

Master mention Sciences de
l'eau parcours Gestion des
habitats et des bassins
versants (GHBV)

Rapport de stage

Caractérisation de stations de référence hydromorphologique sur le territoire Bretagne-Pays de la Loire



La Cantache à Dompierre du chemin. Crédits photo : Mikaël Le Bihan

ETABLISSEMENT D'ACCUEIL

Agence Française pour la Biodiversité
Direction inter-régionale Bretagne-Pays de la Loire
84 rue de Rennes, 35510 Cesson-Sévigné

ETUDIANT

Maxime GALINEAU
Master 1 GHBV - 2019

TUTEURS DANS L'ETABLISSEMENT D'ACCUEIL

Mikaël LE BIHAN
Alexandra HUBERT

TUTEUR ACADEMIQUE

Mélanie DAVRANCHE

« Et le ruisseau murmure sans cesse contre les cailloux qui voudraient l'empêcher de courir. »

Jules Renard

REMERCIEMENTS

Pour commencer, je tiens à adresser des remerciements auprès des personnes m'ayant accueilli et entouré jusqu'ici. Ce stage est et restera à coup sûr une expérience aussi riche sur le plan personnel que professionnel.

Tout d'abord, je voudrais remercier la direction inter-régionale Bretagne-Pays de la Loire pour son accueil et pour m'avoir donné la chance d'effectuer ce stage. Je remercie toute son équipe pour sa bienveillance et pour leur disponibilité en cas de besoin : toutes mes requêtes ont été satisfaites ! Merci à Pascale, Nelly et Martine pour ces échanges de couloirs, et à Patricia pour ses petites attentions portées au quotidien et son sens du timing pour la préparation du café !

Je remercie naturellement mes tuteurs, Alexandra Hubert et Mikaël Le Bihan pour tout : de leur soutien à leur patience, leurs conseils, leur investissement dans mon encadrement, ... Alexandra, ta bonne humeur à toute épreuve et ton positivisme m'ont été d'une grande aide, notamment ces dernières semaines : merci. Sache tout de même que je ne te remercie pas pour tes petits cris de victoire. Mikaël, si tu a souvent été occupé, mes questions ont toujours su trouver une réponse éclairée et bienveillante et pour cela, merci. Je te remercie également pour tous ces conseils stratégiques sur le yams : je saurai en faire bon usage.

Je remercie Olivier Ledouble, révolutionnaire à grande carrure, pour ses conseils et pour les quelques histoires qu'il a su nous raconter avec beaucoup d'humour. Je remercie également Josselin Barry pour ses conseils avisés sur QGIS, pour sa patience, son calme légendaire et pour avoir fini enfin par retenir mon prénom.

Je remercie tous les agents des services départementaux qui ont participé à la recherche de cours d'eau de référence et qui ont bien voulu m'accompagner sur le terrain pour mesurer des morceaux de bois. Sans votre aide, cette étude n'aurait tout simplement pas pu se dérouler.

Je remercie Charlotte et Benjamin pour ces moments partagés autour d'un café, ou autre. Benjamin, mon cobureau, je te remercie pour ton vocabulaire approximatif, tes imitations de Maïté mais aussi, quand même, pour la coopération que nous entreprenons régulièrement.

Je remercie toutes les personnes qui ont pu contribuer de près ou de loin à ce rapport et au bon déroulement de ce stage au quotidien, et que j'aurais pu oublier.

Enfin, Lauriane, je te remercie d'être là, comme toujours, pour m'accompagner et me soutenir, notamment lors de ces dernières semaines.

Table des matières

Introduction	1
1. Etat des connaissances.....	2
1.1. L'hydromorphologie fluviale.....	2
1.2. La référence hydromorphologique	4
1.3. Le protocole CARHYCE.....	4
1.4. Les données utiles à la restauration	6
2. Matériel et méthodes	7
2.1. Le secteur d'étude : le territoire Bretagne-Pays de la Loire	7
2.2. Choix des critères pour la sélection de stations de référence	7
2.3. Méthode de recherche de stations de référence hydromorpho-logiques	8
2.3.1. Collecte des stations de référence potentielles.....	8
2.3.2. Choix des stations à prospecter.....	8
2.4. Elaboration d'un protocole de caractérisation de l'hydromorphologie des stations de référence	9
3. Résultats	11
3.1. Nombre et localisation des stations	11
3.2. Diversité hydromorphologique des stations retenues.....	12
3.3. Granulométrie	12
3.4. Berges de référence.....	13
4. Discussion	14
4.1. La méthode de sélection des cours d'eau étudiés	14
4.2. Le protocole de terrain.....	15
4.3. Granulométrie	15
4.4. Berges de référence.....	16
4.5. Perspectives	16
Conclusion.....	17
Bibliographie	18

Liste des abréviations

AFB : Agence Française pour la Biodiversité

ASTER (cellule) : Animation et Suivi des Travaux En Rivières et milieux aquatiques

BV : Bassin Versant

CARHYCE : CARactérisation de l'Hydromorphologie des Cours d'Eau

DCE : Directive Cadre sur l'Eau

HER : HydroEcoRégion

Hpb : Hauteur plein bord

IED : Interface d'Exploitation des Données

IMG : Indice Morphologique Global

Lpb : Largeur plein bord

MNT : Modèle Numérique de Terrain

RCS : Réseau de Contrôle et de Surveillance

SD : Service Départemental

SIG : Système d'Information Géographique

SYRAH : Système Relationnel d'Audit de l'Hydromorphologie des cours d'eau

Introduction

En 2000, face aux grands enjeux associés à la ressource en eau (restauration de la continuité écologique, protection de la ressource en eau potable, changement climatique), la Directive Cadre sur l'Eau (DCE) a été mise en place. La DCE fixe l'objectif du retour au bon état écologique de l'ensemble des masses d'eau d'ici à 2021 (voire 2027 si les objectifs ne sont pas remplis à cette échéance). La définition du bon état écologique intègre le respect de valeurs de référence concernant la biologie et les paramètres physico-chimiques de la masse d'eau. Dans l'évaluation de l'état des masses d'eau, l'hydromorphologie ne constitue pas un paramètre déterminant mais elle y est reconnue comme un paramètre la soutenant. La préservation et la restauration de l'hydromorphologie des cours d'eau est ainsi mise en œuvre par de nombreux acteurs de l'eau pour atteindre le bon état des masses d'eau. Afin de proposer des techniques adaptées à la restauration de ces cours d'eau, proches des conditions naturelles, il apparaît nécessaire de rassembler des éléments de connaissance fine sur l'hydromorphologie des cours d'eau de référence.

Dans ce cadre, l'Agence Française pour la Biodiversité (AFB) remplit deux missions. D'une part, elle participe à l'amélioration des connaissances sur l'hydromorphologie des cours d'eau notamment en déployant le protocole de CARactérisation HYdromorphologique des Cours d'Eau (CARHYCE). Le protocole CARHYCE est un outil de diagnostic hydromorphologique qui est basé sur des modèles de référence. Plus ces modèles statistiques régionalisés sont robustes, plus l'outil diagnostique est fiable. D'autre part, l'AFB propose un appui technique aux gestionnaires notamment autour des projets de restauration. Ces recommandations techniques sont appuyées par l'étude approfondie de stations de référence hydromorphologique. La présente étude poursuit donc les deux objectifs suivants : d'une part, celui d'affiner les modèles de référence CARHYCE avec l'examen de certaines stations du jeu de données historique et la prise en compte de nouvelles références, et d'autre part l'acquisition de données complémentaires dans le but de fournir des préconisations techniques adaptées pour la restauration. Enfin, dans la continuité des prospections sur les rangs de Strahler 1, cette étude vise à combler le manque de connaissances sur les cours d'eau de rang supérieurs. Ainsi, ce stage porte sur la caractérisation hydromorphologique de stations sur des cours d'eau de référence de rang de Strahler 2 à 5 sur le territoire Bretagne-Pays de la Loire.

Dans une première partie du rapport, une synthèse rapide des connaissances actuelles autour de l'hydromorphologie et de la référence hydromorphologique est effectuée et permet de dessiner plus précisément les contours de l'étude. La méthodologie utilisée et le protocole

de recueil des données mis en place sont exposés dans une seconde partie. La troisième partie présente une exploitation préliminaire des résultats obtenus sur les stations. Une étude plus approfondie des résultats sera effectuée durant la suite du stage. Une discussion est ensuite développée vis-à-vis de la méthodologie employée et des principaux résultats obtenus. Enfin, des perspectives et de nouveaux axes de travail découlant de cette étude sont proposés.

1. Etat des connaissances

1.1. L'hydromorphologie fluviale

L'hydromorphologie fluviale est une discipline qui se situe à l'interface entre la géographie physique, la géologie, la sédimentologie, l'hydraulique et l'hydrologie et qui s'intéresse aux processus physiques régissant la dynamique des cours d'eau et aux formes qui en résultent (MALAVOI ET BRAVARD, 2011).

Pour les cours d'eau naturels et dans des conditions relativement stables, la morphologie de la rivière oscille autour d'un état d'équilibre dynamique sous l'influence de deux types de variables (SCHUMM, 1977) : des variables de contrôle et des variables de réponse. Les variables de contrôle, dont les plus fondamentales sont les débits solide et liquide, interviennent à l'échelle du bassin versant. Elles sont elles-mêmes régies par le climat le relief et l'occupation des sols. Les variables de réponse interviennent à l'échelle du tronçon¹ et correspondent aux variables d'ajustement de la rivière suite à des modifications éventuelles des variables de contrôle.

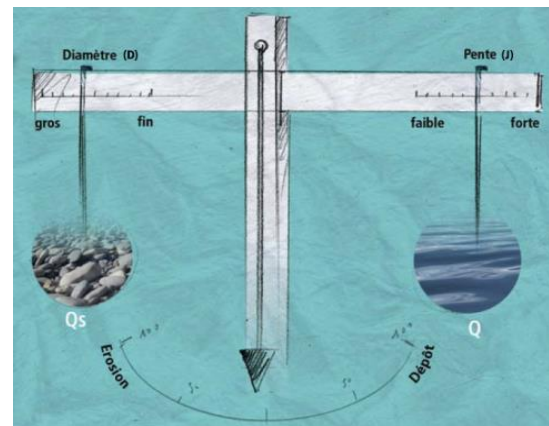


Figure 1 : La "balance de Lane" (1955) et le principe d'équilibre dynamique. Source : Malavoi & Bravard, 2011

La balance de Lane (1955) (Figure 1) permet de visualiser de manière simplifiée la notion d'équilibre dynamique. L'équilibre dynamique de la rivière y est dirigé d'un côté par le débit solide et de l'autre par le débit liquide, pondérés respectivement par la granulométrie et la pente. La morphologie du cours d'eau s'ajuste sans cesse entre érosion et dépôt en fonction

¹ Les tronçons correspondent à des portions de cours d'eau homogènes du point de vue de leur caractéristiques géomorphologiques (pente du lit, de la vallée, largeur plein bord, ...).

des apports en sédiments et de sa capacité ou non à les évacuer. Ainsi, un cours d'eau à forte pente, à débit liquide moyen et à faible débit solide tendra vers l'érosion.

La géométrie en travers des cours d'eau naturels s'ajuste pour un débit morphogène qui correspond au débit de plein bord. Le débit de plein bord correspond à la capacité d'écoulement du lit mineur juste avant de déborder dans la plaine d'inondation (LEOPOLD ET WOLMAN, 1957). Il est couramment admis que ce débit est proche de la crue journalière de fréquence biennale. C'est cette géométrie de plein bord qui est largement étudiée dans les protocoles hydromorphologiques et qui sert au dimensionnement des projets de restauration. L'un des paramètres issus de l'étude de la géométrie de plein bord est le rapport largeur plein bord (Lpb) sur hauteur plein bord (Hpb) (Figure 2). Il est un bon indicateur de l'activité géodynamique d'un cours d'eau et intègre les variations de pente, de débit et de granulométrie du lit (GOB ET AL., 2014). Cela en fait également un bon indicateur de la cohésion des berges.

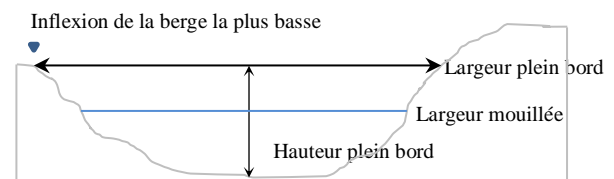


Figure 2 : Principales métriques de la géométrie en travers de plein bord

Le profil en long d'un cours d'eau s'ajuste en fonction de son niveau de base ainsi que des flux liquide et solide. Néanmoins, la répartition de sa pente globale s'établit sur des points de contrôle plus localisés matérialisés par les successions de faciès. La distance de succession radier-mouille est évaluée en 1994 par Grégory *et al.* à 5 à 7 fois la largeur plein bord.

De tout temps, l'Homme a aménagé les cours d'eau au bénéfice de ses activités : irrigation, eau potable, aménagement du territoire... Ces aménagements impliquent une perturbation quasi-systématique de l'équilibre dynamique en impactant les variables de contrôle : débits solide (seuils et barrages, extraction de granulats, ...) et liquide (prélèvements d'eau) ; et les variables de réponse : pente, morphologie (après rectification ou recalibrage). Si les perturbations naturelles peuvent être compensées par la résilience du cours d'eau, les aménagements peuvent l'affecter de façon irréversible. Cependant, de ce cet équilibre dépendent nombre de communautés biologiques : Souchon *et al.* en 2002 ont montré le lien entre dégradation de l'hydromorphologie et détérioration des habitats. Pour exemple, les cours d'eau incisés ont tendance à présenter des faciès d'écoulements plus homogènes, à se déconnecter de leurs annexes hydrauliques et de leur plaine d'inondation et à subir des épisodes plus intenses de crue et d'étiage, autant de conditions défavorables à la biodiversité et aux rythmes biologiques.

1.2. La référence hydromorphologique

Selon la Society for Ecological Restoration (2004), la référence correspond au modèle utilisé pour planifier la restauration et pour l'évaluer. Cette référence est meilleure si elle intègre un nombre important de sites de référence. En écologie de la restauration, deux types de références peuvent être utilisées : une référence historique ou une référence spatiale. L'usage de la référence historique a été écartée par de nombreux chercheurs (BRAVARD, 2003 ; PALMER *ET AL.* 2005 ; ROCHE *ET AL.* 2005 ; NEWSON ET LARGE, 2006 ; DUFOUR ET PIEGAY, 2009 ; RINALDI *ET AL.*, 2013) et ce pour plusieurs raisons : il est difficile de recueillir des données précises sur les paramètres hydromorphologiques des anciens cours d'eau, les conditions climatiques ont évolué au cours de l'Holocène (WYZGA *ET AL.*, 2012) et les pressions anthropiques existent depuis longtemps sur ces milieux (DUFOUR ET PIEGAY, 2009). Autant d'éléments qui rendent difficile l'établissement d'un état historique de référence.

La référence spatiale apparaît plus adaptée. Elle nécessite cependant de la rigueur dans la définition et la construction de ces références hydromorphologiques. Il est nécessaire de déterminer via des critères discriminants les cours d'eau proches des conditions naturelles, dont le fonctionnement n'est pas ou est peu impacté par des pressions anthropiques. En 2006, Newson & Large proposent un ensemble de critères de naturalité :

- Pas ou peu impactés par les activités anthropiques ;
- Reposent sur des matériaux naturels ;
- Sont connectés avec leur plaine alluviale ;
- Ont la possibilité d'évoluer librement au sein de celle-ci ;
- Dont la continuité écologique et sédimentaire n'est pas affectée ;
- Possèdent une végétation rivulaire adaptée au type et à la situation géographique de la rivière.

A cela s'ajoute une conception plus dynamique de la référence. Il est préférable de viser le retour à un état d'équilibre dynamique entre les variables de contrôle et de réponse laissant toute la liberté au cours d'eau d'évoluer (GOB *ET AL.*, 2014).

1.3. Le protocole CARHYCE

Le protocole CARHYCE (AFB, 2017) est un protocole de recueil de données hydromorphologiques appliqué à l'échelle stationnelle. L'objectif associé à sa mise en place est double. Il s'agit d'une part d'établir des référentiels d'état hydromorphologique régionalisés sur lesquels pourront s'appuyer les gestionnaires pour le diagnostic d'altération

hydromorphologique mais également pour orienter et suivre les plans d’actions. D’autre part, il s’agit d’améliorer la connaissance et la compréhension du rôle de l’hydromorphologie dans le maintien du bon fonctionnement écologique des cours d’eau (GOB *ET AL.* 2014). Le protocole CARHYCE est déployé sur l’ensemble du territoire français (métropole et ultramarin) sur plus de 2000 cours d’eau essentiellement sur les stations du Réseau de Contrôle et de Surveillance (RCS) mis en place en réponse à la DCE. L’hydromorphologie vient s’ajouter aux mesures physico-chimiques et hydrobiologiques déjà effectuées sur ce réseau. Le suivi hydromorphologique de ces stations est assuré tous les 6 ans.

En premier point, une station représentative du tronçon étudié est choisie. La longueur de la station correspond à 14 fois la Lpb afin d’observer théoriquement au moins 2 successions radier/mouille/plat. Les données acquises se déclinent ensuite à deux échelles. Premièrement, à l’échelle de la station entière : le débit et la pente de la ligne d’eau sont mesurés, la méthode d’échantillonnage granulométrique de Wolman (1954) est appliquée et une description de la continuité de la ripisylve. Deuxièmement à l’échelle des transects, au nombre de 15, qui permettent l’acquisition de la géométrie en travers du lit, d’une description de la granulométrie, des faciès d’écoulement, des berges et de la végétation rivulaire. L’ensemble des mesures effectuées et leurs objectifs sont décrits dans le tableau en annexe 3. Pour plus de précisions, la version écrite du protocole CARHYCE est disponible à l’adresse suivante

(<https://professionnels.afbiodiversite.fr/fr/no-de/386>).

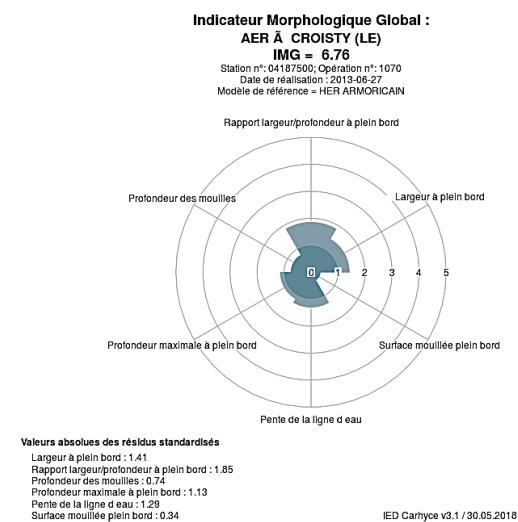


Figure 3 : IMG de l’Aër à Croisty (29). Le rapport L/P est le paramètre le plus éloigné du modèle de référence. Source (<http://194.57.254.11/IED/>)

La base de données éponyme est alimentée en continu et la valorisation de celle-ci est disponible publiquement sur l’Interface d’Exploitation des Données CARHYCE (IED CARHYCE, <http://194.57.254.11/IED/>). Elle présente les données brutes acquises sur la station ainsi que les données valorisées dont une représentation en 3D des transects, un profil en long reconstitué, une visualisation de la ripisylve accompagnée d’un indice ripisylve, l’Indicateur Morphologique Global (IMG) et les modèles de référence nationaux et régionalisés. L’IMG se présente sous la forme d’un graphique en radar (Figure 3) et constitue

une représentation synthétique des paramètres géométriques de la station. Il prend en compte le rapport Lpb/Hpb, la Lpb, la Hpb, la pente de la ligne d'eau, la profondeur des mouilles et la surface mouillée. Plus la surface couverte est grande, plus la métrique est éloignée des modèles de référence.

Ces modèles de références sont construits sur la base d'un jeu de 312 stations sur le territoire français répondant aux critères suivants : absence ou faible rectification ou recalibrage, pas ou peu modification du régime hydrologique et du transport solide (GOB ET AL., 2014). Ce jeu de données a servi à construire les modèles de référence nationaux mais également les modèles de référence régionaux en scindant le jeu de données entre les différentes HydroEcoRégions de niveau 1 (HER). Cette échelle d'étude apparaît plus pertinente car elle tient compte des caractéristiques locales de relief, de géologie et de climat (WASSON ET AL., 2002).

1.4. Les données utiles à la restauration

Les méthodes aujourd'hui appliquées pour restaurer l'hydromorphologie des cours d'eau nécessitent une bonne connaissance de l'état de référence. Pour dimensionner correctement ces projets, il est nécessaire d'acquérir des données complémentaires au protocole CARHYCE. Les données utiles à la restauration sont présentées dans le Tableau 1.

Tableau 1 : Données utiles à la restauration. En italique, les données non-acquises par le protocole CARHYCE

Paramètre à restaurer	Données de référence nécessaires
Profil en long	<i>Amplitude des successions de faciès, pente des différents faciès, profondeur des mouilles, pente totale du lit</i>
Géométrie en travers	<i>Rapport Lpb/Hpb, morphologie et texture des berges</i>
Tracé en plan	<i>Indice de sinuosité</i>
Granulométrie	<i>Granulométrie de la couche d'armure</i>
	<i>Granulométrie de la sous-couche</i>
	<i>Épaisseur du matelas alluvial²</i>
	<i>Densité et granulométrie de la fraction héritée³</i>
Bois en rivière	<i>Densité et taille du bois en rivière</i>

² Le matelas alluvial correspond à l'épaisseur de sédiments qui constitue le lit des cours d'eau. La couche la plus superficielle, de granulométrie plus grossière est appelée couche d'armure, et la plus profonde, plus fine, est appelée sous-couche.

³ Blocs non-mobiles hérités de la dernière ère glaciaire où les débits étaient plus importants. La fraction héritée représente la part très grossière de la granulométrie des cours d'eau.

2. Matériel et méthodes

2.1. Le secteur d'étude : le territoire Bretagne-Pays de la Loire

D'une superficie d'environ 59 700 km², le territoire de la Dir Bretagne-Pays de la Loire de l'AFB couvre 9 départements : le Finistère, les Côtes-d'Armor, le Morbihan, l'Ille-et-Vilaine, la Mayenne, la Sarthe, la Loire-Atlantique, le Maine-et-Loire et la Vendée. Le territoire repose sur deux HER de niveau 1 : le massif armoricain sur le grand ouest et les tables calcaires sur la majorité de la Sarthe, l'est du Maine-et-Loire et au sud de la Vendée.

2.2. Choix des critères pour la sélection de stations de référence

Les différents critères utilisés dans le cadre d'études similaires (JAN, 2013 ; BOSSIS, 2014 ; VIERRON, 2015) ont été compilés et les plus pertinents ont été retenus. Ils sont présentés dans le tableau ci-dessous (Tableau 2).

Tableau 2 : Critères de référence issus de la littérature

Critère	Bibliographie
Recouvrement et composition végétale appropriée au type de cours d'eau et à sa géographie	Barbour <i>et al.</i> , 1996 ; Wallin <i>et al.</i> , 2003
Absence d'espèces exotiques, animales ou végétales	Bonada <i>et al.</i> , 2004
Absence de drains ou de rejets d'effluents	Nijboer <i>et al.</i> 2004 ; Wallin <i>et al.</i> , 2003
Continuité écologique entre l'amont et l'aval	Wallin <i>et al.</i> , 2003
Connectivité latérale avec la zone rivulaire	Wallin <i>et al.</i> , 2003
Absence d'extraction de granulats	Davies, 1994
Substrat représentatif du type de cours d'eau et de sa région	Barbour <i>et al.</i> , 1996
L'absence de barrages sur et en amont du site	Hering <i>et al.</i> , 2004
Présence de bois en rivière	Hughes, 1995 ; Barbour <i>et al.</i> , 1996 ;

Le non-respect de l'un de ces critères peut entraîner un dysfonctionnement de l'hydromorphologie du cours d'eau. Un barrage ou une extraction de granulats en amont du site ont tous deux pour effet de provoquer un déficit sédimentaire à l'aval. Le bois en rivière possède de multiples rôles dont celui d'influencer l'hydromorphologie des cours d'eau en retenant les sédiments et en favorisant la diversification des faciès d'écoulement (BURROWS *ET AL.*, 2012).

2.3. Méthode de recherche de stations de référence hydromorphologiques

2.3.1. Collecte des stations de référence potentielles

Plusieurs méthodes ont été envisagées pour la collecte de stations de référence. La première méthode envisagée est la recherche de stations situées en aval des cours d'eau de référence pris en compte dans les études sur les rangs 1. Cette méthode a l'inconvénient de se baser uniquement sur des critères cartographiques et d'être coûteuse en temps. La seconde méthode, éprouvée et retenue, a été de solliciter la connaissance du territoire des agents des services départementaux (SD) de l'AFB et des partenaires (syndicats de bassin, techniciens de rivière, cellules ASTER et fédérations de pêche). Un mail leur a été envoyé (annexe 4) avec une liste de critères intégrant ceux présentés en partie 2.2. Ainsi, l'expérience des acteurs de terrain vient s'ajouter aux critères cartographiques.

2.3.2. Choix des stations à prospecter

Une méthode de choix objective doit être appliquée sur les propositions de tronçons reçues. Pour ce faire, une analyse cartographique des tronçons a été appliquée. Cette analyse vise à apprécier différents paramètres structurants pour l'hydromorphologie. Ces paramètres, ainsi que les outils et cartes utilisés, sont présentés dans le tableau ci-dessous (

Initialement, il était prévu de prospecter, avant l'application du protocole, toutes les stations présentant une note supérieure à 9 mais les contraintes de temps ne l'ont pas permis. Le choix des stations à caractériser a été réalisé au sein des tronçons présentant une note supérieure à 9 avec pour objectifs :

- D'avoir au moins deux stations par département pour conserver une représentativité sur le territoire ;
- De privilégier la diversité des stations, notamment en termes d'ordre de Strahler.

Paramètre évalué	Outil / Carte utilisé(e)
Epaisseur et continuité de la ripisylve	Images satellite sur Géoportail
Sinuosité du tronçon	Images satellite sur Géoportail
Evolution du tracé au cours du temps	Images satellite, photographies aériennes (1950-65) et cartes de l'état-major sur Géoportail
Nombre de plans d'eau en amont du tronçon	Images satellite sur Géoportail et BD TOPO sous QGIS
Occupation du sol sur le bassin versant (BV)	MNT à 25 m pour l'extraction des BV ; Couche Corine Land Cover (2012)

Tableau 3). En parallèle, les surfaces des Bassins Versants (BV), les longueurs de cours d'eau ainsi que les rangs de Strahler sont calculés sur la base de la BD TOPO.

Afin de sélectionner les tronçons en toute objectivité, un indice est créé. Les modalités et les poids accordés à chacun de ces paramètres sont présentés dans le tableau en annexe 5. Pour la création de l'indice, un poids sensiblement équivalent a été attribué à chacun des paramètres. La modalité la plus déclassante est celle de la zone urbanisée car il est courant que les cours d'eau y soient aménagés. Les notes peuvent aller de 0 à 15 : une note proche de 0 indique un cours d'eau potentiellement altéré tandis qu'une note proche de 15 indique un cours d'eau potentiellement de référence.

Initialement, il était prévu de prospecter, avant l'application du protocole, toutes les stations présentant une note supérieure à 9 mais les contraintes de temps ne l'ont pas permis. Le choix des stations à caractériser a été réalisé au sein des tronçons présentant une note supérieure à 9 avec pour objectifs :

- D'avoir au moins deux stations par département pour conserver une représentativité sur le territoire ;
- De privilégier la diversité des stations, notamment en termes d'ordre de Strahler.

Tableau 3 : Outils et cartes utilisés pour l'évaluation des paramètres

Paramètre évalué	Outil / Carte utilisé(e)
Epaisseur et continuité de la ripisylve	Images satellite sur Géoportail
Sinuosité du tronçon	Images satellite sur Géoportail
Evolution du tracé au cours du temps	Images satellite, photographies aériennes (1950-65) et cartes de l'état-major sur Géoportail
Nombre de plans d'eau en amont du tronçon	Images satellite sur Géoportail et BD TOPO sous QGIS
Occupation du sol sur le bassin versant (BV)	MNT à 25 m pour l'extraction des BV ; Couche Corine Land Cover (2012)

2.4. Elaboration d'un protocole de caractérisation de l'hydromorphologie des stations de référence

Du fait des objectifs de l'étude, le protocole doit permettre d'acquérir d'une part toutes les données nécessaires pour alimenter la base de données CARHYCE et d'autre part d'échantillonner avec précision des paramètres d'intérêt pour la proposition de recommandations techniques. Les mesures complémentaires à CARHYCE ainsi que le principe des mesures et l'objectif de leur acquisition sont détaillés dans le tableau ci-dessous

(Tableau 4). Les fiches terrains ayant servis à l'échantillonnage des stations sont présentées en annexe 6.

Tableau 4 : Mesures et objectifs des paramètres mesurés

Paramètre mesuré/évalué	Modalités de la mesure	Objectif
Acquisition sur la station		
Profil en long détaillé	Un point de mesure à chaque inflexion du lit Mesures effectuées : cote du fond, épaisseur de la lame d'eau, faciès d'écoulement	Affiner les recommandations pour la reconstitution des faciès d'écoulement
Sinuosité	Une mesure de la sinuosité est effectuée Mesure des distances écologique et euclidienne sur le terrain ou sous SIG à partir d'une trace GPS acquise sur le terrain	Affiner les recommandations pour le reméandrage
Bois en rivière	Comptage de tous le bois en rivière de diamètre > 3 cm Mesure du diamètre et de la longueur, caractérisation de sa position dans le cours d'eau selon la typologie de Wallerstein <i>et al.</i> (1997) au sein d'une surface comprise entre 2 transects successifs Le bois en rivière est caractérisé lorsqu'il n'y a pas de traces d'entretien du cours d'eau (coupe fraîche, absence douteuse de bois en rivière)	Affiner les recommandations pour la préservation de la ripisylve ainsi que l'ajout de bois en rivière
Fraction héritée	Comptage et mesure de tous les blocs > 126 mm au sein d'une surface comprise entre deux transects successifs	Affiner les recommandations pour l'ajout de fraction héritée
Epaisseur du matelas alluvial	Mesure de l'épaisseur du matelas alluvial sur un radier au moyen d'un fer à béton planté à la masse jusqu'au refus rocheux ou jusqu'à rencontre d'une couche d'argile	Affiner les recommandations pour la recharge granulométrique
Granulométrie de la sous-couche	Mesure de la granulométrie dominante et accessoire de la sous-couche Prélèvement d'un échantillon de sous-couche au droit de la mesure de l'épaisseur du matelas alluvial et mesure sur photo de l'échantillon	Affiner les recommandations pour la recharge granulométrique
Acquisition sur les transects		
Typologie de la berge	Caractérisation du type de berge (sub-verticale, pente douce, abrupte puis banquette, ou autre) en rives gauche et droite	Affiner les recommandations sur la forme des berges
Profil des berges	Acquisition d'un profil détaillé de certaines berges représentatives de la diversité des formes sur le cours d'eau (voir notice du protocole en annexe 7)	Affiner les recommandations sur la forme des berges
Texture des berges	Appréciation de la texture des berges en rives gauche et droite sur chaque transect	Lier la morphologie des berges avec la texture des matériaux qui la compose
Banquettes	Mesures des banquettes (longueur max, largeur max, épaisseur max par rapport au fond du lit)	Affiner les recommandations pour la création de banquettes
Ripisylve	Relevé des essences ligneuses présentes dans la ripisylve	Décrire les ripisylves de référence

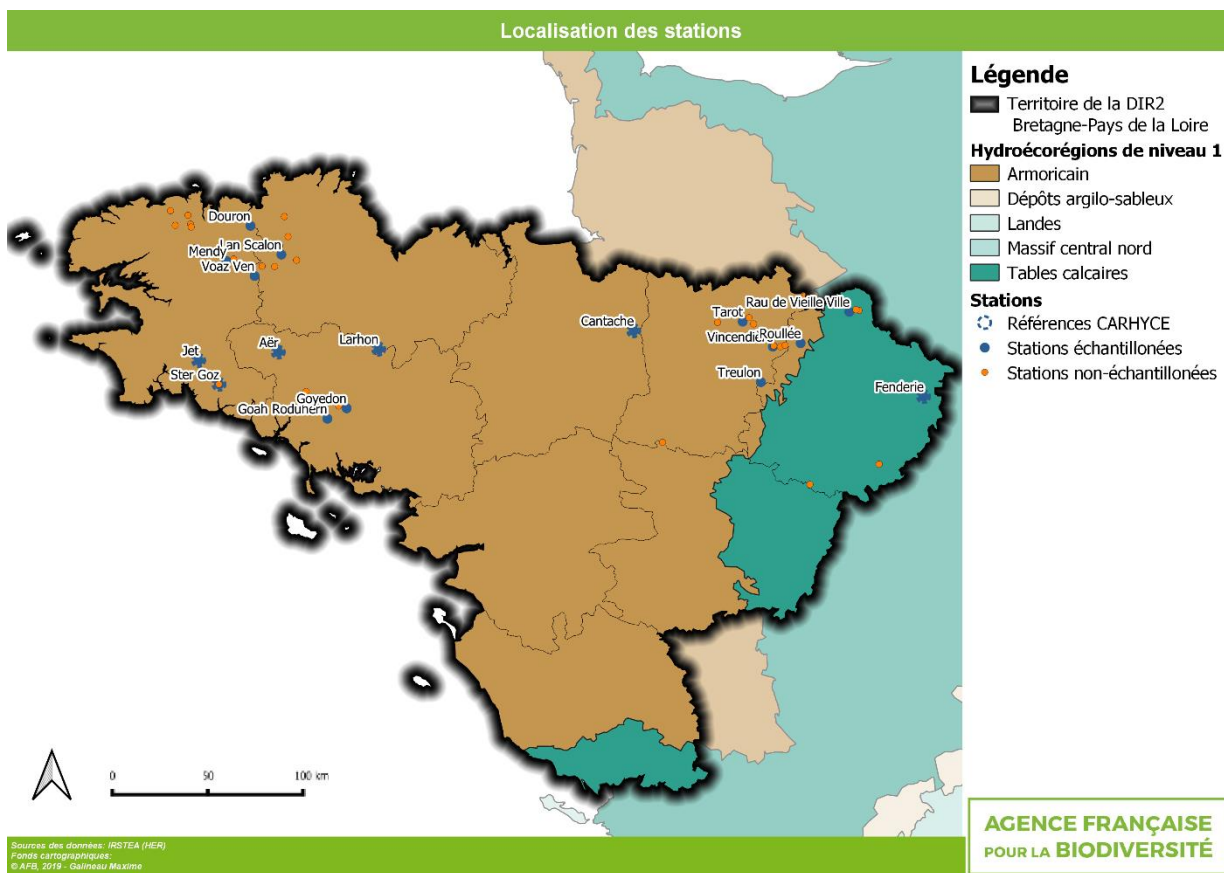


Figure 5 : Localisation des stations

3. Résultats

Il est à noter que les résultats présentés ici ne donnent qu’une vision partielle de l’analyse finale des résultats. L’exploitation exhaustive des données nécessite un traitement plus approfondi qui sera effectué par la suite.

3.1. Nombre et localisation des stations

Les retours des agents des SD et des partenaires ont permis de constituer une liste de 44 stations. A celles-ci viennent s’ajouter 6 stations étiquetées comme référence pour les modèles CARHYCE. La liste des stations est présentée en annexe 8. Sur les 50 stations, 17 ont été échantillonnées, dont les 6 références CARHYCE.

Les 17 stations sélectionnées sont réparties sur 6 des 9 départements du territoire (Figure 5) : aucun cours d’eau de référence n’a été identifié dans les départements de la Vendée, de la Loire-Atlantique et du Maine-et-Loire. Il est à noter qu’un seul cours d’eau de référence a été échantillonné en Ile-et-Vilaine et correspond à une référence

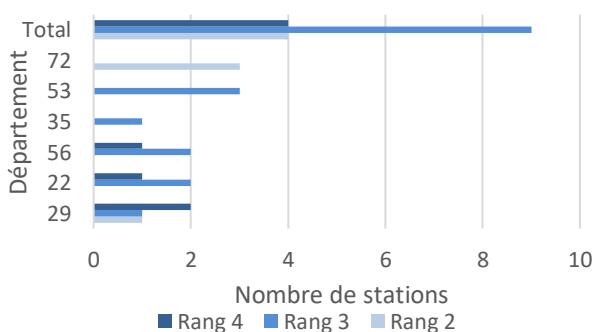


Figure 4 : Répartition des stations échantillonnées par département et par rang de Strahler

CARHYCE. Sur l'ensemble des stations, ce sont les rangs 3 qui sont les plus représentés avec 9 stations. Ensuite, ce sont les rangs 2 et 4 avec respectivement 4 stations (Figure 4). Aucun cours d'eau de rang 5 n'a été proposé. L'occupation des sols sur les bassins versants est assez hétérogène (annexe 9). Les notes d'indice attribuées à chacune des stations sont présentées en annexe 10.

3.2. Diversité hydromorphologique des stations retenues

La distribution de quelques-unes des variables hydromorphologiques recueillies sur les stations est présentée dans la Figure 6. Dans l'ensemble, la variabilité est importante avec des valeurs d'écart-type souvent proches des valeurs moyennes. Ces résultats ont l'avantage de montrer la diversité des cours d'eau échantillonnés notamment vis-à-vis de la surface des bassins versants (de 3 à 72 km²) et de la largeur plein bord moyenne (de 2,5 à 12,8 mètres).

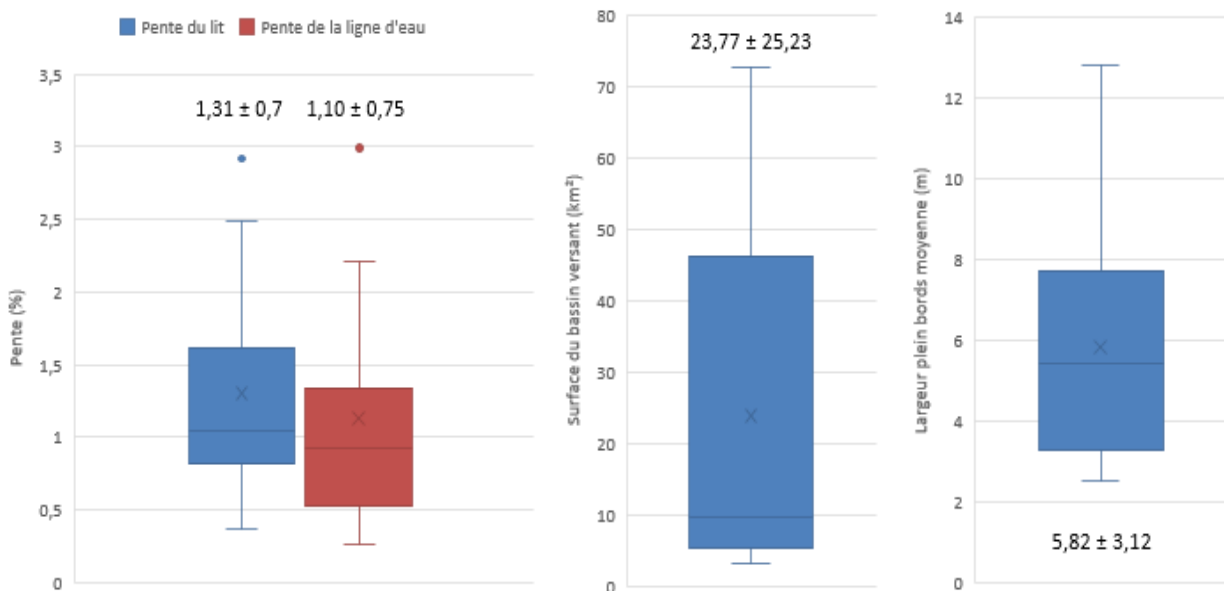


Figure 6 : Distribution de quelques variables hydromorphologiques

3.3. Granulométrie

L'épaisseur du matelas alluvial sur les radiers varie de 15 à 60 cm pour une valeur moyenne de **34,5(± 13,3⁴) cm** et n'est corrélée de façon significative à aucune des autres

⁴ Les moyennes sont présentées en association avec leur écart-type

variables. La couche d'armure représente en moyenne **17,5(± 8,4)%** de l'épaisseur totale du matelas alluvial.

La D50⁵ et la D16 sont corrélées de manière significative (p-value test de Pearson <<0,05) avec la largeur plein bord. Les régressions linéaires correspondantes sont présentées dans la Figure 7. La D84 est elle

aussi corrélée avec la Lpb mais de manière non-significative (p-value = 0,052). Cette analyse sera à poursuivre après les calculs de la géométrie de plein bord. En effet, la corrélation pourrait être plus significative en prenant en compte la puissance spécifique qui tient compte de la Lpb, de la pente du lit et du débit

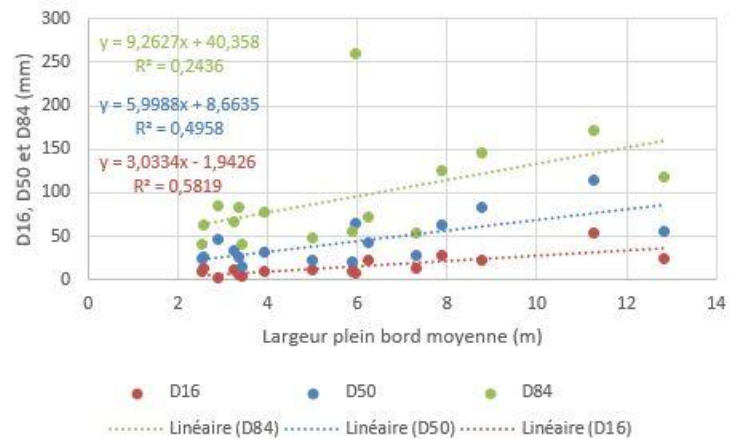


Figure 7 : Relations entre la granulométrie des radiers et la largeur plein bord et régression linéaire. A noter que la D84 ne présente pas de corrélation significative (p-value = 0.052)

de plein bord. La distribution des rapports D16/D84 est hétérogène (0.18 ± 0.09) mais le rapport D16/D84 ne dépasse jamais 0,32 ce qui indique que la granulométrie de la couche d'armure des radiers tend à être plutôt hétérogène.

3.4. Berges de référence

Au total, plus de 500 berges ont été décrites, dont 72 profils détaillés. Ces derniers seront exploités durant la suite du stage et serviront à dresser une typologie fine des berges en condition de référence. Les berges présentent une diversité importante de formes mais la typologie utilisée permet de les regrouper en classes homogènes :

- Berges sub-verticales à abruptes
- Berges en pente douce
- Berge associée à une banquette
- Berge complexe, sub-verticale à abrupte puis en pente douce

⁵ Les D16, D50 et D84 sont des paramètres granulométriques qui fournissent une idée de la distribution de la granulométrie. La D16 correspond à la granulométrie pour laquelle 16% des éléments ont une granulométrie inférieure à la D16 et 84% une supérieure. Le rapport D16/D84 rend donc compte de l'hétérogénéité de la granulométrie échantillonnée (0 : très hétérogène ; 1 : homogène)

Les berges les plus représentées sur les cours d'eau échantillonnés sont les berges sub-verticales à abruptes (76,2%, annexe 11). La texture de ce type de berge est largement dominée par la texture argileuse (70%, annexe 12). Ce résultat paraît cohérent puisque les argiles sont des matériaux cohésifs difficiles à éroder.

Des sous-berges ont été observées sur 34% des berges échantillonnées. La majorité d'entre elles (84,4%, annexe 13) sont soutenues par le système racinaire de la ripisylve. Des banquettes ont été observées sur 23,9% des transects échantillonnés. 67,2% d'entre elles sont associées à une berge sub-verticale à abrupte contre 32,8% à des berges en pente douce (annexe 14). Les résultats concernant les caractéristiques morphométriques des banquettes seront traités durant la suite du stage.

4. Discussion

4.1. La méthode de sélection des cours d'eau étudiés

Toute la difficulté de la présente étude réside dans la collecte de stations de référence hydromorphologique. Les filtres appliqués pour la sélection de ces stations (recours aux agents du territoire, outil d'aide à la décision) comportent un certain nombre de limites. Premièrement, il est difficile de trouver des stations non impactées par l'activité humaine. Sur plusieurs des stations prospectées, il a été constaté des traces d'opérations récentes d'entretien sur le bois en rivière et la ripisylve, d'aménagements anciens (enrochements des berges, ancien abreuvoir) ou encore de piétinement des berges par le bétail. Ces éléments poussent à avoir un regard critique sur les données acquises et à prendre en compte ces altérations dans leur traitement. Ainsi, les données sur le bois en rivière, par exemple, n'ont été acquises que sur les stations dont la ripisylve paraissait intacte.

La création d'un indice comme outil d'aide à la décision permet de déterminer de façon objective les pressions et les caractéristiques principales du cours d'eau. Cette méthode a toutefois ses limites et s'est avérée infructueuse pour certaines stations sous couvert forestier dense (ex. : les ruisseaux de la Vallée Létrie et de la Vallée Layée en Sarthe). Ainsi, l'étude de certains cours d'eau pré-sélectionnés n'a pas été réalisée en raison de travaux hydrauliques lourds. Mis à part ces cas particuliers, l'indice estime bien l'état hydromorphologique des cours d'eau et a permis d'orienter efficacement le choix des stations.

4.2. Le protocole de terrain

Des difficultés liées à l'application du protocole ont été rencontrées, notamment pour les petits cours d'eau (< 2 m de Lpb). Tout d'abord, la longueur réduite de la station peut entraîner des biais dans l'estimation de la pente du cours d'eau. Ensuite, la clé de détermination des faciès d'écoulement s'avère parfois difficile à appliquer, notamment pour distinguer les faciès profonds ou non (distinction plat lentique et chenal lentique par exemple). Enfin, la mesure du débit, donnée de première importance, peut s'avérer compliquée à réaliser avec précision (matériel à disposition : débitmètre à effet doppler). Celui-ci nécessite une certaine profondeur d'eau, et des vitesses suffisamment importantes pour procéder à une mesure fiable du débit. Sur les cours d'eau de grande Lpb (> 10 m), des difficultés d'identification des faciès ont également été rencontrées qui peuvent présenter des variations latérales de faciès sur les transects (radier en rive gauche et plat courant en rive droite par exemple).

4.3. Granulométrie

L'épaisseur du matelas alluvial oscille entre 15 et 60 cm. Si cette valeur guide reste à confirmer par de nouvelles études et par un diagnostic préalable, elle constitue néanmoins une première estimation pour les opérations de recharge granulométrique. Le dimensionnement des recharges granulométriques est aujourd'hui effectué principalement grâce à la méthode d'échantillonnage Wolman (cf. protocole CARHYCE) qui se concentre sur la qualification de la couche d'armure des radiers, souvent plus grossière que la sous-couche (MALAVOI ET BRAVARD, 2011). Or, les résultats indiquent que cette dernière ne représente en moyenne qu'un cinquième de l'épaisseur totale du matelas alluvial. Il serait donc judicieux de prévoir une analyse granulométrique de la sous-couche pour le dimensionnement des opérations de recharge. Cela vaut tout particulièrement pour les cours d'eau intermittents et/ou à faible débit d'étiage pour lesquels une granulométrie trop grossière peut engendrer des conséquences néfastes sur les communautés biologiques, en renforçant l'intermittence ainsi que les risques de pertes du fil d'eau (DATRY ET AL., 2008).

La relation mise en évidence entre les paramètres granulométriques (D16, D50 et D84) et la Lpb sont à utiliser avec précaution. En effet, si la corrélation est significative, la puissance de la relation reste faible ($R^2 < 0,6$), les données sont dispersées et les largeurs supérieures à 10 mètres sont peu représentées. Un diagnostic systématique est donc recommandé lors d'opération de reconstitution du matelas alluvial.

4.4. Berges de référence

Les résultats montrent une dominance des berges sub-verticales à abruptes au sein des cours d'eau de référence. Cette observation s'oppose à des publications le façonnement des berges en pente douce dans l'objectif de favoriser la colonisation par la végétation hygrophile (NICOLAS *ET AL.*, 2013). Une proportion importante de ces berges présente des sous-berges qui constituent des habitats privilégiés pour les communautés biologiques et notamment des habitats pour les poissons. La majorité d'entre elles semble se former et être maintenues grâce aux chevelus racinaires de la végétation rivulaire. Cette observation souligne l'importance de préserver voire de restaurer la ripisylve lors d'opérations de restauration de cours d'eau.

La ripisylve devrait également être prise en compte pour ses nombreux autres rôles, notamment la fourniture de bois pour le cours d'eau ou bien l'absorption de nitrates et de phosphore (ORAISSON *ET AL.*, 2012). Le volet bois en rivière de l'étude, non-traité ici, devrait apporter des éléments complémentaires sur l'intérêt de préserver les ripisylves.

4.5. Perspectives

Le traitement des données présenté ici n'est que partiel et représente une petite part de l'ensemble des données acquises. Aussi, la suite du stage permettra d'effectuer des analyses plus poussées. L'extrapolation du débit de plein bord sera effectuée afin de calculer les paramètres de puissances brute et spécifique du cours d'eau. L'un des objectifs de l'étude étant d'alimenter les modèles CARHYCE avec de nouveaux cours d'eau de référence, une prochaine étape est de compléter la base de données. Une analyse approfondie des profils en long sera également effectuée et visera à décrire des paramètres tels que les pentes et contre-pentes des radiers ainsi que la distance de succession radier/mouille/plat. La typologie de berge esquissée dans cette étude a vocation à être affinée et ouvrira la voie à de plus amples réflexions sur la manière de recréer des lits.

Les recommandations qui en découleront seront diffusées auprès des SD et des partenaires afin de permettre leurs mises en œuvre opérationnelles dans le cadre de futurs projets de restauration. La base de données créée au cours de cette étude pourra être enrichie par la collecte de données sur d'autres sites afin d'améliorer la connaissance des cours d'eau de rang 2 à 5 en conditions de référence hydromorphologique. Le bois en rivière constitue un sujet à part entière qu'il conviendrait de traiter plus finement (âge de la ripisylve, niveau de putréfaction du bois, suivi de la mobilité du bois en rivière, ...). De même, les banquettes

pourraient faire l'objet d'une étude spécifique portant sur leurs caractéristiques dans les cours d'eau qui en présentent.

Conclusion

L'objectif de cette étude est à la fois d'acquérir de nouvelles données de référence pour la base CARHYCE et d'acquérir des données complémentaires dans le but de fournir des préconisations techniques pour la restauration des cours d'eau. Si les résultats ne sont pas encore traités, quelques éléments sont déjà à retenir. Tout d'abord, 17 stations ont été échantillonnées et viendront, alimenter les modèles de référence de CARHYCE. Ces stations constituent également un catalogue pour d'éventuelles analyses complémentaires en situation de référence.

Ensuite, les premières analyses des données ont permis de mettre en évidence quelques éléments intéressants concernant la granulométrie et les berges des cours d'eau de référence. L'épaisseur du matelas alluvial est en moyenne de **34,5(± 13,3) cm**. Les résultats affirment également l'intérêt de recourir à un **diagnostic granulométrique préalable à toute opération de recharge** en prenant en compte la totalité du matelas alluvial, sous-couche comprise. L'étude a pu montrer la **récurrence des berges sub-verticales à abruptes dans des conditions naturelles** ainsi que la présence des sous-berges, soulignant l'**intérêt de préserver et/ou restaurer la ripisylve** dans le cadre des opérations de restaurations des cours d'eau. La typologie de berge qui sera dressée par la suite permettra sans doute d'alimenter la réflexion sur les formes à donner aux berges lors de la recréation de lits mineurs.

La méthode de recueil des données pourrait être réutilisée dans le cadre d'études similaires au sein du territoire pour renforcer la connaissance sur les cours d'eau en condition de référence. Parmi les nombreuses perspectives de travail qu'apportent cette étude, deux points en particulier nécessiteraient des études à part entière. D'abord le bois en rivière, encore souvent retiré des cours d'eau malgré les rôles multiples qu'il remplit, ainsi que les banquettes avec leurs caractéristiques morphométriques, granulométriques et leurs positions dans les cours d'eau naturels.

Bibliographie

- AFB. « Caractérisation hydromorphologique des cours d'eau. Protocole de recueil des données hydromorphologiques à l'échelle stationnelle. », 2017, 56.
- Bonada, Núria, Narcís Prat, Antoni Munné, Maria Rieradevall, Javier Alba-Tercedor, Maruxa Álvarez, Juan Avilés, Jesús Casas, Pablo JÁIMEZCUÉLLAR, et Andrés Mellado. « Criterios para la selección de condiciones de referencia en los ríos mediterráneos. Resultados del proyecto GUADALMED ». *Limnetica* 21, n° 3-4 (2002): 99–114.
- Bossis, Mathieu. « Étude de l'hydromorphologie à l'échelle stationnelle des cours d'eau de tête de bassin versant armoricains en situation de référence », 2014.
- Bravard, J. P. « Dynamiques à long terme des systèmes écologiques ou de l'Eden impossible à la gestion de la variabilité ». *Lévêque C. et Leeuw (van der) S.(éds), Quelles natures voulons-nous*, 2003, 133–139.
- Burrows, Ryan M., Regina H. Magierowski, Jason B. Fellman, et Leon A. Barmuta. « Woody debris input and function in old-growth and clear-felled headwater streams ». *Forest ecology and management* 286 (2012): 73–80.
- Datry, Thibault, Marie-José Dole-Olivier, Pierre Marmonier, Cécile Claret, Jean-François Perrin, Michel Lafont, et Pascal Breil. « La zone hyporhéique, une composante à ne pas négliger dans l'état des lieux et la restauration des cours d'eau ». *Ingénieries-EAT*, n° 54 (2008): p-3.

- Dufour, Simon, et Hervé Piégay. « From the Myth of a Lost Paradise to Targeted River Restoration: Forget Natural References and Focus on Human Benefits ». *River Research and Applications* 25, n° 5 (2009): 568-81. <https://doi.org/10.1002/rra.1239>.
- Gibson, George R., Michael T. Barbour, J. B. Stribling, J. Gerritsen, et J. R. Karr. « Biological Criteria: Technical guidance for streams and small rivers ». Environmental Protection Agency, Washington, DC (United States). Office of Water, 1996.
- Gob, Frédéric, Clélia Bilodeau, Nathalie Thommeret, Jérôme Belliard, Marie-Bernadette Albert, Vincent Tamisier, Jean-Marc Baudoin, et Karl Kreutzenberger. « A tool for the characterisation of the hydromorphology of rivers in line with the application of the European Water Framework Directive in France (CARHYCE) », 2014, 16.
- Gregory, K. J., A. M. Gurnell, C. T. Hill, et S. Tooth. « Stability of the pool-riffle sequence in changing river channels ». *Regulated Rivers: Research & Management* 9, n° 1 (1994): 35–43.
- Hering, Daniel, Andrea Buffagni, Otto Moog, Leonard Sandin, Mario Sommerhäuser, Ilse Stubauer, Christian Feld, Richard Johnson, Paulo Pinto, et Nikos Skoulikidis. « The development of a system to assess the ecological quality of streams based on macroinvertebrates—design of the sampling programme within the AQEM project ». *International Review of Hydrobiology: A Journal Covering all Aspects of Limnology and Marine Biology* 88, n° 3-4 (2003): 345–361.
- Hughes, Robert M. « Defining acceptable biological status by comparing with reference conditions ». *Biological assessment and criteria: tools for water resource planning and decision making*. CRC Press. Boca Raton, FL. p, 1995, 31–48.
- Jan, Alexandre. « Etude du fonctionnement hydromorphologique de référence des cours d'eau de tête de bassin versant sur le Massif Armoricaïn », 2013.
- Lane, E. W. « Importance of Fluvial Morphology in Hydraulic Engineering ». *Proceedings (American Society of Civil Engineers)* ; v. 81, Paper No. 745, 1955. <http://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=US201400000288>.
- Leopold, Luna Bergere, et Markley Gordon Wolman. *River Channel Patterns: Braided, Meandering, and Straight*. U.S. Government Printing Office, 1957.

- Malavoi, Jean-René, et Jean-Paul Bravard. « Éléments d'hydromorphologie fluviale. Édité par l'Onema (Office national de l'eau et des milieux aquatiques), 2010, 224 p. En ligne sur : <http://www.onema.fr/hydromorphologie-fluviale> », 2011.
- Newson, Malcolm D., et Andrew R. G. Large. « 'Natural' Rivers, 'Hydromorphological Quality' and River Restoration: A Challenging New Agenda for Applied Fluvial Geomorphology ». *Earth Surface Processes and Landforms* 31, n° 13 (novembre 2006): 1606-24. <https://doi.org/10.1002/esp.1430>.
- Nicolas, V., B. Chocat, D. Lourdière, Pierre Dupont, S. Le Fur, F. Rey, S. Moussard, et al. *Ingénierie écologique appliquée aux milieux aquatiques. Pourquoi ? Comment ?* ASTEE, 2013. <https://hal.archives-ouvertes.fr/hal-00966868>.
- Nijboer, R. C., P. F. M. Verdonchot, R. K. Johnson, M. Sommerhäuser, et A. Buffagni. « Establishing reference conditions for European streams ». In *Integrated Assessment of Running Waters in Europe*, 91–105. Springer, 2004.
- Oraison, Federica, Yves Souchon, et Kris Van Looy. « Restaurer l'hydromorphologie des cours d'eau et mieux maîtriser les nutriments: une voie commune? » *Pô Hydroécologie Cours Eau Onema-Irstea Lyon MAEPLHQ* 42p, 2011.
- Palmer, M. A., E. S. Bernhardt, J. D. Allan, P. S. Lake, G. Alexander, S. Brooks, J. Carr, et al. « Standards for Ecologically Successful River Restoration ». *Journal of Applied Ecology* 42, n° 2 (2005): 208-17. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2664.2005.01004.x>.
- Rinaldi, M., B. Belletti, W. Van de Bund, W. Bertoldi, A. Gurnell, T. Buijse, et E. Mosselman. « Review on eco-hydromorphological methods ». *Deliverables of the EU FP7 REFORM project*. N. Friberg, M. O'Hare and A. Poulsen ed. (www.reformrivers.eu), 2013.
- Roche, Pierre-Alain, Gilles Billen, Jean-Paul Bravard, Henri Décamps, Didier Pennequin, Eric Vindimian, et Jean-Gabriel Wasson. « Les enjeux de recherche liés à la directive-cadre européenne sur l'eau ». *Research needs for the implementation of the water European Framework Directive* 337, n° 1/2 (janvier 2005): 243-67. <https://doi.org/10.1016/j.crte.2004.10.012>.
- Society for Ecological Restoration International Science & Policy Working Group. 2004. The SER International Primer on Ecological Restoration. www.ser.org & Tucson : Society for Ecological Restoration International.

Schumm, S. A. « The fluvial system », 1977. <http://agris.fao.org/agris-search/search.do?recordID=XF2016024872>.

Souchon, Yves, Héri Andriamahefa, Pascal Breil, Marie-Bernadette Albert, Hervé Capra, et Nicolas Lamouroux. « Vers de nouveaux outils pour l'aide à la gestion des hydrosystèmes: couplage des recherches physiques et biologiques sur les cours d'eau ». *Nature Sciences Sociétés* 10 (2002): 26–41.

Vierron, Anthony. « Caractérisation de stations de “référence hydromorphologique” en région Centre et Poitou-Charentes », 2015.

Wallerstein, N.P., C.R. Thorne, et M.W. Doyle. « Spatial distribution and impact of LWD in northern Mississippi, in C.C. Wang, E.J. Langendoen and F.D ». *Shields editors, Proceeding of the conference on management of landscapes disturbed by channel incision*, 1997, 145-50.

Wallin, Mats, Torgny Wiederholm, et R. K. Johnson. « Guidance on establishing reference conditions and ecological status class boundaries for inland surface waters ». *CIS Working Group 2*, n° 3 (2003): 93.

Wasson, J. G., A. Chandesris, H. Pella, et L. Blanc. « Metropolitan France Hydro-Ecoregions. Regional Approach to the Typology of Flowing-Water and Components for the Definition of Reference Invertebrate Populations ». *French Ministry of Ecology and Sustainable Development, Cemagref BEA/LHQ*, 2002.

Wolman, M. Gordon. « A Method of Sampling Coarse River-Bed Material ». *Eos, Transactions American Geophysical Union* 35, n° 6 (1954): 951-56. <https://doi.org/10.1029/TR035i006p00951>.

Wyźga, Bartłomiej, Joanna Zawiejska, Artur Radecki-Pawlik, et Hanna Hajdukiewicz. « Environmental change, hydromorphological reference conditions and the restoration of Polish Carpathian rivers ». *Earth Surface Processes and Landforms* 37, n° 11 (2012): 1213–1226.

Annexes

Annexe 1 : Présentation de la structure d'accueil

L'Agence Française pour la Biodiversité (AFB) est un établissement public sous tutelle du ministère de la Transition écologique et solidaire. Elle a été créée le 8 août 2016 par la loi 2016-1087 pour la reconquête de la biodiversité, de la nature et des paysages, en réponse aux enjeux actuels de préservation de la biodiversité et d'adaptation face aux changements climatiques. L'AFB, opérationnelle depuis le 1er janvier 2017, devient l'organisme de référence pour la biodiversité des milieux terrestres, aquatiques et marins.

En métropole et en outre-mer, l'Agence Française pour la Biodiversité a pour objectif d'améliorer la connaissance, de protéger, de gérer, et de sensibiliser à la biodiversité. Cet objectif se décline en plusieurs missions :

- Organiser et développer les connaissances et les savoirs ;
- Appuyer la mise en œuvre des politiques publiques liées à la biodiversité ;
- Gérer des espaces et appuyer les autres gestionnaires ;
- Apporter conseil et expertise aux acteurs socio-professionnels ;
- Apporter un soutien financier à des actions partenariales ;
- Mobiliser et sensibiliser la société ;
- Former et structurer les métiers de la biodiversité ;
- Vérifier le respect de la réglementation relative à la protection de la biodiversité.

L'agence est issue du regroupement de l'Agence des Aires Marines Protégées (AAMP), de l'Office National de l'Eau et des Milieux Aquatiques (ONEMA), de l'Atelier Technique des Espaces Naturels (ATEN) et des Parcs Nationaux de France (PNF). Elle est composée de sept directions régionales et trois directions interrégionales. Les services

centraux sont localisés à Vincennes (94), à Montpellier (34) et à Brest (29) (cf. carte page suivante).

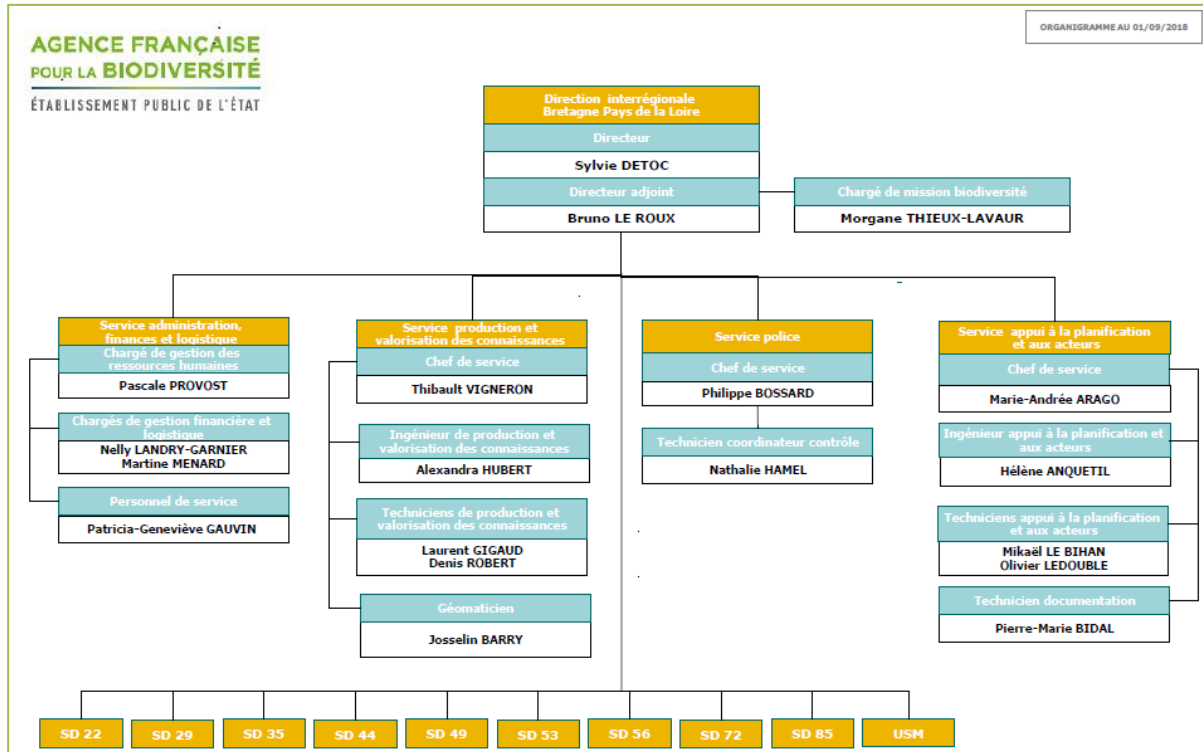
Le stage se déroule au sein de la Direction InterRégionale (DIR) Bretagne - Pays de la Loire (cf. organigramme page suivante), basée à Cesson Sévigné (35). Les missions de la DIR Bretagne - Pays de la Loire (ex Office National des Eaux et des Milieux Aquatiques) s'organisent autour de différents axes :

- Le recueil de données sur la qualité des milieux aquatiques et le suivi d'opérations de restaurations ;
- La surveillance des milieux aquatiques : contrôle des usages et des pressions dans la prévention de la dégradation des milieux aquatiques (missions de police de l'environnement) ;
- L'apport d'un appui technique auprès des acteurs locaux pour la mise en œuvre d'actions en faveur des milieux aquatiques ;
- La mise à disposition des informations sur l'eau, les milieux aquatiques et leurs usages.

Carte : Implantation de l'AFB en France métropolitaine



Organigramme de la DIR Bretagne-Pays de la Loire



Annexe 2 : Bilan personnel du stage

Conformément à mes attentes, c'est un réel plaisir d'effectuer ce stage au sein de la direction inter-régionale Bretagne-Pays de la Loire de l'Agence Française pour la Biodiversité. La problématique est concrète avec une réelle portée technique. Ce stage me permet d'acquérir des connaissances et une expérience de terrain sur un sujet qui me tient à cœur : la restauration des cours d'eau. Si le stage ne porte pas directement sur un projet de restauration, la problématique nécessite tout de même de connaître les principes théoriques et pratiques de ceux-ci. La réalisation de l'étude nécessite de jongler avec plusieurs champs de connaissances dont l'hydromorphologie, l'écologie aquatique, l'hydraulique, l'hydrologie, la sédimentologie, ... Des domaines au sein desquels je me sens à l'aise ou qui suscitent mon intérêt. Mener cette étude requiert un travail dense, notamment du fait du grand nombre de

stations et de données à traiter, mais satisfaisant dans la mesure où je participe au projet de sa conception jusqu'à l'atteinte des objectifs. Ce stage m'a permis de rencontrer des professionnels de la préservation des milieux aquatiques, des rencontres enrichissantes tant sur le plan personnel que professionnel. De plus, il va me permettre de participer à d'autres missions dont les pêches électriques et peut être un protocole de suivi de comblement de plans d'eau. Par ailleurs, le sujet de l'étude a pour plaisante conséquence de devoir effectuer les missions de terrain dans des cadres des plus agréables, ceux des cours d'eau de référence.

Parmi les compétences et les connaissances mobilisées, je peux citer les cours d'hydromorphologie d'A.-J. Rollet, les cours d'écologie de la restauration, notamment pour la notion de référence qui est centrale dans cette étude ainsi que les cours de SIG. A noter que l'utilisation des SIG, elle aussi très importante dans la réalisation de cette étude (calculs de BV, etc), a nécessité l'utilisation exclusive de QGIS. De nombreux échanges avec le SIGiste de la direction et quelques heures d'apprentissage par l'erreur ont su rattraper le manque de maîtrise du logiciel. Choisir les stations à échantillonner a nécessité la conception d'un indice, aussi la réflexion portée sur ce type d'outil au premier semestre en EPG a été très utile.

La conception du protocole de terrain a également été enrichissante : si les apports de la littérature (protocole CARHYCE déjà existant et précédentes études similaires) ont dessiné les contours de la méthode à appliquer pour échantillonner les stations, sa conception a nécessité une réflexion importante sur les paramètres à mesurer et les modalités de ces mesures. Elle a également demandé un certain effort de projection pour « ergonomiser » les mesures sur le terrain. Chapeauté par mes tuteurs, l'organisation des terrains a demandé une attention particulière : renseigner les agents des SD sur les dates et les lieux de rendez-vous à temps, prévenir les chefs de service mais aussi préparer le matériel est essentiel au bon déroulement des visites sur les stations. Si je devais refaire quelque chose, je gérerais mieux l'organisation en général, notamment pour ce qui est de la recherche bibliographique : chaque élément intéressant doit être noté et référencé afin de faciliter le travail par la suite.

Pour conclure, je dirais que ce stage répond parfaitement à mes attentes, en plus de me satisfaire sur le plan personnel et professionnel. Ce stage est, et continue d'être, une expérience enrichissante et positive sur tous les plans et constitue, selon moi, un complément essentiel à ma formation.

Annexe 3 : Mesures et objectifs du protocole CARHYCE

	Paramètre mesuré/évalué	Principe	Objectif	Notes/Remarques
Echelle du BV	Surface du BV	Calcul SIG ou utilisation d'outils comme GeoSAS (Agrocampus ouest) pour le territoire Bretagne	Mettre en évidence/construire des modèles qui quantifient le lien entre surface du BV et des paramètres morphologiques du lit	Hors CARHYCE ; Mesure complémentaire mais indispensable
	Largeur à pleins bords évaluée (m) (lpb-ev)	Mesure de la largeur du cours d'eau à la hauteur du point d'inflexion de la berge la plus basse (x3) ; 1ère mesure au point aval de la station, 2 autres mesures sur des transects espacés de 2 fois la première largeur ; Moyenne des trois	Détermination de la longueur de la station (L) : $L = 14 * lpb-ev$; Paramètre qui rend bien compte du débit morphogène ; Un des paramètres de description du gabarit du lit	
Dimensionnement de la station et espacement des points de mesure	Largeur mouillée évaluée (m) (lm-ev)	Mesure de la largeur de la lame d'eau au droit d'un transect (x3) ; Mesure au droit des transects utilisés pour mesurer la lpb puis moyenne des trois ; Précision : 10%	Détermination de l'espacement inter-point sur les transects (distance inter-point = $1/7 * lm-ev$)	
	Profondeur à pleins bords (PROF_POINT) (m)	Mesure de la profondeur des points par rapport à la ligne d'eau ; Les points au dessus de la ligne d'eau seront exprimés en négatif	Détermination du rapport l/p, bon indicateur de l'activité géodynamique d'un cours d'eau ; Bon indicateur de la cohésion des berges ; Paramètre de description du gabarit du lit	Montre également de bonnes corrélations avec le fonctionnement écologique du cours d'eau (notamment densité de poissons, Dunham et al. 2004)
Retlevés à l'échelle du transect	Hauteur pleins bords (HPB) (m)	Mesure de la différence de hauteur entre la ligne d'eau et la ligne passant par le point d'inflexion de la berge la plus basse et perpendiculaire à la ligne d'eau ; Précision : centimétrique	Paramètre de description du gabarit du lit ; Bon indicateur de l'activité géodynamique d'un cours d'eau	
	Faciès d'écoulement	Caractérisation du type de faciès grâce à la clé de détermination des faciès d'écoulement (fournie par le protocole) ; 2 niveaux de classification : faciès dominant (4 classes) puis faciès majeur ou secondaire (11 classes)	Faciès peut être un indicateur de dysfonctionnement hydromorphologique ; Mesure des successions radier mouille plat?	Hétérogénéité des faciès importante pour les communautés biologiques
	Nature des berges	Détermination du type de berge en présence (matériaux naturels, aménagement végétalisés, enrochement, matériaux artificiels) Détermination du type d'habitat aux abords immédiats de la berge (sous-berge, chevelu racinaire, végétation surplombante, blocs rocheux, débris ligneux grossiers/embâcle)	Renseigne sur l'érodabilité des berges donc sur la mobilité du lit ? Essentiellement écologique? Qu'est ce qui est entendu par abords immédiat? Est-on dans le cours d'eau ou dans la zone rivulaire?	Peuvent également abriter des habitats importants pour les communautés aquatiques
	Nature et structure de la ripisylve (1/2 lpb sur chaque rive)	Description de la stratification verticale des strates ; présence de 0, 1, 2 ou 3 strates dans les suivantes : arborée, arbustive, herbacée Mesure de l'épaisseur de chacune des strates à partir de la berge ; Seule la végétation continue est prise en compte ; Répartition au sein de quatre classes de tailles (0-5, 5-10, 10-25, > 25) Caractérisation du type de végétation suivant 3 classes : Végétation autochtone, exogène ou exotique, plantée Strate la plus recouvrante	Ripisylve possède de nombreux rôles tant en terme de fonctionnement biogéochimique qu'en terme de morphologie, d'hydraulique et de diversité des habitats qu'elle peut fournir. Renseigne sur les apports de bois mort, sur l'érodabilité des berges, approfondissement du chenal (biblio)	Diversification des habitats pour les communautés biologiques, apports en matière organique allochtone, régulation thermique du cours d'eau (ombrage)
	Substrat minéral	Prélèvement d'un élément du substrat au droit de chaque point de mesure des transects ; Attention aux biais d'échantillonnage ; Classification de chaque élément dans une catégorie de Wentworth modifiée (classe granulométrique) déterminée avec un gabarit ou mesurée directement au pied à coulisse (mesure de la perpendiculaire au plus grand axe)	Calcul d'un indice de diversité granulométrique et évaluation de la rugosité ; Evaluation du transport suffisant des sédiments (Malavoi et al., 2011) ; Complément à la typologie du cours d'eau	Transport suffisant : Sédiments garantissant le maintien de l'équilibre géomorphologique du cours d'eau, la diversification des habitats et des faciès du lit mènent ainsi que ceux participant aux processus d'autoépuration
	Support ou substrat additionnel	Description d'éventuels substrats additionnels, organiques ou non, au droit de chaque point de mesure des transects	Essentiellement un paramètre pour évaluer la présence de supports favorables à une bonne structure et/ou diversité biologique	
	Forme de la vallée	Description de la vallée selon 7 classes : pas de vallée évidente, vallée peu encaissée (pente < 30°), vallée prononcée (30° < pente < 80°), gorge (pente abrupte de type falaise de 80 à 90°), vallée asymétrique, vallée en terrasse, autre	Description de la station ; Inscription du cours d'eau dans son paysage	
	Pente de la ligne d'eau (m/m)	Mesure de la différence d'altitude de la ligne d'eau entre l'aval et l'amont de la station, rapportée à la longueur L de la station	Nécessaire pour les modélisations hydrauliques et le calcul de la puissance du cours d'eau (puissance brute = poids volumique de l'eau * débit * pente ; puissance spécifique = puissance brute/lpb) Brookes, 1988 ; Renseigne sur la capacité du cours d'eau à mobiliser du sédiment (érosion lit/berges)	
	Débit (m3/s)	Plusieurs méthodes de mesure, attention à utiliser la plus adaptée à la situation car mesure très importante ; Sur section à écoulement laminaire : exploration du champ de vitesse (courantomètre) ; (Sur section présentant une chute : méthode par capacité) ; Sur grands cours d'eau : exploration du champ de vitesse par ADCP (effet doppler) ; ...	Variable de contrôle au premier ordre ; Utilisée comme base pour l'extrapolation du débit à pleins bords (équation de Manning-Strickler) ; Calcul de la force tractrice, de la vitesse moyenne, de l'énergie hydraulique, de la cote de l'énergie, du nombre de Froude, des puissances brute et spécifique ; Confiance limitée dans les résultats tout de même du fait des postulats à l'utilisation de l'équation de Manning-Strickler (rugosité constante, géométrie de la section mouillée constante, pente du lit constante)	Capacité d'écoulement du lit mineur juste avant de déborder dans la plaine d'inondation (Wolman et Leopold 1957)
	Granulométrie	Application de la méthode Wolman (Wolman, 1954) : choix du radier (ou plat courant) présentant la fraction de granulométrie la plus grossière, 10 traversées d'une rive à l'autre, prélèvement tous les 1/10 de la largeur mouillée, mesure de la plus grande largeur ; Attention aux biais d'échantillonnage importants dans les protocoles de granulométrie (opérateur a tendance à sélectionner l'objet le plus volumineux)	Classement du cours d'eau selon son type granulométrique ; Connaissance des processus de mobilisation du substrat (fréquence de mise en mouvement) ; Calcul des indices de Folk & Ward et de Fredle, indices de tri de la granulométrie, révélateurs de l'origine et de la mise en place des sédiments	Important également pour les communautés aquatiques, et siège de processus biogéochimiques
Habitats marginaux	Prise en compte d'éventuels substrats non minéraux particulièrement biogènes non-observés au droit des transects	Permet d'intégrer des informations sur le substrat du cours d'eau qui échappent à la normalisation du protocole (15 transects espacés de 1 lpb, ...)		
Continuité de la ripisylve	Caractérisation de la continuité de la ripisylve sur chaque rive ; Classement selon 6 classes ; Seules les strates arborées et arbustives sont prise en compte	Complément de la description de la ripisylve ;		
Colmatage	Implantation de substrats artificiels (carrelats de bois clair) en tête de 2 radiers (4/radier) ; Interprétation à vue selon un clé de détermination des zones soumises à des conditions anoxiques et mesure de la profondeur	Détermination de l'ampleur du phénomène de colmatage (mesure de pression sur le cours d'eau, souvent d'origine anthropique) ; Attention, mesure très discutable, pas toujours significative (Descloux, 2014)	Colmatage peut affecter les communautés benthiques et hyporhéiques (Descloux, 2014)	

Annexe 4 : Mail aux agents des SD et aux partenaires

Bonjour,

Je suis actuellement stagiaire (M1 GHBV) à la direction interrégionale Bretagne Pays de la Loire, encadré par Alexandra HUBERT et Mikaël Le Bihan et pour une durée de 4 mois. Mon stage porte sur **l'étude des caractéristiques hydromorphologiques de référence des cours d'eau du territoire d'ordre de Strahler 2 à 5**. Une première étape incontournable de ce travail est de répertorier des cours d'eau de référence du point de vue du fonctionnement hydromorphologique. C'est pourquoi je viens solliciter votre connaissance du territoire et vous demander de me faire parvenir les sites candidats à la référence en fonction des critères suivants :

- Cours d'eau de rang 2 à 5
- Prospectables à pied
- Absence de busage(s) ou de travaux hydrauliques (rectification, recalibrage, ouvrage type seuil/barrage) en amont et sur la station
- Absence de plan(s) d'eau en amont et en aval du cours d'eau
- Absence de drainage latéral
- Zone de prairie ou de forêt (si zone de prairie : présence d'une ripisylve et/ou absence de piétinement sur et en amont de la station) ; Corridor rivulaire non entretenu d'une largeur minimale de 15 mètres
- Absence de plantation forestière monospécifique ou non naturelle

Dans l'idéal, les cours d'eau devraient répondre à l'ensemble de ces critères mais il est possible d'avoir une certaine souplesse sur les deux derniers critères, ceux-ci étant a priori moins structurants pour l'hydromorphologie des cours d'eau.

Merci de me retourner vos propositions avec le **nom de la commune et une capture d'écran du tronçon proposé** (avec le tronçon délimité) avant le 22/04 pour des raisons d'organisation liées à la durée de mon stage.

Je vous remercie par avance pour votre aide précieuse.

Bien cordialement,

Maxime Galineau

Annexe 5 : Notice de l'indice

Grille d'indice pour l'outil d'aide à la décision

Paramètre	Modalité	Pondération
Continuité de la ripisylve	Eparse	0
	Quasi-continue	1
	Continue	2
Epaisseur maximum de la ripisylve	Inférieure à 25 m	0
	25 à 75 m	1
	Supérieure à 75 m	2
Sinuosité du tronçon	Faible	0
	Faible à moyenne	1
	Moyenne	2
	Moyenne à forte	3
Evolution du tracé au cours du temps	Tracé modifié	0
	Tracé peu modifié (rectification mineure loin de la station)	1
	Tracé stable dans le temps	3
Nombre de plans d'eau en amont du tronçon	Nombreux plans d'eau (> 10)	0
	Quelques plans d'eau (< 10)	1
	1 plan d'eau en amont	2
	Pas de plan d'eau en amont	3
Occupation du sol sur le bassin versant (BV)	Zone urbanisée sur le BV	-1
	Dominante agricole avec majorité de prairies et terres arables ; Dominante agricole avec majorité de terres arables	1
	Dominante agricole avec majorité de prairies et forêts	2
	Dominante forestière ou végétation arbustive/herbacée	3

Annexe 6 : Fiches terrains

RENSEIGNEMENTS GÉNÉRAUX				REMARQUES/PHOTOS																														
Code/Nom station : Opérateurs : Date : Météo : Coord. amont X = Y = Coord. aval X = Y =																																		
RENSEIGNEMENTS STATION																																		
Évaluation de la largeur de plein bord lpb-ev1 = lpb-ev2 = lpb-ev3 = Moy. lpb-ev (m) = Longueur de la station L = 14 x lpb-ev L (m) =		Évaluation de la largeur mouillée lm-ev1 = lm-ev2 = lm-ev3 = Moy. lm-ev (m) = Distance inter-points d = 1/7 x lm-ev d (m) =		Essences ligneuses aux abords de la station <div style="border: 1px solid black; height: 100px;"></div>																														
Colmatage (Archambaud, cf. fiche mémo colmatage) 1 à 3 mesures sur radier ou à défaut sur plat courant <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <thead> <tr> <th rowspan="2"></th> <th colspan="5">Classe de colmatage</th> </tr> <tr> <th>1</th> <th>2</th> <th>3</th> <th>4</th> <th>5</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Mes. 1</td> <td><input type="checkbox"/></td> <td><input type="checkbox"/></td> <td><input type="checkbox"/></td> <td><input type="checkbox"/></td> <td><input type="checkbox"/></td> </tr> <tr> <td>Mes. 2</td> <td><input type="checkbox"/></td> <td><input type="checkbox"/></td> <td><input type="checkbox"/></td> <td><input type="checkbox"/></td> <td><input type="checkbox"/></td> </tr> <tr> <td>Mes. 3</td> <td><input type="checkbox"/></td> <td><input type="checkbox"/></td> <td><input type="checkbox"/></td> <td><input type="checkbox"/></td> <td><input type="checkbox"/></td> </tr> </tbody> </table>			Classe de colmatage					1	2	3	4	5	Mes. 1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Mes. 2	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Mes. 3	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Présence d'habitats marginaux <input type="checkbox"/> OUI <input type="checkbox"/> NON Si oui, préciser (selon la même typologie que les substrats additionnels, cf. fiche transect) :		Mesure du débit Débit D (m ³ /s) =	
	Classe de colmatage																																	
	1	2	3	4	5																													
Mes. 1	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>																													
Mes. 2	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>																													
Mes. 3	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>																													
Continuité de la ripisylve <table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <thead> <tr> <th></th> <th></th> <th>G</th> <th>D</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>Absence</td> <td></td> <td><input type="checkbox"/></td> <td><input type="checkbox"/></td> </tr> <tr> <td>Isolée</td> <td></td> <td><input type="checkbox"/></td> <td><input type="checkbox"/></td> </tr> <tr> <td>Espacée-régulière</td> <td></td> <td><input type="checkbox"/></td> <td><input type="checkbox"/></td> </tr> <tr> <td>Bosquets éparses</td> <td></td> <td><input type="checkbox"/></td> <td><input type="checkbox"/></td> </tr> <tr> <td>Semi-continue</td> <td></td> <td><input type="checkbox"/></td> <td><input type="checkbox"/></td> </tr> <tr> <td>Continue</td> <td></td> <td><input type="checkbox"/></td> <td><input type="checkbox"/></td> </tr> </tbody> </table>								G	D	Absence		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Isolée		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Espacée-régulière		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Bosquets éparses		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Semi-continue		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	Continue		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>	
		G	D																															
Absence		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>																															
Isolée		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>																															
Espacée-régulière		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>																															
Bosquets éparses		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>																															
Semi-continue		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>																															
Continue		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>																															
FORME DE LA VALLÉE LE LONG DU TRONÇON																																		
<div style="display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="width: 15%;"> <input type="checkbox"/> V1 </div> <div style="width: 15%;"> <input type="checkbox"/> V2 </div> <div style="width: 15%;"> <input type="checkbox"/> V3 </div> <div style="width: 15%;"> <input type="checkbox"/> V4 </div> <div style="width: 15%;"> <input type="checkbox"/> V7, dessiner à la main </div> </div> <div style="margin-top: 20px; display: flex; justify-content: space-between;"> <div style="width: 30%;"> <input type="checkbox"/> V5 Préciser la rive Rive : Rive : </div> <div style="width: 30%;"> <input type="checkbox"/> V6 </div> </div>																																		

RENSEIGNEMENTS GÉNÉRAUX				REMARQUES			
Code/Nom station :		Départ : <input type="checkbox"/> RD <input type="checkbox"/> RG		l _{pb} (m) = h _{pd} (cm) =			
Transect N°...				l _{mi} (m) = l _{mf} (m) =			

CARACTÉRISTIQUES DU LIT													
Dist. au décimètre													
Profondeur (cm)													
Substrat minéral*													
Subs. additionnel**													

*Minéral (mm): TV / V / A / L / S / GP(2-8) / GG(8-16) / CF(16-32) / CG(32-64) / PF (64-128) / PG (128-256) / B (256-1024) / R (>1024) / D (>1024, dont dalles d'A)

**Additionnel : CR (Chevelu Racinaire) / VS (Végétation Surplombante) / DL (Débris Ligneux Grossiers Embâcles) / VA (Végétation Aquatique) / PD (Pool Détritique) / CC (Concrétion Calcaire)

FACIÈS (cf. fiche mémo Faciès)						BANQUETTES (cf. fiche mémo Banquettes)					
Faciès simplifié	Mouille			Plat		Radier/Rapide					
Faciès affiné	Chenal lentique	Fosse de dissipation	Mouille de concavité	Chenal lotique	Plat lentique	Plat courant	Radier	Rapide	Cascade	Chute	Présence de banquettes sur le transect : <input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non
											Si oui, remplir l'encart ci-dessous
											<input type="checkbox"/> Rive gauche <input type="checkbox"/> Rive droite

RIPISYLVE													
Rive gauche	Strate présente	<input type="checkbox"/> Arborée	<input type="checkbox"/> Arbustive	<input type="checkbox"/> Herbacée	<input type="checkbox"/> Abs.	Rive droite	Strate présente	<input type="checkbox"/> Arborée	<input type="checkbox"/> Arbustive	<input type="checkbox"/> Herbacée	<input type="checkbox"/> Abs.	Longueur LonBAN (m)	
	Epaisseur	<input type="checkbox"/> <5 m	<input type="checkbox"/> <5 m	<input type="checkbox"/> <5 m			<input type="checkbox"/> <5 m	<input type="checkbox"/> <5 m	<input type="checkbox"/> <5 m		Largeur min (cm)		
		<input type="checkbox"/> 5 à 10 m	<input type="checkbox"/> 5 à 10 m	<input type="checkbox"/> 5 à 10 m			<input type="checkbox"/> 5 à 10 m	<input type="checkbox"/> 5 à 10 m	<input type="checkbox"/> 5 à 10 m		Largeur max (cm)		
		<input type="checkbox"/> 10 à 25 m	<input type="checkbox"/> 10 à 25 m	<input type="checkbox"/> 10 à 25 m			<input type="checkbox"/> 10 à 25 m	<input type="checkbox"/> 10 à 25 m	<input type="checkbox"/> 10 à 25 m		Epaisseur min (cm)		
	<input type="checkbox"/> > 25 m	<input type="checkbox"/> > 25 m	<input type="checkbox"/> > 25 m		<input type="checkbox"/> > 25 m	<input type="checkbox"/> > 25 m	<input type="checkbox"/> > 25 m		Epaisseur max (cm)				
	Type de végétation	<input type="checkbox"/> Naturelle	<input type="checkbox"/> Naturelle	<input type="checkbox"/> Naturelle		<input type="checkbox"/> Naturelle	<input type="checkbox"/> Naturelle	<input type="checkbox"/> Naturelle					
		<input type="checkbox"/> Exotique	<input type="checkbox"/> Exotique	<input type="checkbox"/> Exotique		<input type="checkbox"/> Exotique	<input type="checkbox"/> Exotique	<input type="checkbox"/> Exotique					
		<input type="checkbox"/> Plantée	<input type="checkbox"/> Plantée	<input type="checkbox"/> Plantée		<input type="checkbox"/> Plantée	<input type="checkbox"/> Plantée	<input type="checkbox"/> Plantée					

BERGES (cf. fiche mémo Berges)															
Rive gauche	Matériau	MN	AV	ER	MA	Typologie de berge Associer une photographie	Matériau	MN	AV	ER	MA	Typologie de berge Associer une photographie			
	Hab. caract.	SB	CR	VS	DL		BR	Hab. caract.	SB	CR	VS		DL	BR	
	Si sous-berge :						Si sous-berge :								
	● Noter la profondeur (cm) :					<input type="checkbox"/> Pente douce	<input type="checkbox"/> (Sub-)verticale	● Noter la profondeur (cm) :					<input type="checkbox"/> Pente douce	<input type="checkbox"/> (Sub-)verticale	
	● Noter le(s) facteur(s) structurant(s) :					<input type="checkbox"/> Abrupte + banquette		● Noter le(s) facteur(s) structurant(s) :					<input type="checkbox"/> Abrupte + banquette		
	<input type="checkbox"/> Racines <input type="checkbox"/> Mouille de concavité <input type="checkbox"/> Bloc rocheux					<input type="checkbox"/> Autre préciser :		<input type="checkbox"/> Racines <input type="checkbox"/> Mouille de concavité <input type="checkbox"/> Bloc rocheux					<input type="checkbox"/> Autre préciser :		
	<input type="checkbox"/> Autre, préciser :							<input type="checkbox"/> Autre, préciser :							

PROFIL EN LONG

Une mesure de la profondeur d'eau et de la cote du fond à chaque point d'inflexion du lit

Pt	Distance au décamètre	Faciès (préciser début, milieu, fin de faciès)	Cote du fond	Profondeur d'eau (cm)	Remarques	Pt	Distance au décamètre	Faciès (préciser début, milieu, fin de faciès)	Cote du fond	Profondeur d'eau (cm)	Remarques
1						36					
2						37					
3						38					
4						39					
5						40					
6						41					
7						42					
8						43					
9						44					
10						45					
11						46					
12						47					
13						48					
14						49					
15						50					
16						51					
17						52					
18						53					
19						54					
20						55					
21						56					
22						57					
23						58					
24						59					
25						60					
26						61					
27						62					
28						63					
29						64					
30						65					
31						66					
32						67					
33						68					
34						69					
35						70					

SINUOSITÉ

Distance écologique (m) :

Distance euclidienne (m) :

Sinuosité :

GRANULOMÉTRIE DU RADIER : COUCHE D'ARMURE

Application de la méthode de Wolman sur le radier présentant la granulométrie la plus grossière (renseigner le diamètre perpendiculaire au plus grand axe en centimètres)

Coordonnées GPS du radier : X = Y =

Aval ----- 10 profils en travers (Ti) équidistants couvrant le radier -----> Amont

	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9	T10
1	11	21	31	41	51	61	71	81	91	
2	12	22	32	42	52	62	72	82	92	
3	13	23	33	43	53	63	73	83	93	
4	14	24	34	44	54	64	74	84	94	
5	15	25	35	45	55	65	75	85	95	
6	16	26	36	46	56	66	76	86	96	
7	17	27	37	47	57	67	77	87	97	
8	18	28	38	48	58	68	78	88	98	
9	19	29	39	49	59	69	79	89	99	
10	20	30	40	50	60	70	80	90	100	

ÉPAISSEUR DU MATELAS ALLUVIAL

1 à 3 mesures sur le radier présentant la granulométrie la plus grossière (suivant la difficulté à effectuer la mesure)

Mesure 1	Épaisseur (cm)
Armure	
Sous-couche	
Total	

Mesure 2	Épaisseur (cm)
Armure	
Sous-couche	
Total	

Mesure 3	Épaisseur (cm)
Armure	
Sous-couche	
Total	

GRANULOMÉTRIE DU RADIER : SOUS-COUCHE

1 prélèvement au moins au droit d'un point de mesure de l'épaisseur du matelas alluvial (3 prélèvements max., à adapter en fonction de la difficulté d'accès à la sous-couche)

Renseigner la classe granulométrique de Wentworth (cf fiche mémo)

Sous-couche 1	Sous-couche 2	Sous-couche 3
---------------	---------------	---------------

Granulométrie dominante :

Granulométrie dominante :

Granulométrie dominante :

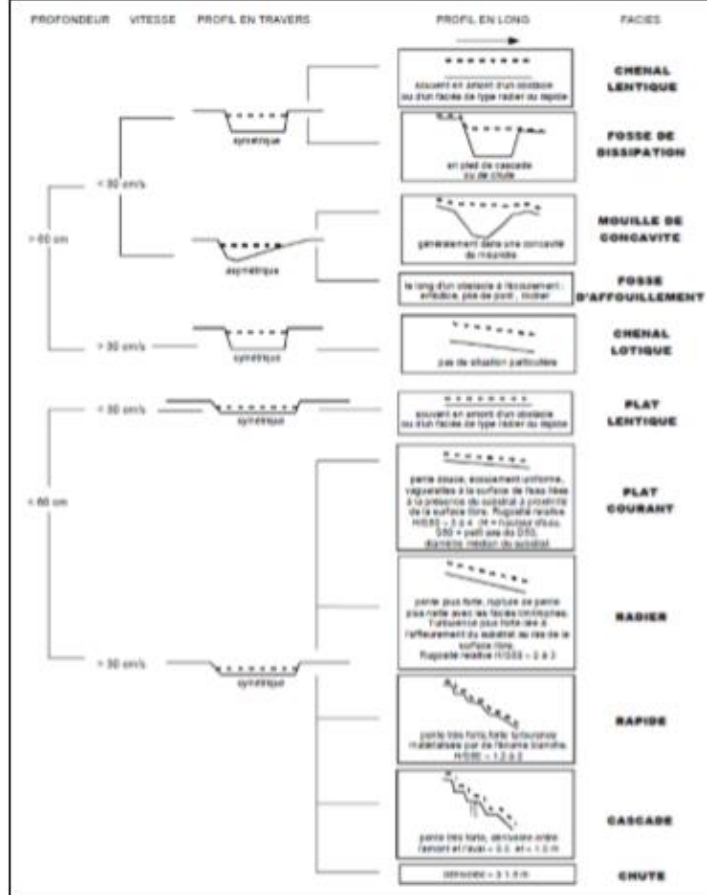
Granulométrie accessoire :

Granulométrie accessoire :

Granulométrie accessoire :

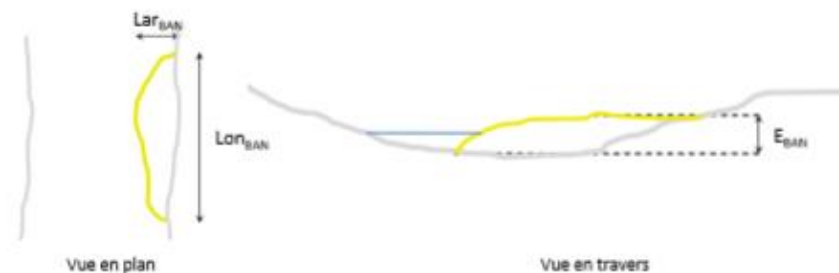
FACIÈS

Clé de détermination des faciès d'écoulement (Malavoi & Bravard, 2002)



BANQUETTES

Mesures à effectuer sur les banquettes



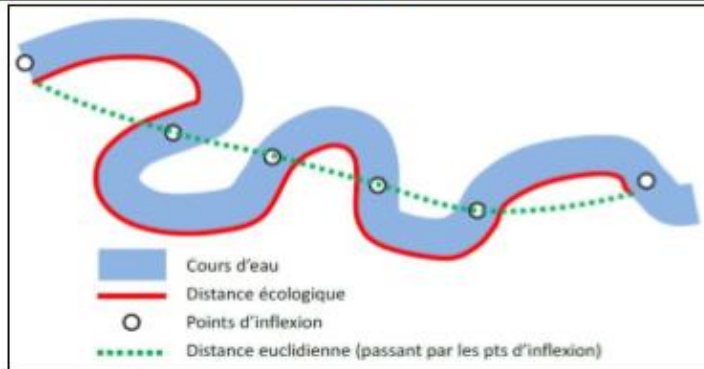
BERGES

Matériau et habitat(s) caractéristique(s)

Types de berges	Code
Matériaux naturels	MN
Aménagement végétalisé	AV
Enrochement	ER
Matériaux artificiels	MA

Types d'habitats	Code
Sous-berge	SB
Chevelu racinaire	CR
Végétation surplombante	VS
Blocs rocheux	BR
Débris ligneux grossiers, embâcle	DL

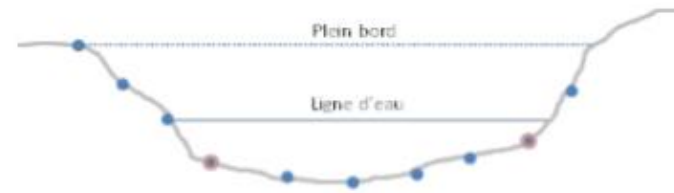
SINUOSITÉ



- Cours d'eau
- Distance écologique
- Points d'inflexion
- ⋯ Distance euclidienne (passant par les pts d'inflexion)

BERGES

Mesures à effectuer pour dresser le profil en travers des berges

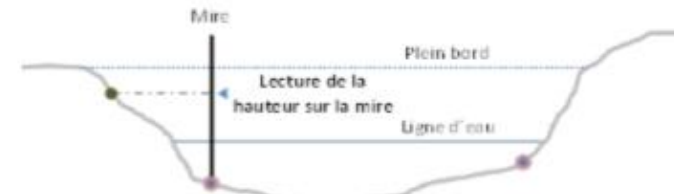


- Points de mesure profil en travers CARHYCE
- Dernier point de mesure en eau : Position de la mire pour le profil en travers des berges

COLMATAGE

Méthode Archambaud (2005)

Classe de colmatage	Diagramme	Description
1 (10 - 25%)		Les éléments sont petits. On peut observer un dépôt fin de limon peu cohésif (sur la gauche) qui assure l'adhérence des pierres.
2 (25 - 50%)		Les éléments sont plus gros. On observe des dépôts de limon (sur la partie droite en abîme). La rugosité de la surface est plus élevée.
3 (50 - 75%)		Les éléments sont plus gros et présentent un rugosité de la surface assez élevée. On observe un dépôt de limon sur la partie droite en abîme.
4 (75 - 90%)		Les éléments sont plus gros et présentent un rugosité de la surface assez élevée. On observe un dépôt de limon sur la partie droite en abîme.
5 (90 - 100%)		Les éléments sont plus gros et présentent un rugosité de la surface assez élevée. On observe un dépôt de limon sur la partie droite en abîme.



- Points de mesure profil en travers de berge

Notice pour la mise en œuvre du protocole de caractérisation des stations de référence hydromorphologique

Introduction

Cette notice a pour objet de faciliter la mise en œuvre du protocole de caractérisation hydro-morphologique des cours d'eau de référence de rang de Strahler 2 à 5. Il existe de nombreux protocoles de caractérisation hydromorphologique des cours d'eau. Ils se basent sur des données issues de la télédétection et des SIG (« Indice di Qualità Morfologica IQM » en Italie ; RINALDI *ET AL.*, 2013), ou sur des mesures de terrain (River Habitat Survey au Royaume-Uni, LAWA (Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser) en Allemagne). En France, c'est le protocole CARHYCE (Caractérisation HYdromorphologique des Cours d'Eau) qui est utilisé et qui alimente à ce jour l'une des bases de données les plus fournies d'Europe sur l'hydromorphologie des cours d'eau (GOB *ET AL.*, 2014). Si le protocole CARHYCE permet l'élaboration de modèles solides et un diagnostic du fonctionnement hydromorphologique des cours d'eau, il occulte certains paramètres utiles à une bonne restauration des cours d'eau. Le présent protocole a pour objectif d'acquérir les données exigées pour alimenter les modèles de référence régionaux CARHYCE ainsi qu'un ensemble de données complémentaires telles que l'épaisseur du matelas alluvial, la granulométrie de la sous couche ou encore l'acquisition d'un profil en long détaillé.

Dans ce document sont détaillés les modes d'acquisition des données, pour CARHYCE ainsi que pour les mesures complémentaires. Il est possible d'obtenir plus d'informations sur le recueil des données CARHYCE en consultant directement le document suivant : « Protocole de recueil de données hydromorphologiques à l'échelle de la station sur les cours d'eau prospectables à pied » (BAUDOIN *ET AL.*, 2010). Les paramètres relevant du protocole CARHYCE seront marqués d'un astérisque (*).

1. Acquisition des données représentatives de la station

1.1. Dimensionnement de la station

Calquée sur le protocole CARHYCE, l'estimation de la largeur plein bord et de la largeur mouillée à l'échelle de la station est indispensable pour déterminer la longueur de la station, la distance entre les transects et la distance entre les points de mesure sur les transects.

1.1.1. Largeur pleins bords évaluée l_{pb-ev} (m)*

Le lit de pleins bords correspond à la capacité maximale d'écoulement du cours d'eau avant débordement. L'ensemble des modélisations réalisées à partir des données CARHYCE sont effectuées à partir de la géométrie de pleins bords du lit. L'objectif de l'évaluation de la largeur pleins bords est de déterminer la longueur de la station : la station doit mesurer 14



Figure 8 : Exemple de mesure de la largeur pleins bords

fois la largeur pleins bords de façon à ce que la station présente théoriquement au moins deux successions radier/mouille/plat. La largeur pleins bords correspond à la longueur de la ligne fictive qui relie horizontalement le point d'inflexion de la berge la plus basse à la berge opposée (figure 1).

La largeur pleins bords doit être mesurée au moins trois fois selon le schéma visible sur la figure 2 : la première mesure matérialise le début, ou le point aval de la station et est effectuée si possible sur un radier ou sur un plat courant, au niveau d'une portion rectiligne ou d'un point d'inflexion entre deux sinuosités. C'est la moyenne de ces trois mesures qui est utilisée

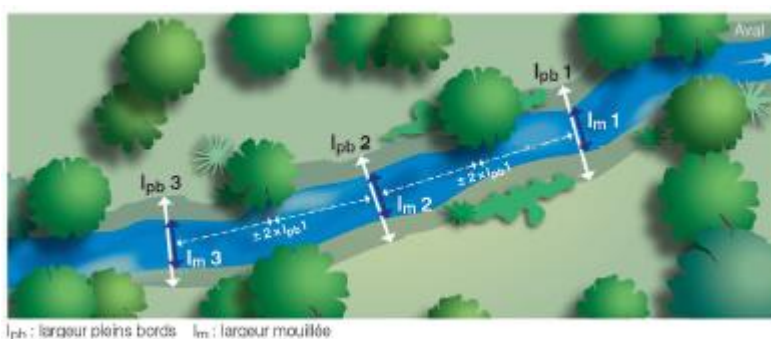


Figure 9 : Positionnement des mesures préliminaires à effectuer pour une opération CARHYCE

pour calculer la longueur de la station.

1.1.2. Largeur mouillée évaluée l_{m-ev} (m)*

Son évaluation est faite au droit des mesures de largeur pleins bords évaluée et est donc mesurée trois fois (voir figure 2). La largeur mouillée correspond à la largeur de la lame d'eau (figure 1). L'objectif est de déterminer l'espacement entre les points de mesure sur chaque transect.

1.2. Débit (m³/s)*

Le débit est mesuré au moyen d'un débitmètre sur une portion rectiligne (longue d'environ deux fois sa largeur) présentant l'écoulement le plus laminaire possible. Une fois la section choisie, elle est matérialisée par un décamètre tendu afin d'espacer les verticales de mesure avec précision. En vue d'améliorer la qualité de la mesure, il est conseillé de dégager tout ce qui pourrait être à l'origine de turbulences sur et en amont de la section de mesure (branches, végétation aquatique, ...).

Le nombre de verticales ainsi que le nombre de points sur celle-ci est consultable dans la notice de l'appareil. De manière générale, il est conseillé d'effectuer 10 verticales et d'adapter la profondeur des points sur les verticales en fonction de la hauteur d'eau h (figure 3).

Hauteur d'eau sur la verticale de mesure	Mesures à effectuer par rapport au fond
Si $h < 10$ cm	0,4 x h
Si $10 \leq h < 20$ cm	0,2 x h et 0,8 x h
Si $h \geq 20$ cm	0,2 x h , 0,4 x h et 0,8 x h

Figure 10 : Positionnement des points de mesures sur les verticales en fonction de la profondeur d'eau

1.3. Continuité de la ripisylve*

Il s'agit de caractériser à l'échelle stationnelle la continuité de la ripisylve pour chacune des berges selon les 6 classes suivantes (figure 4) : absence, isolée, espacée-régulière, bosquets éparses, semi-continue ou continue.




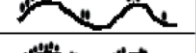


		G	D
Absence		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Isolée		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Espacée-régulière		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Bosquets éparses		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Semi-continue		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
Continue		<input type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Figure 11 : Typologie décrivant la continuité de la ripisylve

1.4. Présence d'habitats marginaux*

Si des substrats non minéraux marginaux particulièrement biogènes sont présents sur la station mais ne sont recensés sur aucun des transects, ceux-ci sont renseignés dans la partie « habitats marginaux » en utilisant la même typologie que celle des supports et substrats non minéraux présentée au paragraphe 2.3. (tableau 4).

1.5. Colmatage

L'appréhension du colmatage sur la station est effectuée selon la méthode Archambaud (2005). Cette méthode est une estimation visuelle du colmatage qui consiste à soulever un bloc du lit sur un radier (ou à défaut un plat courant) et à caractériser la quantité de fines qui s'échappent suite à cette action ainsi que la difficulté à extirper ledit bloc (appréhension de la cohésion apportée par le



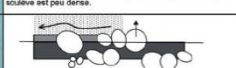


Code	Classes de Colmatage	Représentation du degré de colmatage (lorsque l'on souleuvre un élément du fond)
1	] 0 - 25%]	 Les éléments sont posés. On peut observer soit un dépôt fin de limons peu colmatant (cas de gauche) soit aucun dépôt (cas de droite). Sens du courant
2	] 25 - 50%]	 Les éléments sont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

Figure 12 : Classes de colmatage selon Archambaud et al. (2005).
Source : *Eléments d'hydromorphologie*

colmatage). Cette caractérisation se fait selon la typologie illustrée dans la figure 5.

1.6. Forme de la vallée

Il s'agit d'apporter une première description de la station et de l'inscription du cours d'eau dans paysage. La forme de la vallée est à caractériser selon six classes représentées par des schémas sur la fiche station du protocole (voir figure 6). Une septième classe existe pour les vallées qui ne rentrent dans aucune des classes prédéfinies, auquel cas l'opérateur devra

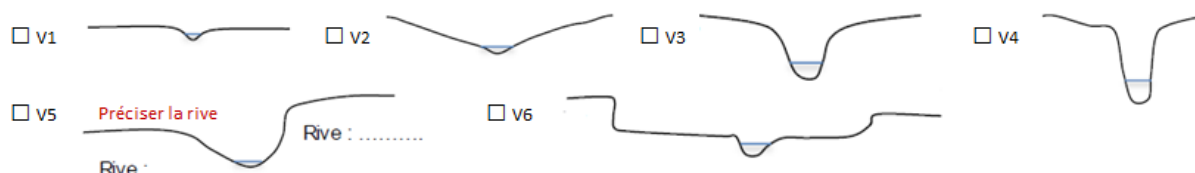


Figure 13 : Typologie des formes de vallée

dessiner un profil en travers rapide de la vallée.

1.7. Profil en long

L'acquisition d'un profil en long détaillé vient compléter le protocole CARHYCE. Le présent protocole propose l'acquisition d'un profil en long renforcé avec le relevé simultané de la cote du lit, de hauteur d'eau ainsi que des faciès d'écoulements aux points de mesure. La distance entre chaque point de mesure est également relevée afin de reconstituer fidèlement le profil en long de la station ainsi que les successions de faciès, et de calculer les pentes du lit et de la ligne d'eau sur la station.

1.8. Sinuosité

Dans le même temps, les paramètres nécessaires au calcul de l'indice de sinuosité sont mesurés. L'indice de sinuosité est calculé selon la méthode de Allen (1984) (figure 6). Tout d'abord, la distance dite écologique (d_{eco}) est mesurée : elle correspond à la longueur de l'une des rives et est proche de la longueur du cours d'eau avec sa sinuosité. Ensuite, la distance dite euclidienne (d_{euc}) est mesurée : elle correspond à la somme des longueurs passant par les points d'inflexion du cours d'eau. L'indice de sinuosité s'obtient en faisant le rapport entre ces deux distances (d_{eco}/d_{euc}).

Indice de sinuosité (Si)	Classe de sinuosité du cours d'eau
$1,05 < Si < 1,25$	Sinueux
$1,25 < Si < 1,5$	Très sinueux
$Si > 1,5$	Méandriforme

Tableau 5 : Classes de sinuosité des cours d'eau

1.9. Granulométrie

Le protocole CARHYCE prévoit d'effectuer un échantillonnage granulométrique selon la méthode de Wolman sur le radier présentant la granulométrie la plus grossière de la station. Le présent protocole propose de compléter la caractérisation de ce radier par des mesures

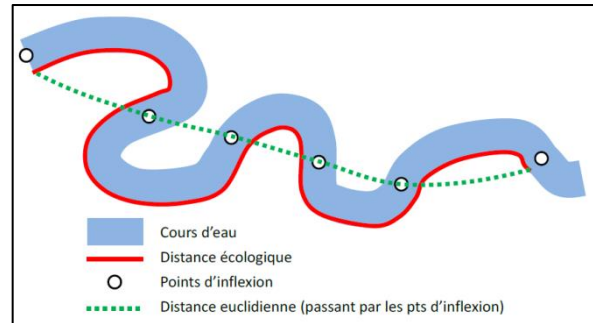


Figure 14 : Méthode de mesure de la sinuosité.
Source : Vierron, 2015

de l'épaisseur du matelas alluvial ainsi qu'une caractérisation des classes granulométriques de la sous-couche.

1.9.1. Couche d'armure*

Pour décrire la couche d'armure, la méthodologie du protocole CARHYCE est conservée : dix traversées équidistantes sont réalisées de la tête au pied du radier, de sorte à couvrir l'ensemble du faciès. Sur ces traversées, un élément est prélevé tous les 1/10^{ème} de la largeur mouillée. La plus grande largeur perpendiculaire au plus grand axe de chaque élément de granulométrie est mesurée au pied à coulisse ou de tout autre instrument permettant une mesure de précision millimétrique.

1.9.2. Epaisseur du matelas alluvial

Un fer à béton est enfoncé à l'aide d'une masse dans le matelas alluvial jusqu'à atteindre la couche d'argile sous-jacente, ou jusqu'au refus sur des blocs ou sur la roche mère. La hauteur de sédiments entre la surface du matelas alluvial et l'argile (ou l'extrémité du fer à

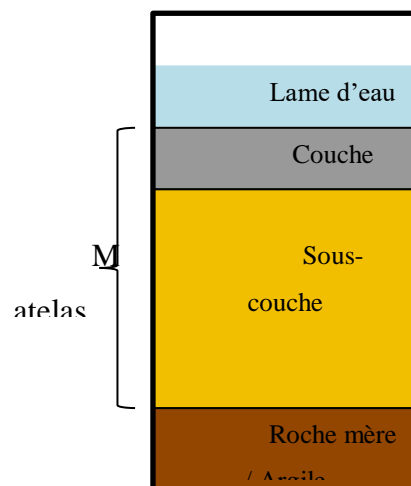


Figure 15 : Profil en profondeur d'un radier

béton dans le cas d'un refus) est mesurée. Si le cours d'eau reposant directement sur la roche

mère, il faut le préciser en remarque. La mesure est effectuée une à trois fois, suivant la difficulté de l'opération.

1.9.3 Sous-couche

Pour décrire la sous-couche sur ce radier, un trou est réalisé dans la couche d'armure au droit des mesures de l'épaisseur du matelas alluvial. Une poignée d'éléments de la sous-couche est prélevé et étalé dans une bassine et une appréciation visuelle des classes granulométriques de Wentworth dominante et accessoire est effectuée. Cette mesure est à effectuer au moins une fois et jusqu'à trois fois (toujours au droit de la mesure de l'épaisseur du matelas alluvial) si l'accès à la sous-couche est facile.

1.10. Bois en rivière et fraction héritée

Ces deux facteurs présentent un intérêt dans la restauration des cours d'eau : le bois en rivière remplit de nombreuses fonctions dans le cours d'eau dont la diversification des faciès d'écoulement l'apport naturel de matière organique dans le cours d'eau. La fraction héritée peut quant à elle constituer des micro-habitats favorables à la biodiversité. Connaître la répartition de ces éléments au sein des cours d'eau de référence, leurs tailles ainsi que leurs dispositions permettra d'émettre des recommandations techniques pour la restauration des cours d'eau de même rang de Strahler sur le territoire BPD. Ces paramètres sont relevés au sein de surfaces inter-transects sur la station. Une surface inter-transect correspond à la surface séparant deux transects successifs. Il est important de relever précisément la distance entre ceux-ci. Les données relevées sont à reporter dans la fiche « Bois en rivière et fraction héritée ».

1.10.1. Bois en rivière

Le choix des surfaces à échantillonner ne suit pas de règles précises. Ainsi un cours d'eau ne présentant que peu de bois ou des entassements mineurs n'a pas vocation à être échantillonné. Si cette partie du protocole est appliquée, la surface échantillonnée doit être la plus représentative d'une répartition naturelle du bois. Pour cela, il est important d'avoir effectué au préalable une lecture attentionnée de l'environnement proche et du lit du cours d'eau afin de détecter :

- Des traces de coupe fraîche ;
- Des entassements de bois à proximité du cours d'eau ;
- Une quantité de bois non-adaptée à l'environnement proche du cours d'eau.

Le bois en rivière est caractérisé selon plusieurs paramètres. Tout d'abord, les éléments supérieurs à 3 centimètres de diamètre sont comptés au sein de la/des surface(s) inter-transects puis leurs longueurs et diamètres sont mesurés. Enfin, leur position au sein du cours d'eau est relevée selon la typologie suivante :

- Barrage strict : barrage formant un seuil de bois en travers du chenal, cette disposition piège les sédiments et créer une chute naturelle en aval
- Barrage ouvert au fond : le bois est toujours placé en travers du chenal, mais il présente une ouverture au fond du lit, entraînant une érosion locale du fond
- L'entassement déflecteur : Le bois est entassé à l'oblique du chenal, ce qui dévie l'écoulement et provoque une érosion latérale des berges
- L'entassement parallèle : Le bois est entassé à la parallèle de l'écoulement
- En arche/pont au-dessus du cours d'eau

Si l'élément observé ne correspond à aucune des descriptions ci-dessus, indiquer « indéterminé » dans la fiche.

1.10.2. Fraction héritée

La fraction héritée correspond aux blocs non mobiles présents dans le lit de la rivière. Si elle est présente, les éléments sont dénombrés au sein des surfaces inter-transects et leur taille est mesurée (mesure de la seconde plus grande largeur). Un cours d'eau ne présentant pas de fraction héritée n'a pas vocation à être échantillonné. Selon les mêmes modalités que le bois en rivière, il peut être judicieux d'observer l'environnement proche du cours d'eau afin de détecter d'éventuels enrochements de berge effectués avec cette fraction héritée.

2. Acquisition des données sur les transects

Les transects, au nombre de 15, sont effectués à partir du point aval de la station et sont espacés d'une largeur pleins bords (l_{pb-ev}). Ils ont pour but de reconstituer le profil en travers du lit et d'acquérir des données concernant les berges et la ripisylve.

2.1. Géométrie en travers*

Afin de caractériser la géométrie en travers du lit sur les transects, la hauteur pleins bords, la largeur pleins bords et la largeur mouillée sont mesurées. Tous les $1/7^{\text{ème}}$ de la largeur mouillée évaluée à partir du point d'inflexion de la berge la plus basse, des mesures de la hauteur d'eau ainsi que de la hauteur des berges hors d'eau (hauteur entre le point de mesure et la ligne d'eau, notée en négatif) sont effectuées (figure 7).

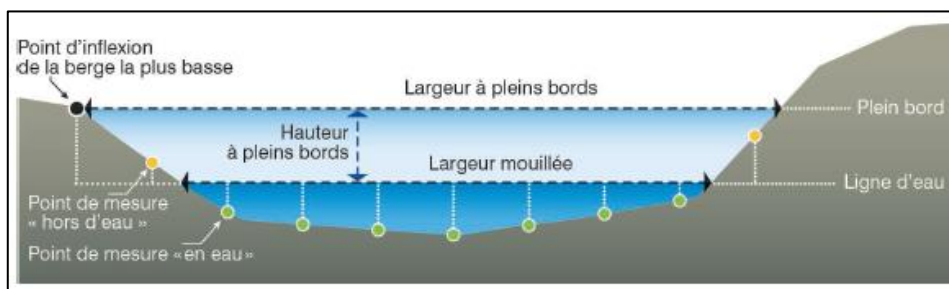


Figure 16 : Géométrie du lit au niveau d'un transect

2.2. Substrat minéral*

Afin de caractériser la granulométrie sur chacun des transects, un élément est prélevé au droit de chaque mesure (tous les 1/7^{ème} de la largeur mouillée évaluée) et classé selon une catégorie de Wentworth (tableau 3).

Les points dans le lit mouillé comme les points exondés sont à échantillonner.

Tableau 6 : Echelle granulométrique de Wentworth modifiée

Nom de la classe granulométrique	Classes de taille (diamètre perpendiculaire au plus grand axe)	Code utilisé
Dalles (dont dalles d'argile)	Plus de 1 024 mm	D
Rochers	Plus de 1 024 mm	R
Blocs	256 à 1 024 mm	B
Pierres grossières	128 à 256 mm	PG
Pierres fines	64 à 128 mm	PF
Cailloux grossiers	32 à 64 mm	CG
Cailloux fins	16 à 32 mm	CF
Graviers grossiers	8 à 16 mm	GG
Graviers fins	2 à 8 mm	GF
Sables	0,0625 à 2 mm	S
Limons	0,0039 à 0,0625 mm	L
Argiles	Moins de 0,0039 mm	A
Vase	Sédiments fins (< 0,1 mm) avec débris organiques	V
Terre végétale	Points hors d'eau très végétalisés	TV

2.3. Support ou substrat additionnel*

S'il est présent, le substrat additionnel est relevé. Pour être pris en compte, le substrat additionnel doit couvrir une surface supérieure à 0,02 m² (soit un rectangle de 20 x 10 cm ou une feuille format A5). Les éléments observés sont classés dans la typologie détaillée dans le tableau 4.

Tableau 7 : Classes de substrat additionnel et leurs codes respectifs

Classe de substrat additionnel	Code
Chevelu racinaire	CR
Végétation surplombante	VS
Débris ligneux grossiers, embâcle	DL
Végétation aquatique	VA
Pool détritique : accumulation de matière organique particulaire grossière (feuilles mortes, écorce, autres débris végétaux)	PD
Concrétion calcaire	CC

2.4. Berges

Le protocole CARHYCE prévoit une caractérisation des berges selon leur type de berge et le type d'habitats qu'elles présentent (plusieurs choix possibles). Les modalités de chacun des

Tableau 8 : Typologie des berges et de leurs habitats

Types de berges	Code	Types d'habitats	Code
Matériaux naturels	MN	Sous-berge	SB
Aménagement végétalisé	AV	Chevelu racinaire	CR
Enrochement	ER	Végétation surplombante	VS
Matériaux artificiels	MA	Blocs rocheux	BR
		Débris ligneux grossiers, embâcle	DL

paramètres sont présentées dans le tableau 5.

2.4.1. Typologie de berge

La description qualitative des berges est complétée par une typologie simple des berges observées. La typologie est la suivante :

- Berge sub-v verticale à abrupte ;
- Berge en pente douce ;
- Système associé à une banquette (sub-v verticale et banquette, pente douce et banquette) ;
- Système complexe sub-vertical puis pente douce ;
- Si la berge ne rentre pas dans cette typologie, associer un croquis de la berge.

2.4.2. Profil de berges

En complément de la description qualitative des berges, le présent protocole propose une description plus fine des berges. Un profil en travers détaillé des berges (rives gauche et droite) est réalisé sur au moins 3 transects en favorisant la diversité des berges acquises :

- Diversité de faciès : échantillonner sur au moins un radier, une mouille et un plat ;
- Diversité des tracés en plan : échantillonner sur au moins une portion rectiligne et un méandre.

Les profils de berge sont réalisés en même temps que l'acquisition des transects ainsi le décimètre est tendu pour matérialiser la ligne de plein bord. Il est impératif de ne pas bouger le décimètre entre la fin de l'acquisition du transect et l'acquisition du profil de berge. Une mire est positionnée sur le dernier point en eau du profil en travers CARHYCE (figures 10). A chaque point d'inflexion de la berge, un point de mesure est effectué. Sur chacun d'entre eux,

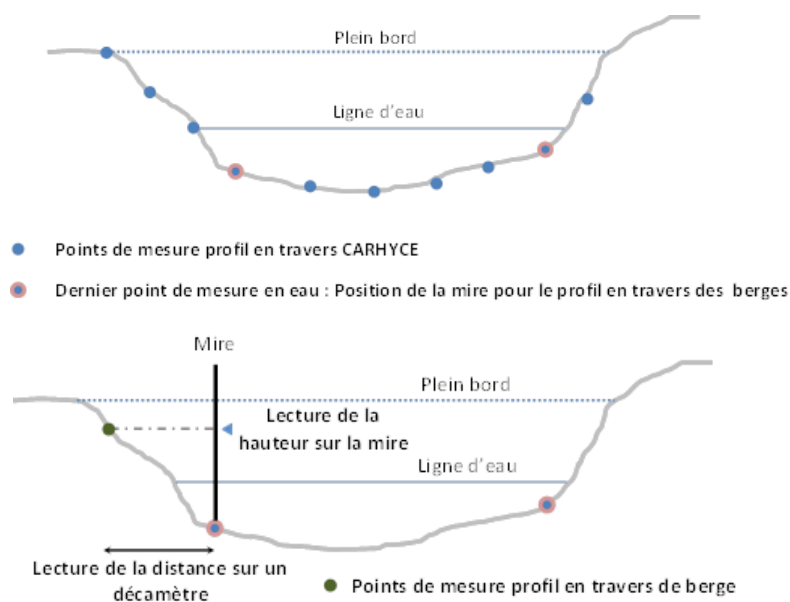


Figure 17 : Modalités d'acquisition des profils de berge

la hauteur sur la mire ainsi que la distance entre la mire et le point de mesure sont relevées. Ces mesures sont à reporter au sein de la fiche « Berges ».

2.4.3. Texture des berges

Il s'agit de relier la forme des berges avec leur texture. Sur chaque transect, la texture des berges est caractérisée selon les classes du triangle des textures (figure 11)

2.4.4. Sous-berges

Concernant les sous-berges, le protocole CARHYCE permet d'indiquer leur présence sur les transects. Le présent protocole propose de mesurer leur profondeur maximale et de qualifier le facteur qui structure ou soutient la sous-berge :

- Racines
- Bloc
- Erosion seule du cours d'eau

2.5. Banquettes

Sur les cours d'eau qui en possèdent, les banquettes sont décrites selon trois critères : leur longueur (L_{BAN}) et largeur (L_{arBAN} ,

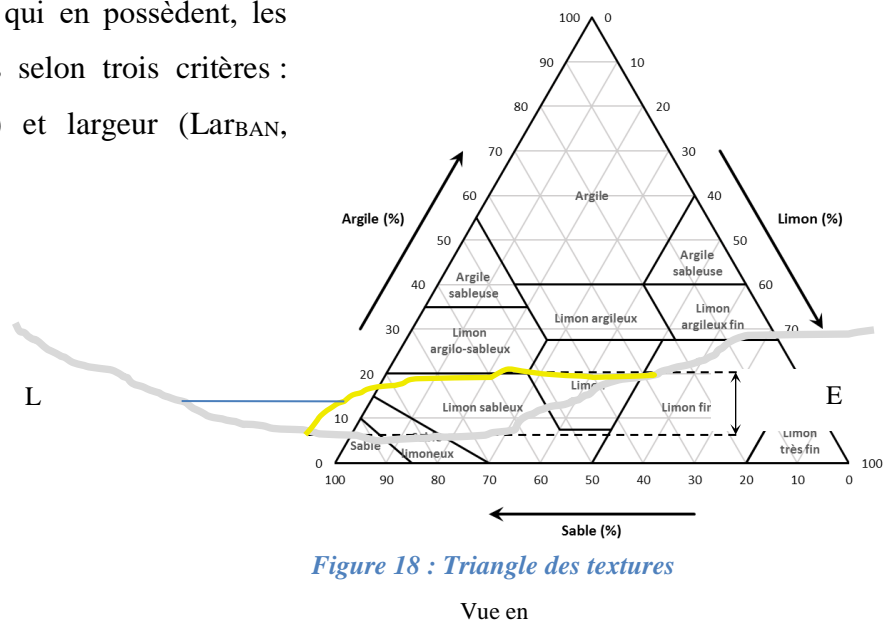
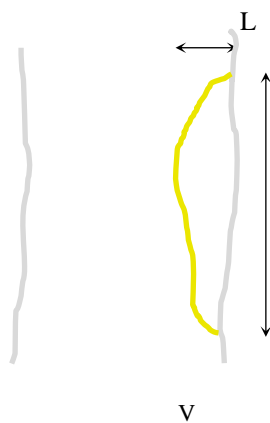


Figure 12 : Mesures à effectuer pour caractériser les banquettes

minimum et maximum), leur épaisseur (E_{BAN} , minimum et maximum) et la hauteur dégagée au-dessus de la ligne d'eau (H_{BAN}). L'ensemble de ces mesures sont décrites dans la figure 10.

3. Matériel nécessaire à la mise en œuvre du protocole

3.1. Station

- Fiche terrain station
- GPS
- Appareil photo
- Décamètre
- Mire
- Machette (lorsque l'accès à la station est difficile)
- Débitmètre
- Talkies-walkies
- Débitmètre (valise + perche)

3.2. Transects

- Fiche terrain transects
- Fiche outil gabarit ou pied à coulisse
- Décamètre
- Mire

3.3. Berges

- Fiche terrain berges
- Mire (ou mètre)
- Mire

3.4. Bois en rivière et fraction héritée

- Fiche terrain bois en rivière et fraction héritée
- Pied à coulisse ou réglette
- Mètre

3.5. Profil en long

- Fiche terrain profil en long
- Niveau optique
- Trépied
- Mire
- Décamètre

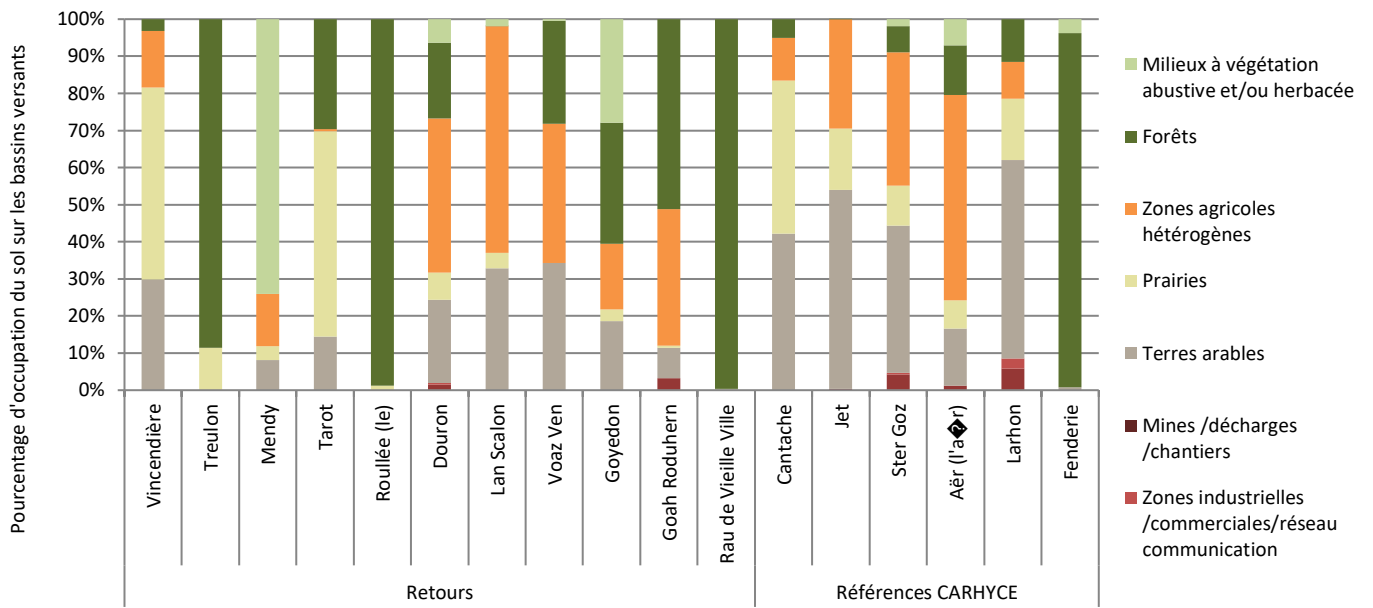
3.6. Radier

- Fiche terrain radier
- Fiche outil gabarit
- Décamètre (pour le positionnement des traversées du radier Wolman)
- Pied à coulisse
- Masse/massette
- Fer à béton
- Bassine (détermination visuelle des classes granulométrique dominante et accessoire de la sous-couche)

Annexe 8 : Liste des sites proposés

ID	Nom du cours d'eau	Département	Commune	Rang de Strahler	Surface BV (km ²)
32	Lan Scalon	22	Plougonver	4	25,235
38	Voaz Ven	22	Carnoët	3	3,87
995	Larhon	22	Saint Maudan	3	50,624
30	Kerlan Braz	22	Calanhel	3	4,233
31	Milín ar Prat	22	Loguivy-Plougras	2	15,141
33	Léguer (1)	22	Pont-Melvez	3	32,56
35	ID35	22	Belle-Isle-en-Terre	3	5,123
36	ID36	22	Le Vieux-Marché	2	4,404
37	Den	22	Plourac'h	2	5,522
11	Mendy	29	Berrien	2	7,472
21	Douron	29	Plouigneau	4	71,881
992	Jet	29	Elliant	3	32,64
993	Ster Goz	29	Bannalec	4	72,753
22	Penzé (1)	29	Guimiliau	4	49,411
23	Penzé (2)	29	Saint Sauveur	4	35,21
24	Véronique	29	Bannalec	3	9,351
25	Créac'h Oualar	29	Mespaul	2	2,562
26	Horn (1)	29	Plouvorn	3	13,487
27	Horn (2)	29	Plouvorn	3	10,641
29	Kérvin	29	Plougar	2	2,819
39	Squiriou	29	Berrien	3	16,524
991	Cantache	35	Dompierre du Chemin	3	19,497
1	Vincendière	53	Izé / St Martin de Connée	3	6,254
6	Treulon	53	Blandouet	3	9,39
12	Tarot	53	Marcillé-la-Ville	3	12,5
2	Orthe	53	St Martin de Connée	4	24,443
3	Orthe	53	St Pierre-sur-Orthe	4	36,397
4	Orthe	53	St Pierre-sur-Orthe	4	55,645
5	Sarthon	53	Ravigny	3	103,017
13	Trébuchère	53	Hardanges	3	3,615
14	Vrillère	53	Champgénéteux	2	3,394
15	Filousière	53	Mayenne	2	2,931
997	Hière	53	Chérancé	5	152,59
41	Goyedon	56	La Chapelle-Neuve	3	9,836
42	Goah Roduherm	56	Pluvigner	3	7,867
994	Aër	56	Le Croisty	4	57,37
40	Kervihan	56	Camors	4	5,524
43	R. de Pobleï	56	Quisitinic	3	15,349
16	Roullée (le)	72	Mont St Jean	2	4,611
44	Rau de Vieille Ville	72	Neufchâtel-en-Saosnois	2	4,884
996	Fenderie	72	Vibraye	2	3,11
17	Vallée Létrie	72	Villaines-la-Carelle	2	2,998
18	Vallée Layée	72	Villaines-la-Carelle	2	2,247
19	Dinan	72	Thouaré-sur-Dinan	3	44,414
20	Les Cartes	72	Savigné-sous-le-Lude	3	44,9

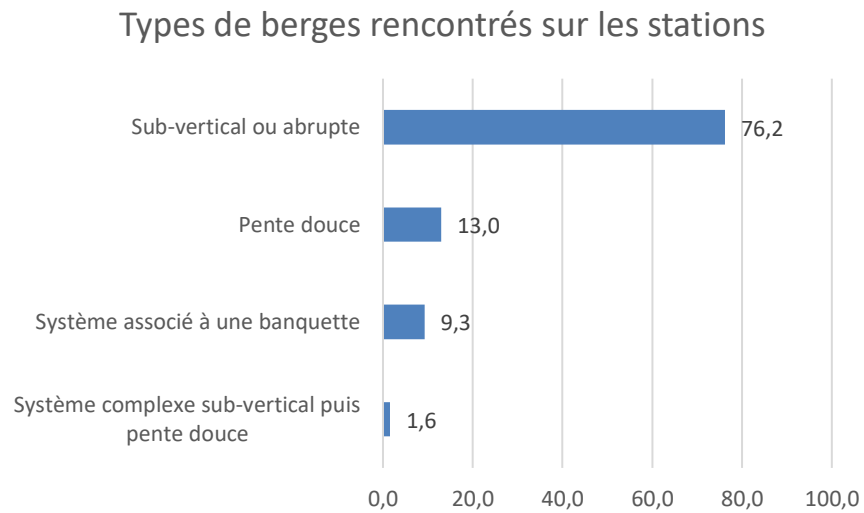
Annexe 9 : Occupation du sol sur les bassins versants des stations échantillonnées



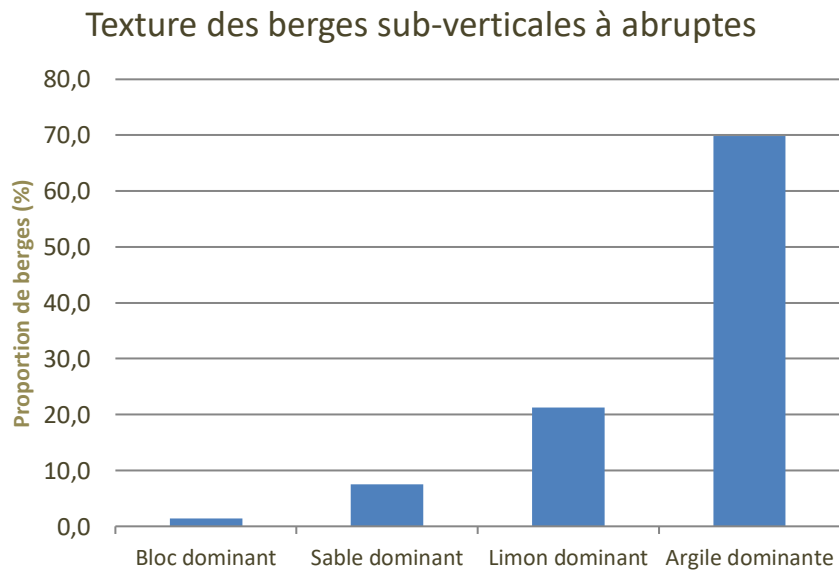
Annexe 10 : Notes d'indice

Nom du cours d'eau	ID	Dép	Score occupation	Score plan d'eau	Score évolution du tracé	Score sinuosité	Score continuité ripisylve	Score épaisseur ripisylve	Note
Vincendière	1	53	1	2	3	2	1	0	9
Orthe	2	53	1	1	0	2	2	1	7
Orthe	3	53	1	1	0	1	1	2	6
Orthe	4	53	0	0	0	1	2	1	4
Sarthon	5	53	1	0	0	1	2	0	4
Treulon	6	53	3	3	1	0	2	2	11
Mendy	11	29	3	3	3	2	0	0	11
Tarot	12	53	2	1	3	3	2	1	12
Trébuchère	13	53	2	1	1	0	1	2	7
Wrillère	14	53	0	1	3	0	2	0	6
Filousière	15	53	-1	2	3	0	1	0	5
Roullée (le)	16	72	3	3	3	0	2	2	13
Vallée Létrie	17	72	3	3	3	0	2	2	13
Vallée Layée	18	72	3	3	3	0	2	2	13
Dinan	19	72	0	2	0	2	1	1	6
Les Cartes	20	72	2	0	0	3	2	2	9
Douron	21	29	0	1	3	1	2	2	9
Penzé (1)	22	29	0	1	1	0	1	2	5
Penzé (2)	23	29	0	1	1	0	1	2	5
Véronique	24	29	1	1	3	0	2	2	9
Créac'h Oualar	25	29	1	3	1	0	0	2	7
Horn (1)	26	29	1	1	3	2	0	0	7
Horn (2)	27	29	1	1	1	1	1	1	6
Kérvin	29	29	0	3	1	2	1	2	9
Kerlan Braz	30	22	1	2	1	3	1	2	10
Milin ar Prat	31	22	1	2	3	0	2	2	10
Lan Scalon	32	22	1	2	3	1	2	2	11
Léguer (1)	33	22	0	1	1	2	1	2	7
ID35	35	22	0	3	3	0	2	2	10
ID36	36	22	1	3	3	0	2	2	11
Den	37	22	2	3	1	1	1	1	9
Voaz Ven	38	22	1	3	3	1	1	2	11
Squiriou	39	29	1	0	3	0	2	2	8
Kervihan	40	56	0	3	1	1	2	2	9
Goyedon	41	56	3	0	1	2	2	2	10
Goah Roduherh	42	56	2	1	3	3	2	2	13
R. de Pobleï	43	56	0	1	1	0	2	2	6

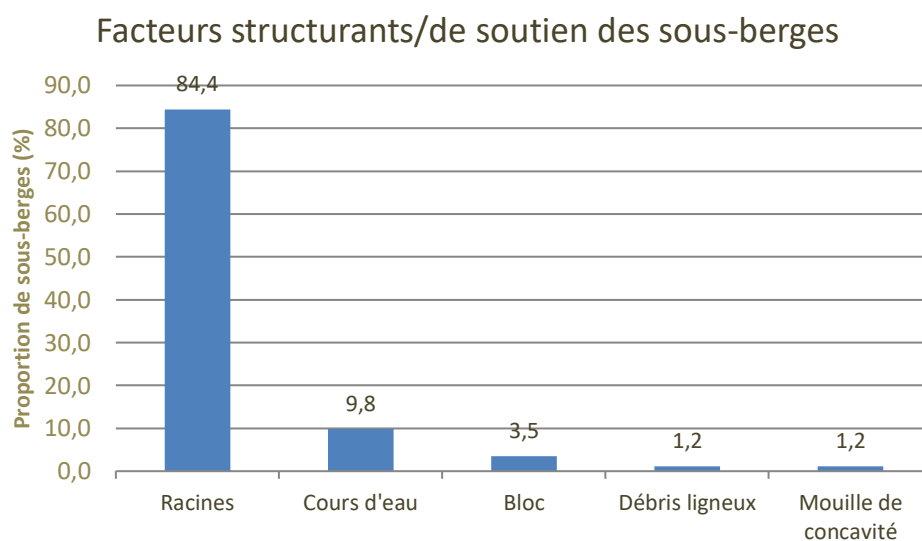
Annexe 11 : Types de berges sur les stations échantillonnées



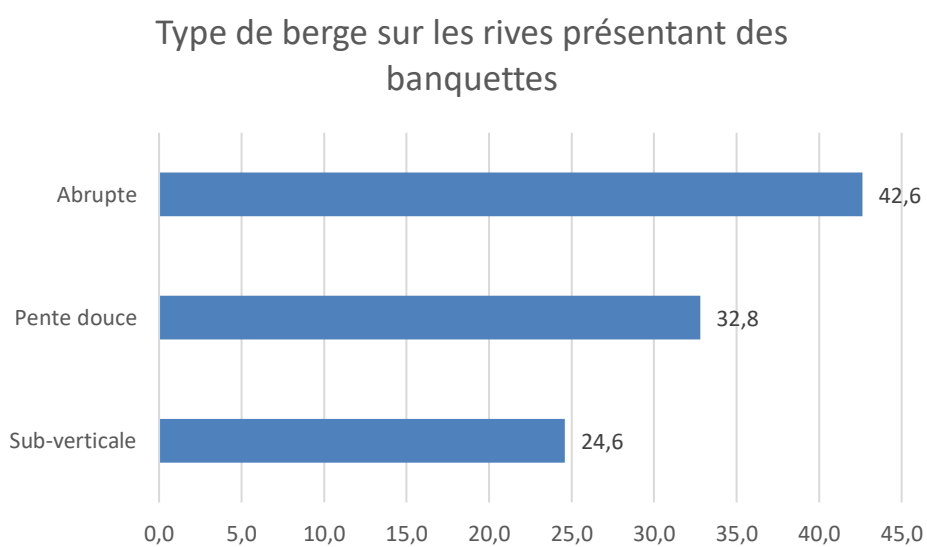
Annexe 12 : Texture des berges sub-verticales à abruptes



Annexe 13 : Facteur structurant/de soutien des sous-berges



Annexe 14 : Types de berge présentant des banquettes



Résumé

En 2000, la Directive Cadre sur l'Eau a permis d'inclure la protection de la ressource en eau dans les politiques publiques. La restauration de l'hydromorphologie des cours d'eau est une des démarches entreprises pour atteindre le bon état des masses d'eau d'ici 2021. Pour cela, il est nécessaire de connaître finement des cours d'eau proches des conditions naturelles, dits de référence. Le protocole CARHYCE, appliqué sur l'ensemble du territoire depuis 2010, permet de réaliser un diagnostic des altérations probables sur un cours d'eau sur la base de modèles statistiques de référence régionalisés. La présente étude a pour objectif de fournir des recommandations techniques pour la restauration des cours d'eau d'ordre de Strahler 2 à 5, ainsi que d'alimenter les modèles de référence CARHYCE avec des nouvelles stations.

Pour ce faire, le protocole de recueil mis en place comprend à la fois l'acquisition des données CARHYCE ainsi qu'un ensemble de données complémentaires. Ces dernières consistent à décrire finement les successions de faciès et la répartition de leurs pentes sur le profil en long, mais également la granulométrie des radiers, le bois en rivière et la fraction héritée.

L'étude a permis d'identifier une épaisseur de matelas alluvial de **34,5 ± 13,3 cm** sur les cours d'eau échantillonnés. Cette donnée pourrait servir de valeur guide pour de futures opérations de recharge granulométrique. Elle montre également la récurrence des berges sub-verticales sur les cours d'eau naturels qui pourront orienter le dimensionnement lors de la recréation de lits. Enfin, l'importance de la ripisylve, que ce soit pour l'apport de bois en rivière ou pour la diversification des habitats aquatiques a été vérifiée.

MOTS CLES :

Hydromorphologie fluviale, cours d'eau, protocole CARHYCE, restauration hydromorphologique, référence, géométrie de plein bord