

Conséquences des travaux de restauration écologique sur l'hydromorphologie des cours d'eau

Stage réalisé à la Délégation InterRégionale Bretagne, Pays de la Loire
Du 2 avril au 6 septembre 2013



Thaïs BOUDOT GRIMAUD

Master II Gestion des Habitats et des Bassins Versants

2012-2013

Université de Rennes 1

Maître de stage : Mikaël Le Bihan

Correspondant universitaire : Yves Quêté

Soutenu le mardi 10 septembre 2013





Dessin de Mix & Remix dans Cipel, 2003

Présentation de la structure d'accueil

Ce rapport est rédigé dans le cadre d'un stage effectué à l'Office National de l'Eau et des Milieux Aquatiques (ONEMA) de mars à septembre 2013. Il s'est déroulé au sein de la Délégation InterRégionale (DIR) Bretagne - Pays de la Loire (DIR 2) basée à Cesson Sévigné (35) dans l'unité "Appui aux politiques de l'eau".

L'ONEMA est un établissement public sous la tutelle du Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et l'Energie (MEDDE). Il a été créé par la Loi sur l'Eau et les Milieux Aquatiques du 30 décembre 2006 qui a transformé l'ancien Conseil Supérieur de la Pêche (CSP) en un nouvel établissement aux fonctions élargies. Sa création s'inscrit dans l'objectif de reconquête de la qualité des eaux et d'atteinte des objectifs de bon état écologique fixé par la Directive Cadre européenne sur l'Eau (DCE) du 22 décembre 2000.

Ses missions s'organisent autour de quatre axes :

- le développement des connaissances sur les écosystèmes aquatiques ;
- la connaissance de l'état et des usages des milieux aquatiques et de la ressource en eau ;
- la police de l'eau, des milieux aquatiques et de la pêche ;
- la contribution à la mise en œuvre des politiques publiques de l'eau.

En 2013, l'ONEMA est constitué de 897 personnes réparties sur 3 échelons : 1 direction générale, 9 délégations interrégionales et 90 services départementaux ou interdépartementaux.

- La direction générale coordonne les délégations interrégionales et les services départementaux et appuie les politiques publiques de gestion de l'eau. Elle s'organise en trois directions métiers :
 - la Direction de l'Action Scientifique et Technique (DAST) ;
 - la Direction de la Connaissance et de l'Information sur l'Eau (DCIE) ;
 - la Direction du Contrôle des Usages et de l'Action Territoriale (DCUAT).
- Les délégations interrégionales regroupent 4 unités - Administration et logistique, Connaissance de l'état et des usages de l'eau et des milieux aquatiques, Contrôle des usages, Appui aux politiques de l'eau. Chacune est composée d'ingénieurs et de techniciens spécialisés dans le recueil et le traitement de données, dans l'appui aux politiques publiques de gestion des eaux et la surveillance des milieux aquatiques.
- Les services départementaux (SD), composés de techniciens et d'agents techniques, ont pour rôle le contrôle des usages et la police de l'eau et de la pêche. Ils contribuent au recueil de données sur l'état des milieux aquatiques et des espèces et apportent une expertise technique auprès des organismes partenaires.

La répartition des différentes DIR et l'organigramme de la DIR 2 sont présentés en annexe

Remerciements

J'adresse tous mes remerciements à l'ONEMA et particulièrement à Alix Nihouarn, Marie-Andrée Arago et Mikaël Le Bihan pour l'entretien qui a été une véritable entrée en matière introduisant le début d'une étude plus que passionnante.

Merci à Mikaël Le Bihan, maître de stage hors pair, passionné et passionnant. Merci pour ta patience, tes conseils, ta pédagogie, ton optimisme et ton investissement dans cette étude.

Merci également aux personnes qui ont répondu favorablement pour participer au comité de pilotage autour des deux stages ONEMA, DIR 2 de 2013. Ainsi je remercie Hubert Catroux (FDPPMA 22), Arnaud Cholet (Cellule ASTER 56), Maud Courcelaud (Agence de l'Eau Loire Bretagne), Alain Crave (Chercheur CNRS, Rennes), François-Xavier Duponcheel (SAGE Couesnon), Yohann Fuentes (FDPPMA 56), Florian Guérineau (FDPPMA 35) et François Veillard (Cellule ASTER 22) et Marie-Andrée Arago, Laetitia Faivre, Mikaël Le Bihan, Olivier Ledouble, Alix Nihouarn et Thibault Vigneron.

L'ensemble des résultats n'auraient pu être obtenu sans la participation d'un grand nombre de personnes extérieures. Merci aux Services Départementaux, aux techniciens de rivières, aux chargés d'études de s'être rendus disponibles pour m'accompagner sur le terrain et répondre aux questionnaires par tous les temps.

Pour la découverte des activités de l'ONEMA, les conseils, les relectures, la bonne ambiance, les discussions, je tiens à remercier l'ensemble des personnes de la Délégation. Toutes ces rencontres ont été très enrichissantes, bonne continuation à tous à l'ONEMA ou ailleurs.

Je ne saurais faire l'impasse sur les amis, géographiquement proches ou non, qui sont toujours là avec un soutien sans condition. Merci les amis, des fois (et même souvent) vous me donnez des ailes, des crampes au bide et, des fois, vous m'emmenez sur des routes parsemées de graviers qui font peur.

6 mois, c'est beaucoup de rencontres, beaucoup de joies, quelques coups durs et c'est aussi très rapide finalement.

Longo maï !
(formule provençale)

Sommaire

Remerciements	
Sommaire	
Liste des figures	
Liste des tableaux	
Table des abréviations	
Glossaire	
Introduction	1
I - Synthèse bibliographique	2
1 - Les travaux hydrauliques, causes de dégradation des cours d'eau.....	2
1.1 - Définition	2
1.2 - Historique.....	2
1.3 - Les impacts des travaux hydrauliques	3
1.4 - Services écosystémiques	4
2 - Les opérations de restauration hydromorphologique.....	5
2.1 - Définition	5
2.2 - Evolution des objectifs de la restauration	7
2.3 - De la restauration à de nouvelles règles d'aménagements	8
2.4 - Suivis des restaurations de cours d'eau	9
II - Matériel et méthodes	10
1 - Le secteur d'étude et le choix des sites.....	10
1.1 - Synthèse bibliographique.....	10
1.2 - Secteur d'étude	10
1.3 - Recensement	11
1.4 - Sélection des sites	12
2 - Méthodologie utilisée pour les restaurations sélectionnées	12
2.1 - Mesures sur le terrain.....	12
2.2 - Données complémentaires	14
2-3 - Questionnaire.....	15
2.4 - Analyse statistique des données	16
III - Résultats	17
1 - La connaissance des sites restaurés.....	17
2 - Sites sélectionnés	17
3 - Questionnaire	18
3.1 - Le diagnostic et la définition des objectifs	18
3.2 - La mise en œuvre	19
3.3 - Les suivis	19

3.4 - Communication.....	20
4 – Mesures	21
4.1 - Caractéristiques générales - Description du jeu de données	21
4.2 - Position du cours d'eau par rapport à son talweg	21
4.3 - Etude des sinuosités	22
4.4 - La puissance spécifique	22
4.5 - Etude des gabarits à travers les débits pleins bords	23
4.6 - Diversité des écoulements.....	24
4.7 - Les variations de profils en travers	25
4.8 - La rugosité	26
4.9 - Encombrement du lit mineur par la végétation.....	27
IV - Discussion.....	27
1 - La connaissance des sites restaurés.....	27
2 - Le déroulement des projets de restauration	27
3 – Limites du protocole « Mesures »	28
4 - De nombreux facteurs limitants a la restauration	28
5 - Perspectives.....	33
Conclusion.....	35
Bibliographie.....	1
Annexes.....	6

Liste des figures

Figure 1 : Synthèse des travaux hydrauliques réalisés dans le lit mineur des cours d'eau (Le Bihan, 2013).....	2
Figure 2 : Les variables de contrôle et de réponse (D'après Schumm, 1977).....	5
Figure 3 : Identification des pressions sur les masses d'eau en Bretagne et Pays de la Loire Etat des lieux 2004 (ONEMA, 2012).....	8
Figure 4 : Occupation du sol sur le territoire de l'étude, issu du référentiel Corine Land Cover 2006 simplifié (ONEMA, 2013)	10
Figure 5 : Territoire de l'étude et HER de type 2.....	11
Figure 6 : Déroulement du recensement des travaux de restauration hydromorphologique....	11
Figure 7 : Localisation des travaux de restauration hydromorphologique en Bretagne et Pays de la Loire.....	17
Figure 8 : Répartition des altérations identifiées sur les tronçons avant restauration	18
Figure 9 : Répartition des suivis (à gauche) et mesures de préservation (à droite).....	19
Figure 10 : Moyens de communication utilisés autour des projets de restauration	20
Figure 11 : Les projets de restauration vus par les acteurs locaux	20
Figure 12 : Nombre de stations selon leur rang de Strahler	21
Figure 13 : Répartition des cours d'eau hors et dans talweg et dispersion des distances par rapport au talweg pour les cours d'eau hors talweg.....	21
Figure 14 : Etude des sinuosités	22
Figure 15 : Débits de pleins bords estimés et débits de crue biennale, quinquennale et décennale et rang de Strahler correspondant.....	23
Figure 16 : Fréquence de retour de radier exprimé en n Lpb pour chaque station étudiée et fréquence de radier en grisé.....	24
Figure 17 : Nombre de stations rencontrant n faciès sur 100 mètres	24
Figure 18 : Largeurs moyennes triées par rang de Strahler.....	25
Figure 19 : Variabilité des largeurs : A : toutes les stations. B : sans les 3 variations les plus importantes.....	26
Figure 20 : Représentation des coefficients de rugosité théorique (cours d'eau naturel) et restaurés.....	26
Figure 21 : Encombrement du lit mineur par la végétation. © BOUDOT-GRIMAUD, 2013	27

Liste des tableaux

Tableau 1 : Impacts des travaux hydrauliques sur les paramètres physiques des cours d'eau ...	4
Tableau 2 : Exemples de services écosystémiques fournies par les cours d'eau, inspirée par le programme des nations unies (UICN France, 2012).....	4
Tableau 3 : Définitions des techniques de restauration ciblées.....	12
Tableau 4 : Eléments relevés sur le terrain	13
Tableau 5 : Eléments du projet appréhendés par le questionnaire	15
Tableau 6 : Enjeux des restaurations définis	18
Tableau 7 : Sensibilisation des gestionnaires et des propriétaires riverains.....	21
Tableau 8 : Répartition des stations selon les classes de sinuosités historiques, initiales et restaurées	22
Tableau 9 : Puissances spécifiques obtenues à partir des Q_2	22
Tableau 10 : Comparaison des débits Q_{pb} avec les débits biennaux Q_2 associés et répartition par rang de Strahler	23
Tableau 11 : Comparaison des débits $Q_{pb} > à Q_2$ avec les débits quinquennaux Q_5 puis des débits $Q_{pb} > à Q_5$ avec les débits décennaux Q_{10} associés et répartition par rang de Strahler	23
Tableau 12 : Récapitulatif des gabarits en fonction des débits Q_x et de la technique utilisée .	24
Tableau 13 : Résultats obtenus au test de corrélation de Spearman entre l'encombrement du lit et des variables explicatives	27

Table des abréviations

AELB	Agence de l'Eau Loire-Bretagne
ASTER	Animation et Suivi des Travaux en Rivières et Milieux Aquatiques
CARHYCE	CARactérisation de l'HYdromorphologie des Cours d'Eau
CRE	Contrat de Restauration et d'Entretien
CSP	Conseil Supérieur de la Pêche
CTMA	Contrat Territorial Milieu Aquatique
DAST	Direction de l'Action Scientifique et Technique
DBO5	Demande Biochimique en Oxygène sous 5 jours
DCE	Directive Cadre sur l'Eau
DCIE	Direction de la Connaissance et de l'Information sur l'Eau
DCUAT	Direction du Contrôle des Usages et de l'Action Territoriale
DIR	Délégation InterRégionale
FDPPMA	Fédération Départementale pour la Pêche et la Protection du Milieu Aquatique
Hpb	Hauteur à plein bord
IBD	Indice Biologique Diatomées
IBGN	Indice Biologique Global Normalisé
IBMR	Indice Biologique Macrophyte en Rivière
IPR	Indice Poissons Rivière
IOBS	Indice Oligochètes de Bioindication des Sédiments
HER	HydroEcoRégion
Lpb	Largeur à plein bord
MEDDE	Ministère de l'Ecologie, du Développement Durable et de l'Energie
ONEMA	Office National de l'Eau et des Milieux Aquatiques
Q _x	Débit de fréquence x années (ex : biennale, quinquennale ou décennale)
SD	Service Départemental
SAGE	Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux
SDAGE	Schéma Directeur d'Aménagement et de gestion des Eaux
ZNT	Zone Non Traitée

Glossaire

Annexes hydrauliques : Milieux naturels humides, latéraux au cours d'eau, en relation permanente ou temporaire avec le milieu courant par des connections soit superficielles soit souterraines, créés par la dynamique fluviale (bras morts, îles, lônes, forêts inondables, ripisylves, sources et rivières phréatiques, etc.).

Autoépuration : Ensemble des processus biologiques, chimiques ou physiques permettant à un écosystème (rivières, lacs, mers et océans...) de transformer lui-même les substances le plus souvent organiques qu'il produit ou qui lui sont apportées de l'extérieur. Les organismes vivant dans les milieux aquatiques jouent dans ce processus un rôle important (bactéries, protozoaires, algues, poissons...).

Bassin versant : Surface d'alimentation d'un cours d'eau ou d'un lac. Il se définit comme l'aire de collecte des eaux, considérée à partir d'un exutoire : elle est limitée par le contour à l'intérieur duquel toutes les eaux s'écoulent en surface et en souterrain vers cet exutoire. Ses limites sont des lignes de partage des eaux.

Berges : Talus incliné qui sépare le lit mineur et le reste du lit majeur.

Chenalisation : Concerne toutes les interventions visant à accélérer l'écoulement en augmentant la débitance, par modification du tracé en plan, de la géométrie en travers, de la pente et de la rugosité d'un cours d'eau.

Continuité écologique : Réservoirs de biodiversité et corridors écologiques maintenant une capacité de mouvement entre les réservoirs biologiques par les corridors écologiques.

Continuité latérale : Désigne les échanges biologiques et hydrologiques qui ont lieu entre les cours d'eau, ses annexes hydrauliques et sa plaine alluviale.

Continuité longitudinale : Désigne la libre circulation des flux liquides, solides et des espèces d'amont en aval (et inversement) du cours d'eau.

Continuité verticale : Définit les échanges (physico-chimiques, biologiques) et écoulements hydrauliques entre la rivière et les nappes

souterraines, par l'intermédiaire de la zone hyporhéique.

Couche d'armure : couche de surface grossière résultant de l'exportation des éléments fins pendant et après chaque période de mouvement de tout ou partie de l'éventail granulométrique disponible au transport. Elle est donc remaniée par des phases épisodiques de transport de charge de fond au cours desquelles toutes les classes granulométriques sont actives.

Cours d'eau : La qualification de cours d'eau donnée par la jurisprudence repose sur deux critères : la **présence et la permanence** d'un lit naturel à l'origine et la permanence d'un **débit suffisant** une majeure partie de l'année

Corridors écologiques : Chemins utilisés par la faune et la flore entre différents réservoirs biologiques.

Curage : Opération destinée à extraire et exporter les sédiments qui se sont accumulés par décantation sous l'eau.

Débitance : Débit maximum d'un cours d'eau pour un gabarit donné.

Dérivation : Déplacement du lit mineur d'un cours d'eau, dans ou à l'extérieur de son talweg.

Dévalaison : Descente de certaines espèces de l'amont vers l'aval pour atteindre les eaux maritimes.

Embâcle : Obstruction d'un cours d'eau par un amas de débris végétaux.

Enterrement de cours d'eau : Couverture, busage, drainage, comblement ou canalisation, d'un cours d'eau sur des linéaires variant de quelques dizaines de mètres (les cours d'eau de tête de bassin versant en milieu rural) à plusieurs kilomètres (en milieu urbain notamment).

Espace de mobilité : Espace du lit majeur à l'intérieur duquel le ou les chenaux fluviaux assurent des translations latérales pour permettre la mobilisation des sédiments ainsi que le fonctionnement optimal des écosystèmes aquatiques et terrestres.

Extraction de granulats : Extraction d'un ensemble de grains, de dimensions comprises entre 0 et 125mm, destinés à la construction des ouvrages du bâtiment et du génie civil. Les granulats sont soit d'origine alluvionnaire soit obtenus par concassage de roches massives.

Faciès : Petites portions de cours d'eau présentant une homogénéité sur le plan des vitesses, des profondeurs, de la granulométrie, des profils en travers, de la pente du lit et de la ligne d'eau

Fonctions écologiques : Processus biologiques de fonctionnement et de maintien des écosystèmes.

Génie végétal : Technique visant à concevoir et mettre en œuvre des ouvrages de stabilisation de talus, de berges et de rives, avec des techniques qui allient les principes de l'écologie et du génie en utilisant des végétaux vivants comme matériau de base pour confectionner des armatures végétales.

Hydroécorégions : Zone homogène du point de vue de la géologie, du relief et du climat. C'est l'un des principaux critères utilisés dans la typologie et la délimitation des masses d'eau de surface. 22 hydro-écorégions de type 1 sont identifiées sur le territoire métropolitain, subdivisées en 112 HER de type 2.

Hydromorphologie : Étude de la morphologie des cours d'eau, des variables hydrauliques qui les conditionnent et de leur dynamique. Étude de l'évolution des profils en long et en travers, et du tracé en plan : capture, méandres, anastomoses etc.

Hydrosystème : Système, sur un bassin versant, composé des eaux souterraines et superficielles, des milieux associés et de leurs interactions permettant le développement d'une faune et d'une flore inféodées à ce milieu.

Lit d'étiage : Aussi appelé lit d'été, c'est la partie du lit qui reste toujours en eaux. Il correspond au débit d'étiage.

Lit majeur : Lit maximum qu'occupe un cours d'eau dans lequel l'écoulement ne s'effectue que temporairement, lors du débordement des eaux hors du lit mineur, en période de très hautes eaux, en particulier lors de la plus grande crue historique. Le lit majeur est mis en eau lors de crues de fréquence moyenne à rare.

Lit mineur : Partie du lit en eau pour des débits compris entre le débit d'étiage et le débit de pleins bords. Partie du lit comprise entre des berges franches, et dans laquelle l'intégralité de l'écoulement s'effectue la quasi-totalité du temps, en dehors des périodes de très hautes eaux et de crues débordantes.

Lit de pleins bords : Correspond à la limite au-delà de laquelle l'eau se répand dans la plaine alluviale. Il correspond au débit de pleins bords (ou débit morphogène).

Masse d'eau : Unité hydrographique (eau de surface) ou cohérente, présentant des caractéristiques assez homogènes pour définir un même objectif. 5 catégories : cours d'eau, plans d'eau, eaux de transition, eaux côtières, eaux souterraines.

Montaison : Migration par laquelle certaines espèces de poissons comme le saumon, quittent le milieu salé pour remonter les fleuves et s'y reproduire.

Mouille : Faciès de type lentique, caractérisé par une lame d'eau importante (> 60 cm de hauteur) et des faibles vitesses de courant.

Radier : Partie d'un cours d'eau caractérisée par des vitesses de courant assez fortes, une lame d'eau plutôt mince et des fonds caillouteux. S'oppose au terme « mouille ».

Rang de Strahler : Classification des réseaux hydrographiques permettant de hiérarchiser l'ensemble des tronçons de cours d'eau d'un bassin versant, de l'amont vers l'exutoire, en leur attribuant une valeur n pour caractériser leur importance c'est-à-dire déterminer leur rang (ou leur ordre) dans le réseau.

Rectification : Recoupement des méandres et des sinuosités afin d'accélérer le passage d'une crue et/ou pour faciliter l'exploitation des parcelles.

Recalibrage : Augmentation du gabarit du cours d'eau pour permettre le transit sans débordement d'une crue quinquennale à bi-centennale selon les zones (urbains ou rurales).

Réseau hydrographique annexe : Correspond au linéaire de talwegs, de fossés, de drains souterrains ne répondant pas aux critères de reconnaissance des cours d'eau. Il est en connexion directe ou indirecte avec le cours d'eau, il peut également présenter une

fonctionnalité biologique mais de 2nd ordre. Ce type de réseau est (à l'exception des talwegs) totalement artificiel et a été conçu pour permettre le drainage des parcelles ou l'évacuation des eaux pluviales.

Réservoirs biologiques : Zones où les espèces peuvent vivre toute ou partie de leur existence (reproduction, développement, alimentation, abri...).

Résilience : Capacité d'un écosystème à revenir à sa trajectoire première de succession après disparition des perturbations qui l'en avait dévié.

Services écosystémiques : Bénéfices retirés par l'homme de processus biologiques.

Seuil : Élévation naturelle ou artificielle du lit, formant un ressaut, mais sans partie émergée.

Talweg : Ligne reliant les points les plus bas d'une vallée.

Variable de contrôle : S'imposent directement à la rivière et contrôlent son évolution.

Variable de réponse : Permettent à la rivière de s'adapter aux mutations des variables de contrôle.

Zone hyporhéique : Zone de contact entre les eaux de surface et les eaux souterraines.

Depuis l'Antiquité, l'Homme a modifié durablement les milieux aquatiques en réponse à différents usages. Ainsi, les cours d'eau ont été utilisés comme source d'énergie, moyen de transport, source d'alimentation, d'irrigation afin de développer le tissu urbain, industriel et les voies de communication (Roche, 1984). C'est au cours du siècle dernier que les aménagements se sont intensifiés et ont conduit à artificialiser la majorité des cours d'eau à l'échelle européenne et nationale. L'ensemble de ces travaux ont altéré fortement la qualité des cours d'eau et leur capacité à garantir des services écosystémiques de qualité. En 2013, face aux nouveaux enjeux comme l'augmentation de la démographie ou encore les changements climatiques (Giuntoli *et al.*, 2012), l'état actuel des cours d'eau ne permet pas de subvenir aux besoins des générations futures.

Partant de ce constat et afin d'améliorer et préserver la ressource en eau, la Directive Cadre européenne sur l'Eau (DCE) de 2000 fixe un objectif ambitieux d'atteinte du bon état écologique des masses d'eau à l'horizon 2015. Or, l'état des lieux réalisé en 2004 révèle que l'hydromorphologie est un des principaux facteurs de non atteinte du bon état écologique (AELB, 2005). La restauration hydromorphologique est ainsi devenue incontournable. D'un objectif initial au début des années 1970 qui se voulait uniquement piscicole, les opérations ont évolué et tendent aujourd'hui à intégrer les objectifs de la DCE. Cependant peu de projets ont bénéficié d'un suivi afin d'évaluer l'efficacité des opérations réalisées. Des sites pilotes ont été mis en place dès 2008 sur le territoire français afin de tester et de suivre les différentes techniques de restauration. Toutefois, les résultats ne seront disponibles qu'en 2017.

Confrontée aux évolutions rapides des techniques de restauration, au manque de connaissance sur les projets réalisés ainsi qu'aux attentes des nombreux partenaires, la délégation interrégionale Bretagne Pays de la Loire de l'ONEMA a souhaité réaliser une étude sur les opérations de restauration n'ayant pas systématiquement fait l'objet d'un état initial nécessaire à un suivi. La présente étude a pour principal objectif l'identification de facteurs limitant l'efficacité et la pérennité des actions pour les techniques ambitieuses telles que la création d'un nouveau lit, le déblai/remblai, la recharge granulométrique, le reméandrage et la remise dans le talweg.

Dans un premier temps, une synthèse bibliographique a été réalisée afin d'apporter un éclairage sur la restauration hydromorphologique des cours d'eau et d'identifier les éléments utiles à l'évaluation des projets de restauration. Dans un second temps, un recensement des opérations a permis la sélection de 30 projets sur le territoire Bretagne, Pays de la Loire. Une méthodologie d'évaluation de ces projets a été élaborée et appliquée afin de répondre à l'objectif principal de cette étude.

I - SYNTHÈSE BIBLIOGRAPHIQUE

1 - LES TRAVAUX HYDRAULIQUES, CAUSES DE DÉGRADATION DES COURS D'EAU

1.1 - DÉFINITION

Les travaux hydrauliques comprennent tous les types d'intervention sur les cours d'eau ayant pour objectif d'organiser le milieu naturel et le rendre compatible avec les diverses activités humaines (OIEAU, 1993). Ils se rencontrent sous différents termes comme aménagement, entretien ou encore chenalisation.

La **chenalisation** concerne toutes les interventions visant à accélérer l'écoulement en augmentant la débitance, par modification du tracé en plan, de la géométrie en travers, de la pente et de la rugosité d'un cours d'eau. Sont inclus les ouvrages longitudinaux (protection de berges) et transversaux de stabilisation (seuils) qui accompagnent généralement ces interventions pour maintenir une forme hydraulique « efficace » (Wasson *et al.*, 1998). La **rectification**, le **recalibrage**, le **curage**, l'**enterrement**, la **dérivation**, la **dévégétalisation** et le **retrait du bois mort et de la granulométrie** sont autant de travaux compris dans le terme « chenalisation ».

La figure 1 ci-dessous représente schématiquement les travaux hydrauliques les plus fréquemment effectués dans le lit mineur des cours d'eau français.

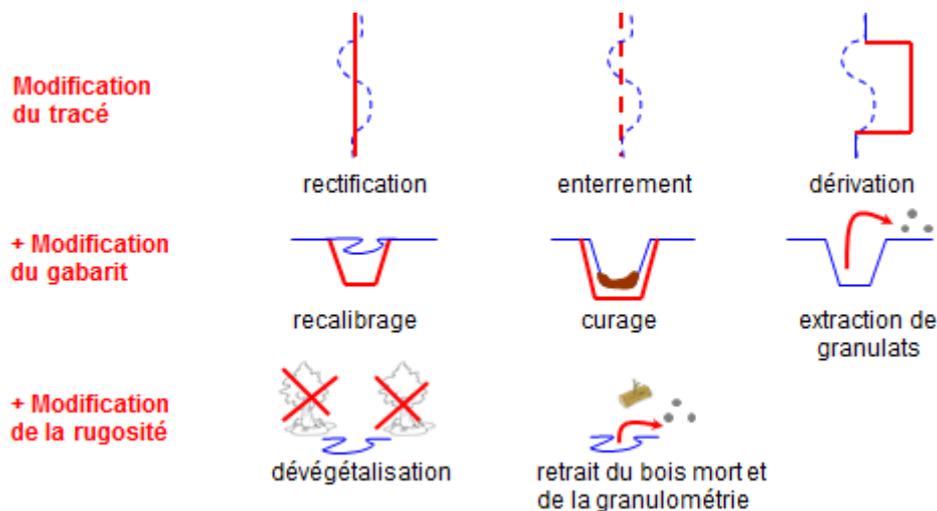


Figure 1 : Synthèse des travaux hydrauliques réalisés dans le lit mineur des cours d'eau (Le Bihan, 2013)

1.2 - HISTORIQUE

Les traces témoignant de la chenalisation des cours d'eau remontent au début du Moyen-Age, à partir du V^{ème} siècle. Du X au XII^{ème} siècle, l'espace urbain connaît une nouvelle organisation qui s'accompagne d'une politique de conquête d'espaces réputés insalubres. Commence alors l'assèchement des zones humides notamment par la suppression de bras morts et d'îlots ou par la

rectification du lit principal (Leguay, 2002). Au XV^{ème} siècle, de grands travaux de rectification sont engagés pour aménager les voies navigables et favoriser le flottage de bois. Dans le but de pérenniser ces travaux, des actions d'entretien du lit comme le **curage** et la **gestion de la ripisylve** y sont souvent associées. Le **bois** est systématiquement **retiré** des chenaux (Benoit *et al.*, 2004). Toutefois, c'est au XX^{ème} siècle que la chenalisation va connaître une croissance accrue avec le développement d'outils mécaniques toujours plus performants. De plus, les politiques agricoles et urbaines vont promouvoir l'aménagement hydraulique des cours d'eau, le drainage des terrains cultivables et des zones humides afin d'agrandir les surfaces exploitables et constructibles (Bardon, 2009). La plupart des travaux de chenalisation en zone agricole vont s'effectuer entre 1950 et 1980.

En Bretagne et Pays de la Loire, rares sont les territoires indemnes de travaux hydrauliques (Jan, 2013). Par exemple, en Ille-et-Vilaine, plus de 90% du linéaire de cours d'eau est recalibré. La chenalisation constitue une des principales causes de dégradation des cours d'eau (Wasson *et al.*, 1998).

Les travaux hydrauliques ont longtemps été conduits dans l'ignorance des fonctionnements hydrologique et écologique des systèmes fluviaux. Aujourd'hui, il est établi que les altérations majeures des hydrosystèmes sont en partie imputables à ces travaux.

1.3 - LES IMPACTS DES TRAVAUX HYDRAULIQUES

Les travaux hydrauliques effectués à large échelle sur le territoire amènent à dévaloriser l'image des cours d'eau aux yeux du public, en font un élément mineur du paysage. Ce qui résulte, au final, à l'acceptation de ces travaux malgré leurs impacts négatifs sur la fonctionnalité des cours d'eau. En effet, ils modifient les caractéristiques des cours d'eau selon quatre dimensions interconnectées : les dimensions longitudinales (d'amont en aval), verticales (la zone hyporhéique¹), latérales (lit majeur) et la dimension temporelle. Ils entraînent une accélération brutale de l'évolution morphologique des cours d'eau : incision, érosion latérale, perturbation de la dynamique sédimentaire (Niemi *et al.*, 1990). Ces impacts sont restitués dans le tableau 1 ci-dessous :

¹ Zone d'interface rivière-nappe. Définie comme l'ensemble des sédiments saturés en eau situés au dessous et à côté d'une rivière, contenant une certaine proportion d'eau de surface (Datry, 2008).

Tableau 1 : Impacts des travaux hydrauliques sur les paramètres physiques des cours d'eau
(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 [...]
Ecologique	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 [...]

Ces altérations physiques créent des dysfonctionnements hydromorphologiques, et consécutivement écologiques. Ils contribuent à la dégradation de la qualité de la ressource en eau et des milieux aquatiques ainsi qu'à la perte de la biodiversité et de la biomasse (Wasson *et al.*, 1998). L'importance de ces impacts est fonction du type de cours d'eau, du linéaire, de l'ancienneté et de l'ampleur des travaux et affectent durablement les services écosystémiques (Malavoi *et al.*, 2007).

1.4 - SERVICES ECOSYSTEMIQUES

Le milieu naturel rend de nombreux services aux sociétés humaines et contribue à leur développement et leur bien-être. Les cours d'eau, partie intégrante des hydrosystèmes, offrent des services écosystémiques, cités dans le tableau 2, et des ressources biologiques essentiels pour l'existence et le bien-être des êtres humains.

Tableau 2 : Exemples de services écosystémiques fournies par les cours d'eau, inspirée par le programme des nations unies (UICN France, 2012)

Régulation	Approvisionnement	Soutien	Culturel
Pollution et qualité des eaux Régulation du régime hydraulique Régulation des risques naturels Régulation du climat global et local	Pêche et pisciculture Ressource en eau Industries Energie Ressources génétiques	Offre d'habitats Formation et rétention des sols Cycle des nutriments Production primaire	Loisirs et écotourisme Paysage Valeur de la biodiversité et patrimoine Source et support d'inspiration artistique

La prise en compte de ces enjeux essentiels pour notre société favorise depuis quelques années la mise en œuvre d'actions de restauration (ONEMA, 2010).

2.1 - DEFINITION

2.1.1 - L'HYDROMORPHOLOGIE

L'hydromorphologie des cours d'eau est une science qui étudie les processus physiques régissant le fonctionnement des cours d'eau et les formes qui en résultent. Les cours d'eau non modifiés par les activités humaines sont des systèmes à "l'équilibre dynamique". La notion "d'équilibre dynamique" (annexe 2) signifie un ajustement permanent des caractéristiques physiques des cours d'eau. Un cours d'eau en bon état présente une dynamique naturelle, des évolutions latérales et verticales (Malavoi *et al.*, 2007)

Dans des conditions naturelles relativement constantes, les rivières tendent à établir un équilibre dynamique entre deux types de variables (figure 2) : les **variables de contrôle**, comme le débit liquide et la charge solide, et **de réponse** comme la largeur, la sinuosité (Schumm, 1977). Les variables de contrôle principales et secondaires s'imposent directement à la rivière et contrôlent son évolution physique. Les variables de réponse permettent à la rivière de modeler sa morphologie en fonction des fluctuations des variables de contrôle (Malavoi *et al.*, 2010).

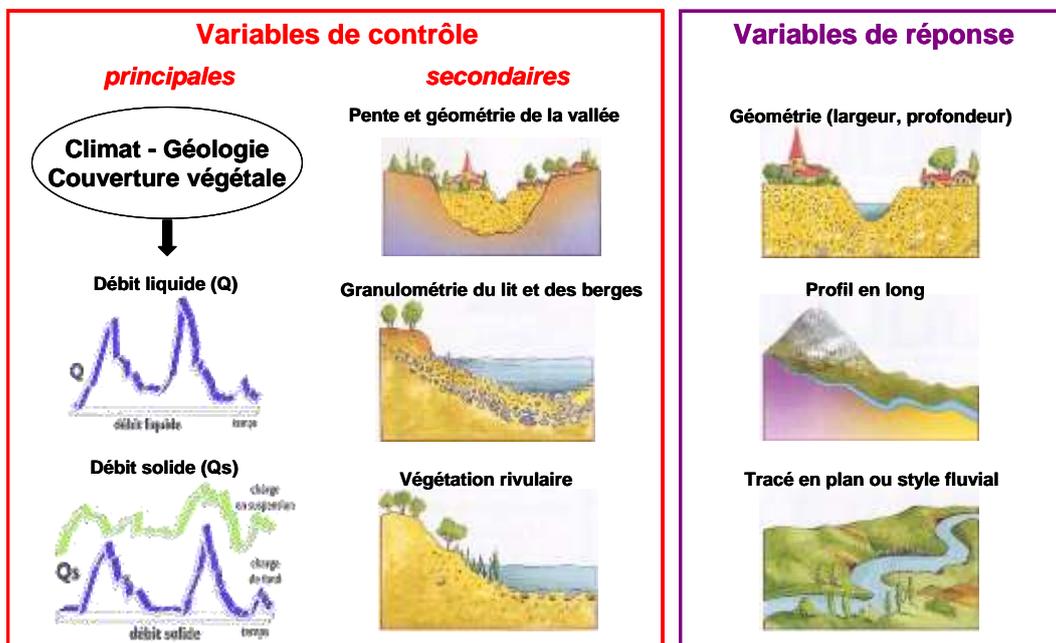


Figure 2 : Les variables de contrôle et de réponse (D'après Schumm, 1977)

L'hydromorphologie et la DCE

La DCE définit le bon état écologique des masses d'eau selon des critères biologiques² et physico-chimiques³. L'état hydromorphologique des cours d'eau ne constitue pas un indicateur utilisé dans l'évaluation de la qualité des masses eau, sauf comme condition du très bon état. Cependant, la DCE intègre l'hydromorphologie comme facteur explicatif de l'état biologique. Les paramètres hydromorphologiques soutenant les paramètres biologiques, précisés par la circulaire DCE 2005/12, sont :

- les **conditions morphologiques** : diversité des **profondeurs**, de la **largeur** de la rivière, du **substrat** du lit et de la **végétation des rives**, annexes hydrauliques fonctionnelles,
- 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 (temps de retour 1 à 3 ans), connexions avec les eaux souterraines.

Ces critères aident à définir le bon fonctionnement hydromorphologique. Il est nécessaire de rappeler que cette définition résulte d'une évolution lente des objectifs de restauration et évolue encore avec les connaissances (Brookes, 1988 ; Malavoi *et al.*, 2007 ; Oraison *et al.*, 2011).

2.1.2- LA RESTAURATION HYDROMORPHOLOGIQUE

Les différents guides lus lors de cette synthèse bibliographique et recensés dans le tableau en annexe 3 révèlent que la notion de "restauration" n'est pas strictement définie. En théorie, la **restauration** est le processus qui vise à faciliter le **rétablissement d'un état antérieur** dans toute sa dimension et sa complexité. Au niveau des écosystèmes, les enjeux sont de maintenir ou d'accroître la productivité primaire ou secondaire et d'améliorer la biodiversité et la stabilité. Au niveau des paysages, il s'agit de faciliter la réintégration quand ils ont été gravement fragmentés (Aronson, 1995 ; Pierron, 2005 ; ONEMA, 2010).

La **restauration** physique des cours d'eau vise à rétablir les principaux processus hydromorphologiques permettant à l'hydrosystème d'être fonctionnel au niveau morphologique et écologique, tout en étant autonome par la suite (Bardon, 2009 ; Malavoi, 2006 ; ONEMA, 2010). Elle doit être menée à une échelle significative, au moins supérieure à 20 fois la largeur à pleins bords, pour avoir un impact réel et pérenne (Malavoi, 2006). Cette définition correspond en

² IBD, IBGN, IBMR, IPR, IOBS.

³ L'oxygène dissous, Demande Biochimique en Oxygène sous 5 jours, Carbone organique dissous, Température, pH, Concentrations en Azote, Phosphore, Chlorures et Sulfates, Conductivité.

général à d'autres termes trouvés dans la littérature comme récréation, revitalisation, renaturation, réhabilitation (ONEMA, 2010 ; Pierron, 2005 ; Tassard, 2011). Les définitions rencontrées dans les guides de restauration s'accordent sur deux points:

- réhabilitation et restauration ne sont pas différenciées,
- la restauration au sens strict est hors de portée, le plus souvent parce que l'état initial des milieux est inconnu ou hors de portée.

2.2 - EVOLUTION DES OBJECTIFS DE LA RESTAURATION

Dès les années 1950, les premières restaurations de cours d'eau ont lieu. A cette époque, il s'agit de lutter contre la pollution due aux eaux d'origines domestique et industrielle (Brookes, 1998). A partir de la fin des années 1970, plusieurs scientifiques et techniciens proposent de "renaturer" certains cours d'eau très dégradés. Cette proposition coïncide avec l'évolution du temps de travail et l'apparition de la notion de loisir dans les sociétés (Binder, 1979). La nature et les rivières acquièrent alors une valeur récréative. Les premiers travaux de restauration physique des cours d'eau sont alors recensés en Allemagne et en Suisse (AERMC, 2006). Parallèlement en France, les premiers travaux sont entrepris au début des années 1970, notamment en Bretagne. Les préoccupations sont alors piscicole et paysagère. Les pêcheurs ont un rôle prépondérant au commencement de la restauration des cours d'eau. En 1981, les premiers contrats de rivière sont mis en place afin d'atteindre les objectifs des cartes départementales de qualité⁴ (Bravard, 2010). Les premières mesures d'entretien et de restauration des cours d'eau apparaissent en 1998. Ces dernières se limitent alors à une gestion de la ripisylve. Les premiers Contrats de Restauration et d'Entretien (CRE) des cours d'eau voient le jour dans les années 2000.

L'évolution récente des enjeux des travaux de restauration est appuyée par les réglementations européennes et nationales. La loi sur l'eau du 3 janvier 1992, remplacée par la Loi sur l'Eau et les Milieux Aquatiques (LEMA) de 2006 définit le cadre actuel des réglementations liées à la restauration des cours d'eau. L'état des lieux exigé par la DCE permet d'identifier les éléments de pression liés aux activités humaines sur les masses d'eau, susceptibles d'entraîner un impact sur leurs qualités et fonctionnalités. En Bretagne et Pays de la Loire, l'état des lieux de 2004, figure 3, révèle que la morphologie est la première pression explicative du risque de non atteinte du bon état écologique en 2015 (AELB, 2005).

⁴ Carte des cours d'eau d'un département illustrant par des couleurs les différents niveaux d'objectifs de qualité à atteindre (physico-chimique, hydrobiologique et environnementale).

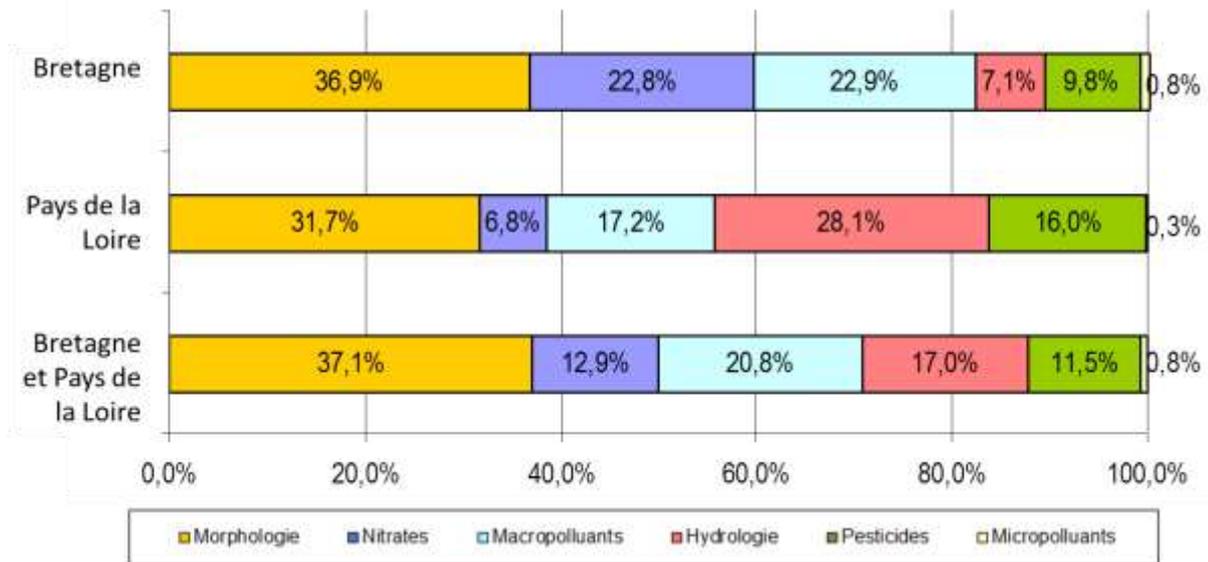


Figure 3 : Identification des pressions sur les masses d'eau en Bretagne et Pays de la Loire Etat des lieux 2004 (ONEMA, 2012)

Ainsi, les projets de restauration mis en œuvre ont pour nouvel objectif de rétablir le bon état morphologique en vue d'atteindre le bon état écologique des cours d'eau. L'agence de l'eau Loire-Bretagne dédie, à travers son 10^{ème} programme pour la période 2013-2018, 11% de son budget, soit 283 millions d'euros, aux actions de restauration et d'entretien des cours d'eau et des zones humides afin d'atteindre le bon état de toutes les eaux (AELB, 2012). L'évolution des enjeux et des techniques utilisées trouvent leurs illustrations dans les différents guides de restauration hydromorphologique des cours d'eau (annexe 3). Les techniques actuellement utilisées ont pour principal objectif l'atteinte du bon état écologique et tendent à favoriser de plus en plus l'auto-ajustement des cours d'eau.

2.3 - DE LA RESTAURATION A DE NOUVELLES REGLES D'AMENAGEMENTS

L'évolution des techniques de restauration et la prise en compte de nouveaux impératifs a fait évoluer les règles d'aménagements et d'entretien des cours d'eau. Cela se traduit par exemple par l'adoucissement des méthodes d'entretien comme le "non-enlèvement" systématique des embâcles ou encore une gestion modérée des ripisylves (Le Lay & Piégay, 2007). La réglementation actuelle impose aux riverains des cours d'eau non domaniaux d'entretenir régulièrement le cours d'eau. Cette réglementation et l'arrêté de prescriptions générales du 30 mai 2008 préconisent une intervention raisonnée visant simplement le bon écoulement des eaux. Le curage, qui n'est plus cité dans l'article L.215-14 CE, ne peut plus être assimilé à une opération courante mais à une opération lourde, ce qui engendre une procédure administrative de

déclaration ou d'autorisation (Lumet, 2011 ; Goron, 2012). Un des premiers objectifs énoncé dans le Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SDAGE) du bassin Loire Bretagne 2010-2015 est "d'empêcher toute nouvelle dégradation des milieux".

2.4 - SUIVIS DES RESTAURATIONS DE COURS D'EAU

Aujourd'hui, il y a beaucoup d'attentes sur la restauration hydromorphologique des cours d'eau. Il s'agit d'investissements importants pour les prochaines décennies en réponse à la DCE. Cependant, les initiatives sont encore modérées tant en termes d'ambition que d'échelle d'actions souvent inférieures à 1 km (Boutet-Berry, 2013). Les structures engagées dans la restauration des cours d'eau (Syndicats de rivières, collectivités locales, SAGE, établissements publics territoriaux de bassin, bureaux d'études, acteurs de la pêche et associations) développent actuellement leurs compétences dans ce domaine.

Les premières restaurations n'ont pas fait l'objet de suivis, ou alors minimalistes comme les suivis photographiques. Le manque de suivi est général dans le monde, aux Etats-Unis, sur 37000 opérations de restauration réalisées, seuls 10% ont fait l'objet d'un suivi (Bernhardt *et al.*, 2005). Cette absence de suivis est un manque à gagner. En effet, sans suivi il est impossible de caractériser les principaux facteurs de succès et d'échec (Muotka, 2002 ; Pander & Geist, 2013). Les premiers éléments de suivi scientifique minimal ont été proposés en 2010 par Malavoi et Souchon. En 2012, une aide à la définition d'une étude de suivi reprend ces principaux éléments et apporte un complément sur les méthodes à mettre en place (Navarro *et al.*, 2012).

Aujourd'hui, à l'échelle nationale, une trentaine de sites de démonstrations⁵ réalisent ces suivis minimums. Les données sont en cours d'acquisition et les premières analyses ne seront réalisées qu'en 2017 (ONEMA, 2013). En parallèle, de nouveaux indicateurs sont expérimentés sur des sites pilotes⁶ (Péress, 2013).

⁵ Site sur lequel une méthode/technologie déjà testée et validée sur le plan scientifique est mise en œuvre afin d'organiser un retour d'expériences mutualisées pour éclairer les décideurs et les scientifiques

⁶ Site sur lequel va pouvoir être testée une méthode n'ayant jamais été mise en œuvre. Il s'agit d'un site support d'innovation en appui à la connaissance, à la restauration et à la gestion.

II - MATERIEL ET METHODES

Cette étude s'est déroulée en plusieurs étapes dont la première était de recenser les travaux de restauration et de cibler des techniques de restauration en devenir. 30 sites sélectionnés à partir du recensement ont fait l'objet d'une visite de terrain afin d'évaluer différents paramètres à partir de protocoles élaborés au cours de la phase de recensement.

En parallèle, un comité de pilotage a été créé dans le but de mieux comprendre et de discuter les attentes des gestionnaires et, pour la suite, de faciliter la diffusion des résultats. Ce comité réunissait les FDPPMA 22, 35 et 56, les cellules ASTER 22 et 56, Géosciences Rennes, le SAGE Couesnon, l'Agence de l'eau Loire-Bretagne et l'ONEMA. Deux réunions ont permis de valider les protocoles et de définir le support de diffusion ainsi que les éléments clefs à y intégrer.

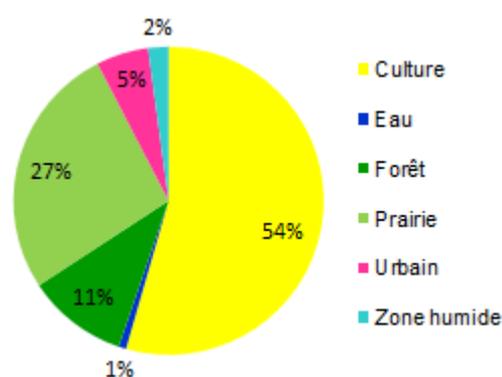
1 - LE SECTEUR D'ETUDE ET LE CHOIX DES SITES

1.1 - SYNTHESE BIBLIOGRAPHIQUE

Cette première phase a permis d'identifier les atteintes physiques faites aux cours d'eau et les moyens engagés pour restaurer les cours d'eau. Les informations sont issues de la base bibliographique « End Note » de la DIR 2, des organismes tels que les FDPPMA et les Agences de l'eau.

1.2 - SECTEUR D'ETUDE

La campagne d'échantillonnage se déroule sur les régions Bretagne et Pays de la Loire qui appartiennent à la zone administrative de la DIR 2 de l'ONEMA. Ces régions occupent la partie



occidentale du bassin Loire Bretagne. Les superficies sont de 27 208 km² pour la Bretagne et 32 082 km² pour les Pays de la Loire. Ces deux régions sont sous l'influence d'un climat tempéré océanique (amplitudes thermiques annuelles peu marquées et pluviométrie abondante et régulière). Les cultures représentent plus de la moitié de l'occupation des sols, viennent ensuite les prairies et les forêts (figure 4).

Figure 4 : Occupation du sol sur le territoire de l'étude, issu du référentiel Corine Land Cover 2006 simplifié (ONEMA, 2013)

Les HydroEcoRégions⁷ (HER) de type 1 sont le Massif Armoricain et les Tables Calcaires, elles se déclinent en 7 HER de type 2 (figure 5).



Figure 5 : Territoire de l'étude et HER de type 2

1.3 - RECENSEMENT

Le recensement des travaux de restauration hydromorphologique des cours d'eau s'est effectué en plusieurs étapes, de mars à mai 2013, auprès des différents partenaires du territoire, selon les étapes présentées figure 6.

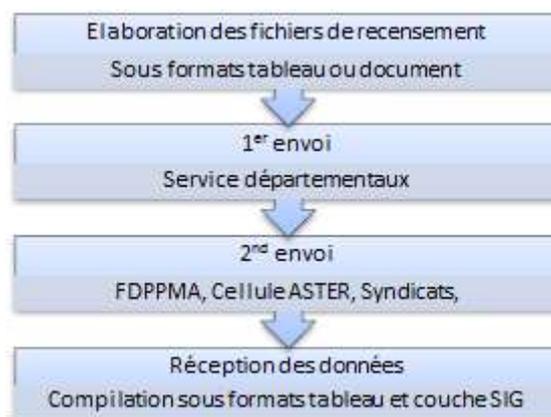


Figure 6 : Déroulement du recensement des travaux de restauration hydromorphologique

⁷ Hydroécorégion HER : Zone homogène du point de vue de la géologie, du relief et du climat. C'est l'un des principaux critères utilisés dans la typologie et la délimitation des masses d'eau de surface. 22 hydro-écorégions de type 1 sont identifiées sur le territoire métropolitain, subdivisées en 112 HER de type 2 (Malavoi & Bravard, 2010).

1.4 - SELECTION DES SITES

Suite aux retours des partenaires lors du recensement, une sélection de sites à étudier a été faite selon différents critères :

- **la répartition spatiale des opérations** : Echantillonner l'ensemble du territoire afin de diversifier les typologies de cours d'eau
- **la (ou les) technique(s) utilisée(s)** : Cibler les techniques ambitieuses (tableau 3). Il s'agit de la création d'un nouveau lit, du déblais/remblais, de la recharge granulométrique, de la remise dans le talweg et du reméandrage (annexe 4).

Tableau 3 : Définitions des techniques de restauration ciblées

Création de lit	Restaurer un tracé et un gabarit adaptés aux caractéristiques du cours d'eau.
Déblai/remblai	Modifier la géométrie du lit mineur.
Recharge granulométrique	Rehausser le fond du lit mineur par apports de granulométrie.
Reméandrage	Allonger le tracé et réduire la pente.
Remise dans le talweg	Replacer le cours d'eau en fond de vallée.

- **l'année de réalisation des travaux** : En effet, une restauration trop récente ne peut faire l'objet d'une évaluation. L'optimum aurait été une réalisation avant 2009 puisque les crues dites « morphogènes » surviennent 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).

Les résultats du recensement n'ont pas permis de répondre à l'ensemble des critères de sélection, certains départements étant dotés de peu de sites restaurés ou alors trop récents.

2 - METHODOLOGIE UTILISEE POUR LES RESTAURATIONS SELECTIONNEES

La synthèse bibliographique a permis de définir différents paramètres d'évaluation des opérations de restauration hydromorphologique. Ces paramètres sont étudiés à l'aide de 3 filtres d'analyses : « Mesures », « Données complémentaires » et « Questionnaire ». Les protocoles associés se trouvent en annexes 5 et 6.

2.1 - MESURES SUR LE TERRAIN

Le protocole « Mesures » s'applique sur une station positionnée sur le linéaire restauré. La longueur de station est définie par la relation : 14 fois la largeur pleins bords (Lpb) du cours d'eau (CARHYCE, 2008). 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. Ce protocole permet d'obtenir un ensemble d'éléments qualifiant l'hydromorphologie du cours d'eau. Les éléments évalués sont inscrits dans le tableau 4.

Tableau 4 : Eléments relevés sur le terrain

Echelle d'observations	Descripteurs	Nature des données	Objectifs de mesure	Référence bibliographique
Vallée	Forme de la vallée	Qualitative	Dynamique du cours d'eau	Protocole RHS, 2003
Vallée	Position du cours d'eau dans son talweg	Quantitative	Pression anthropique	-
Station	Niveau d'intermittence des écoulements	Qualitative	Dynamique du cours d'eau	Fritz <i>et al.</i> , 2006
Station	Zones présentes : érosion, dépôt, équilibre			-
Station	Distance écologique et euclidienne	Quantitative	Caractéristique physique du cours d'eau Estimation du débit pleins bords selon Manning-Strickler	Mathieu, 2010
Station	Hauteur totale	Quantitative		CARHYCE, 2008
Station	Largeur pleins bords	Quantitative		CARHYCE, 2008
Ponctuel	<u>3 transects complets</u> : Largeur mouillée Largeur pleins bords Périmètre des berges Zone de mesure (Erosion, Equilibre, Dépôt) Présence de sous berges et profondeur maximale <u>Tous les 1/10 de Lpb</u> : Hauteur mouillée Hauteur totale Granulométrie	Quantitative		CARHYCE, 2008
Station	Pente de la ligne d'eau Pente du fond			CARHYCE, 2008
Station	Matériaux constitutifs de la berge Degré d'irrégularité Variations de sections Présence d'obstacles Végétation du lit et des berges Méandrement	Qualitative	Estimer le coefficient de rugosité de Manning-Strickler K selon la formule de Cowan	CARHYCE, 2008
Station	Faciès d'écoulements	Qualitative	Dysfonctionnement hydromorphologique Macrodescripteur de diversité des habitats aquatiques Pression anthropique	Malavoi & Souchon, 2002
Station	Facteurs de diversification	Quantitative		-
Ponctuel	Mesures granulométriques sur un radier			Wolman, 1954
Station	Evaluation du colmatage	Qualitative		Chandesris, 2008
Station	Présence d'une couche d'armure			Malavoi, 2010
Ponctuel	Force appliquée pour décoller les éléments granulométriques			-
Station	Occupation du sol	Qualitative	Pression anthropique	-
Station	<u>Description de la ripisylve</u> : Strates présentes Luminosité du lit mineur	Qualitative Quantitative	Composition, structure et importance de la ripisylve	-

Station	Description de la strate arborée : Distance à la berge Epaisseur moyenne Linéaire occupé Espèces présentes Nombre d'arbres par classe d'âge	Quantitative Quantitative Quantitative Qualitative Quantitative		-
Station	Composition granulométrique des berges	Qualitative	Erosion et mobilité du lit	Malavoi, 2010
	Végétation des berges			
	Inclinaison des berges			
	Appréciation sur l'érodabilité des berges			
	Présence de protection de berges			
	Observations sur la stabilité des berges			
Station	Espace de mobilité			
Station	Récupération de végétation spontanée	Qualitative	Pression anthropique	-

2.2 - DONNEES COMPLEMENTAIRES

La méthodologie détaillée appliquée pour chacune de ces données est présentée en annexe 7.

2.2.1 - POSITION DU COURS D'EAU DANS SON TALWEG

Le tracé historique est vérifié sur le terrain ainsi que par analyse cartographique à partir de photographies aériennes anciennes (1950-1960) obtenues à partir des sites cms.geobretagne.fr (sites bretons) et www.geoportail.gouv.fr (sites ligériens). Si le cours d'eau ne se trouve pas dans son talweg, trois distances au talweg sont mesurées et moyennées.

2.2.2 - SINUOSITE HISTORIQUE ET INITIALE

La sinuosité initiale correspond à la sinuosité rencontrée avant les restaurations et permet d'identifier les techniques favorisant une augmentation de la sinuosité. Les sinuosités historiques et avant restauration (initiales) sont obtenues à partir de photographies aériennes anciennes et des orthophotoplans selon le même principe que sur le terrain :

$$S_i = \text{longueur écologique} / \text{longueur euclidienne}$$

La sinuosité historique correspond à celle de 1950. A cette date la majorité des cours d'eau étudiés n'étaient pas recalibrés, ni rectifiés à quelques exceptions. S'agissant d'une variable temporelle, ces sinuosités historiques renseignent la sinuosité des cours d'eau avant les travaux hydrauliques. En effet, il est difficile d'estimer la variabilité naturelle de la sinuosité de ces cours d'eau de 1950 à aujourd'hui. Il est fortement probable que la sinuosité observée après travaux, notamment dans le cadre de rectification, soit très différente et nettement moins importante que celle qui aurait été engendrée par une évolution naturelle.

2.2.3 - DEBITS DE REFERENCE

Les débits de référence biennaux, quinquennaux et décennaux (Q_2 , Q_5 et Q_{10}) sont obtenus via les données disponibles sur la banque HYDRO et permettent de confronter les gabarits mesurés à des gabarits théoriques. Les débits biennaux ont également servi à calculer les puissances spécifiques des cours d'eau prospectés.

2.2.4 - RUGOSITE THEORIQUE

La rugosité théorique a été calculée avec la méthode de Cowan. Les indices choisis sont ceux de cours d'eau en conditions naturelles : une reprise systématique de la granulométrie actuelle des berges, une irrégularité importante, une variation de sections fréquentes, une présence d'obstacles importante (bois en rivière, blocs, atterrissement,...), la sinuosité est reprise sur la sinuosité historique, une végétation haute. Ce dernier critère est adapté en tête de bassin où la présence naturelle de ripisylve induit une faible productivité primaire (Karlsson, 2005). Ainsi la végétation est faible pour les cours d'eau de rang 1 et moyenne pour les cours d'eau intermittent.

2-3 - QUESTIONNAIRE

Les retours d'expérience comme le recueil d'expériences sur l'hydromorphologie (ONEMA, 2010) révèlent que le succès d'un projet dépend des gestionnaires (en termes de sensibilité et de technicité) mais également de l'implication des acteurs locaux afin que chacun s'approprie le projet de restauration. A partir de ce constat, ce questionnaire, dont les éléments sont présentés en tableau 5, complété avec le maître d'ouvrage, permet de comprendre comment s'est déroulé le projet de la phase diagnostic à l'après restauration.

Tableau 5 : Eléments du projet appréhendés par le questionnaire

Phase ciblée	Descripteurs
Diagnostic	<u>Diagnostic des conditions altérées :</u> Pressions sur les bassins versants Pressions autour des tronçons à restaurer Identification des altérations et dates des travaux hydrauliques Impacts identifiés Etude du réseau hydrographique annexe Enjeux et objectifs définis Etat des lieux initial Identification des conditions de référence
Définition des travaux	Usages à concilier Choix des techniques Dimensionnement des techniques Choix des engins Dimensionnement des gabarits Cadre des opérations Aspects réglementaires

Réalisation des travaux	Périodes de réalisation Mesures préventives Imprévus de réalisation Aménagement du réseau hydrographique annexe
Après travaux	Facteurs limitants Problèmes survenus après la restauration Suivis Mesures de préservation Objectifs initiaux atteints Entretien des aménagements Dialogue avec les gestionnaires et propriétaires riverains
Sensibilisation du public	Communications effectuées autour des projets Moyens de diffusion
Bilan du projet	<u>Selon le maître d'ouvrage :</u> Points positifs Points négatifs Recommandations techniques <u>Vision des acteurs :</u> Acceptation du projet Documents associés à la restauration

2.4 - ANALYSE STATISTIQUE DES DONNEES

L'analyse statistique des données récoltées sur le terrain est réalisée avec les logiciels R et XLSTAT. L'ensemble des données utilisées pour ces tests sont des données indépendantes. Les tests de Shapiro effectués sur l'ensemble des variables révèlent qu'elles ne suivent pas une loi normale. Les données seront traitées à partir d'analyses descriptives et de tests non paramétriques.

Les tests non paramétriques utilisés sont :

- **Test de Kruskal-Wallis** pour la comparaison de moyennes non paramétriques ($k > 2$)
- **Test de Mann Whitney** pour la comparaison de moyennes non paramétriques ($k = 2$)
Ces 2 tests vérifient si les différences observées sont significatives entre les k lots de stations.
- **Test de corrélation** entre deux variables **de Spearman**. Ce test vise à valider ou invalider des variables explicatives.
- **Analyse de co-inertie** à partir de 2 **Analyses en Composantes Principales (ACP)**. Elle permet de déterminer s'il existe un lien entre deux tableaux de variables.

Pour tous ces tests, le risque d'erreur alpha choisi est de 5%. H_0 est rejetée si p -value, le seuil de significativité, est inférieur à 0.05.

III - RESULTATS

1 - LA CONNAISSANCE DES SITES RESTAURES

Le recensement des travaux a permis d'identifier 187 projets de restauration hydromorphologique représentés en gris en figure 7. 38 travaux non géolocalisés ne figurent pas sur cette carte. Les 30 sites sélectionnés pour cette étude sont représentés en couleur selon la technique utilisée (figure 7).

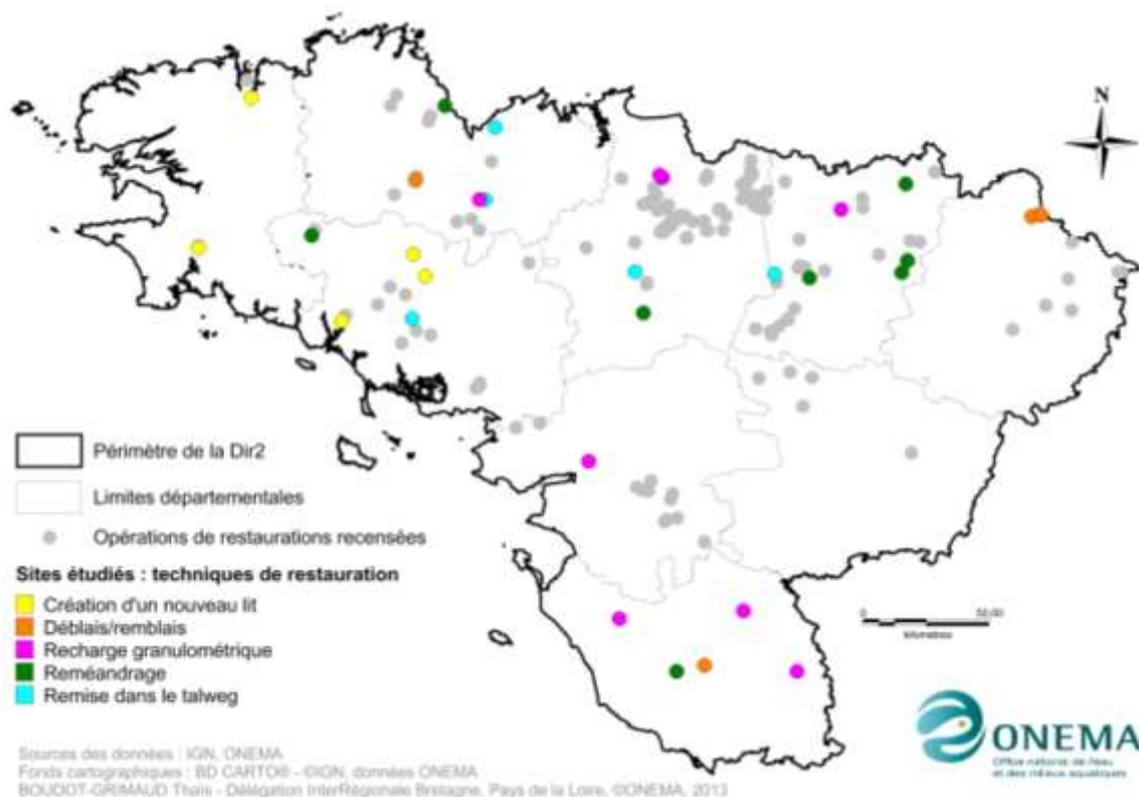


Figure 7 : Localisation des travaux de restauration hydromorphologique en Bretagne et Pays de la Loire

2 - SITES SELECTIONNES

Les 30 sites sélectionnés sont localisés de manière hétérogène sur le territoire. Les techniques retenues sont : 5 créations d'un nouveau lit, 4 déblais/remblais, 8 recharges granulométrique, 8 reméandrages et 5 mises dans le talweg. Ces opérations sont de natures diverses : 11 Contrats de Restauration et d'Entretien de cours d'eau (CRE) ou Contrat Territoriaux Milieux Aquatiques (CTMA), 6 procédures pénales, 8 dossiers administratifs dans le cadre de création de routes nécessitant le déplacement d'un cours d'eau et 1 pour l'alimentation en eau potable, 2 contrats Plans Etat-Région, 3 indéterminées recensées sous l'appellation « autre ».

3 - QUESTIONNAIRE

Les questionnaires ont été renseignés avec les personnes ayant suivi le projet de restauration (techniciens de rivière, chargés de mission, inspecteur de l'environnement). Au total, 22 questionnaires sur 30 ont pu être complétés.

3.1 - LE DIAGNOSTIC ET LA DEFINITION DES OBJECTIFS

Sur 22 questionnaires, 15 ont fait l'objet d'un diagnostic, dont 8 à l'échelle du bassin versant, 3 uniquement à l'échelle plus fine du tronçon ciblé par le projet de restauration et 4 à ces 2 échelles.

Les pressions les plus fréquentes sur les bassins versants sont les cultures, les traitements phytosanitaires, l'élevage et l'érosion des sols ainsi que le déficit de fonctionnalité piscicole. A l'échelle du tronçon, les pressions cultures et élevage sont retrouvées ainsi que la présence de drains et d'étangs sur le cours d'eau. Les altérations des profils rencontrées (figure 8) résultent des travaux hydrauliques subis par les cours d'eau.

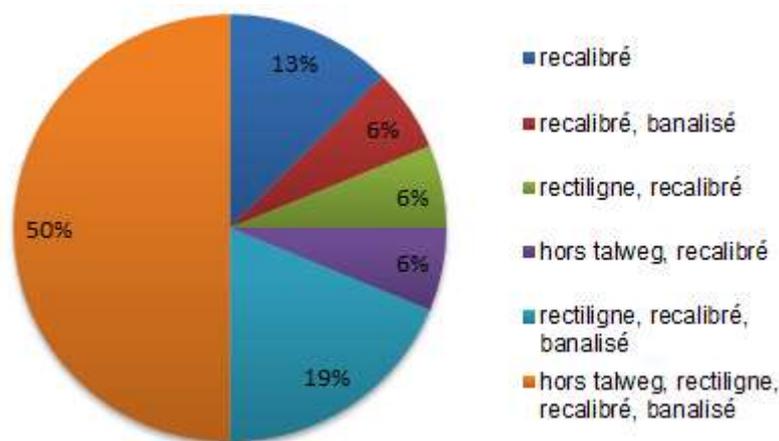


Figure 8 : Répartition des altérations identifiées sur les tronçons avant restauration

14/22 définissent des enjeux à leur projet de restauration (tableau 6).

Tableau 6 : Enjeux des restaurations définis

1	enjeux hydrologique, hydromorphologique, physico chimique biologique et annexe
4	enjeux hydrologique, hydromorphologique, biologique et annexe
2	enjeux hydrologique, hydromorphologique et biologique
4	enjeux hydromorphologique et biologique
3	enjeu hydromorphologique ou physico chimique ou biologique

10 projets se sont appuyés sur une référence. 9 références basées sur des critères hydromorphologiques : 4 analyses de la répartition granulométrique et du gabarit de référence, 3

analyses de la puissance spécifique et 2 de la sinuosité historique. 1 référence biologique établit sur le peuplement piscicole, ici : Truite fario et espèces d'accompagnement.

12 ont réalisés un état initial dont 6 hydromorphologiques (Réseau d'Evaluation des Habitats REH) et 6 biologiques (IPR et/ou IBGN et/ou IBMR) et hydromorphologiques (REH).

3.2 - LA MISE EN ŒUVRE

Le dimensionnement des techniques, c'est à dire la définition du gabarit visé après la restauration, est rarement appuyé par des calculs. 5 projets sur 22 seulement reposent sur des calculs, 7 sont expérimentaux, 8 sont intuitifs et 2 reposent sur des indices historiques.

Le choix de la période de travaux peut être lié à des contraintes agricoles (récolte), biologiques (période de reproduction) ou encore hydrologiques (période d'étiage pour limiter les impacts). Certains projets ne rencontrent pas ces contraintes comme la création d'un nouveau lit ou le reméandrage avec une mise en eau comme dernière étape. Ainsi sur 22 retours, 14 ont pris en compte une contrainte pour réaliser les travaux (3 agricoles, 7 biologiques et 4 hydriques).

Des mesures provisoires telles que des pêches de sauvegarde, la pose de filtres en paille ou des dérivations provisoires de cours d'eau permettent de limiter les impacts des travaux de restauration sur le cours d'eau. 9 projets ont mis en place certaines de ces mesures. Concernant le réseau hydrographique annexe, la suppression de connexion directe du fossé avec le cours d'eau et la mise en place de bassins de traitements des eaux pluviales sont des aménagements effectués pour 3 des projets.

3.3 - LES SUIVIS

14 stations sur 22 bénéficient d'un suivi (figure 9_{gauche}). Quelques projets ont mis en place des mesures de préservation. Ces mesures sont principalement des plantations de ripisylve, de la pose de clôtures et de la protection de berges par fascinage en saules vivants (figure 9_{droite}).

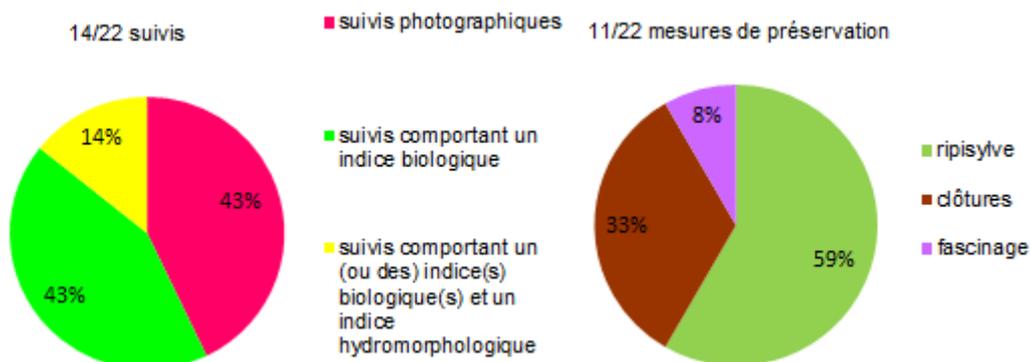


Figure 9 : Répartition des suivis (à gauche) et mesures de préservation (à droite)

La communication faite autour des projets de restauration est apparue comme un élément

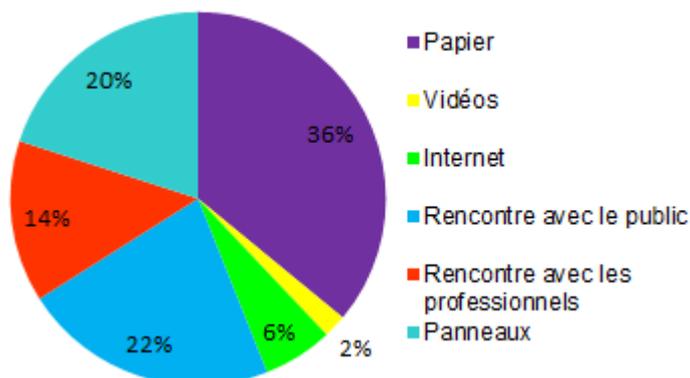


Figure 10 : Moyens de communication utilisés autour des projets de restauration

important pour l'appropriation et la compréhension du public mais aussi pour la pérennité et la réussite des restaurations.

Les moyens de communication les plus utilisés sont les supports papiers (bulletins municipaux, magazines spécialisés, presse), les rencontres avec le public (journée de sensibilisation, programme d'animation) les panneaux et plaquettes informatives (figure 10). La perception des

acteurs locaux à l'égard des projets de restauration est en lien avec ces éléments de communication. L'ensemble de ces acteurs est globalement satisfait de ces évolutions du territoire malgré parfois certaines réticences (figure 11).

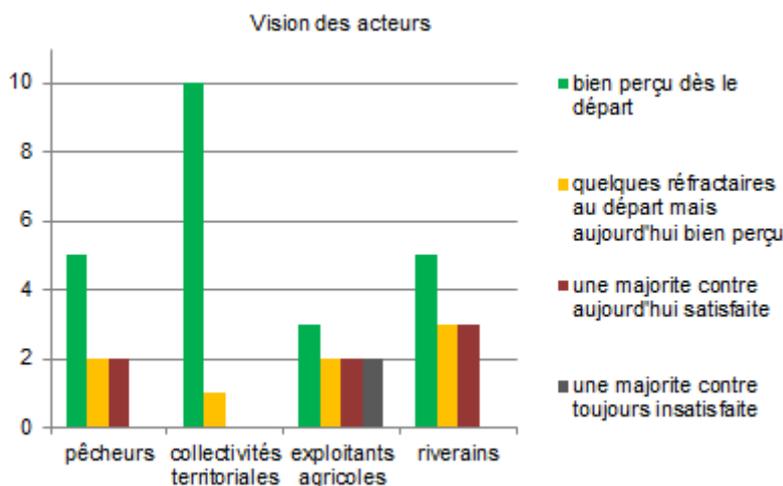


Figure 11 : Les projets de restauration vus par les acteurs locaux

Les travaux s'effectuent sur des parcelles appartenant au domaine public ou au domaine privé. Dans tous les cas, il y a des règles à connaître en termes d'entretien et de réglementation. D'autres discussions peuvent également aider à la compréhension des interventions. Le tableau 7 représente le nombre de projets ayant développé une communication autour de différentes thématiques : entretien des berges et du cours d'eau, intérêt de la recharge granulométrique, du bois en rivière et la réglementation (Zones Non Traitées, bandes enherbées).

Tableau 7 : Sensibilisation des gestionnaires et des propriétaires riverains

	Préconisations pour l'entretien	Recharge granulométrique	Rappel de la réglementation (Zones Non Traitées, bandes enherbées)	Bois en rivière
oui	15/22	12/22	9/22	4/22
non	7/22	10/22	13/22	18/22

4 - MESURES

4.1 - CARACTERISTIQUES GENERALES - DESCRIPTION DU JEU DE DONNEES

Les stations prospectées sont réparties sur différents rangs de Strahler, identifiés à partir de la BD TOPO (figure 12). Il s'agit, pour les 2/3 des projets, de petits cours d'eau de rang 1 et 2.

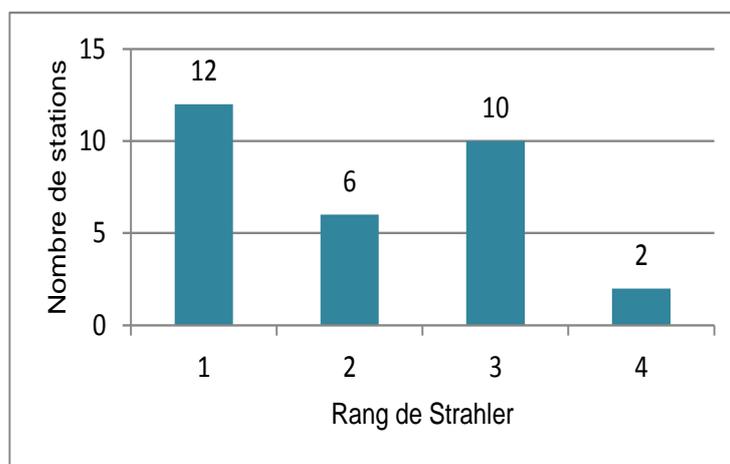
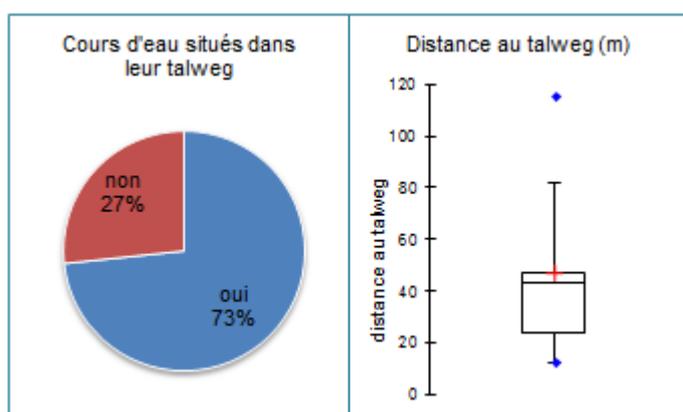


Figure 12 : Nombre de stations selon leur rang de Strahler

Un box plot a été réalisé pour chaque variable définissant les caractéristiques des stations afin d'avoir une image de l'hétérogénéité du jeu de données (annexe 8). Il en ressort une forte hétérogénéité entre les stations sur les paramètres suivants : surface du bassin versant, distance à la source, hauteur plein bord, largeur plein bord, puissance spécifique, pente et le coefficient de rugosité.

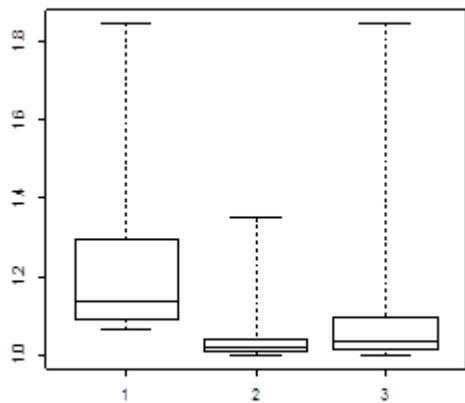
4.2 - POSITION DU COURS D'EAU PAR RAPPORT A SON TALWEG



73% des cours d'eau se trouvent dans leur talweg, les 27 % restants sont à une distance variable (figure 13). Parmi les 7 cours d'eau hors talweg, 4 sont en bordure de parcelle agricole exploitée et 3 ont été déplacés dans le cadre de création de voies de communication et 1 suite à la construction d'un lotissement.

Figure 13 : Répartition des cours d'eau hors et dans talweg et dispersion des distances par rapport au talweg pour les cours d'eau hors talweg

4.3 - ETUDE DES SINUOSITES



1 : Historique ; 2 : Initiale ; 3 : Restaurée

Figure 14 : Etude des sinuosités

Une sensible amélioration des sinuosités suite à la restauration est notée (2 et 3). Cependant, les sinuosités après restauration ne correspondent pas aux sinuosités historiques (1 et 3) (figure 14). Un test de Mann Whitney permet d'invalider H_0 . Un test de corrélation est également effectué entre la sinuosité restaurée et la pente. Ce test s'est avéré non significatif.

La sinuosité historique est toujours plus importante que les sinuosités initiales et restaurées. Seules 6 stations ont une sinuosité différente entre initiales et restaurées : 1

station passe de la classe rectiligne à sinueux, 2 de rectiligne à méandriforme, 1 de sinueux à méandriforme et 2 de très sinueux à sinueux (tableau 8).

Tableau 8 : Répartition des stations selon les classes de sinuosités historiques, initiales et restaurées

Classes de sinuosité	SI < 1,05	1,05 < SI < 1,25	1,25 < SI < 1,5	SI > 1,5
Style fluvial	Rectiligne	Sinueux	Très sinueux	Méandriforme
Historiques	0	20	8	2
Initiales	23	5	2	0
Restaurées	20	7	0	3

4.4 - LA PUISSANCE SPECIFIQUE

Le tableau 9 décrit les variations des puissances spécifiques (W , exprimées en W/m^2).

Tableau 9 : Puissances spécifiques obtenues à partir des Q_2

	Minimum	Maximum	1 ^{er} Quartile	Médiane	3 ^{ème} Quartile	Moyenne
W	0,254	81,369	3,405	9,400	24,038	17,821

Seulement 6 stations ont une puissance spécifique supérieure ou égale à $35 W/m^2$ ⁸. Il s'agit de cours d'eau de rang de Strahler 3 et 4. 2/3 des cours d'eau de faible puissance sont des cours d'eau de rang 1 et 2.

⁸ Seuil d'irréversibilité au-dessus duquel la puissance naturelle de cours d'eau anciennement chenalés a permis à ces derniers de réajuster leurs formes et de retrouver petit à petit une géométrie plus naturelle.

Tableau 12 : Récapitulatif des gabarits en fonction des débits Q_x et de la technique utilisée

Techniques utilisées	$\leq Q2$	$\leq Q5$	$\leq Q10$	$> Q10$
recharge granulométrique	5	3		4
remise dans le talweg	2	2		1
reméandrage	3	1		2
déblai/remblai	2		1	
création de lit	3	1		

4.6 - DIVERSITE DES ECOULEMENTS

Dans un cours d'eau naturel dont l'équilibre morphodynamique est respecté, un faciès de type radier est observé en moyenne tous les 6 fois la largeur pleins bords du cours d'eau (entre 4 et 10 fois) (Brookes, 1988). Seulement 20 % des stations approchent cette fréquence théorique de retour de radier (figure 16).

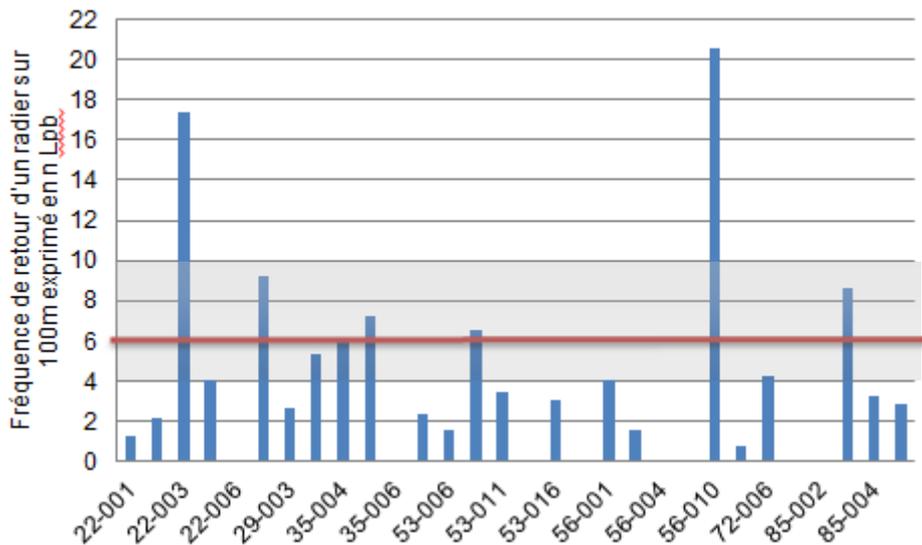


Figure 16 : Fréquence de retour de radier exprimé en n Lpb pour chaque station étudiée et fréquence de radier en grisé

Les 7 stations dont le nombre de faciès est égal à 0 (figure 17) sont des stations dont les écoulements étaient intermittents ou interstitiels lors de la prospection.

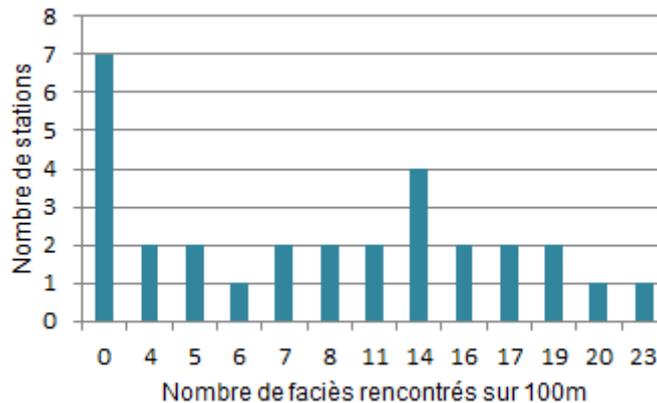


Figure 17 : Nombre de stations rencontrant n faciès sur 100 mètres

Le nombre de faciès est corrélé positivement avec l'augmentation de l'épaisseur d'une ripisylve ($S = 0.446$ et $p\text{-value} = 0.014$) ainsi qu'avec la fréquence des éléments de diversification ($S = 0.526$ et $p\text{-value} = 0.003$). L'épaisseur de la ripisylve et la fréquence des éléments de diversification sont corrélés ($p\text{-value} < 0.0001$).

4.7 - LES VARIATIONS DE PROFILS EN TRAVERS

La largeur est une variable de réponse des cours d'eau qui évoluent avec le rang de Strahler (Malavoi & Bravard, 2010). Les largeurs moyennes mesurées montrent une relation avec le rang de Strahler du cours d'eau (figure 18), une corrélation positive existe entre les largeurs moyennes et le rang de Strahler ($p\text{-value} = 0.004$).

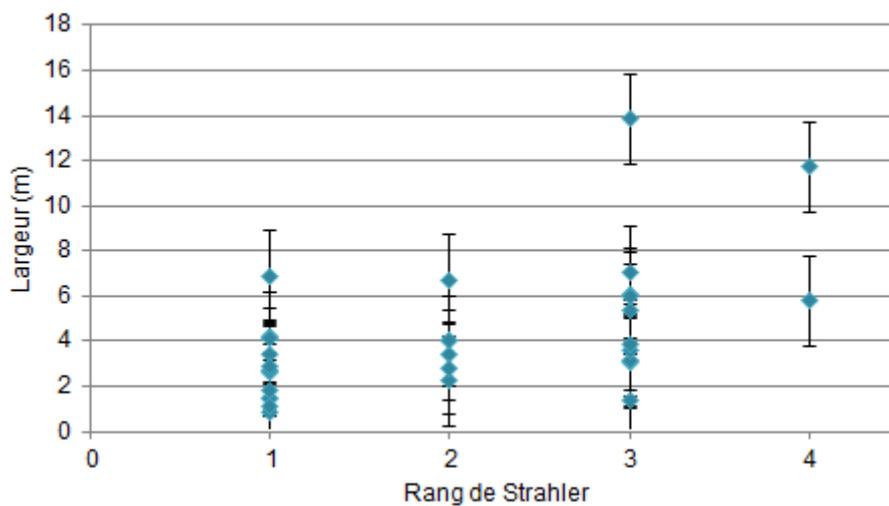


Figure 18 : Largeurs moyennes triées par rang de Strahler

L'hétérogénéité des largeurs par station est approchée via les 15 largeurs mesurées par station. La figure 19_{gauche} révèle que 2 stations connaissent une forte hétérogénéité de largeurs et 1 présente une variation modérée mais les largeurs sont supérieures à 10m. Ainsi elles écrasent l'appréciation des autres boxplots, c'est pourquoi elles ont été retirées au sein de la figure 19_{droite}. 14 stations ont une légère hétérogénéité et 13 sont assez homogènes (différence entre le minimum et le maximum inférieure à 2m).

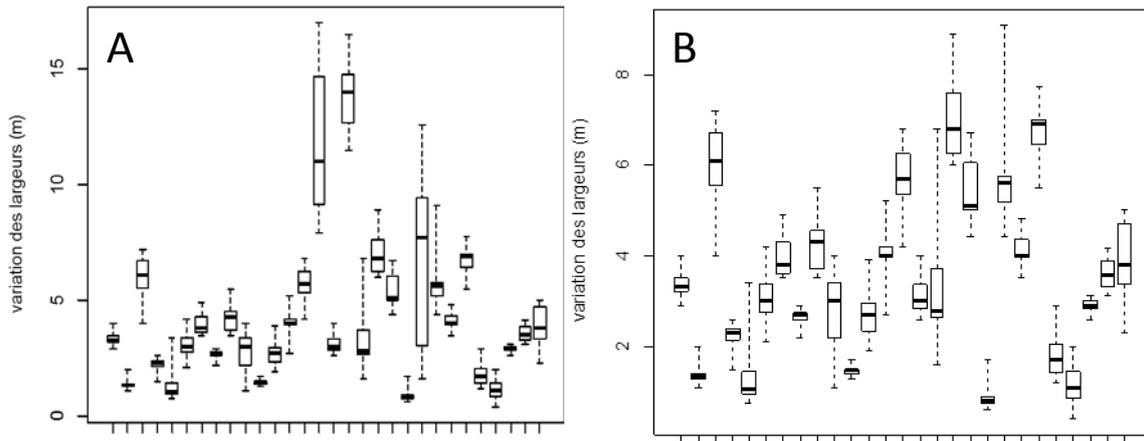


Figure 19 : Variabilité des largeurs : A : toutes les stations. B : sans les 3 variations les plus importantes

Des tests de comparaisons de moyennes sont réalisés sur les variations de sections selon le rang de Strahler. Le test de Kruskal-Wallis ne valide pas l'hypothèse H_0 . Les distributions de largeurs par rang de Strahler présentent des différences significatives. Une analyse de co-inertie a été réalisée sur ces mesures afin de faire ressortir des facteurs explicatifs. Les facteurs explicatifs choisis pour cette analyse étaient : la pente, la sinuosité, l'ancienneté des travaux et la technique utilisée. Cette analyse n'a pas été significative ($RV=0.12$) et n'a pas révélé de facteurs expliquant les variations de largeurs.

4.8 - LA RUGOSITE

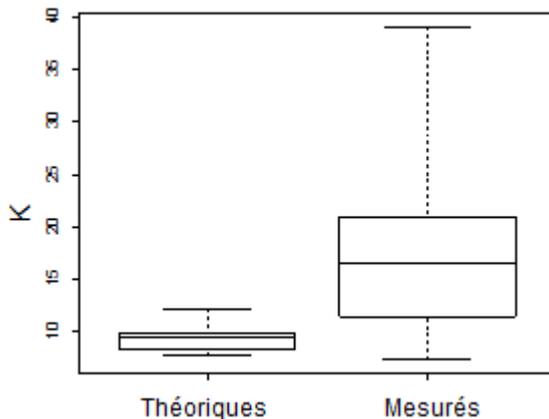


Figure 20 : Représentation des coefficients de rugosité théorique (cours d'eau naturel) et restaurés

Un coefficient de rugosité (k) présentant une valeur faible traduit une rugosité élevée. Les rugosités mesurées sont faibles et très hétérogènes pour l'ensemble des sites alors que les k théoriques sont assez homogènes et présentent une rugosité importante (figure 20). La rugosité est corrélée avec la ripisylve (p -value=0.015), la présence d'une ripisylve augmente la rugosité.

La rugosité est corrélée avec le colmatage (p -value=0.026), les sites présentant un coefficient de rugosité élevé sont colmatés.

4.9 - ENCOMBREMENT DU LIT MINEUR PAR LA VEGETATION



Figure 21 : Encombrement du lit mineur par la végétation. © BOUDOT-GRIMAUD, 2013

L'encombrement du lit mineur par la végétation (figure 21) a été observé sur 10 des 30 stations. Ces 10 cours d'eau sont des cours d'eau de rang 1. Les tests de Spearman (tableau 13) révèlent que l'encombrement du lit par la végétation est fortement corrélé à la distance à la source, au régime d'écoulement (les 2 étant liés) ainsi qu'au colmatage. Plus la

distance à la source est faible, plus le risque d'encombrement du lit est élevé. Les corrélations négatives avec la pente et l'épaisseur d'une ripisylve. Ces deux paramètres sont des facteurs limitant l'encombrement du lit.

Tableau 13 : Résultats obtenus au test de corrélation de Spearman entre l'encombrement du lit et des variables explicatives

	Puissance spécifique	Couche d'armure	D50	Pente	Colmatage	Distance à la source	Écoulement	Épaisseur de la ripisylve
Matrice de corrélation	0,068	-0,164	-0,38	0,526	0,6	-0,672	-0,705	-0,648
p-values	0,718	0,384	0,038	0,003	0,001	<0,0001	<0,0001	0

IV - DISCUSSION

1 - LA CONNAISSANCE DES SITES RESTAURES

L'étude a permis d'identifier 225 opérations de restauration morphologique. La répartition géographique hétérogène de ces projets s'explique par la présence ou non de restauration sur un territoire donné (manque de structures porteuses, autres thématiques prioritaires : continuité, espèces invasives) et par la difficulté à récupérer ces informations (absence de base de données géolocalisées, manque de suivis des dossiers).

2 - LE DEROULEMENT DES PROJETS DE RESTAURATION

Les résultats obtenus aux questionnaires révèlent que deux étapes primordiales dans la réalisation d'un projet de restauration sont souvent négligées. Il s'agit du diagnostic (état initial) et du suivi. Plusieurs synthèses récentes évoquent la faible pertinence du diagnostic préalable, une définition initiale d'objectifs mesurables souvent floue et un manque de partage de ces objectifs par les structures chargées de la mise en œuvre des diagnostics (Bayley, 2002 ; Palmer *et al.* ; 2005 ; Kondolf *et al.*, 2006 ; Palmer *et al.*, 2007 ; Bernhardt *et al.*, 2008 in Malavoi *et al.*, 2010). Dans cette

étude le constat est similaire, 15 des 22 questionnés ont réalisé un diagnostic. Seulement 4 l'ont effectué sur le bassin versant ainsi que sur le tronçon ciblé. Pourtant, ces deux échelles permettent une identification précise des interventions humaines subies par le cours d'eau, des dysfonctionnements induits et des pressions toujours existantes sur le bassin versant. Les suivis, eux, sont absents, incomplets ou minimalistes avec 14 suivis sur 22 dont 6 uniquement photographiques et 2 répondants aux critères du suivi scientifique minimal.

- Le diagnostic permet de localiser les zones prioritaires à restaurer et de définir les enjeux et objectifs de la restauration hydromorphologique (Malavoi *et al.*, 2007). Les enjeux confrontés à l'état morphologique du cours d'eau à l'échelle du tronçon permettent de choisir une technique adaptée pour répondre aux dysfonctionnements observés.
- L'état initial est une étape nécessaire pour la réalisation de suivis. Les suivis permettent une évaluation des actions de restauration à condition de respecter certains critères (Navarro *et al.*, 2012). Ils permettent également de vérifier l'efficacité des travaux effectués et d'en tirer des conclusions opérationnelles (Kondolf & Micheli, 1995 ; Muotka, 2002 ; Malavoi *et al.*, 2010).

3 – LIMITES DU PROTOCOLE « MESURES »

Le protocole « Mesures » a permis de relever sur le terrain des éléments traduisant l'état hydromorphologique des cours d'eau. L'absence d'état initial ne permet pas d'appréhender une évaluation suite à la restauration mais plutôt un état hydromorphologique à un instant t. La phase terrain s'est déroulée de fin mai à mi-juin. Les conditions météorologiques pluvieuses n'ont pas toujours permis une prospection en période d'étiage. Ceci implique parfois un lissage des faciès d'écoulements. Les données recueillies sont en partie présentées dans cette étude. Dans un souci de temps et de justesse des données, certaines n'y sont pas intégrées comme l'étude de la couche d'armure et de l'érodabilité des berges.

4 - DE NOMBREUX FACTEURS LIMITANTS A LA RESTAURATION

De multiples entretiens avec les différents gestionnaires ont fait ressortir que le premier élément limitant l'ambition des projets de restauration est la disponibilité foncière. Certains facteurs expliquent la non atteinte d'un bon état hydromorphologique comme une déconnexion nappe/rivière, un tracé rectiligne, peu de diversité d'écoulements, une faible rugosité ou encore l'encombrement du lit mineur par la végétation.

La position par rapport au talweg

Les échanges nappe-rivière répondent au principe qui implique que tout obstacle à l'écoulement du flux d'eau de surface provoque, si la perméabilité des sédiments du lit le permet, des échanges à travers la zone hyporhéique (Datry, 2008). Lorsqu'un cours d'eau ne se trouve pas dans son talweg, il est généralement déconnecté de sa nappe et ne répond plus à ce principe. Les 7 cours d'eau hors talweg de cette étude en sont déconnectés soit pour la création de voies de communication, soit pour concilier un usage agricole. Il apparaît important de vérifier préalablement lors du diagnostic la place du cours d'eau par rapport à son talweg et d'évaluer également les possibilités foncières autour du tronçon à restaurer.

Un tracé trop souvent rectiligne

Les processus d'autoépuration se déroulent en surface et au niveau de la zone hyporhéique. La sinuosité joue un rôle important dans ces processus, par exemple, un indice de sinuosité de 1.9 (méandrique) améliore l'élimination de nitrates de 91% (Oraison *et al.*, 2013). De plus, la sinuosité est un facteur majeur dans la dissipation de l'énergie lors de crues. Les méandres offrent une forte dissymétrie influençant les écoulements et entraînant une richesse écologique non négligeable. Lorsqu'elle n'est pas respectée, il se peut que les problèmes initiaux reviennent dès les premières crues, par exemple l'incision. En contexte de protection contre les inondations, lors d'une intervention sur la partie amont d'un bassin versant, recréer une sinuosité peut protéger l'aval.

La plupart des scientifiques admettent que les cours d'eau ne présentent que très rarement un tracé naturellement rectiligne, et que le coefficient de sinuosité est corrélé à la pente (Malavoi *et al.*, 2010). Pourtant 2/3 des sites prospectés présentent un tracé rectiligne et il ne ressort pas de corrélation entre la pente et la sinuosité dans cette étude. Ce résultat s'explique par une rectification des cours d'eau dans le passé. Afin de permettre la mise en place et la préservation de processus d'autoépuration efficaces, il est intéressant d'évaluer les possibilités foncières lors du diagnostic afin de déterminer si une modification du tracé est envisageable d'autant que sur petits cours d'eau, l'emprise est minime. Les techniques qui font varier les classes de sinuosité dans cette étude sont le reméandrage, la création d'un nouveau lit et la remise dans le talweg.

La puissance spécifique

La puissance spécifique traduit la capacité d'ajustement géomorphologique d'un cours d'eau. Au-dessus de 35W/m², la puissance naturelle d'un cours d'eau permet à ce dernier de réajuster ses

formes et de retrouver une géométrie plus naturelle (Malavoi, 2006). 80% des cours d'eau prospectés ont des puissances spécifiques inférieures à 35W/m². Pour ces cours d'eau, la restauration était nécessaire et le sous-dimensionnement du gabarit aurait dû être préconisé afin de favoriser les réajustements au profil d'équilibre. Les résultats obtenus révèlent que cette préconisation n'a pas été prise en compte pour l'ensemble des sites.

Un gabarit surdimensionné et une absence de lit emboîté

Un gabarit bien dimensionné permet d'améliorer la plupart des compartiments de l'écosystème (Bramard, 2012). Les gabarits approchés grâce au débit de pleins bords révèlent que les lits mineur des cours d'eau sont bien souvent surdimensionnés et ne permettent plus de retrouver un fonctionnement naturel avec un débordement régulier. Toutes les techniques ciblées permettent et ne permettent pas d'avoir un $Q_{pb}=Q_2$.

Le dimensionnement du gabarit du lit est un élément primordial. D'une part, un gabarit adapté est indispensable à la restauration de toutes les fonctionnalités d'un cours d'eau : recharge des nappes, autoépuration, gain paysager, satisfaction des usagers. D'autre part, le dimensionnement permet d'évaluer le volume de matériau à mobiliser pour toutes les techniques ciblées. Il peut reposer sur l'observation d'une station de référence⁹, l'étude des débits biennaux, l'existence de témoignages ou de cartographies historiques. Pourtant ce dimensionnement est souvent expérimental ou intuitif (15/22 questionnés). La conséquence est un gabarit non modifié et/ou surdimensionné ne permettant plus un débordement régulier. Lors d'une crue, un cours d'eau déconnecté de sa plaine alluviale va privilégier le transport vers l'aval de nutriments voire de composants toxiques qui pourraient être assimilés par la plaine alluviale dans le cas contraire (Rheinhardt, 1999).

Lorsqu'il est impossible pour des raisons justifiées de recréer un cours d'eau avec un gabarit naturel, les guides de restauration préconisent également de réaliser des lits emboîtés (annexe 9). Pourtant, un seul site a appliqué cette préconisation.

Une faible diversité d'écoulement

La diversité d'écoulement est fonction de la diversité de faciès, des substrats, de la sinuosité et de l'hétérogénéité des sections.

⁹ Tronçon, en amont ou en aval du secteur à restaurer, peu impacté par les activités humaines ou situé dans un milieu préservé (milieu forestier non exploité par exemple).

Une diversité naturelle de faciès contribue à maintenir les capacités d'autoépuration des cours d'eau, notamment de dénitrification, à offrir des habitats écologiques essentiels au cycle de vie de nombreuses populations de poissons et d'invertébrés (Keith, 2011). La diversité des faciès est favorisée par des largeurs et des hauteurs adaptées et variées, un tracé non rectiligne et des éléments de diversification naturels (Oraison *et al.*, 2011). La diversité de faciès est peu élevée sur l'ensemble des sites prospectés. Les causes principales sont le tracé rectiligne et un gabarit surdimensionné. Les résultats montrent qu'elle est favorisée par la présence d'éléments de diversification et par la présence d'une ripisylve. Une restauration doit considérer les structures naturelles pouvant favoriser une diversité des écoulements.

Les têtes de radier constituent les zones d'infiltration du cours d'eau vers sa nappe. C'est là que se déroulent prioritairement les échanges et processus d'autoépuration (Malavoi, 2010). La fréquence de retour de radier caractérise donc un bon fonctionnement. Elle est respectée approximativement pour 4 cours d'eau.

La variabilité des largeurs est assez faible pour 14 des sites et peut s'expliquer par le fait que les cours d'eau anciennement recalibrés ont vu leurs sections uniformisées et sur-élargies par la pelle mécanique. Les 16 autres présentent une variabilité des largeurs plus ou moins forte (de 2 à 6 m de variation). Les travaux sur ces sites ont été réalisés entre 2002 et 2009. La capacité d'ajustement du cours d'eau et la dimension temporelle sont ici importantes à considérer.

La rugosité

La rugosité d'un cours d'eau est importante au niveau physico-chimique (capacité de rétention des particules et de la matière organique), hydromorphologique (dissipation de l'énergie) et biologique (Muotka, 2002). Cette dernière a été fortement réduite par le passé en raison des actions de rectification, de curage et de suppression de la ripisylve (Vought, 2010). Le manque de rugosité est un facteur limitant la réussite des opérations de restauration (Muotka, 2002). Aucun cours d'eau restauré ne retrouve un coefficient de rugosité naturelle excepté 4. Pour 3 de ces 4 cours d'eau, la rugosité est expliquée par un surencombrement du lit mineur par la végétation en lien avec des phénomènes d'eutrophisation (Sarriquet *et al.*, 2013), le 4^{ème} est un cours d'eau méandrique. Sur l'ensemble des 30 sites, c'est majoritairement le tracé rectiligne qui réduit la rugosité ainsi que la faible variation de sections.

Un cours d'eau peu rugueux et à faible diversité d'écoulement aura tendance à sur-sédimer entraînant un colmatage de la granulométrie. La restauration d'un cours d'eau doit tenter d'améliorer et de maintenir une bonne rugosité (Madsen, 2010). La rugosité peut être améliorée

avec les éléments de diversification tel que les bryophytes, les macrophytes, les blocs ou encore le bois en rivière. Les chercheurs reconnaissent aujourd'hui le bois en rivière comme un outil accélérant la restauration fonctionnelle des cours d'eau. En effet, il complexifie la morphologie du cours d'eau, formant des habitats faunistiques intéressants, tout en fournissant et retenant la matière organique en transit, soutenant ainsi la biodiversité (Gerhard, 2000 ; Le Lay, 2007 ; Mott, 2010). La corrélation entre les éléments de diversification et la présence de la ripisylve implique que l'implantation d'une ripisylve est une mesure à ne pas négliger lors d'une restauration. De plus, la ripisylve a un rôle non négligeable (notamment en tête de bassin) dans le fonctionnement des réseaux trophiques par ses apports de débris organiques et offre des habitats pour la faune terrestre et aquatique, maintient les berges et participe à l'optimisation de la capacité auto-épuratoire du milieu (Schneider, 2007 ; LIFE, 2009 ; Hayot, 2007). Toutefois, si les dysfonctionnements et la banque de graines dans le sol le permettent, il est judicieux d'observer la régénération naturelle suite aux travaux (Forget, 2011).

L'encombrement du lit mineur par la végétation

L'encombrement du lit mineur par la végétation induit une activité microbienne accrue et un développement d'algues pouvant amener à l'eutrophisation et l'asphyxie des cours d'eau (Sarriquet *et al.*, 2013). Au cours de cette étude, ce phénomène est principalement identifié sur les cours d'eau de rang 1. Ce constat renforce la nécessité qu'il faut une attention particulière pour ces cours d'eau. Leur position et leur rôle écologique au sein d'un bassin versant sont primordiales. Excepté les facteurs typologiques comme la distance à la source et l'intermittence des écoulements, le facteur modifiable est la ripisylve. La ripisylve en apportant de l'ombrage limite cette production primaire et est un moyen de lutte efficace contre ce phénomène.

Bilan général

2/3 des cours d'eau prospectés sont de rangs de Strahler 1 et 2. Ils correspondent à des cours d'eau en tête de bassin versant en accord avec la définition du SDAGE Loire-Bretagne. Ces cours d'eau représentent 70% du réseau hydrographique et sont d'une importance majeure au sein d'un bassin versant. En bon état hydromorphologique, ces écosystèmes sont de formidables réservoirs, pourvoyeurs de biens et de services écologiques (Meyer *et al.*, 2007).

D'une manière générale, le bon état hydromorphologique n'est pas systématiquement atteint sur les sites prospectés. En cause le diagnostic, le choix de la technique ou encore un temps de réponse du cours d'eau qui peut être très long en fonction de la puissance du cours d'eau.

Certains cours d'eau voient même les dysfonctionnements initiaux réapparaître comme par exemple un colmatage important dû à des écoulements peu diversifiés et lents. Les choix des techniques de restauration doivent être réfléchis pour avoir une action efficace et durable.

5 - PERSPECTIVES

La phase de recensement a été rendue obligatoire par l'absence de base de données géolocalisées sur ce type de restaurations. L'ensemble des gestionnaires attend des retours d'expériences et des échanges autour des techniques de restauration, il serait intéressant de réaliser une base de données de géoréférencement des opérations de restauration écologique à différentes échelles, régionale, nationale voire européenne car certains pays mettent en œuvre des techniques encore non réalisées en France (ex : ajout de bois en rivière).

Les restaurations hydromorphologiques constituent une réponse à la DCE dans le cadre de l'amélioration de la qualité des masses d'eau. Les étapes de diagnostic et de suivi sont cruciales dans l'évaluation des restaurations. Il est nécessaire que du temps soit dégagé pour effectuer ces étapes afin de choisir une technique adaptée aux dysfonctionnements observés et aux usages présents sur le bassin versant dans sa totalité. Les suivis permettent de valoriser une opération de restauration et surtout d'apprendre des expériences déjà réalisées et d'en tirer de précieux conseils. Par exemple, les premières passes à poissons étaient expérimentales mais, aujourd'hui, les dimensionnements sont encadrés grâce aux connaissances acquises lors des premières expériences et des études sur la capacité de franchissement des espèces ciblées.

La présente étude, les résultats de 2017 et l'acquisition de connaissances supplémentaires apporteront des éléments de plus en plus précis afin d'améliorer les techniques de restauration étudiées. Toutefois, la mise en place de suivis techniques adaptés aux questions posées par les gestionnaires (la pérennité d'une recharge granulométrique, l'efficacité d'un reméandrage sur les zones humides périphériques,...) est conseillée dans les prochaines années, tout comme la prise en compte du temps de réponse des cours d'eau à travers, par exemple, les crues morphogènes et les modifications qu'elles entraînent. Cette proposition est appuyée dans cette étude par le constat que les cours d'eau présentant une diversité satisfaisante de largeurs ont été restaurés il y a plus de 4 ans. Cet élément suggère la nécessité de diversifier les profils en travers du cours d'eau restauré dès la phase travaux afin d'accélérer le temps de réponse du cours d'eau.

La faible rugosité est également un frein à la réussite des restaurations. Pourtant certains paramètres peuvent jouer en sa faveur, par exemple le maintien de bois en rivière ou la présence

d'une ripisylve. A ce titre, une évolution des règles d'entretien accompagnée d'une sensibilisation des gestionnaires et des riverains serait à mener.

Il est intéressant également lors du diagnostic et du choix de la technique de considérer les avantages de la technique sur le tronçon restauré mais également sur la partie aval, par exemple, la remise dans le talweg ou le reméandrage ont un effet global. Afin d'atteindre les objectifs de bon état écologique, il est nécessaire de réaliser des projets ambitieux. Ainsi, l'étude de l'espace de mobilité qui passe par l'appréciation de la puissance spécifique, l'érodabilité potentielle des berges et l'apport solide théorique est une démarche à développer. La possibilité foncière demeure le principal frein à la mise en œuvre de ces techniques. Il est par conséquent nécessaire de créer des dispositifs facilitant leur réalisation.

La sélection des sites a également porté sur des projets, non pas de restauration, mais de déplacement de cours d'eau dans le cadre de création de voies de communication par exemple. Il est primordial de partager les expériences acquises grâce aux projets de restaurations avec les concepteurs d'infrastructures linéaires, de lotissements, ... Dans le cadre de ces projets, la conception des nouveaux lits doit être compatible avec des restaurations futures pouvant avoir lieu en amont et en aval.

CONCLUSION

Les opérations de restauration hydromorphologique des cours d'eau sont une des réponses à la DCE afin de retrouver et de préserver le bon état écologique des cours d'eau. Le manque de suivi de ces opérations ne permet pas encore d'avoir une parfaite maîtrise du dimensionnement de ces projets. Des études visant à apporter des éléments techniques sur cette thématique n'offriront des résultats qu'en 2017. A travers cette étude, la Délégation InterRégionale Bretagne, Pays de la Loire de l'ONEMA, sollicitée par les acteurs de terrain, veut tirer des enseignements d'opérations de restauration réalisées ces dernières années.

La présente étude a permis d'identifier différents facteurs limitant la réussite de ces restaurations en évaluant le déroulement des projets des diagnostics aux suivis ainsi que les éléments hydromorphologiques des sites restaurés. Ainsi, il en ressort que les étapes de diagnostic et de suivi de ces projets sont des étapes peu réalisées, pourtant cruciales à respecter. La réussite des opérations de restauration est également limitée par la déconnexion des cours d'eau avec leur nappe d'accompagnement, le tracé rectiligne, des gabarits surdimensionnés ou encore un manque de rugosité.

La connaissance de ces différents éléments et l'analyse des résultats a permis de dégager des pistes d'améliorations favorisant un bon fonctionnement hydromorphologique après restauration. La mise en œuvre de projets ambitieux est toutefois limitée par l'acceptation des projets par les riverains, il est nécessaire de continuer la sensibilisation auprès de chacun. Il est important que les gestionnaires aient un discours similaire sur l'ensemble du territoire en faveur de la restauration hydromorphologique, une contradiction dans les discours entraînant un refus systématique de la part des riverains. De plus, l'artificialisation importante des sites prospectés met en lumière la nécessité de faire évoluer l'image des cours d'eau. Dans un contexte où la protection de l'environnement semble difficile et pourtant nécessaire pour les générations futures, il est nécessaire de rendre aux cours d'eau leur importance et ne pas se limiter à une vision purement hydraulique mais évoluer vers une vision éco-hydraulique.

BIBLIOGRAPHIE

AELB, 2005. Synthèse des états des lieux 2004, site internet : <http://www.eau-loire-bretagne.fr>.

AELB, 2012. Rapport d'activités de l'Agence de l'Eau Loire Bretagne, 71 p.

Aronson J., Floret C., Le Floc'h E., Ovalle C., Pontanier R., 1995. Restauration et réhabilitation des écosystèmes dégradés en zones arides et semi-arides. Le vocabulaire et les concepts, 19 p.

ARRETE du 25 janvier 2010, relatif aux méthodes et critères d'évaluation de l'état écologique, de l'état chimique et du potentiel écologique des eaux de surface pris en application des articles R. 212-10, R. 212-11 et R. 212-18 du code de l'environnement, Journal Officiel de la République Française n°0046 du 24 février 2010, page 3429.

Bardiau P., 2007. Les cours d'eau sous leur meilleur profil : l'hydromorphologie un nouvel enjeu pour l'eau, Confluence n° 43, magazine édité par l'Agence de l'eau Seine Normandie, 32 p.

Bardon E., 2009. Restauration hydromorphologique des petits cours d'eau de plaine : synthèse, comparaison et choix des techniques à appliquer, Master 2, Université de Poitiers, 115 p.

Benoit P., Berthier K., Boët P., Rezé C., 2004. Les aménagements hydrauliques liés au flottage du bois, leur impact sur le milieu fluvial (XVI^e-XVIII^e siècles), dans Fleuves et marais, une histoire au croisement de la nature et de la culture. Sociétés préindustrielles et milieux fluviaux, lacustres et palustres : pratiques sociales et hydrosystèmes, Burnouf J., Leveau P. (dir.). Paris: C.T.H.S., 9 p.

Bernhardt E. S., Palmer M.A., Allan J. D., Alexander G., Barnas K., Brooks S., et al., 2005. Synthesizing US river restoration efforts, *Science* 308:636–637.

Binder W., 1979. Grundzüge der Gewässerpflege, Schriftenr, Bayer, Landesamt f. Wasserwirtschaft, H. 10, München.

Bourdin L., Stroffek S., Bouni C., Narcy J.B. et Dufour M., 2011. Restaurer et préserver les cours d'eau, restauration hydromorphologique et territoires, concevoir et négocier, Agence de l'eau RMC, 108p.

Boutet-Berry L., 2013. Méthodes de suivi des opérations de restauration hydromorphologique des petits cours d'eau de plaine, ONEMA, 2013, 65 p.

Bramard M., 2012. Formation sur la restauration des petits cours d'eau de plaine, support de présentation.

Bravard J.P., 2010. Historique de la restauration physique des cours d'eau, Evolution en rapport aux connaissances et en lien avec les grandes politiques de l'eau, Rencontre interrégionale des réseaux d'acteurs pour une gestion globale et concertée des milieux aquatiques, Juillet 2010, 17 p.

Brookes A., 1988. Rivers channelization, Perspectives for environmental management, *Wiley interscience*, 326 p.

CARHYCE, 2008. Protocole de caractérisation de l'hydromorphologie des cours d'eau à l'échelle stationnelle (cours d'eau prospectables à pied), 25 p.

Chandesris A., Mengin N., Malavoi J.R., Souchon Y., Wasson J.G., Pella H., 2008. SYstème Relationnel d'Audit de l'Hydromorphologie des Cours d'Eau, Principes & Méthodes, Rapport, Cemagref Lyon BEA/LHQ, 64 p.

Chauris L., 1989. Exploitations et recherches minières abandonnées de Bretagne, Pen Ar Bed n°132, Bretagne Vivante, 16 p.

CIPEL, 2003. La renaturation pour la vie des rives et des rivières du bassin lémanique, 16 p.

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

Datry T., Dole-Olivier M.J., Marmonier P., Claret C., Perrin J.F., Lafont M., Breil P., 2008. La zone hyporhéique, une composante à ne pas négliger dans l'état des lieux et la restauration des cours d'eau, Ingénieries, EAT, **54**, 16 p.

Degoutte G., 2006. Hydraulique et morphologie fluviales appliquées au diagnostic, à l'aménagement et à la gestion des rivières, Editions Lavoisier Tec et Doc, 384 p.

Dray, S., Dufour, A.B. (2007): The ade4 package: implementing the duality diagram for ecologists, Journal of Statistical Software, 22(4), 19 p.

FDPPMA 22, 2010. Etude bilan des aménagements piscicoles réalisés en faveur de la Truite fario en Côtes d'Armor, bilan et perspectives d'actions, 52 p.

Feld C., 2004. Identification and measure of hydromorphological degradation in Central European lowland streams, Institute of Ecology, Department of Hydrobiology, University of Essen, 22 p.

Forget G., Bernez I., 2011. Assessment of the success of headwater restoration through the vegetation diversity analysis of four Oir river's tributaries, 7 p.

Fritz K.M., Johnson B.R., Walters D. M., 2006. Field operations manual for assessing the hydrologic permanence and ecological conditions of headwater streams, U.S. EPA, 130 p.

Frossard P.A., Lachat B. & Paltrinieri L, 1998. Davantage d'espace pour nos cours d'eau, Pour l'homme et la nature, Contributions à la protection de la nature en Suisse, Pro Natura, Bâle, n°20, 48 p.

Gerhard, M., 2000. Restoration of Streams with Large Wood: Effects of Accumulated and Built-in Wood on Channel Morphology, Habitat Diversity and Aquatic Fauna, International Review of Hydrobiology, **85**, 14 p.

Giuntoli I., Maugis P., Renard B., 2012. Evolutions observées dans les débits des rivières en France, sélection d'un réseau de référence et analyse de l'évolution temporelle des régimes des 40 dernières années, ONEMA, 8 p.

Goron, 2012. Enterrement des cours d'eau en tête de bassin : Quelles voies réglementaires pour arriver à la remise à ciel ouvert et comment anticiper le risque d'enterrement, Rapport de stage, ONEMA/Université Paul Verlaine de Metz, 85 p.

Hayot, 2011. Sur quels critères entreprendre la reconstitution de ripisylves diversifiées (en âge et en structure) et fonctionnelles sur le long terme ?, Rapport de stage, ONEMA/AERM/Agro Paris Tech, 69 p.

- Karlsson, 2005.** Modelling organic matter dynamics in headwater streams of south-western British Columbia, Canada, *Ecological Modelling*, **183**, 13 p.
- Keith P., Persat H., Feunteun E & Allardi J., 2011.** Les poisons d'eau douce de France, Biotope, Mèze, Muséum national d'histoire naturelle, Paris, 552 p.
- Klaar M.J., Hill D.F., Maddock I. & Milner A.M., 2011.** Interactions between instream wood and hydrogeomorphic development within recently deglaciated streams in Glacier Bay National Park, Alaska, *Geomorphology*, **130**, 12 p.
- Lane E.W., 1955.** The Importance of Fluvial Morphology in Hydraulic Engineering, American Society of Civil Engineering, Proceedings, 17 p.
- Ledard M., Gross F., Haury J., Lafontaine L., Hubaud M.-O., Vigneron T., Dubos C., Labat J.-J., Aubry M., Nioche-Seigneuret F., Vienne L., Craipeau F., 2001.** Restauration et entretien des cours d'eau en Bretagne, Guide technique, DIREN Bretagne, Rennes, Société Rivière-Environnement, Bègles, 91 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.
- Leguay J.P., 2002.** L'eau dans la ville au Moyen Age, Presse Universitaire Rennes, 493 p.
- Le Lay Y.-F. et Piégay H., 2007.** Le bois mort dans les paysages fluviaux français : éléments pour une gestion renouvelée, L'Espace géographique, **1**, 13 p.
- LIFE, 2009.** Éléments techniques pour la préservation des ruisseaux, Retour d'expériences du programme LIFE, Ruisseaux de têtes de bassins et faune patrimoniale associée, 2004 - 2009, 84 p.
- LUMET J.-C., 2011.** Entretien des cours d'eau, Notion d'entretien courant et de travaux soumis à réglementation loi eau, ONEMA, 6 p.
- Madsen B.L., 2010.** The stream and beyond: reinstating natural functions in streams and their floodplains, 39 p.
- 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 Pêche Piscicole, 16 p.
- Malavoi JR, 2006.** Retour d'expérience 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., Debais N., 2007.** Manuel de restauration hydromorphologique des cours d'eau, Publications de l'Agence de l'Eau Seine Normandie, 64 p.
- Malavoi J.R. et Bravard J.P., 2010.** Éléments d'hydromorphologie fluviale, ONEMA, 224 p.
- Malavoi J.R. et Souchon Y., 2012.** Éléments pour une harmonisation des concepts et des méthodes de suivi scientifique minimal, Volets hydromorphologie-hydroécologie, ONEMA, 61 p.

- Mathieu A., 2010.** Cours d'eau enterrés en tête de bassin : préconisations pour leur restauration, Rapport de stage, ONEMA/Université de Rennes 1, 36 p.
- Meyer J.L., D.L. Strayer, J.B. Wallace, S.L. Eggert, G.S. Helfman, N.E. Leonard, 2007.** The contribution of headwaters streams to biodiversity in river networks, *Journal of the American water resources association* **43**, 17 p.
- Mott, N., 2010.** Fish Live in Trees Too, River Rehabilitation and Large Woody Debris, Staffordshire Wildlife Trust, Stafford, UK, 28 p.
- Muotka T. & Laasonen P., 2002.** Ecosystem recovery in restored headwater streams : the role of enhanced leaf retention, *Journal of Applied Ecology*, **39**, 11 p.
- Navarro L., Péress J., Malavoi J.R., 2012.** Aide à la définition d'une étude de suivi – recommandations pour les opérations de restauration de l'hydromorphologie des cours d'eau, ONEMA, 48 p.
- Nguyen Van R., 2012.** Les altérations physiques en têtes de bassin versant sur les régions Bretagne-Pays de la Loire, ONEMA, 161 p.
- Niemi, G.J., DeVore P., Detenbeck N., Taylor D., Lima A., Pastor J., Yount J.D., and Naiman R.J., 1990.** Overview of case studies on recovery of aquatic systems from disturbance, *Environmental Management*, **14**, 16 p.
- OIEAU, 1993.** Etude bibliographique de l'impact des aménagements sur les capacités auto-épuratrices des cours d'eau, Etude inter-agences n°24, 108 p.
- ONEMA, 2010.** Recueil d'expériences sur l'hydromorphologie, ONEMA, 364 p.
- ONEMA, 2013.** Des sites de démonstration pour la restauration hydromorphologique des cours d'eau, Post-it juin-juillet 2013, n°46, 4 p.
- Oraison F., Souchon Y., Van Looy K., 2011.** Restaurer l'hydromorphologie des cours d'eau et mieux maîtriser les nutriments : une voie commune ?, ONEMA, IRSTEA, 7 p.
- Pander J., Geist J., 2013.** Ecological indicators for stream restoration success, Aquatic systems biology unit, department of ecology and ecosystem management, Université de Munich, 14 p.
- Péress J., 2013.** Restauration hydromorphologique des cours d'eau, Sites pilotes et sites de démonstration, le qui fait quoi, ONEMA, 7 p.
- Piegay H., Barge O., Bravard J.-P., Landon N. & Piery J.-L., 1996.** Comment délimiter l'espace de liberté des rivières ? In L'Eau, l'Homme et la Nature, 24èmes journées de l'Hydraulique, Congrès de la SHF du 18-20.9.96, Paris.
- Pierron F., 2005.** Restauration physique des cours d'eau dans le nord-est de la France. Conseil Supérieur de la Pêche. 18 p.
- Protocole RHS, 2003.** River Habitat Survey in Britain and Ireland, Field survey guidance manual, Scottish Environment Protection Agency and environment and heritage service, 74 p.

- R Development Core Team, 2011.** R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. ISBN 3-900051-07-0, URL <http://www.R-project.org/>.
- Rheinhardt, 1999.** Application of reference for assessing and restoring headwater ecosystems, *Restoration Ecology*, Vol. 7 No. 3, 11 p.
- Roche, D., 1984.** Le temps de l'eau rare du Moyen Âge à l'époque moderne. *Annales. Économies, Sociétés, Civilisations*. 39e année, N. 2, 16 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**, 13 p.
- Schneider, 2007.** Plaidoyer pour une restauration des cordons rivulaires naturels des ruisseaux et ruisselets forestiers, forêt wallonne n°86, Coopération pour un Renouveau Sylvicole, 15 p.
- Schumm S.A., 1977.** The fluvial system, Water Resources Publications, New-York, 338 p.
- Tassard A., 2011.** Evaluation 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 p.
- UICN France, 2012.** Panorama des services écologiques fournis par les milieux naturels en France, Volume 1 : contexte et enjeux, Paris, France.
- Vought L.B. et Lacoursière J.O., 2010.** Restoration of streams in the agricultural landscape, Sustainable water management group, Kristianstad university, 18 p.
- 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.
- Wolman M. G., 1954.** A method of sampling coarse river-bed material, *American geophysical union transacts* 35, 5 p.

Liste des annexes

Annexe 1 : Répartition géographique des délégations interrégionales de l'ONEMA et organigramme de la DIR 2

Annexe 2 : La balance de Lane, notion d'équilibre dynamique

Annexe 3 : Tableau récapitulatif des guides de restauration parcourus lors de la synthèse bibliographique

Annexe 4 : Schémas des techniques de restauration ciblées dans cette étude

Annexe 5 : Protocole « Questionnaire »

Annexe 6 : Protocole « Mesures »

Annexe 7 : Méthodologie d'acquisition des données complémentaires

Annexe 8 : Boxplots des variables caractéristiques des stations

Annexe 9 : Schéma d'un lit emboîté

Annexe 1 : Répartition géographique des délégations interrégionales de l'ONEMA et organigramme de la DIR 2



Figure 22 : Carte de répartition des délégations interrégionales de l'ONEMA

Tableau 14 : Organisation de la DIR 2

Délégué interrégional : Benoît Le Galliot		Délégué interrégional adjoint : Alix Nihouarn	
Unité administrative et logistique	Unité connaissance de l'état et des usages de l'eau et des milieux aquatiques	Unité appui aux politiques de l'eau	Unité contrôle des usages
Benoît Le Galliot Responsable d'unité	Thibault Vigneron Responsable d'unité Valorisation des connaissances (pressions, mesures), participation aux groupes de travail, suivi évaluation de projets, mise en place et suivi des réseaux	Alix Nihouarn Responsable d'unité Suivi et animation des Sage, contribution active au Sdage	Bruno Le Roux Responsable d'unité Animation de la démarche progrès, formation à l'OHP, avis techniques sur les grandes infrastructures
Martine Ménard Gestion des marchés publics, suivi des dépenses, logistique et inventaire, secrétariat délégation	X Gestion des bases de données, valorisation des données, cours d'eau RCS et RHP, Carhyce, pressions polluantes	Marie Andrée Arago Continuité écologique et migrateurs, ICE, classement des cours d'eau, Plagepomi.	Laurent Gigaud Soutien OHP, suivi des contrôles LGV, inventaires frayères, appui à l'utilisation de QGIS, suivi armement
Nelly Landry-Garnier	Olivier Ledouble	X	

Budget, suivi des dépenses, suivi du contrôle gestion, classement	Recueil et bancarisation des données Pays de Loire, gestion base ichtyologique. Traitement données poissons et hydromorphologie	Sage, zones humides, état des lieux	Unité spécialisée migrants
			Patrick Lapoirie
			Responsable d'unité Site de Nantes Stéphane Maugendre Christian Mock
Pascale Provost Chargée de gestion pour les ressources humaines, suivi de tempo 2, accueil	José Berdayes Recueil et bancarisation des données Bretagne, gestion base ichtyologique. Suivi réseau thermique. Suivi logistique	Mikaël Le Bihan Restauration hydromorphologie et continuité, tête de bassins versants, suivis expérimentaux. Formation des opérateurs.	Site de Ploërmel Yannick Chauvin François Rault Stéphane Prunet
Patricia Gauvin Entretien des locaux et des véhicules, appui	Josselin Barry Sigiste : administration des données, appui technique aux référents IG. Etat des lieux DCE	Nathalie Hamel Contrats territoriaux milieux aquatiques suivi réseau ONDE – BSH. Espèces exogènes, Natura 2000. Alimentation du recueil REX Assistante de prévention	
Eric Baglinière Correspondant informatique (20% du temps)		Pierre Marie Bidal Mise en forme de documents, matériel d'analyse, analyses biologiques, numérisation de documents	

Annexe 2 : La balance de Lane, notion d'équilibre dynamique

Le débit liquide (Q), variable selon les saisons (précipitations), et le débit solide (Q_s), déterminé par la charge en matériaux minéraux fins et/ou grossiers, sont à l'origine des processus d'érosion et de dépôt. L'équilibre du cours d'eau oscillera en effet entre érosion et dépôts, selon que l'un ou l'autre des débits sera prédominant. **La balance de Lane (1955) illustre ce principe d'équilibre dynamique** (figure 3)

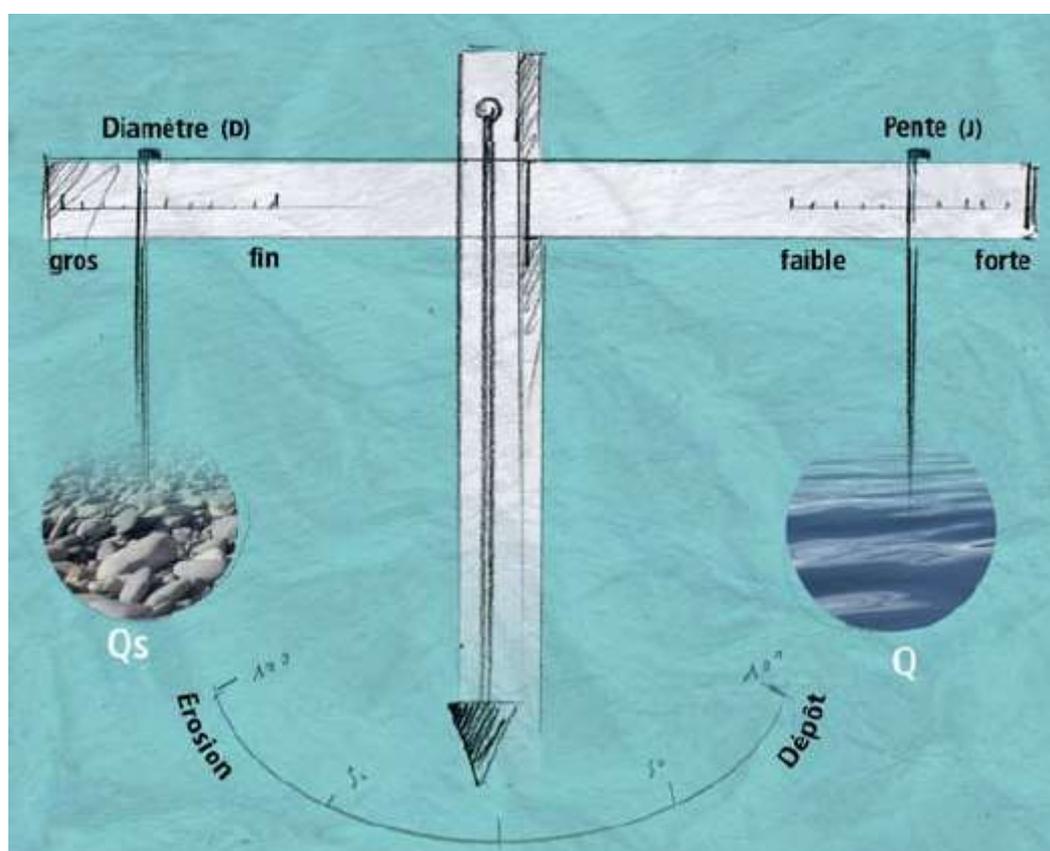


Figure 3 : La « balance de Lane » et le principe de l'équilibre dynamique (Malavoi & Bravard 2010, d'après Lane)

Lorsque le débit liquide devient moins important, la puissance du cours d'eau ne lui permet plus de transporter les matériaux solides « lourds » et le phénomène de dépôt se met en place. Les éléments les plus fins se déposent lorsque le débit liquide est particulièrement faible et inférieur au débit solide ($Q < Q_s = \text{dépôt}$).

La fluctuation des quantités solides et liquides étant importante à différentes échelles de temps (journée, année, milliers d'années...), un « **ajustement permanent** » de la morphologie du cours d'eau autour de conditions moyennes, se fait par le biais de ces processus d'érosion et de dépôt (Malavoi et Bravard, 2010).

Plus les **oscillations de l'équilibre dynamique** seront fortes, plus les ajustements morphologiques du lit du cours d'eau (largeur, profondeur, importance du méandrage) seront importants.

Annexe 3 : Tableau récapitulatif des guides de restauration parcourus lors de la synthèse bibliographique

Année	Pays	Nom du guide	Technique(s) proposée(s)
1998	France	Guide technique n°1 - La gestion des boisements de rivières. Fascicule 1&2	Rôle de la ripisylve, conseil de gestion et d'entretien de la végétation riveraine.
2000	Australie	A rehabilitation Manual for Australian Streams	Restauration et suivi pour les cours d'eau en zones aride et semi-aride. Bois en rivière et ripisylve.
2001	France	Restauration et entretien des cours d'eau en Bretagne	Différentes étapes de réalisation d'un projet : démarches, techniques et objectifs.
2002	Angleterre	Manual of River Restoration Techniques	Défecteurs, pose de blocs, création de mares, protection des berges, déversoirs, aménagement de passage à gué, reméandrage, reconnexion d'annexes fluviales.
2003	Belgique	Guide méthodologique pour le choix d'aménagements appropriés en matière de conservation des sols et des eaux	Lutte contre l'érosion, le ravinement et les coulées de boue : talus, bandes enherbées, barrières végétales et pratiques culturales.
2005	Etats-Unis	An integrated Framework to Restore Small Urban Watershed V2.0	Gestion des eaux pluviales, gestion de la ripisylve, diversification des habitats, étude des points de rejets d'eaux usées non autorisés.
2005	France	Grands types d'intervention permettant d'améliorer la qualité physique des cours d'eau	Reméandrage, déblai/remblai, risbermes, diversification du lit par implantation de blocs, banquettes ancrées avec sous berges, épis crénelé avec sous berges artificielles.
2006	France	Retour d'expérience d'opérations de restauration de cours d'eau et de leurs annexes, menées sur le bassin RMC	Dysfonctionnements, approches typologiques et techniques de restauration selon le niveau d'ambition choisi.
2007	Belgique	La gestion physique des cours d'eau : bilan d'une décennie d'ingénierie écologique	Evolution du génie végétal, définition du "bon" génie végétal et notion d'espace de liberté.
2007	France	Manuel de restauration hydromorphologique des cours d'eau	Aménagements piscicoles, création d'une ripisylve, épis, bancs et risbermes alternés, reconstitution du matelas alluvial, seuils et rampes, reconnexion d'annexes hydrauliques, arasement/dérasement de seuils, suppression des contraintes latérales, remise à ciel ouvert de cours d'eau, modification de la géométrie du lit mineur/ moyen, diversification de berges sur grands cours d'eau navigués, suppression des digues, suppression d'étangs, reméandrage ou recréation de cours d'eau
2007	Luxembourg	Renaturation des cours d'eau Restauration des habitats humides	Gestion des embâcles et de la ripisylve raisonnée, reméandrage, réactivation de la plaine alluviale, remise dans le talweg, restauration en milieu urbain, reconnexion des annexes hydrauliques
2009	France	Techniques de préservation des ruisseaux	Guide technique sur la restauration des têtes de bassin versant. Création d'un nouveau lit, reméandrage, diversification des habitats, exploitations agricoles et ruisseaux de têtes de bassins, gestion et exploitation forestière, déplacements de la faune aquatique.
2009	France	Restauration hydromorphologique des petits cours d'eau de plaine	Diversifier les habitats, créer un lit d'étiage, recharge granulométrique, déblai/remblai, reméandrage, création d'un nouveau lit, effacement d'ouvrages, protection de berges, création de seuils.

2010	France	Etude bilan des aménagements piscicoles en faveur de la Truite fario en Côtes d'Armor – Fiches techniques	Sous berges artificielles, seuils, épis, blocs, rampe d'enrochements, risbermes, pré-barrage, rivière de contournement, enlèvement et remplacement d'ouvrage, passe à poissons, effacement total ou partiel d'un ouvrage, recharge granulométrique, déblai/remblai.
2010	France	Guide de gestion des travaux de renaturation des émissaires agricoles de plaine sur le bassin Rhin Meuse	Dégradations physiques faites aux émissaires agricoles Fiches techniques de restauration : Plantation et gestion de la végétation, enlèvement raisonné des obstacles à l'écoulement, gestion des zones humides latérales, diversification des écoulements, diversification du tracé du cours d'eau, protection de berges, rétrécissement du lit mineur, aménagement des exutoires de drains
2010	France	Restauration des cours d'eau enterrés	Création d'un nouveau lit, reméandrage, aménagement du réseau hydrographique annexe, gestion de la ripisylve et suivis des restaurations.
2011	Luxembourg	Protection transfrontalière des milieux aquatiques et des ressources en eau	Aménagements en milieu agricole d'abreuvoirs et d'ouvrage de franchissement du bétail. Echelle à poissons, aménagement de buse, remplacement d'ouvrage, enrochements, restauration d'annexes et d'étangs, gestion d'espèces invasives, alternatives aux pesticides.
2011	Québec	Manuel d'accompagnement pour la mise en valeur de la biodiversité des cours d'eau en milieu agricole	Etapes de réalisation d'un projet Aménagements hydro-agricoles, aménagement pour la stabilité des berges, actions pour la biodiversité
2011	France	Restaurer et préserver les cours d'eau. Restauration hydromorphologique et territoires - Concevoir pour négocier	Les conditions de mise en œuvre de la restauration physique. Le guide vise à aider la conception et la négociation des projets de restauration hydromorphologique pour soutenir le bon état écologique des cours d'eau.
2012	Suisse	Recueil des fiches sur l'aménagement et l'écologie des cours d'eau	Revitalisation de cours d'eau, restauration de la dynamique naturelle des cours d'eau, diversification des habitats, outil d'évaluation : "indice hydromorphologique de la diversité", amélioration de la connectivité latérale et longitudinale, élargissement local des embouchures, rampes en enrochements

Annexe 4 : Schémas des techniques de restauration ciblées dans cette étude

La création d'un nouveau lit

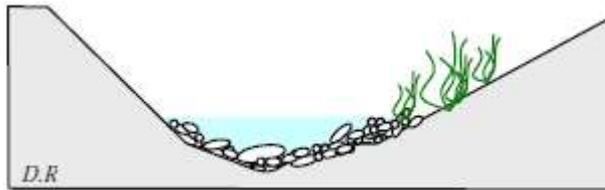


Figure : Création d'un nouveau lit (Bardon, 2009)

Le déblai/remblai

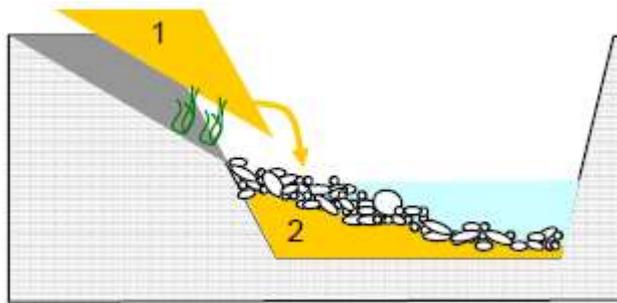


Figure : Déblai/remblai (Bardon, 2009)

La recharge granulométrique

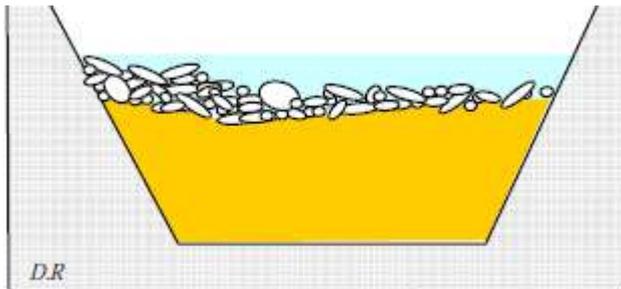


Figure : Recharge granulométrique (Bardon, 2009)

Le reméandrage

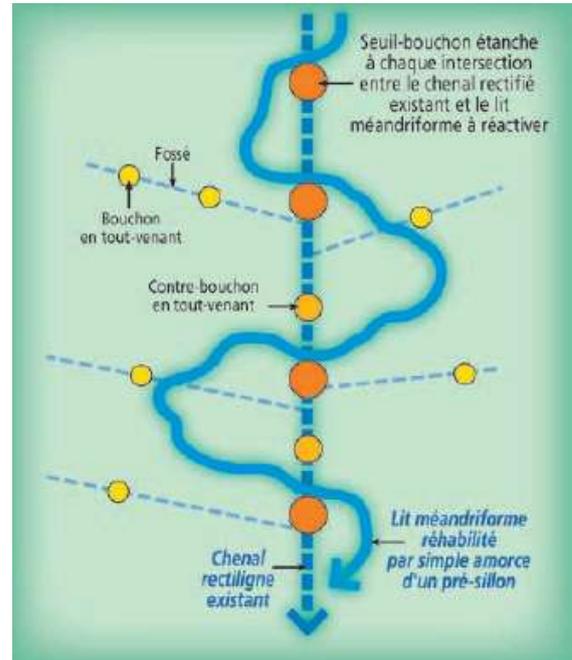


Figure :

La remise dans le talweg



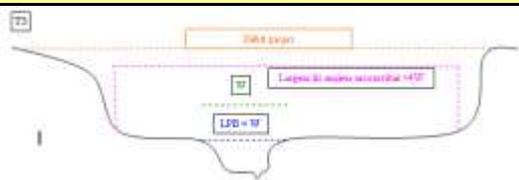
Figure 23: Remise dans le talweg (GGDL, 2007)

Annexe 5 : Protocole « Questionnaire »

SUIVI RESTAURATION - Questionnaire			
Date :	Opérateurs :	Id sélection :	
Eléments du diagnostic			
Diagnostic des conditions altérées <input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non			
Pressions sur le bassin versant :			
<input type="checkbox"/> Erosion des sols (granulats fins) <input type="checkbox"/> Cultures <input type="checkbox"/> Elevage <input type="checkbox"/> Barrages <input type="checkbox"/> Imperméabilisation <input type="checkbox"/> Rejets STEP <input type="checkbox"/> Prélèvements AEP <input type="checkbox"/> Extraction de granulats <input type="checkbox"/> Traitements phytosanitaires <input type="checkbox"/> Irrigation <input type="checkbox"/> Déforestation <input type="checkbox"/> Déficit de fonctionnalité piscicole <input type="checkbox"/> Autre :			
Pressions autour du tronçon restauré :			
<input type="checkbox"/> Cultures <input type="checkbox"/> Emprise foncière <input type="checkbox"/> Elevage <input type="checkbox"/> Protection des berges excessives <input type="checkbox"/> Drains <input type="checkbox"/> Dérivation <input type="checkbox"/> Présence d'étangs sur le cours d'eau <input type="checkbox"/> Suppression de la ripisylve <input type="checkbox"/> Digos <input type="checkbox"/> Seuils			
Identification des altérations des tracés/ du profil ... :			
<input type="checkbox"/> Hors talweg <input type="checkbox"/> Rectiligne <input type="checkbox"/> Recalibré <input type="checkbox"/> Banalisé			
Historique des travaux hydrauliques			
Année 1 : Travaux : Année 2 : Travaux :			
Impacts identifiés : <input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non			
Hydrologie : <input type="checkbox"/> Accélération des écoulements <input type="checkbox"/> Accentuation des régimes hydrologiques <input type="checkbox"/> Forte variabilité entre débits d'étiage et plein bord d'origine non identifiée <input type="checkbox"/> Perte d'étanchéité <input type="checkbox"/> Ralentissement des écoulements			
Lit : <input type="checkbox"/> Colmatage des substrats grossiers <input type="checkbox"/> Surcharge en MES <input type="checkbox"/> Elargissement du lit mineur <input type="checkbox"/> Incision du lit mineur <input type="checkbox"/> Homogénéisation des faciès <input type="checkbox"/> Talweg perché <input type="checkbox"/> Perte de substrat alluvial <input type="checkbox"/> Perturbation du transit de la charge de fond <input type="checkbox"/> Tête de bassin enterrée			
Berges : <input type="checkbox"/> Blocage des processus d'érosion latérale <input type="checkbox"/> Modification de la structure des berges <input type="checkbox"/> Disparition de la ripisylve <input type="checkbox"/> Autres :			
Etude du réseau hydrographique annexe <input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non Connexion directe : <input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non			

Enjeux et objectifs des travaux de restauration :			
Objectifs définis : <input type="checkbox"/> oui <input type="checkbox"/> non			
<input type="checkbox"/> Hydrologie <input type="checkbox"/> Alimenter la nappe <input type="checkbox"/> Alimenter la zone humide <input type="checkbox"/> Soutenir le débit d'étiage <input type="checkbox"/> Ralentir les écoulements (en crue) <input type="checkbox"/> Limiter les pics de crue <input type="checkbox"/> Permettre le débordement régulier <input type="checkbox"/> Permettre la connexion des bras morts <input type="checkbox"/> Hydromorphologie <input type="checkbox"/> Améliorer la résilience <input type="checkbox"/> Diversifier les écoulements et les habitats <input type="checkbox"/> Restaurer le gabarit (ou profil) <input type="checkbox"/> Restaurer la sinuosité <input type="checkbox"/> Permettre l'érosion des berges <input type="checkbox"/> Limiter le colmatage <input type="checkbox"/> Physico-chimie <input type="checkbox"/> Favoriser l'auto-épuration <input type="checkbox"/> Favoriser la rétention de la matière organique naturelle <input type="checkbox"/> Biologie <input type="checkbox"/> Créer des frayères <input type="checkbox"/> Soutenir l'alimentation des populations piscicoles <input type="checkbox"/> Retrouver des espèces spécialisées <input type="checkbox"/> Limiter les impacts thermiques <input type="checkbox"/> Préserver la biodiversité remarquable <input type="checkbox"/> Espèce cible, préciser : <input type="checkbox"/> Objectifs annexes : <input type="checkbox"/> Diminuer les impacts sur le réseau hydrographique annexe <input type="checkbox"/> Loisirs <input type="checkbox"/> Tourisme <input type="checkbox"/> Paysager <input type="checkbox"/> Expérimentation <input type="checkbox"/> Pédagogie <input type="checkbox"/> Autres :			
Etat des lieux initial <input type="checkbox"/> Non <input type="checkbox"/> Oui, quelle année :			
Compartiments	Biologique	Hydromorphologique	Physico-chimique
Méthodes utilisées	<input type="checkbox"/> IBGN <input type="checkbox"/> IBMR <input type="checkbox"/> IPR <input type="checkbox"/> Autres :	<input type="checkbox"/> Carhyce <input type="checkbox"/> IAM <input type="checkbox"/> REH <input type="checkbox"/> Score hétérogénéité <input type="checkbox"/> Syrah <input type="checkbox"/> Autres	<input type="checkbox"/> Classique BE <input type="checkbox"/> Écologique <input type="checkbox"/> Chimie NQE <input type="checkbox"/> Autres :
Station témoin : <input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non		Station de référence : <input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non	
Débit à plein bord = Débit biennale Q2 <input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non			

Identification des conditions de référence <input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non				
Etat de référence défini : <input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non <input type="checkbox"/> Biologique <input type="checkbox"/> Hydromorphologique				
A partir de : <input type="checkbox"/> Cartes <input type="checkbox"/> Cours d'eau voisin <input type="checkbox"/> Indices historiques <input type="checkbox"/> Station amont <input type="checkbox"/> Station aval <input type="checkbox"/>				
Référence bibliographique <input type="checkbox"/> Autre:				
Analyse de la répartition granulométrique : <input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non				
Calcul de la puissance spécifique : <input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non				
Calcul de la sinuosité théorique : <input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non				
Calcul du gabarit de référence : <input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non				
Définition des travaux sur tronçon				
Usages à concilier : <input type="checkbox"/> Non <input type="checkbox"/> Oui :				
Contexte : <input type="checkbox"/> Culture <input type="checkbox"/> Forêt naturelle <input type="checkbox"/> Forêt industrielle <input type="checkbox"/> Prairie fauchée <input type="checkbox"/> Paturage <input type="checkbox"/> Urbain bétonné				
Dimensionnement des techniques				
<input type="checkbox"/> Intuitif <input type="checkbox"/> Expérimental <input type="checkbox"/> Par calcul				
<input type="checkbox"/> Reproduction d'une expérience réussie sur un cours d'eau similaire ailleurs				
Choix des techniques				
Linéaire total restauré (m) :				
Recharge granulométrique : linéaire rechargée, hauteur, granulométrie, nature géologique, volume, origine				
Déblais / remblais : linéaire, section avant et après, gabarit visé initialement				
Reméandrage : linéaire, coefficient de sinuosité, référence, gabarit visé				
Remise dans le talweg : linéaire, référence, coefficient de sinuosité, gabarit visé				
Epis, déflecteurs, risbermes : Orientation (angle) par rapport au sens de l'écoulement, nature (bois, roche), longueur, largeur				
Techniques de restauration				
Linéaire (m)				
info sup encadré jaune				
Forme du lit :	<input type="checkbox"/> Carré		<input type="checkbox"/> Trapèze	
	<input type="checkbox"/> Noue		<input type="checkbox"/> Variée	
Choix des engins :				
Engins utilisés : <input type="checkbox"/> Manuels <input type="checkbox"/> Portatifs <input type="checkbox"/> Lourds, depuis <input type="checkbox"/> la berge ou <input type="checkbox"/> dans le lit mineur				
Utilisation de matériel lourd limitée : <input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non				
Dimensionnement du gabarit du lit				
Lit à plein bord				
Débits morphogènes pris en compte <input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non				
Lit dimensionné à partir de <input type="checkbox"/> Q1,5 <input type="checkbox"/> Q2 <input type="checkbox"/> Q5 <input type="checkbox"/> Autres				
Lit emboîté (si gabarit >Q2)				
Largeur du lit emboîté (m) : RG : RD :				
Lit de crue dimensionné à partir de : Q...				
Lit d'étiage				
Présence d'un lit d'étiage : <input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non				
Lit d'étiage dimensionné à partir de : Q...				
Cadre de l'opération : <input type="checkbox"/> CRE/CTMA <input type="checkbox"/> Procédure pénale <input type="checkbox"/> Autre :				
Aspect réglementaire des travaux : <input type="checkbox"/> Dossier loi sur l'eau <input type="checkbox"/> DIG <input type="checkbox"/> DUP <input type="checkbox"/> Autre :				
Les travaux ont-ils fait l'objet d'échanges parcellaires <input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non				



Phase travaux	
Période de réalisation des travaux	
Saison	Mois
Enjeu : <input type="checkbox"/> Agricole <input type="checkbox"/> Biologique, travaux réalisés hors période de reproduction ou de migration <input type="checkbox"/> Hydrique	
Mesures préventives : <input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non	
<input type="checkbox"/> Clôtures temporaires <input type="checkbox"/> Dérivation provisoire du cours d'eau <input type="checkbox"/> Dispositifs de filtration	
<input type="checkbox"/> Ouvrages de franchissement provisoires <input type="checkbox"/> Passage à gué pour les engins de chantiers	
<input type="checkbox"/> Pêche de sauvetage <input type="checkbox"/> Autres :	
Imprévus de réalisation (conception et mise en oeuvre) : <input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non	
<input type="checkbox"/> Ajustements morphologiques imprévus ou disproportionnés <input type="checkbox"/> Erreur de conception <input type="checkbox"/> Crues importantes <input type="checkbox"/> Erreur lors des travaux <input type="checkbox"/> Retard <input type="checkbox"/> Erreur de dimensionnement : <input type="checkbox"/> Gabarit <input type="checkbox"/> Sinuosité	
<input type="checkbox"/> Ecoulements infiltrés <input type="checkbox"/> Autres :	
Aménagements du Réseau Hydrographique Annexe : <input type="checkbox"/> Non <input type="checkbox"/> Oui : <input type="checkbox"/> Fossé aveugle <input type="checkbox"/> Bassin tampon <input type="checkbox"/> Collecteur de drains <input type="checkbox"/> Suppression du réseau <input type="checkbox"/> Autres :	
Après Travaux	
Facteurs limitants : <input type="checkbox"/> Assecs <input type="checkbox"/> Etiage sévère <input type="checkbox"/> Qualité d'eau <input type="checkbox"/> Ombrage <input type="checkbox"/> Bloom algal <input type="checkbox"/> Colmatage	
Problèmes survenus après restauration : <input type="checkbox"/> Suppression de la ripisylve <input type="checkbox"/> Réouverture d'abreuvoirs sauvages <input type="checkbox"/> Autre :	
Suivis : <input type="checkbox"/> Hydromorphologique <input type="checkbox"/> Macroinvertébrés <input type="checkbox"/> Macrophytes <input type="checkbox"/> Poisson <input type="checkbox"/> Photographique <input type="checkbox"/> Sociologique <input type="checkbox"/> Autres :	
Cours d'eau dans son lit d'origine <input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non <input type="checkbox"/> ?	
Mesures de préservation : <input type="checkbox"/> Non <input type="checkbox"/> Oui : <input type="checkbox"/> Aménagement d'abreuvoirs <input type="checkbox"/> Clôtures <input type="checkbox"/> Création de passage à gué <input type="checkbox"/> Plantation de ripisylve <input type="checkbox"/> Autres :	
Objectifs initiaux atteints : <input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non <input type="checkbox"/> Pas encore, mais amélioration lente	
Entretien de l'aménagement <input type="checkbox"/> Non <input type="checkbox"/> Oui :	
Sensibilisation des gestionnaires et propriétaires riverains	
Dialogue sur l'intérêt du bois en rivière : <input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non	
Dialogue sur l'intérêt de la recharge granulométrique : <input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non	
Préconisations sur les techniques d'entretien de la ripisylve et des cours d'eau : <input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non	
Rappel de la réglementation : <input type="checkbox"/> Non <input type="checkbox"/> Oui : <input type="checkbox"/> Bandes enherbées <input type="checkbox"/> ZNT <input type="checkbox"/> Encore non existant	
<input type="checkbox"/> Autres :	
Sensibilisation du public	
Réunion d'informations des riverains avant les travaux : <input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non	
Réalisation d'une enquête de satisfaction : <input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non	
Communication : <input type="checkbox"/> Articles de presse <input type="checkbox"/> Articles dans les bulletins municipaux <input type="checkbox"/> Articles sur le site internet de la commune <input type="checkbox"/> Articles dans magazine spécialisé (pêche) <input type="checkbox"/> Conférences <input type="checkbox"/> Exposition <input type="checkbox"/> Journée de sensibilisation <input type="checkbox"/> Panneaux d'information <input type="checkbox"/> Plaquette d'explication du projet <input type="checkbox"/> Programme d'animations	
<input type="checkbox"/> Reportage sur une chaîne de télévision locale <input type="checkbox"/> Réunion collective <input type="checkbox"/> Sentier pédagogique <input type="checkbox"/> Vidéos	
<input type="checkbox"/> Visites organisées <input type="checkbox"/> Autres :	
Bilan du projet	
Points positifs :	
Points négatifs :	
Recommandations techniques :	

Vision des acteurs

Pêcheurs : Projet bien perçu Quelques réfractaires Une majorité contre, aujourd'hui satisfaite
 Une majorité contre, toujours insatisfaite

Collectivités : Projet bien perçu Quelques réfractaires Une majorité contre, aujourd'hui satisfaite
 Une majorité contre, toujours insatisfaite

Exploitants : Projet bien perçu Quelques réfractaires Une majorité contre, aujourd'hui satisfaite
 Une majorité contre, toujours insatisfaite

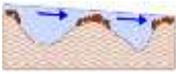
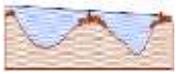
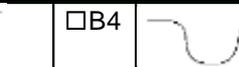
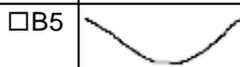
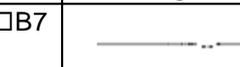
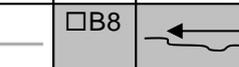
Riverains : Projet bien perçu Quelques réfractaires Une majorité contre, aujourd'hui satisfaite
 Une majorité contre, toujours insatisfaite

Documents associés à la restauration

Cartographie Données diagnostic Données du suivi Photographies avant projet Autres : . . .

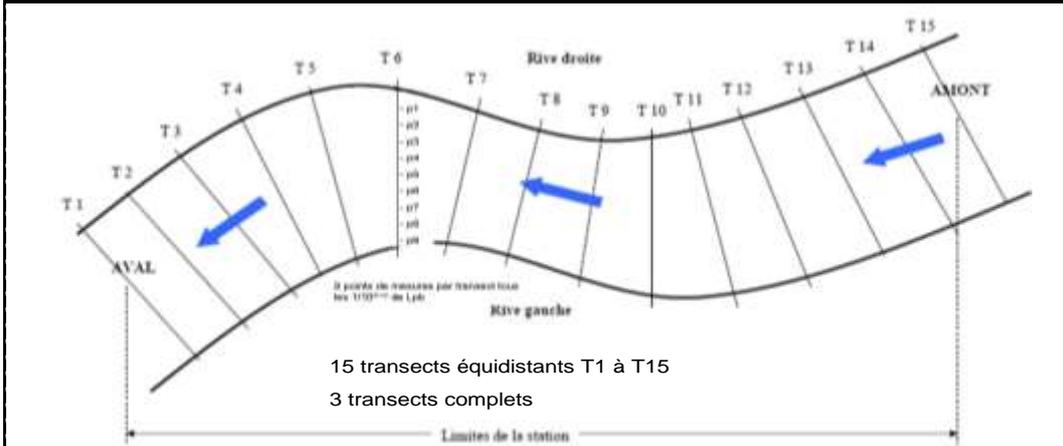
Remarques :

Annexe 6 : Protocole « Mesures »

SUIVI RESTAURATION - Mesures							
Hdébut :		Hfin :					
Date :	Opérateurs :	Id sélection :					
Commune :		Département :					
Cours d'eau :		Code_ME :					
Coordonnées linéaire restauré							
Aval (WGS 84)	N :	Amont (WGS 84)	N :				
	E :		E :				
Caractéristiques de la station							
Longueur de la station : 30m minimum, si Lpb>2,10m alors longueur = 14 Lpb							
Lpb (m) :	GPS (en dd)	N (WGS84)	E (WGS84)				
14*Lpb :	Amont						
Largeur du lit majeur (m)	Aval						
Niveau d'intermittence des écoulements							
<input type="checkbox"/> A	<input type="checkbox"/> B	<input type="checkbox"/> C	<input type="checkbox"/> D	<input type="checkbox"/> E			
							
A = Ecoulement continu / B = Ecoulement visible et interstitiel / C = Surface en eau mais absence d'écoulement D=Surface en eau dans les « profonds » uniquement / E = Pas d'eau visible							
Forme de la vallée							
<input type="checkbox"/> B1	<input type="checkbox"/> B2	<input type="checkbox"/> B3	<input type="checkbox"/> B4	<input type="checkbox"/> B5	<input type="checkbox"/> B6	<input type="checkbox"/> B7	<input type="checkbox"/> B8
							
Si B8 : Largeur du Lit (RG - RD) en m :							
B1 = peu profond / B2 = profond / B3 = gorge / B4 = vallée en U / B5 = bol / B6 = vallée asymétrique / B7 = pas de vallée évidente / B8 = lits emboîtés ou en terrasse							
Cours d'eau sur <input type="checkbox"/> Alluvions <input type="checkbox"/> Roche mère							
Présence de : <input type="checkbox"/> Zone de dépôt <input type="checkbox"/> Zone d'érosion <input type="checkbox"/> Zone d'équilibre							
Positionnement par rapport au talweg							
Dans son talweg : <input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non Si non, 3 distances terrain ou SIG							
Distance 1 (m) :		Distance 2 (m) :		Distance 3 (m) :			
La sinuosité <i>Deco = Distance écologique / Deu = Distance euclidienne</i>							
Sinuosité tronçon restauré							
Deco =				Deu =			
Sinuosité homogène : <input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non							

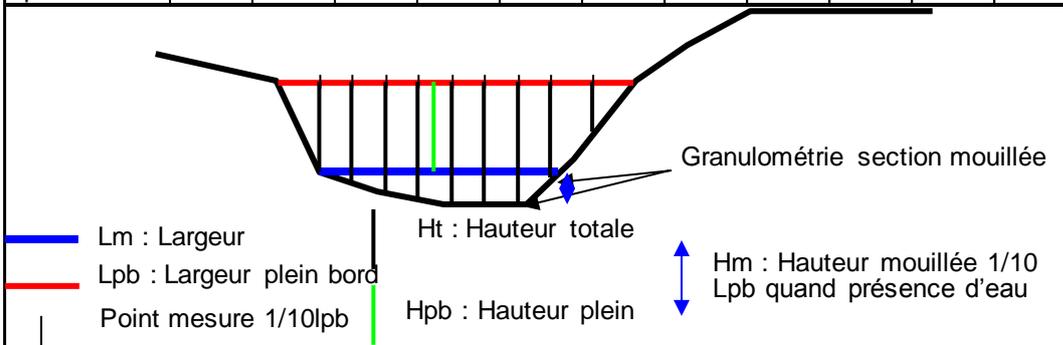
Géométrie en travers

Gabarit du lit sur la station restaurée



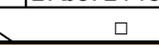
Si drains présents les indiquer sur le schéma et noter leur hauteur par rapport au fond du lit mineur

Transect	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
Ht											
Lpb											
Transect	12	13	14	15							
Ht											
Lpb											



Transect n° :	Lm =									Lpb =		D, EQ, E
1/10 Lpb	1	2	3	4	5	6	7	8	9			
Hm												
Granulométrie												
Ht												
Pberge		Sous berge			Epaisseur (m) :							
Transect n° :	Lm =									Lpb =		D, EQ, E
1/10 Lpb	1	2	3	4	5	6	7	8	9			
Hm												
Granulométrie												
Ht												
Pberge		Sous berge			Epaisseur (m) :							
Transect n° :	Lm =									Lpb =		D, EQ, E
1/10 Lpb	1	2	3	4	5	6	7	8	9			
Hm												
Granulométrie												
Ht												
Pberge		Sous berge			Epaisseur (m) :							

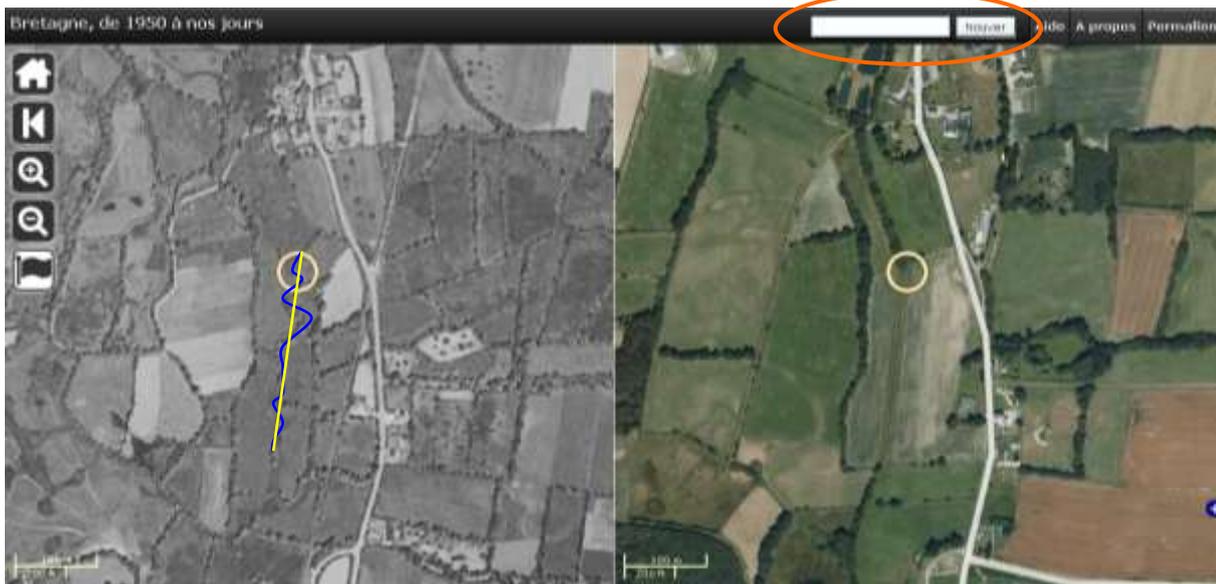
Puissance spécifique du tronçon restauré										
Mesure de la pente										unités : m / m
Fond	Altitude amont :					Altitude aval :				
Ligne	Altitude amont :					Altitude aval :				
Estimation du coefficient de rugosité Manning-Strickler K										
Matériaux constitutifs de la berge	<input type="checkbox"/> béton	<input type="checkbox"/> sable	<input type="checkbox"/> pierres							
	<input type="checkbox"/> limon	<input type="checkbox"/> graviers	<input type="checkbox"/> blocs rocheux							
Degré d'irrégularité	<input type="checkbox"/> très faible	<input type="checkbox"/> faible	<input type="checkbox"/> moyen	<input type="checkbox"/> important						
Variations de section	<input type="checkbox"/> progressives		<input type="checkbox"/> occasionnelles	<input type="checkbox"/> fréquentes						
Présence d'obstacles	<input type="checkbox"/> négligeable < 5% section		<input type="checkbox"/> sensible : 15 à 50 %							
	<input type="checkbox"/> faible < 15 %		<input type="checkbox"/> très marquée : > 50 %							
Végétation lit+berge	<input type="checkbox"/> négligeable	<input type="checkbox"/> faible	<input type="checkbox"/> moyenne	<input type="checkbox"/> importante	<input type="checkbox"/> très importante					
Diversité des habitats										
Alternance des faciès										
Ple : plat lentique Pic : Plat courant Ch : Chenal lentique Chlo : Chenal lotique Rad : Radier M : Mouille de concavité Rp : Rapide Fd : Fosse de dissipation Fa : Fosse d'affouillement C : Chute										
N°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Faciès										
Linéaire (m)										
Si Fx, Profondeur (m)										
Si C, Hauteur (m)										
N°	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Faciès										
Linéaire (m)										
Si Fx, Profondeur (m)										
Si C, Hauteur (m)										
Présence de facteurs de diversification										
Type : Bois : bois en rivières / Bl : blocs / D : Dalles / M : motte de terre végétalisée / V : Végétation aquatique										
* BOF : barrage ouvert au fond / BS : barrage strict / ED : Entassement Déflecteur / I : indéterminée EP : Entassement parallèle / D : Déflecteur / Ba : bancs / Ch : chute / Cr : création de zones de dépôt / E : érosion des berges / M : Mouilles / Mhy : modification hydraulique de l'écoulement / R : rétention de MO										
N°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Type										
Longueur (m)										
Diamètre (cm)										
Conséquences*										
Granulométrie										
Mesures Granulométriques sur radier										unités : mm
Evaluation visuelle du colmatage : <input type="checkbox"/> 0 - 25 % <input type="checkbox"/> 25 - 50 % <input type="checkbox"/> 50 - 75 % <input type="checkbox"/> 75 - 100 % Granulométrie liée (<i>gratter</i>) : <input type="checkbox"/> 0 <input type="checkbox"/> + <input type="checkbox"/> ++ <input type="checkbox"/> +++ <input type="checkbox"/> ++++ Nature colmatage : Présence d'une couche d'armure : <input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non										

Bandes riveraines (10m)				
Occupation des sols				
Rive gauche : <input type="checkbox"/> Culture <input type="checkbox"/> Forêt <input type="checkbox"/> Forêt industrielle <input type="checkbox"/> Prairie <input type="checkbox"/> Paturage <input type="checkbox"/> Urbain bétonné <input type="checkbox"/> Urbain pelouse entretenue <input type="checkbox"/> Industrie <input type="checkbox"/> Zone Humide <input type="checkbox"/>				
Rive droite : <input type="checkbox"/> Culture <input type="checkbox"/> Forêt <input type="checkbox"/> Forêt industrielle <input type="checkbox"/> Prairie <input type="checkbox"/> Paturage <input type="checkbox"/> Urbain bétonné <input type="checkbox"/> Urbain pelouse entretenue <input type="checkbox"/> Industrie <input type="checkbox"/> Zone Humide <input type="checkbox"/>				
Description de la ripisylve Unités : m				
H: Herbacée Ar: Arbustive Arb: Arborée				
	Rive gauche		Rive droite	
Strates présentes				
Spontanée/plantée				
Distance à la berge				
Epaisseur moyenne				
linéaire occupé				
Luminosité				
Espèces de la strate arborée et arbustive (nom commun)				
1		4		7
2		5		8
3		6		9
Erodabilité des berges				
Granulométrie: R : Affleurement Rocheux (dalles) / A : Argiles / L : Limons / C : Cailloux / S : Sables / G : Gravier / P : Pierres / TV : Terre Végétale / Art. : Artificielle				
	Rive droite		Rive gauche	
Position stratigraphique	Granulométrie	Végétation / Racines	Granulométrie	Végétation / Racines
Haut de berge		<input type="checkbox"/> Abs. <input type="checkbox"/> Prés.		<input type="checkbox"/> Abs. <input type="checkbox"/> Prés.
Milieu de berge		<input type="checkbox"/> Abs. <input type="checkbox"/> Prés.		<input type="checkbox"/> Abs. <input type="checkbox"/> Prés.
Bas de berge		<input type="checkbox"/> Abs. <input type="checkbox"/> Prés.		<input type="checkbox"/> Abs. <input type="checkbox"/> Prés.
Inclinaison des berges	<input type="checkbox"/> 	<input type="checkbox"/> 	<input type="checkbox"/> 	<input type="checkbox"/> 
Appréciation sur l'érodabilité :				
RD <input type="checkbox"/> Nulle <input type="checkbox"/> Faible <input type="checkbox"/> Moyenne <input type="checkbox"/> Importante RG <input type="checkbox"/> Nulle <input type="checkbox"/> Faible <input type="checkbox"/> Moyenne <input type="checkbox"/> Importante				
Présence de protection de berges : <input type="checkbox"/> Non <input type="checkbox"/> Oui, nature :				
Récupération de végétation spontanée <input type="checkbox"/> Oui : <input type="checkbox"/> Herbacée <input type="checkbox"/> Arbustive <input type="checkbox"/> Arborée <input type="checkbox"/> Non, causes possibles :				
Observation sur la stabilité des berges : <input type="checkbox"/> Effondrement <input type="checkbox"/> Glissement <input type="checkbox"/> RAS				
Espace de mobilité (m) :				
Observations				

Annexe 7 : Méthodologie d'acquisition des données complémentaires

Sinuosités historiques :

- Connexion à l'un des sites précités
- Obtenir la photographie aérienne ancienne par téléchargement ou capture d'écran
- Ouvrir l'image obtenue sur le logiciel SIG Quantum GIS. Le géoréférencement n'est pas nécessaire car il s'agit d'un rapport de distance.
- A partir de la photographie aérienne ancienne (à gauche sur la **figure X** ci-dessous) et de l'outil mesure de distance de Q-Gis, mesurer les distances écologique (en **bleu**) et euclidienne (en **jaune**) afin d'obtenir la sinuosité historique (1950).



Pour les sites ligériens des Pays de la Loire, le même procédé est utilisé à partir de l'application " remonter le temps" sur géoportail. La photographie aérienne ancienne (1950) est téléchargeable. La sinuosité est obtenue selon le même procédé que précédemment.

La sinuosité initiale reprend la même démarche à partir d'orthophotos datant d'avant la phase de réalisation des travaux dans la majorité des cas.

Débits de référence :

Tous les cours d'eau prospectés lors de cette étude ne disposent pas d'une station hydrométrique. L'obtention des débits Q_x est réalisée selon une méthode appliquée au sein de la DIR Centre Poitou-Charentes de l'ONEMA :

- Recherche de stations hydrométriques sur des cours d'eau proches de ceux étudiés et sur un socle géologique similaire.
- A partir des données "Synthèse" de la banque HYDRO, noter les débits Q_2 , Q_5 et Q_{10} et la surface du bassin versant.

- Calculer les Q2, Q5 et Q10 théorique de notre bassin versant selon :

$$Q_x * S_{BV_Etude} / S_{BV_Hydro}$$

Avec : Q_x : les débits Q2, Q5 et Q10 de la banque HYDRO (www.hydro.eaufrance.fr)

S_{BV_Etude} : la surface du bassin versant à l'amont du point aval du tronçon étudié.

S_{BV_Hydro} : la surface du bassin versant donnée par la banque HYDRO

Les surfaces des bassins versants sont obtenues à partir du logiciel Q-Gis, par 2 méthodes selon la région. Pour la région Bretagne, l'extension Watershed est utilisée (<http://geowww.agrocampus-ouest.fr/mapfishapp-wps/>).

Pour la région Pays de la Loire, l'extension GRASS de Q-gis est utilisée (Nguyen Van, 2013).

Ces outils permettent d'obtenir les surfaces des bassins versants à partir d'un point déterminé, ici le point aval des stations de mesures.

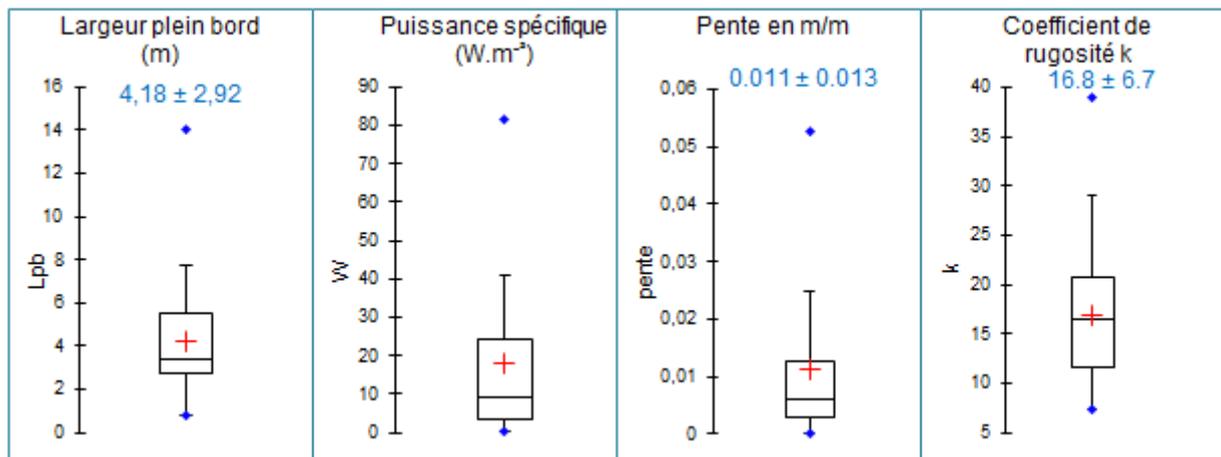
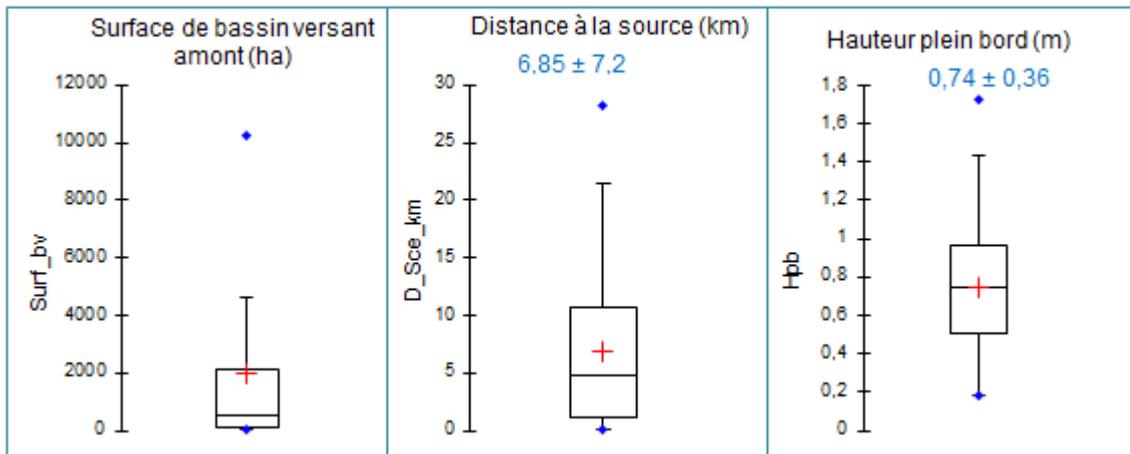
Calcul de la puissance spécifique à partir du Q2 obtenu ci-dessus :

La puissance spécifique se calcule à partir du débit plein bord Q_2 (m³/s), de la pente i (m/m), de la largeur plein bord (m) et de ρg , le poids volumique de l'eau (9810 N/m³) selon la formule suivante :

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

Les valeurs de pente i et de Largeur pleins bords L_{pb} sont celles mesurées sur le terrain. La pente utilisée est la pente de la ligne d'eau, la largeur plein bord est la largeur ayant servi à définir la longueur à prospecter.

Annexe 8 : Boxplots des variables caractéristiques des stations



Annexe 9 : Schéma d'un lit emboîté

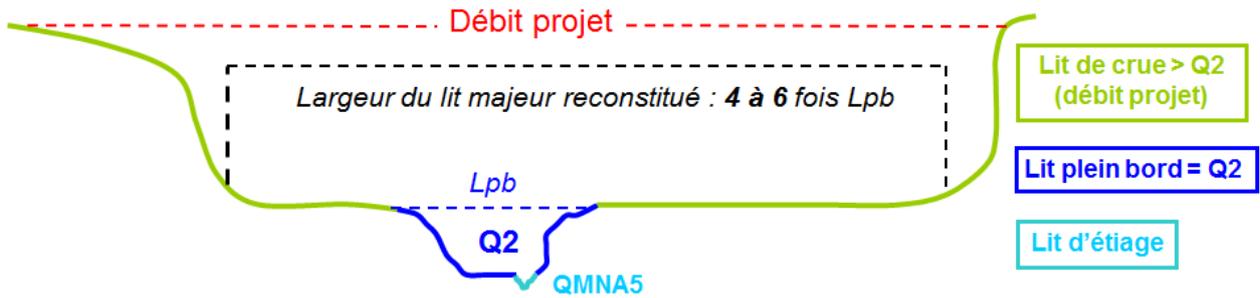


Figure : Principe du lit emboîté (Le Bihan, 2013)

Pour des talus élevés, un fractionnement de la pente peut être réalisé afin d'éviter l'érosion.

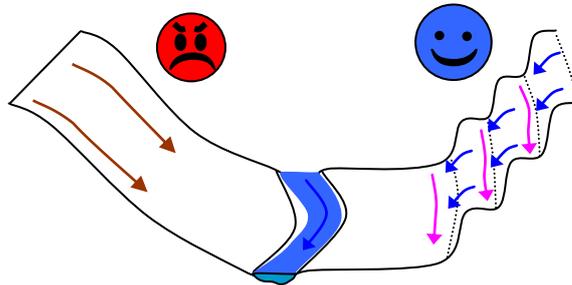


Figure : Fractionnement de la pente des talus élevés (Bramard, 2012)

Résumé

Depuis plusieurs années, la restauration hydromorphologique des cours d'eau est mise en œuvre afin d'améliorer la qualité de l'eau et des milieux aquatiques en réponse à la Directive Cadre européenne sur l'Eau. Les premiers projets étaient expérimentaux et les gestionnaires ont aujourd'hui besoin de cadrer les démarches et d'assurer l'efficacité des actions de restauration. La mise en place sur le territoire français de sites pilotes et de démonstrations vise à acquérir à l'horizon 2017 des connaissances sur le fonctionnement hydromorphologique des cours d'eau et sur les techniques de restauration mises en œuvre. Dans l'attente de ces résultats, cette étude cherche à identifier les éléments importants d'un projet de restauration en s'appuyant sur l'analyse d'anciens projets de restauration. La base de données créée a permis de sélectionner 30 sites sur le territoire Bretagne, Pays de la Loire. L'étude de ces sites a fait ressortir des facteurs limitant la réussite des projets et des éléments pour y remédier. Par ailleurs, un guide sur les préconisations techniques à l'attention des acteurs de terrain verra le jour, à la demande de l'ONEMA.

Mots clefs : création de nouveau lit ; déblai/remblai ; recharge granulométrique ; reméandrage ; suivi

Abstract

For several years, stream restoration is implemented to improve water quality and aquatic ecosystems in response to the European Water Framework Directive. The first projects were experimental. Today managers need to frame and steps to ensure restoration's efficacy. On the French territory, the establishment of pilots and demonstrations sites aimed at acquiring in 2017 the knowledge of hydromorphological functioning of streams and restoration techniques implemented. Pending these results, this study seeks to identify the important elements of a restoration project based on an analysis of past restoration projects. The database created was used to select 30 sites in the Brittany, Pays de la Loire territory. The study of these sites identified factors limiting the success of projects and items to address. In addition, a guide to the technical recommendations to the attention of the field staff will be created at the request of ONEMA.

Key-words: Assessment ; creating stream bed ; cut and fill ; gravel deposit ; meandering