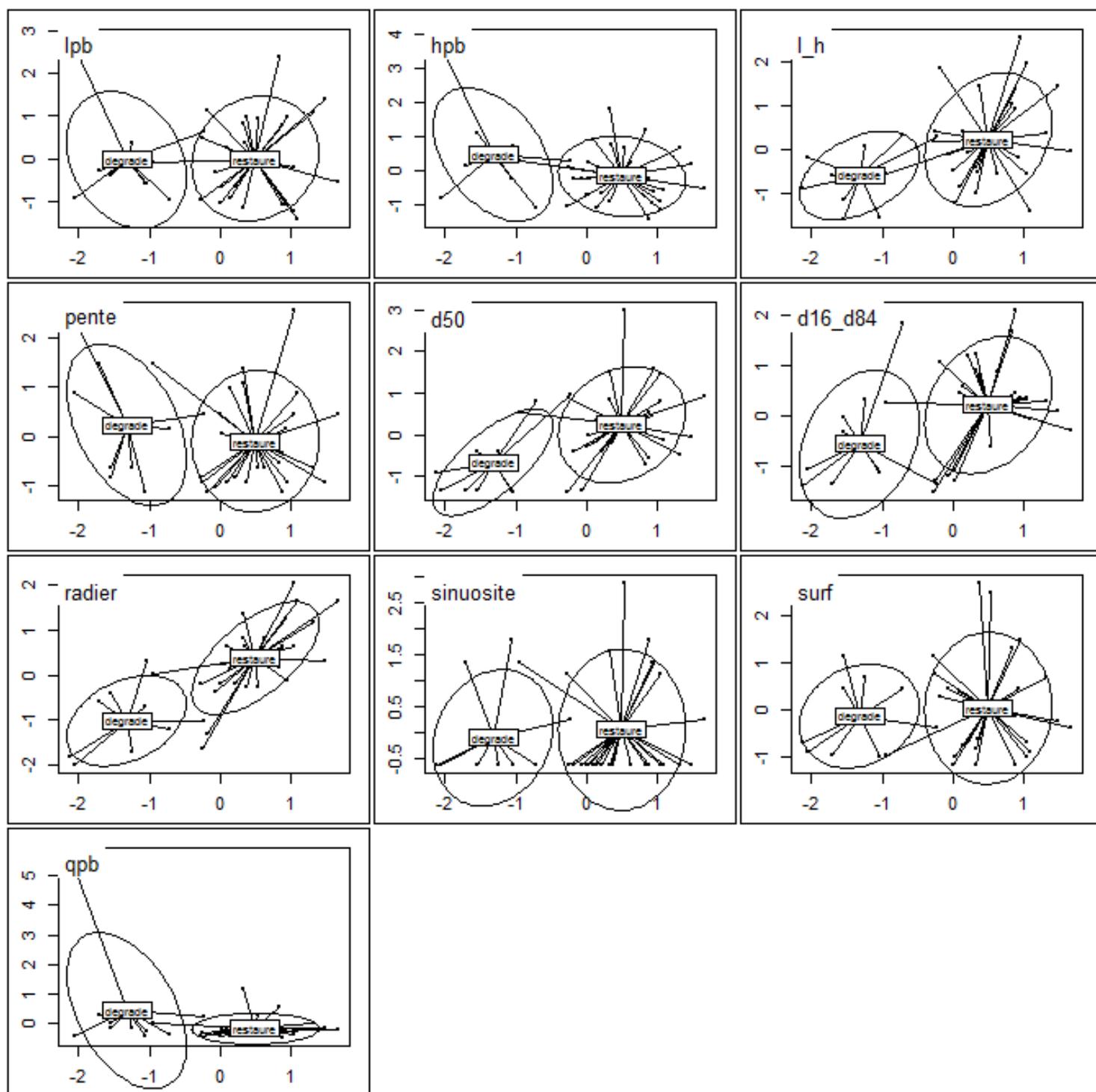
Annexe 5 : Fiche terrain des données qualitatives

Fiche terrain : recharge granulométrique			
Données générales			
Département :		Commune :	
Cours d'eau :		Lieu-dit :	
N aval (WGS84) :		E aval (WGS84) :	
Données décrivant la recharge granulométriques			
Objectifs : <input type="checkbox"/> recréer une couche d'armure <input type="checkbox"/> limiter l'incision <input type="checkbox"/> améliorer la connexion cours d'eau - ZH <input type="checkbox"/> inondation <input type="checkbox"/> paysage <input type="checkbox"/> Diversifier les écoulements			
Linéaire total restauré (m) :			
Données qualitatives		Technique associée(s) :	
Année Travaux		<input type="checkbox"/> épis <input type="checkbox"/> risbernes <input type="checkbox"/> déblai, remblai <input type="checkbox"/> Retalutage de berge Autres :	
Nature de la recharge	<input type="checkbox"/> En plein <input type="checkbox"/> en dôme <input type="checkbox"/> en tâche		
Epaisseur recharge	en cm :		
CE dans son talweg	<input type="checkbox"/> OUI / <input type="checkbox"/> NON		
Determination granulo avant trvx	biblio/ woolman/observation /pas d'obs		
Volume de recharge (m3)			
Origine des matériaux			
Gamme granulo			
Type de cailloux	<input type="checkbox"/> refus de criblage <input type="checkbox"/> graviers roulés <input type="checkbox"/> tir de mine		
Traitement au préalable	<input type="checkbox"/> lavé <input type="checkbox"/> trié		
Repartition de la recharge	<input type="checkbox"/> homogène <input type="checkbox"/> respect radier/mouille existante <input type="checkbox"/> mise en place de seuils au fond pour maintenir		
La recharge a bougé?	<input type="checkbox"/> OUI <input type="checkbox"/> NON		
Ré-intervention	<input type="checkbox"/> OUI <input type="checkbox"/> NON		
Spécificités techniques du cours d'eau :			
<input type="checkbox"/> cours d'eau intermittent <input type="checkbox"/> faible apport solide amont <input type="checkbox"/> faible érodabilité des berges <input type="checkbox"/> pente :			
Caractéristiques :			
Contexte :	<input type="checkbox"/> culture <input type="checkbox"/> prairie paturée <input type="checkbox"/> prairie fauchée <input type="checkbox"/> forêt <input type="checkbox"/> urbain <input type="checkbox"/> zone humide		
Maître d'œuvre :		Coût total :	
Cadre de l'opération : <input type="checkbox"/> CRE/CTMA <input type="checkbox"/> Procédure pénale <input type="checkbox"/> Autre : . .			
Données décrivant le suivi			
Réalisation d'un suivi écologique : <input type="checkbox"/> oui <input type="checkbox"/> non			
Biologique	<input type="checkbox"/> IBGN	<input type="checkbox"/> IBMR	<input type="checkbox"/> IPR <input type="checkbox"/> Autres :
Hydromorpho.	<input type="checkbox"/> Carhyce	<input type="checkbox"/> IAM	<input type="checkbox"/> Score d'hété <input type="checkbox"/> Autres :
Pas de suivi : pourquoi?	<input type="checkbox"/> Coût <input type="checkbox"/> étendue géographique <input type="checkbox"/> manque de protocole <input type="checkbox"/> manque de temps		
Remarques :			
Contacts			
Structure		Nom / prénom :	
Adresse mail :		Numéro de téléphone	

Annexe 6 : jeu de données

Station	type	lpb	hpb	Lh	pente	d50	radier	diversite	sinuosite	surf	qpb	Puiss
STAT_001_Sauvers	restaure	2.32	0.80	2.900000	0.006	25.00	0.46666667	4	1.00	5.2614703	0.43651495	11.0
Degrade-Sauvers	degrade	2.16	1.00	2.160000	0.006	19.00	0.26070000	2	1.00	5.2614703	0.59733576	16.2773995
STAT_002_Long_gue	restaure	3.17	0.90	3.522222	0.006	17.50	0.52333333	3	1.00	6.0091459	0.90001208	16.7112653
Degrade_Long_gue	degrade	2.66	0.80	3.325000	0.006	18.50	0.04800000	3	1.00	6.0091459	0.61404162	13.5874022
STAT_003_Tremerat	restaure	1.94	0.60	3.233333	0.004	19.00	0.30000000	2	1.00	1.9117976	0.17916097	3.6238538
STAT_004_Drayac	restaure	3.08	0.90	3.422222	0.006	80.50	0.28571429	4	1.16	11.3016823	1.47428183	28.1741002
STAT_005_Loc	restaure	3.20	0.70	4.571429	0.001	19.00	0.11554622	2	1.00	4.7449644	0.28787100	0.8625045
STAT_006_bodo	restaure	2.96	0.70	4.228571	0.009	16.00	0.42857143	3	1.00	0.4924421	0.38785916	11.5669478
STAT_007_Grabeto	restaure	1.78	0.50	3.560000	0.022	32.50	0.35000000	4	1.00	1.7176030	0.17795850	21.5767264
STAT_008_Harmoye	restaure	2.58	0.96	2.687500	0.003	22.50	0.43333333	2	1.00	5.0073341	0.51138234	5.8333265
STAT_009_Le_Fromené	restaure	1.67	0.53	3.150943	0.014	34.50	0.53333333	3	1.09	5.2219338	0.39451713	32.4448996
Degrade_Le_Fromene	degrade	1.75	0.50	3.500000	0.014	41.00	0.13000000	2	1.00	5.2219338	0.26661408	20.9238732
STAT_010_Grâce-Uzel	restaure	3.00	1.17	2.564103	0.023	41.50	0.55555556	4	1.00	0.5023905	3.03317563	228.1251393
STAT_011_La_bouloterie	restaure	1.94	0.80	2.425000	0.013	26.00	0.36666667	3	1.00	0.9768134	0.58702028	36.5890189
Degrade_La_bouloterie	degrade	2.00	0.91	2.197802	0.013	1.25	0.38000000	3	1.00	0.9768134	0.42294758	26.9692326
STAT_012_La_Championnaie	restaure	1.62	0.54	3.000000	0.026	53.50	0.46666667	4	1.10	1.4413229	0.35566586	55.9976139
STAT_013_Pesle	restaure	1.74	0.51	3.411765	0.004	0.90	0.30000000	3	1.08	7.3424660	0.16829077	3.7952469
Degrade_Pesle	degrade	2.15	0.87	2.471264	0.004	1.50	0.17000000	3	1.00	7.3424660	0.94346431	17.2193207
STAT_014_Le_Pont_ST_pierre	restaure	2.79	0.88	3.170455	0.003	28.00	0.44400000	3	1.04	NA	NA	NA
Degrade_Le_Pont_ST_Pierre	degrade	2.80	0.86	3.255814	0.003	32.50	0.33000000	4	1.04	NA	NA	NA
STAT_015_Le_scave	restaure	4.94	1.17	4.222222	0.002	12.00	0.17045455	4	1.12	NA	NA	NA
Degrade_Le_scave	degrade	4.35	1.18	3.686441	0.002	10.00	0.16700000	2	1.12	NA	NA	NA
STAT_016_Guy_Renault	restaure	1.65	0.42	3.928571	0.001	36.00	0.43333333	3	1.11	3.5651491	0.05077077	0.3018553
Degrade_Guy_Renault	degrade	2.00	0.70	2.837143	0.001	2.00	0.21400000	3	1.11	3.5651491	0.18181404	0.8917979
STAT_017_Quéhugan	restaure	3.09	0.61	5.085374	0.003	55.00	0.30952381	3	1.09	8.3334359	0.38767234	3.6923967
STAT_018_croiseau	restaure	1.56	0.54	2.888889	0.038	53.00	0.66666667	4	1.08	1.9012889	0.42499030	101.5563354
Degrade_croiseau	degrade	4.40	1.65	2.666667	0.038	9.50	0.03000000	3	1.00	1.9012889	11.05365317	936.4956429
STAT_019_Arz	restaure	5.40	0.83	6.506024	0.006	11.00	0.31428571	3	1.07	NA	NA	NA
Degrade_Arz	degrade	4.80	0.96	4.897959	0.006	8.00	0.22200000	4	1.07	NA	NA	NA
STAT_020_Ruisseau_des_epromnières	restaure	2.67	0.92	2.902174	0.012	22.50	0.43333333	3	1.00	2.1158876	1.03787092	45.75596123
STAT_021_Pont_du_Guesdon	restaure	2.74	0.77	3.58442	0.003	42.00	0.05714286	3	1.00	6.1808706	0.38686074	4.1552332
STAT_022_La_Réauté	restaure	2.36	0.82	2.878049	0.027	36.00	0.33333333	3	1.09	1.1039810	0.97532093	109.4632431
Degrade_La_Réauté	degrade	2.23	0.78	2.858974	0.027	2.00	0.23200000	3	1.09	1.1039810	1.45454511	172.7647374
STAT_023_Ruisseau_du_Hel	restaure	2.04	0.63	3.238095	0.017	42.50	0.60000000	4	1.04	2.7902000	0.51768180	42.3204869
Degrade_Ruisseau_du_Hel	degrade	2.86	0.82	3.487805	0.017	43.50	0.16000000	3	1.04	2.7902000	1.34205821	76.2570100
STAT_024_mimiacsousbêcherel	restaure	1.70	0.58	2.931034	0.017	21.00	0.30000000	3	1.00	0.4601223	0.12884818	12.6400066
STAT_025_Lesignolais	restaure	2.20	0.69	3.188406	0.002	2.00	0.26666667	3	1.00	5.2898857	0.28219789	2.5166921
STAT_026_Auvergnac	restaure	3.38	0.79	4.278481	0.003	25.00	0.38095238	4	1.00	3.2533363	0.63601306	5.5378297
STAT_027_Ponterreau	restaure	1.42	0.62	2.290323	0.021	23.50	0.60000000	3	1.00	1.2745852	0.48339548	70.1297907
Degrade_Ponterreau	degrade	1.76	0.56	3.142857	0.021	1.50	0.00000000	2	1.00	1.2745852	0.17462230	20.4631486
STAT_028_Le_bas Cutelou	restaure	4.08	1.02	4.000000	0.007	13.00	0.35714286	4	1.00	7.8152529	1.87469878	31.5528346
STAT_029_Le_pont besnard	restaure	3.09	0.72	4.291667	0.003	23.00	0.28571429	3	1.00	11.8655372	0.22434609	2.1367332
STAT_030_Guernouette	restaure	2.28	0.49	4.653061	0.017	41.00	0.43333333	3	1.00	0.9692495	0.25483775	18.6400400

Annexe 7 : Analyse discriminante pour chaque variable



Résumé

L'objectif de ce travail était de réaliser un état des lieux des différentes techniques de restauration hydromorphologique mises en œuvre sur le territoire du bassin versant de la Vilaine, tout en étudiant particulièrement la technique de recharge granulométrique. Afin de valoriser et de mettre en avant le rôle essentiel de l'hydromorphologie des cours d'eau sur l'atteinte du bon état écologique, une étude bibliographique a été réalisée en ce sens.

Ensuite, l'analyse des différentes techniques de restauration appliquées sur le bassin versant de la Vilaine a permis de montrer la réelle dynamique de restauration qui est en marche, avec des actions plus ou moins ambitieuses. Des difficultés notables et très contraignantes pour la mise en place et l'acceptation sociale de ce type de restaurations ont été soulevées. Les résultats obtenus suite à l'évaluation spécifique des travaux de recharge granulométrique permettent de dégager des tendances plutôt positives pour l'apport d'une diversification des écoulements, la reconstitution d'un matelas alluvial et la réduction de l'incision du lit. Cependant, l'objectif de débord précoce, pour permettre au cours de dissiper son énergie plus rapidement, grâce à cette technique, n'a pas pu être démontré par cette étude.

Enfin, un manque notable de suivis scientifiques des travaux de restauration est observé ce qui pose de nombreuses interrogations sur l'évaluation de ces techniques de restauration.

Mots clé : restauration hydromorphologiques, recharge granulométrique, suivi écologique

Abstract

The objective of this work was to make an inventory of the different hydromorphological restoration technical implemented on the watershed of the Vilaine, particularly while studying particle charging. In order to enhance and highlight the essential role hydromorphology of the river on the achievement of good ecological environmental status, a bibliographical study was done in this way.

Then the analysis of different restoration technicals applied to the watershed of the Vilaine has shown that the process begins with more or less ambitious actions. Social difficulties appeared on the implementation of this type of restoration. The results obtained from the evaluation of particle charging works allow to reach rather positive trends of diversification flows, the reconstitution of alluvial mattress and reducing bed incision. However, early overflow aim to break up energy faster, thanks to this technique could not be demonstrated by this study.

Finally, a notable lack of scientific monitoring of the restoration work is observed which raises many questions about the evaluation of these restoration techniques.

Keywords : hydromorphological restoration, particle charging, ecological monitoring