

Année universitaire : 2016 - 2017

Spécialité : Ressources aquatiques et exploitation durable.

Spécialisation (et option éventuelle) :

Gestion de pêches et des écosystèmes continentaux et côtiers.

Mémoire de fin d'études

- d'Ingénieur de l'Institut Supérieur des Sciences agronomiques, agroalimentaires, horticoles et du paysage
- de Master de l'Institut Supérieur des Sciences agronomiques, agroalimentaires, horticoles et du paysage
- d'un autre établissement (étudiant arrivé en M2)

Synthèse des connaissances et validation de protocoles pour l'hydromorphologie et la biologie des cours d'eau en tête de bassin versant (Rang de Strahler 1)



Laura MONDESIR

Soutenu à Agrocampus Ouest RENNES, le 15 septembre 2017

Devant le jury composé de :

Présidente et enseignante référente :

Dominique OMBREDANE

Maîtres de stage : Mikaël LE BIHAN & Olivier LEDOUBLE

Autres membres du jury

Anne Jafrezic

(Agrocampus ouest)

Jean-Marc Roussel (Inra)

Les analyses et les conclusions de ce travail d'étudiant n'engagent que la responsabilité de son auteur et non celle d'AGROCAMPUS OUEST

Ce document est soumis aux conditions d'utilisation
«Paternité-Pas d'Utilisation Commerciale-Pas de Modification 4.0 France»
disponible en ligne <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0/deed.fr>



PRESENTATION DE LA STRUCTURE D'ACCUEIL

L'Agence Française pour la Biodiversité (AFB) 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 est opérationnelle depuis le 1^{er} janvier 2017 suite au décret de création du 23 décembre 2016. C'est un établissement public du ministère de l'environnement, de l'énergie et de la mer issue du regroupement de l'Agence des Aires Marines Protégées (AAMP), de l'Office Nationale de l'Eau et des Milieux Aquatiques (ONEMA), de l'Atelier Technique des Espaces Naturels (ATEN) et des Parcs Nationaux de France (PNF).

L'AFB est créée pour être l'organisme de référence pour la biodiversité en milieux terrestres, aquatiques et marins. L'agence est chargée d'un certain nombre de missions telles que l'organisation et le développement des connaissances, l'appui aux politiques publiques liées à la biodiversité, la gestion des espaces protégés, l'appui aux gestionnaires, la police de l'environnement ou encore la formation et la sensibilisation aux métiers de la Biodiversité.

Pour les anciens agents de l'ONEMA, leurs rôles restent organisés en 4 missions principales :

- Le développement des savoirs sur l'eau et les milieux aquatiques
- L'information sur l'eau, les milieux aquatiques et leurs usages
- Le contrôle des usages qui comprend des missions de police de l'environnement
- L'appui technique à la mise en œuvre des politiques de l'eau

L'AFB est implantée en France métropolitaine et en outre-mer. 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) (Carte ci-dessous).



REMERCIEMENTS

Je tiens tout d'abord à remercier mes deux maîtres de stage Mikaël Le Bihan et Olivier Ledouble pour leurs connaissances, leurs conseils, leur soutien tout au long de ces six mois de stage mais aussi leurs nombreuses relectures attentives pendant la phase de rédaction qui m'ont été indispensables. Un grand MERCI !

Je remercie Josselin Barry pour son aide avec le logiciel QGis, Laurent Gigaud et Pierre-Marie Bidal sans qui mes repas de midi n'auraient pas été les mêmes. Je remercie bien sûr, toutes les personnes de la Dir pour leur accueil chaleureux ainsi que les services départementaux d'Ille – et – Vilaine, du Morbihan et de la Loire – Atlantique pour leur participation sur le terrain et leur bonne humeur.

Je remercie également Kévin Urvoy et Amélie Valsangiacomo, mes compatriotes de stages avec qui j'ai passé de très bons moments !

Je souhaite remercier particulièrement Marc Roucaute, pour sa disponibilité et le partage de ces connaissances ! Merci Marc, grâce à toi les macro-invertébrés n'ont plus de secret pour moi ; ainsi que Yannick Outreman pour son aide et ses conseils en analyses statistiques.

Je remercie ma famille et mes amis particulièrement ma maman Nathalie, ma sœur Sandrine et mes deux amies de longue date Jessyka et Wendy pour leur soutien et leurs « bonnes pensées positives » ces cinq dernières années ...

Enfin, je souhaite dédier ce mémoire à mes grands-parents Liliane et Guy qui ont cru en moi dès le début et sans rien n'aurait été possible ! Ce mémoire est pour vous, je n'aurais sans doute jamais assez d'une vie entière pour vous remercier !

TABLE DES MATIERES

TABLE DES ILLUSTRATIONS

TABLE DES ABREVIATIONS

GLOSSAIRE

INTRODUCTION GENERALE	1
I. Etat de l'art	2
1. Quelle définition pour les cours d'eau en tête de bassin versant ?	2
2. Rôles et fonctionnement des têtes de bassin versant	2
3. L'hydromorphologie des cours d'eau en tête de bassin versant	3
4. Vulnérabilité des TBV et impacts des travaux de chenalisation.....	5
a. Sensibilité des cours d'eau TBV.....	5
b. Impacts des travaux de chenalisation en TBV.....	5
5. Caractérisation de la référence	6
6. Protocoles de caractérisation de l'hydromorphologie.....	7
7. Protocole de caractérisation de la biodiversité (Macro-invertébrés et ichtyofaune).....	9
II. L'hydromorphologie des cours d'eau en tête de bassin versant.....	10
A. Méthodes d'étude.....	10
1. Validation du protocole de caractérisation de l'hydromorphologie en TBV	10
a. Contexte géographique et sites prospectés	10
b. Présentation du protocole	11
2. Caractéristiques de l'hydromorphologie en TBV	11
a. Contexte géographique	11
b. Présentation des jeux de données et analyses statistiques réalisées	11
c. Outils statistiques	12
B. Résultats	13
1. Protocole	13
2. Analyses statistiques : description des variables de contrôle Dir 2	14
3. Statistiques sur le jeu de données DIR 2 Stations de référence.....	15
a. Analyses en Composantes Principales (ACP).....	15
b. Classification Ascendante Hiérarchique (CAH).....	16
c. Analyses complémentaires - Variables de réponse	18
d. Caractérisation de la ripisylve	19

4.	Statistiques sur le jeu de données DIR 2 et 4 : Stations de référence	21
a.	Description des variables de contrôle communes Dir 2 et Dir 4	21
b.	Description de la variable hydro-écorégion de niveau 2	22
c.	Analyses en composantes principales et classification	23
C.	Discussion	24
D.	Conclusion	27
III.	La biologie des cours d'eau en tête de bassin versant (Macro-invertébrés et ichtyofaune)	28
A.	Méthodes d'étude	28
1.	Protocole d'étude des macro-invertébrés en TBV	28
a.	Présentation du jeu de données	28
b.	Présentation du protocole	28
2.	Analyses statistiques	29
B.	Résultats	29
1.	Etude de la richesse spécifique en fonction du nombre de prélèvements	29
2.	Effort d'échantillonnage 2017	30
3.	Effort d'échantillonnage 2016 – 2017	31
C.	Discussion	32
D.	Conclusion	33
	CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES	34
	BIBLIOGRAPHIE	35
	ANNEXES	I
	ANNEXE 1 : Protocole de caractérisation de l'hydromorphologie des cours d'eau en tête de bassin versant	II
	ANNEXE 2 : Protocole de caractérisation de la biologie (Macro-invertébrés et Ichtyofaune) en tête de bassin versant	XI
	ANNEXE 3 : Guide de valeurs seuils pour l'hydromorphologie de référence des cours d'eau en tête de bassin versant (rang de Strahler 1)	XIV
	ANNEXE 4 : Note IBGN (Stations 2017)	XXI
	ANNEXE 5 : Données brutes hydromorphologie (partielle)	XXII
	ANNEXE 6 : Données biologie : Richesse cumulée par prélèvement et valeurs des estimateurs Chao 1 et Jackknife 1 et 2	XXV
	ANNEXE 7 : Données biologie : Pourcentages de la richesse attendue par prélèvement pour chaque estimateur (Chao 1 et Jackknife 1 et 2)	XXVII

TABLE DES ILLUSTRATIONS

Figure 1: Classification de Strahler (1957).....	2
Figure 2 : Evolution de la teneur en azote total dans les eaux en fonction de la largeur de la bande rivulaire..	3
Figure 3 : Balance de Lane- Borland (1960)	4
Figure 4 : Carte de localisation des stations prospectées pour la validation des protocoles hydromorphologie et biologie.....	10
Figure 5 : Carte de localisation de toutes les stations de référence de rang 1 représentées dans le jeu de données.....	11
Figure 6 : Histogrammes de distribution des variables et boxplots.....	14
Figure 7 : Dotchart plot représentant la distance entre les sites du jeu de données Dir2.....	15
Figure 8 : Représentation graphique des dimensions 1 et 2 de l'ACP (Jeu de données DIR 2).....	15
Figure 9 : Arbre obtenu par CAH à partir de l'ACP avec le niveau de troncature (Dir 2)	16
Figure 10 : Représentation dans l'espace des classes issues de la CAH (Dir 2)	16
Figure 11 : Carte représentant les sites d'étude par classe en fonction des HER 2 (CAH Dir 2)	18
Figure 12 : Proportion des stations de référence sur le critère présence / absence de ripisylve	19
Figure 13 : Proportion des stations altérées sur le critère présence / absence de ripisylve	19
Figure 14 : Histogramme du nombre de station par catégorie d'épaisseur de strate arborée pour les stations de référence et les stations altérées	19
Figure 15 : Boxplots représentant les variables de caractérisation de la ripisylve en situation de référence et en situation altérée	20
Figure 16 : Comparaison des histogrammes et boxplots de description des variables de contrôle entre les jeux de données Dir 2 et 4	21
Figure 17 : Boxplots représentant les variables quantitatives en fonction des HER 2 (Dir 2 et 4)	22
Figure 18 : Courbe représentant le pourcentage de la richesse spécifique cumulée attendue en fonction du nombre de prélèvement selon les trois estimateurs	30
Figure 19 : Pourcentage cumulé moyen de la richesse spécifique attendue selon les trois estimateurs Chao 1 et Jackknife 1 et 2	31
Tableau 1 : Critères définissant les TBV en situation de référence hydromorphologique.....	7
Tableau 2 : Différentes méthodes de caractérisation de l'hydromorphologie selon les pays.....	8
Tableau 3: Caractéristiques des méthodes d'échantillonnage des macro-invertébrés aquatiques.....	9
Tableau 4: Description des stations prospectées en 2017 lors de la phase de terrain.....	10
Tableau 5 : Variables communes des jeux de données des différentes Directions interrégionales.....	12
Tableau 6: Différentes sections du protocole de caractérisation de l'hydromorphologie.....	13
Tableau 7 : Coefficient de corrélation des différentes variables par rapport aux axes de l'ACP.....	16
Tableau 8 : Interprétation des classes en fonction des variables (CAH Dir 2).....	17
Tableau 9: Valeurs des variables de réponses correspondantes aux 3 groupes pour les cours d'eau en situation de référence (Dir 2).....	18
Tableau 10 : Moyennes, écart-types et P-values issus du test de Wilcoxon-Mann-Whitney pour chaque variable de caractérisation de la ripisylve.....	20
Tableau 11 : Valeurs des variables de contrôle (moyenne \pm écart-type) en fonction de chaque hydro-écorégion de niveau 2 (Dir 2 et 4).....	23
Tableau 12 : Interprétation des classes en fonction des variables	23
Tableau 13 : Description des stations prospectées lors de la phase terrain en 2017 (Rappel).....	29
Tableau 14 : Richesse cumulée observée par station et estimation de la richesse théorique attendue par trois estimateurs : Chao 1, Jackknife 1 et 2. (valeur \pm écart-type).....	29
Tableau 15 : Pourcentages cumulés de la richesse attendue pour chaque station pour les prélèvements P6, P8 et P9	31

TABLE DES ABREVIATIONS

ACP : Analyses en Composantes Principales

AFB : Agence Française pour la Biodiversité

BV : Bassin Versant

CAH : Classification Ascendante Hiérarchique

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

DCE : Directive Cadre sur l'Eau

EPT : Ephéméroptères, Plécoptères, Tricoptères

IBG DCE : Indice Biologique Global – Directive Cadre sur l'Eau

IBGN : Indice Biologique Global Normalisé

IQM : Indice de Qualité Morphologique

MA : Massif Armoricaïn

MRP MD : Méthode Rapide de Prélèvement de Macro-invertébrés en cours d'eau peu profonds pour une recherche de Diversité

ONEMA : Office National de l'Eau et des Milieux Aquatiques

RHS : River Habitat Survey

RHT : Réseau Hydrographique Théorique

ROE : Référentiel des Obstacles à l'Écoulement

SBV : Surface de Bassin Versant

SYRAH : SYstème Relationnel d'Audit de l'Hydromorphologie

TBV : Tête de Bassin Versant

GLOSSAIRE

Espèce polyvoltine : Plusieurs générations successives dans une même année

MAG20 : Protocole d'analyse semi-quantitative des communautés benthiques

Martin pêcheur : Matériel de pêche électrique

Ovovivipare : Les espèces ovovivipares produisent des œufs qui incubent et éclosent dans le ventre de la femelle, à l'intérieur de son tractus génital ou au sein de sacs d'incubation. L'embryon se nourrit des réserves nutritives incluses dans l'œuf, il n'y a pas d'échange avec la mère.

Poisson lithophile : Poissons dépendant des fonds pierreux et frayant sur un substrat composé de pierres.

Zone hyporhéique : Ensemble des sédiments saturés en eau, situés au-dessous et à côté d'un cours d'eau, contenant une certaine quantité d'eau de surface. Si le cours d'eau s'écoule sur un substratum imperméable, il ne développera pas de zone hyporhéique. La zone hyporhéique peut être constituée exclusivement d'eau de surface ou caractérisée par un mélange d'eaux souterraines et d'eau de surface. La zone hyporhéique joue un rôle important dans l'auto-épuration du cours d'eau. (Définition eaufrance.fr, AFB)

INTRODUCTION GENERALE

Les cours d'eau en Tête de Bassin Versant (TBV) constituent les rangs de Strahler 1 et 2 visibles sur les cartes à l'échelle 1 :25 000 en intégrant les cours d'eau non cartographiés (ONEMA, 2015). Ils peuvent représenter entre 60 et 80 % de la longueur totale du réseau hydrographique (Schumm, 1956 ; Shreve, 1969 ; Meyer et Wallace, 2001 ; Benda *et al.*, 2005 ; Le Bihan, 2009).

Ces écosystèmes assurent des fonctions écologiques indispensables au bon fonctionnement de l'environnement. Ils présentent une multitude d'habitats et exercent un rôle majeur dans les cycles biogéochimiques.

La Directive Cadre sur l'eau (DCE) a pour objectif de préserver et d'améliorer l'état écologique des systèmes aquatiques afin d'en promouvoir un usage durable et de garantir l'approvisionnement en eau (Bouleau & pont, 2014). Le « bon état écologique » des masses d'eau de surface était prévu pour 2015 et doit être mis en œuvre au plus tard à l'horizon 2027 (Castelain *et al.*, 2016). La qualité des TBV conditionne la qualité des masses d'eau en aval et ils doivent, de ce fait, faire l'objet d'une gestion prioritaire (Choucard, 2011 ; Jan, 2013).

Il est donc primordial d'étudier l'hydromorphologie et la biologie des très petits cours d'eau. En effet, les pressions anthropiques dues notamment à l'urbanisation ou aux pratiques agricoles intensives contribuent à l'altération du régime hydrologique des TBV ainsi qu'à l'altération de la continuité écologique. Les dégradations en TBV peuvent engendrer une altération des cours d'eau de rang supérieur en aval. Cependant, il n'existe pas de protocoles d'étude de l'hydromorphologie et de la biodiversité adaptés aux cours d'eau en TBV malgré de multiples besoins identifiés tels que la caractérisation des bassins versants, les diagnostics réalisés en amont des projets de restauration ou encore le suivi écologique.

Ce travail s'inscrit dans la continuité de quatre rapports effectués entre 2013 et 2016 à la délégation interrégionale (DIR 2) Bretagne – Pays de la Loire de l'ONEMA (Office National de l'Eau et des Milieux Aquatiques) devenue Agence Française pour la Biodiversité (AFB) depuis le 1^{er} janvier 2017.

En 2013 et 2014, les études de Jan et Bossis respectivement ont permis de déterminer un état de référence de l'hydromorphologie des TBV. En 2015, l'étude de Marion Colin avait pour objectif d'étudier l'impact des travaux de chenalisation sur l'hydromorphologie et ainsi introduire une comparaison avec l'état de référence établi les années précédentes. L'étude de Bouas en 2016, avait pour objet la caractérisation de la biodiversité (Macro-invertébrés et ichtyofaune).

Des travaux similaires ont été menés à la délégation interrégionale Alsace, Champagne-Ardenne, Lorraine en 2010 et à la délégation interrégionale Centre – Poitou-charente en 2015 et 2016.

Cette étude cherche à répondre à la problématique suivante : Quelles sont les caractéristiques hydromorphologiques et biologiques des cours d'eau en TBV ? Pour cela, dans un premier temps, un état des lieux des connaissances en hydromorphologie d'une part, et en biologie d'autre part va être réalisé. Dans un second temps, les protocoles de caractérisation de l'hydromorphologie et de la biologie en TBV (Rang de Strahler 1) en situation de référence et en situation altérée, seront révisés, testés et validés.

I. Etat de l'art

1. Quelle définition pour les cours d'eau en tête de bassin versant ?

La Loi Biodiversité promulguée le 8 août 2016 a défini la notion de cours d'eau au sein de l'article L. 215-7-1 du Code de l'Environnement : « Constitue un cours d'eau, un écoulement d'eaux courantes dans un lit naturel à l'origine, alimenté par une source et présentant un débit suffisant la majeure partie de l'année. L'écoulement peut ne pas être permanent compte tenu des conditions hydrologiques et géologiques locales. » (legifrance.gouv.fr)

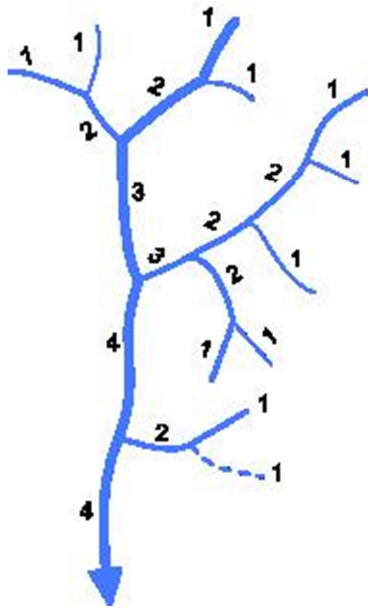


Figure 1: Classification de Strahler (1957)

La définition de la tête de bassin versant n'est pas établie de manière indiscutable. En France, les TBV correspondent en général aux cours d'eau de rangs de Strahler 1 et 2 (figure 1) sur les cartes IGN au 1:25 000 en intégrant les cours d'eau non cartographiés (ONEMA, 2015). Le SDAGE Loire-Bretagne (2010 – 2015) définissait les TBV comme « les bassins versants des cours d'eau dont le rang de Strahler est inférieur ou égal à 2 et dont la pente est supérieure à 1% ». La révision du SDAGE en 2016 précise que le « critère de pente peut être adapté localement pour les cours d'eau à faible puissance spécifique présentant un risque de non atteinte des objectifs environnementaux ». (SDAGE Loire – Bretagne 2016 – 2021). Cette révision de la définition des TBV est en accord avec les études menées entre 2013 et 2016 sur les TBV en Bretagne qui ont montrées que des cours d'eau en TBV présentent une pente inférieure à 1%.

Cependant, ces définitions présentent des limites. En effet, attribuer les vrais numéros des rangs de Strahler nécessite la connaissance exhaustive du réseau de cours d'eau national (OFEV, 2009). De plus elles dépendent du degré de précision des cartes IGN (Le Bihan, 2009).

2. Rôles et fonctionnement des têtes de bassin versant

Les têtes de bassin sont indispensables au bon fonctionnement de l'intégralité du bassin versant. Elles peuvent être qualifiées de « capital hydrologique » (Alexander, 2007)

Les TBV jouent un rôle important dans la rétention, le transport de l'eau et la régulation des débits notamment grâce aux nombreuses zones humides avec lesquelles ils sont en relation (Mc Cartney *et al.*, 1998 ; Janish *et al.*, 2011). En effet, en période de crue ces zones humides permettent le stockage de l'eau afin de limiter les débits en aval, ainsi que le déstockage de l'eau à l'étiage (soutien d'étiage) (Meyer *et al.*, 2007). Les TBV sont également soumises à une importante variabilité de leur débit selon la saison (écoulements intermittents) (Datry *et al.*, 2012).

Les TBV sont en lien avec la zone hyporhéique, siège des procédés biogéochimiques tels que la dénitrification (Thomas *et al.*, 2001 ; Böhlke *et al.*, 2004 ; Mulholland *et al.*, 2004) et permettent l'initiation de la dégradation de la matière organique (Vannote *et al.*, 1980).

Ils possèdent une surface hyporhéique plus étendue que les cours d'eau d'ordres supérieurs (Harvey & Wagner, 2000 ; Harvey *et al.*, 2003). Les cycles biogéochimiques y sont plus efficaces qu'en aval grâce à l'augmentation du ratio surface/volume et aux vitesses d'écoulement plus lentes (Howarth *et al.*, 1996 ; Oraison *et al.*, 2011).

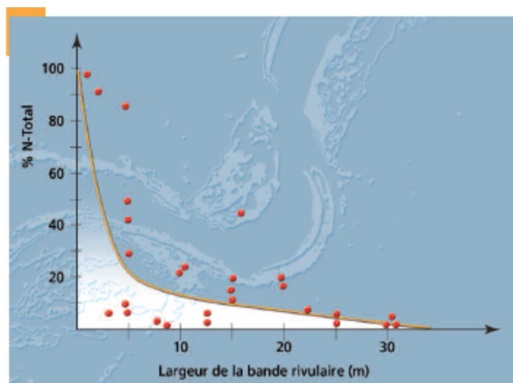


Figure 2 : Evolution de la teneur en azote total dans les eaux en fonction de la largeur de la bande rivulaire.

A noter que la présence d'une bande rivulaire contribue fortement à la qualité physico-chimique de l'eau, par exemple, une bande de végétation rivulaire de 5m de large sur chaque rive d'un cours d'eau permet la dégradation d'environ 80% de l'azote.

(Figure 2 : Données de Maridet, 1995 in Oraison, 2011).

Les TBV sont caractérisées par une alternance des faciès d'écoulement favorisant la diversité des habitats au même titre que la sinuosité (plus le cours d'eau est sinueux, plus il présente des habitats diversifiés) (Malavoi & Bravard, 2010) ou encore l'état physique des berges.

L'état des berges et notamment leur stabilité (Montgomery *et al.*, 2003) est fortement liée à la qualité de la ripisylve en bordure du cours d'eau. Par conséquent, la présence d'une ripisylve diversifiée est capitale pour la qualité physico-chimique, hydromorphologique et biologique car elle permet l'alternance de l'éclairement (régulation de la température de l'eau) ainsi que l'apport de bois mort participant à diversifier les faciès d'écoulements et les habitats (Hayot, 2011).

Enfin, la granulométrie est un facteur déterminant concernant l'hydrologie et les habitats benthiques structurant les peuplements d'invertébrés (Bouas, 2016).

En 2007, Meyer *et al.* soulignent que les TBV fournissent les habitats les plus diversifiés ainsi qu'un grand nombre d'espèces endémiques. La matière organique présente en TBV et notamment la création de litière en automne constitue 70 à 80 % de cette matière organique (Webster *et al.*, 1995), elle détermine les communautés biologiques (Wallace *et al.*, 1999) en termes d'abondance et de distribution des invertébrés détritivores (apports alimentaires et micro-habitats) (Dobson *et al.*, 1992 in Haapala, 2003). Bouas en 2016, confirme ces observations car lorsque la litière est le substrat biogène dominant il observe une forte abondance en EPT (Ephéméroptères, Plécoptères et Trichoptères) détritivores. Les TBV constituent des lieux de reproduction (zones de ponte) pour les macro-invertébrés (Paimpont, 1994 in Bouas, 2016) ainsi que pour la truite (Roussel & Bardonnat, 2002). A noter que les invertébrés aquatiques dérivant servent de base alimentaire aux poissons, de ce fait, la structure et l'abondance de leurs peuplements peuvent modifier et contribuer à la régulation des communautés des écosystèmes notamment piscicoles (McIntosh et Townsend, 1996 in Bouas, 2016).

La zonation de Huet (1949) qualifie les TBV comme des zones salmonicoles et plus précisément des zones à truite, toutefois, les TBV ne sont pas uniquement des zones salmonicoles et peuvent accueillir d'autres espèces.

3. L'hydromorphologie des cours d'eau en tête de bassin versant

L'hydromorphologie, appelée également géomorphologie fluviale est une discipline prenant en compte l'ensemble des processus physiques régulant la dynamique du cours d'eau ainsi que sa morphologie fluviale correspondant à la forme que le cours d'eau adopte en réponse à cette dynamique (Malavoi & Bravard, 2010). Le principe fondamental de cette discipline est la relation existante entre les phénomènes d'érosions et de dépôts de laquelle résulte un ajustement permanent de la morphologie du cours d'eau observé à différentes échelles temporelles.

Ce principe est illustré par la balance de Lane (1955) (figure 3).

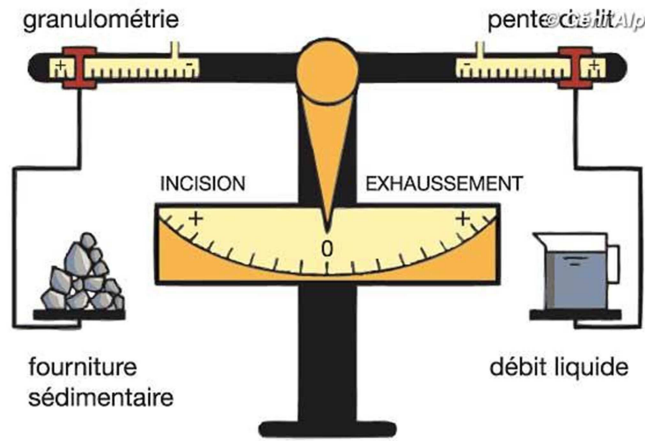


Figure 3 : Balance de Lane- Borland (1960) © geni-alp.org

L'hydromorphologie est caractérisée par 2 types de variables, les variables de contrôle et les variables de réponse (Malavoi & Bravard, 2010) :

- Les variables de contrôle correspondent au débit liquide (Q), au débit solide (Q_s), à la pente et à la géométrie de la vallée dépendant du bassin versant, de son histoire géologique et de son climat.
- Les variables de réponse s'expriment à l'échelle du tronçon. Elles sont liées à la géométrie du lit (largeur, profondeur, sinuosité ...), et au profil en long (faciès d'écoulement). L'expression de ces variables résulte de l'adaptation du cours d'eau aux variables de contrôle.

Le principe de l'hydromorphologie est défini par des règles morphodynamiques universelles s'appliquant quelque soit la taille du cours d'eau. C'est le principe de proportionnalité des processus permettant l'application de ces règles aux TBV (Malavoi & Bravard, 2010).

Depuis les années 50, un certain nombre d'études traitant de l'hydromorphologie des cours d'eau ont permis la mise en lumière des grandes règles morphodynamiques, notamment:

- Les cours d'eau ayant une puissance spécifique inférieure à 35 W/m^2 ne sont pas en capacité d'ajuster leur morphologie en réponse aux aménagements d'origine anthropique par exemple. (Petit et al, 2005 ; Malavoi & Bravard, 2010)
- La granulométrie des cours d'eau conditionne la géométrie du lit notamment la profondeur et la largeur. (Petit et al, 2005)
- La ripisylve est un élément déterminant pour les processus géodynamiques (tenue des berges, érosion latérale ...) (Malavoi & Bravard, 2010).

Malgré de nombreuses études sur l'hydromorphologie, peu d'entre elles ont été orientées vers les têtes de bassin versant. Ces petits cours d'eau font l'objet d'une attention plus importante seulement depuis les années 2000 en dépit de leurs rôles et de leurs incidences avérées sur l'ensemble des bassins versants.

Les études menées les années précédentes sur 61 stations du Massif Armoricain ont permis de mettre en évidence quelques caractéristiques des TBV en situation de référence hydromorphologique (Bossis, 2014) :

- Une pente de ligne d'eau de 0,1 à 8,5% (en moyenne 2,6 %) impliquant une faible puissance spécifique en raison de faibles débits.
- Un coefficient de sinuosité entre 1,05 et 1,25 signifiant que les TBV sont des cours d'eau qualifiés de sinueux (1,13 en moyenne).
- Un gabarit du lit du cours d'eau plus large (L) que profond (P) (Ratio moyen $L/P = 7,7$) ; une largeur plein bord de 1,7 m en moyenne et une hauteur plein bord de 0,3 m en moyenne.

- Une diversité morphologique importante avec une alternance diversifiée de faciès d'écoulement (en moyenne 9 variations de faciès par station) ; la présence d'éléments diversifiant les habitats ayant plusieurs rôles importants, entre autres la participation à la différenciation des faciès ou la rétention de la matière organique.
- Une granulométrie sur radier dominée par les graviers et sur la station globale dominée par les particules sédimentaires fines.
- La présence de sous-berges pour 90 % des cours d'eau en situation de référence.

4. Vulnérabilité des TBV et impacts des travaux de chenalisation

a. Sensibilité des cours d'eau TBV

Les caractéristiques des TBV les exposent à une vulnérabilité importante. Tout d'abord ces cours d'eau présentent des gabarits réduits où les écoulements peuvent être intermittents et souvent, ils ne portent pas de toponyme. Leur nombre conséquent, leur petite taille ainsi que leur faible débit les exposent plus facilement aux modifications d'origine anthropique car leurs aménagements sont simples, rapides et peu onéreux (Smiley *et al.*, 2005).

De plus, l'urbanisation croissante entraînant des aménagements des cours d'eau, les pratiques agricoles modernes (Renard, 2002) souvent intensives avec utilisation de produits phytosanitaires ainsi que l'exploitation des forêts (Schneider, 2007) engendrent de fortes pressions sur ces cours d'eau et de fait, les dégradations qui en résultent.

Rheinhardt en 1999, souligne que moins de 1% des têtes de bassins demeure intact pour certains bassins versants aux Etats-unis.

D'un point de vue biologique, les cours d'eau en TBV sont d'autant plus sensibles à la perte et à la dégradation des habitats (Allan & Flecker, 1993) qu'à la pollution organique (Whitehurst, 1991 in Bouas, 2016) et aux pesticides (Schulz & Liess, 1999 in Berenzen *et al.*, 2005). Ces derniers constituent un facteur de « paupérisation biologique » en TBV (Peterman *et al.*, 1996).

Ces pressions sont à l'origine d'une diminution globale de l'abondance et de la diversité en macro-invertébrés polluo-sensibles : ETP (Bouas, 2016) et à l'inverse entraînent une augmentation des taxons collecteurs-cueilleurs tels que les Chironomidae (Diptères) (Carlisle & Clements 2003 in Woodcock et Uring, 2007 in Bouas 2016). L'étude de Bouas en 2016 a permis de mettre en évidence ce phénomène sur certaines stations à hydromorphologie dégradée.

Enfin, les différentes sources de dégradations dues à la vulnérabilité des TBV ont également un impact sur l'ichtyofaune notamment par la réduction des habitats ce qui engendre une diminution de la survie des œufs des poissons lithophiles et de fait une baisse des effectifs. (Bjornn *et al.*, 1977 ; Alexander & Hansen, 1986 in Bouas, 2016)

b. Impacts des travaux de chenalisation en TBV

L'étude de Marion Colin en 2015 a permis d'établir un premier état des lieux des impacts des travaux de chenalisation en tête de bassin versant en Bretagne et Pays de la Loire.

Les opérations de chenalisation (Brookes, 1985 ; Brookes, 1988 ; Wasson *et al.*, 1995) regroupent les différents travaux hydrauliques qui altère le lit mineur d'un cours d'eau (recalibrage, rectification, curage, endiguement, protection des berges).

Ces travaux impactent fortement l'hydromorphologie du cours d'eau (Hauer *et al.*, 2007) : ils sont à l'origine de l'homogénéisation et de la diminution du nombre de faciès d'écoulement (Malavoi & Bravard, 2010) entraînant l'altération des habitats impactant la biodiversité. L'ensemble de ces phénomènes a été constaté dans l'étude de Marion Colin en 2015.

Des dysfonctionnements sédimentaires (Brookes, 1985) au niveau granulométrique sont à mettre en avant, une surreprésentation des particules fines dans le lit des cours d'eau remaniés (colmatage) est

observée (Gayraud *et al.*, 2002), or en situation naturelle, la taille moyenne de la granulométrie diminue selon un gradient amont/aval (Vannote *et al.*, 1980).

Ces modifications granulométriques correspondant à une destruction du substrat ainsi qu'à une diminution de la capacité de rétention des débris végétaux (Wasson *et al.*, 1995), posent des réels problèmes notamment pour les communautés de macro-invertébrés et de poissons en TBV. En effet, les différents substrats constituent les habitats des macro-invertébrés et sont très importants pour leurs fonctions biologiques telles que la reproduction, le développement des œufs et les ressources alimentaires (Hynes, 1970 ; Minshall, 1984 in Gayraud *et al.*, 2002).

Le phénomène de colmatage des cours d'eau peut entraîner une réduction de l'abondance en macro-invertébrés polluo-sensibles (EPT) de - 10 à - 95 % (Newcombe & McDonald, 1991 in Gayraud *et al.*, 2002).

L'altération des TBV suite à des travaux de chenalisation implique aussi souvent la bande rivulaire. Une diminution du nombre et de la taille des zones humides des TBV a été constatée ce qui peut engendrer une perte de leurs fonctionnalités (Colin, 2015).

En conséquence, une diminution des débits et d'éventuelles ruptures d'écoulement peuvent être observées avec des répercussions sur la biodiversité (Malavoi & Bravard, 2010). De plus, une disparition partielle ou totale de la ripisylve est avérée pour la plupart des cas de cours d'eau remanié (Adam *et al.*, 2007) causant la déstabilisation des berges et parfois une colonisation de ces dernières par des espèces exotiques (Colin, 2015).

En absence de ripisylve, la température de l'eau (notamment en période estivale) n'est plus régulée et peut augmenter (LIFE, 2004 – 2009) favorisant le développement d'algues et l'installation de végétation dans le lit mineur induisant l'eutrophisation du milieu et impactant les communautés biologiques.

Enfin, il semblerait que les relations entre variables de contrôle et variables de réponse établies à ce jour en hydromorphologie (Malavoi & Bravard, 2010) ne soient plus valables pour les cours d'eau ayant subis des travaux de chenalisation (Colin, 2015). L'homme ayant modifié la morphologie du cours d'eau, il devient la variable principale, le cours d'eau n'est alors plus capable d'ajuster ces variables de réponse et perd son équilibre dynamique.

5. Caractérisation de la référence

Afin de caractériser les cours d'eau en situation hydromorphologique de référence, il est indispensable d'apporter une définition au terme « référence ». Quelques auteurs considèrent la référence historique (Chaves *et al.*, 2006 ; Stoddard *et al.*, 2006 ; Sanchez-Montoya *et al.*, 2009 ; Yates & Bailey, 2009). Cependant, cette vision de la référence est discutable et fut discutée par d'autres auteurs (Bravard, 2003 ; Palmer *et al.*, 2005 ; Newson & Large, 2006 ; Dufour & Piégay, 2009 ; Rinaldi *et al.*, 2013a) notamment sur le fait que le caractère historique est difficilement qualifiable par manque de connaissances et d'autant plus que des changements environnementaux ont eu lieu. Par conséquent, les recherches tendent à s'orienter vers une définition de référence spatiale, rivières considérées comme naturelles ou peu modifiées (Dufour & Piégay, 2009 ; Wyzga *et al.*, 2012 in Gob *et al.*, 2014). Toutefois, Palmer et ses collaborateurs en 2005 mettent en avant le caractère dynamique de ces écosystèmes, évoluant dans le temps et dans l'espace. Leur vision de la référence est donc plutôt basée sur la recherche de situation d'équilibre dynamique (Gob *et al.*, 2014) entre les variables de contrôle et de réponse des processus hydromorphologiques.

Les travaux de Jan et Bossis en 2013 et 2014, consistaient à rechercher des cours d'eau de rang 1 de référence au sein de l'hydroécocoréion « Massif armoricain ». Les critères de sélection ont tout d'abord été retenus à partir de la bibliographie : (liste non exhaustive)

- Surface minimum d'occupation naturelle des sols supérieure à 80 % du bassin versant (Sanchez & Montoya, 2009)

- Composition végétale adaptée au cours d'eau et à sa région (Barbour *et al.*, 1996 ; Wallin *et al.*, 2003)
- Absence d'espèces exotiques (Bonada *et al.*, 2002)
- Absence de drains et d'effluents, d'obstacles anthropiques à la continuité écologique, et d'altération de la connectivité latérale (Wallin *et al.*, 2003)

A la suite de ces recherches, les critères établis par Jan en 2013 sont présentés dans le Tableau 1 ci-dessous. (A noter que les mêmes critères ont été conservés par Bossis en 2014).

Tableau 1 : Critères définissant les TBV en situation de référence hydromorphologique (Jan, 2013 ; Bossis, 2014)

Types de critère	Critères
Type de cours d'eau étudié	Cours d'eau de rang 1 selon la classification de Strahler (1957)
	Pente inférieure à 5 %
Occupation du sol du bassin versant	Absence de plan d'eau en amont de la station
	Cours d'eau se trouvant en zone de prairie ou de forêt
Occupation du sol de la bande rivulaire	Absence de plantations monospécifiques ou exotiques
Pressions	Absence de travaux hydrauliques sur et en amont de la station
	Absence de drainage latérale

Quelques observations ont été mises en lumière, notamment par Jan en 2013 qui a constaté que 60% des stations dite de référence ne respectaient pas le critère de surface minimum d'occupation des sols avancé par Sanchez et Montoya en 2009.

En 2016, l'étude de Guillaume Bouas sur la biodiversité des macro-invertébrés et l'ichtyofaune en TBV a permis de caractériser des TBV en situation de référence biologique. Les critères de définition de cette référence biologique sont complémentaires à ceux concernant la référence hydromorphologique :

- Prise en compte des pollutions ponctuelles et diffuses
- Occupation du sol
- Conditions hydrologiques
- Qualité de l'habitat
- Présence d'espèces invasives

Ces critères ont été définis par Guillaume Bouas à partir de l'analyse des fiches stations établies par Jan et Bossis en 2013 et 2014 ainsi qu'à partir de photographies aériennes et de visites de terrain.

6. Protocoles de caractérisation de l'hydromorphologie

Dans le cadre de la DCE l'hydromorphologie est abordée différemment selon les pays (cf. tableau 2). Cet état des lieux des protocoles mis au point pour caractériser l'hydromorphologie des cours d'eau démontre l'intérêt grandissant pour cette discipline à l'échelle de l'Union Européenne (Gob *et al.*, 2014). Néanmoins, aucun protocole n'est spécifiquement adapté à la caractérisation hydromorphologique des TBV malgré leur importance pour répondre aux objectifs fixés par la DCE.

Tableau 2 : Différentes méthodes de caractérisation de l'hydromorphologie selon les pays

Pays	Nom du protocole	Méthode	Echelle	Références
Allemagne	Méthode LAWA : (Bund/Länder-Arbeitsgemeinschaft Wasser)	Mesures de terrain avec attribution de niveaux de dégradations morphologiques qualitatifs	Stationnelle	Raven <i>et al.</i> , 2002
France	SYRAH : SYstème Relationnel d'Audit de l'Hydromorphologie	Base de données SIG : inventaire des pressions anthropiques susceptibles d'intervenir sur la qualité des cours d'eau	Linéaire	Valette <i>et al.</i> , 2008 ; Chandesris <i>et al.</i> , 2008
	ROE : Référentiel des obstacles à l'écoulement	Base de données : recense les obstacles à l'écoulement en réponse aux enjeux de continuité écologiques et sédimentaires	Linéaire	Léonard <i>et al.</i> , 2013
	RHT : Réseau Hydrographique Théorique	Description physique des cours d'eau à l'échelle nationale	Linéaire	Lamouroux <i>et al.</i> , 2010 ; Pella <i>et al.</i> , 2012
	CARHYCE : CARactérisation de l'HYdromorphologie des Cours d'Eau	Mesures hydromorphologiques de terrain, associées à une base de données	Stationnelle	Alber & Piégay, 2011 ; Bertrand <i>et al.</i> , 2013 ; Gob <i>et al.</i> , 2014
Italie	IQM : Indice di Qualità Morfologica (Indice de qualité morphologique)	Téledétection et systèmes d'informations géographiques (SIG)	Linéaire	Rinaldi <i>et al.</i> , 2013a
Pologne	-	Mesures de terrains	Stationnelle	Wyzga <i>et al.</i> , 2012
Royaume-Uni	RHS : River Habitat Survey (1993)	Mesures de terrain quantitatives et qualitatives regroupées dans une base de données	Linéaire	Raven <i>et al.</i> , 1998 ; 2002 ; Szoszkiewicz <i>et al.</i> , 2006

7. Protocole de caractérisation de la biodiversité (Macro-invertébrés et ichtyofaune)

Les travaux de Clarke *et al.* en 2008 ont permis de recenser 14 méthodes d'études de la biodiversité en macro-invertébrés aquatiques basées sur différentes techniques d'échantillonnage et différents nombres de prélèvements.

Les plus utilisées sont l'IBGN, l'IBG DCE I2M2, le Mag 20 et le MRP MD.

Tableau 3 : Caractéristiques des différentes méthodes d'échantillonnage des macro-invertébrés aquatiques

Protocole	Caractéristiques
IBG DCE (AFNOR XP T90-333, 2009 et Guide d'application)	12 prélèvements en 3 phases. Détermination au genre. Calcul de la note avec les listes des taxons des deux premières phases.
I2M2 (Mondy <i>et al.</i> , 2012 in Villeneuve, 2016)	Calcul de 5 métriques à différentes échelles : diversité de Shannon, ASPT (Average Score Per Taxon), fréquence relative des espèces <u>polyvoltines</u> et <u>ovovivipares</u> , richesse taxonomique globale.
IBGN (Archambault & Dumont, 2010).	12 prélèvements en 3 phases. Détermination à la famille. Prise en compte de la nature du substrat et de la vitesse du courant. Note.
MAG 20 (Parc Naturel Régional du Morvan, 2008)	20 prélèvements. Détermination au genre ou à l'espèce. Pas d'indice semi-quantitatif, utilisation d'indice classique de description des peuplements.
MRP MD (DREAL Lorraine, 2012)	12 prélèvements. Au moins 1 prélèvement par substrats prioritaires. Pas forcément d'échantillonnage des substrats complémentaires.

Chaque protocole présente des forces et des faiblesses, mais aucun n'est adapté aux cours d'eau en tête de bassin versant. Guillaume Bouas, en 2016 a mis en place un protocole spécifique aux TBV s'appuyant majoritairement sur le protocole de l'IBG DCE. Le protocole propose 9 prélèvements, 6 prélèvements sur les substrats biogènes, 2 prélèvements sur les substrats peu biogènes et un prélèvement supplémentaire facultatif. Les invertébrés récoltés sont déterminés à la famille ou au genre. Le protocole ayant pour but la caractérisation des communautés biologiques par une méthode rapide et robuste permettant une bonne évaluation de la biologie des TBV.

II. L'hydromorphologie des cours d'eau en tête de bassin versant

A. Méthodes d'étude

Dans un premier temps, le protocole de caractérisation de l'hydromorphologie a été révisé et testé sur quelques stations en vue d'une validation définitive.

Dans un second temps, des analyses statistiques sont effectuées sur le jeu de données regroupant toutes les stations de référence étudiées les années précédentes.

1. Validation du protocole de caractérisation de l'hydromorphologie en TBV

a. Contexte géographique et sites prospectés

Afin de tester le protocole révisé de caractérisation de l'hydromorphologie en TBV, 5 stations ont été sélectionnées. Ces stations sont localisées en région Bretagne et Pays de la Loire. Elles sont réparties sur 3 départements : Morbihan (56), Ille-et-Vilaine (35) et Loire-Atlantique (44) (tableau 4 et figure 4).

Tableau 4: Description des stations prospectées en 2017 lors de la phase de terrain

Département	Stations	Etats hydromorphologiques
Morbihan (56)	Camors	Altérée prospectée en 2014
	Molac	Référence prospectée en 2014
Ille-et-Vilaine (35)	Vern-Sur-Sèche : Le Boël amont et aval	Altérée en partie, état initial pour l'étude des sites locaux
	Bazouges-la-Pérouse	Référence prospectée en 2014
Loire-Atlantique (44)	Avessac : Le Rubis	Altérée, état initial pour l'étude des sites locaux

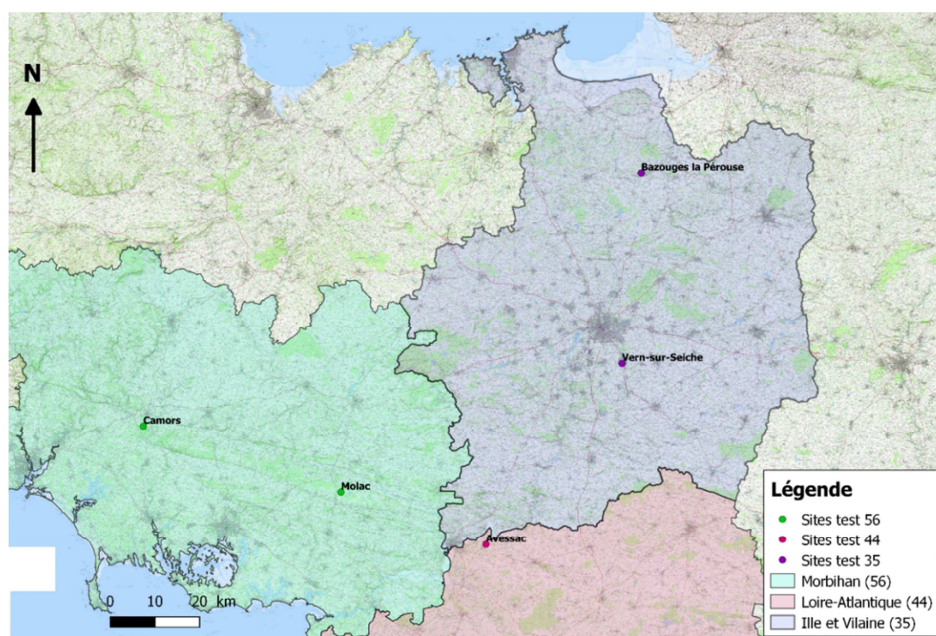


Figure 4 : Carte de localisation des stations prospectées pour la validation des protocoles hydromorphologie et biologie

b. Présentation du protocole

Le protocole présenté dans cette étude a été développé spécifiquement pour l'étude de l'hydromorphologie des cours d'eau en tête de bassin versant. La première version date de 2010 (Mathieu, 2010) et a été enrichie par les travaux successifs réalisés entre 2013 et 2015 (Jan, 2013 ; Bossis, 2014 ; Colin 2015). Certaines sections du protocole s'inspirent en partie du protocole CARHYCE.

L'objet de cette étude est la validation de ce protocole qui doit être opérationnel pour tous les types de stations de TBV qu'elles soient en situation de référence ou en situation altérée. Certaines sections concernent tous les types de stations et certaines sont spécifiques aux stations altérées. Ce protocole permet la récolte de données quantitatives et/ou qualitatives selon les sections. La récolte de données quantitatives a été privilégiée au maximum afin de limiter le biais observateur.

Les données récoltées sont saisies informatiquement directement dans une base de données Access à partir de 2017.

2. Caractéristiques de l'hydromorphologie en TBV

a. Contexte géographique

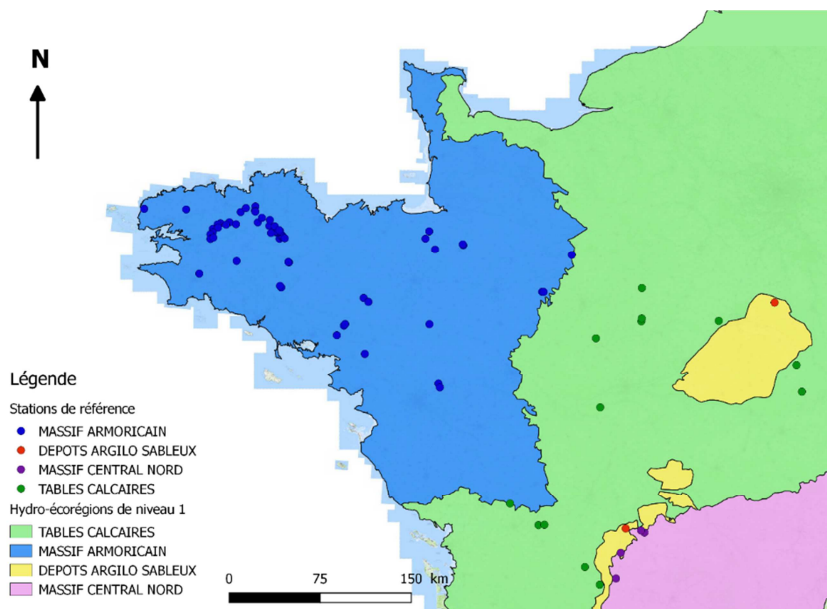


Figure 5 : Carte de localisation de toutes les stations de référence de rang 1 représentées dans le jeu de données.

Ces stations sont réparties sur 4 hydro-écorégions de niveau 1 : Massif Armoricain, Tables calcaires, Dépôts argilo-sableux et Massif central nord.

b. Présentation des jeux de données et analyses statistiques réalisées

Les analyses statistiques concernant les données hydromorphologiques sont effectuées sur un jeu de données regroupant les données de 2 directions interrégionales de l'AFB récoltées entre 2013 et 2015 (78 stations de référence de rang 1).

- La direction interrégionale Centre, Poitou – Charentes (DIR 4), données récoltées par Anthony Vierron et Valentin Viennot en 2015 et 2016 respectivement comprenant 17 stations qualifiées de référence.
- La direction interrégionale Bretagne – Pays de la Loire (DIR 2), données récoltées par Alexandre Jan, Mathieu Bossis et Marion Colin en 2013, 2014 et 2015 respectivement comprenant 61 stations de référence.

Le jeu de données a été scindé en deux sous-jeux de données en fonction des variables en communs disponibles selon les DIR.

- Des analyses sont réalisées sur le jeu de données DIR 2 afin de comprendre quelles variables permettent de caractériser les stations de référence en Bretagne, Pays de la Loire. Les résultats de ces analyses sont exploités pour la rédaction d'un « Guide de valeurs seuils » (annexe 3) à destination des gestionnaires fournissant des indications concernant les valeurs des différentes variables de contrôle et de réponse pour d'éventuels projets de restauration. Ce guide est rédigé en collaboration avec Amélie Valsangiacomo qui travaille sur la gestion de la base de données Access issue des données hydromorphologiques récoltées depuis 2013.
- D'autres analyses sont réalisées sur le jeu de données DIR 2 et 4 afin de comprendre à quel niveau (hydro-écorégions de niveau 1, de niveau 2 ou local) la variabilité inter-stationnelle est observée.

Tableau 5 : Variables communes selon les jeux de données des différentes Directions interrégionales.

Jeu de données d'origine		Variables ou groupes de variables
Direction interrégionale 2 et 4	Variables de réponse	Gabarit du lit (Largeur et hauteur plein bord en m)
		Pente de la ligne d'eau (%)
		Puissance spécifique (W/m ²)
		Sinuosité
		Gabarit du lit (Largeur et hauteur plein bord en m)
		Gabarit du lit (Ratio Largeur / profondeur)
		Caractéristiques des faciès d'écoulements
		Couche d'armure
	Granulométrie à l'échelle de la station (D16, D50, D84 et D16/D84)	
	Variables de contrôle	Hydro-écorégion de niveau 1 et 2
Surface du bassin versant		
Pente de la vallée (%)		
Débit plein bord (m ³ /s)		
Direction interrégionale 2	Variables de contrôle	Géologie du fond du cours d'eau
		Coefficient de Gravelius
		Occupation du sol (% de surface boisée, cultivée et enherbée)

c. Outils statistiques

Les analyses statistiques sont effectuées avec le logiciel R et le package FactoMineR.

- **Analyses statistiques : Jeu de données DIR 2 :**

Pour ces analyses, seules les variables de contrôle sont prises en compte dans le jeu de données : surface du bassin versant, pente de la vallée, débit plein bord, coefficient de Gravelius, occupation du sol et hydro-écorégion de niveau 2.

- Des histogrammes et boxplots descriptifs sont réalisés pour chaque variable.
- Une Analyse en Composantes Principales (ACP) ainsi qu'une Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) sont réalisées sur le jeu de données DIR 2 afin de comprendre quelles variables sont les plus déterminantes dans la différenciation des sites.
- Des boxplots et histogrammes représentant les données concernant le ripisylve sont réalisés.

- **Analyses statistiques : Jeu de données DIR 2 et 4 :**

Dans ce cas, ce sont également les variables de contrôle qui sont prises en compte dans le jeu de données : l'hydro-écorégion de niveau 1 et de niveau 2, la surface du bassin versant, la pente de la vallée et le débit plein bord.

- Des boxplots sont créés permettant la description de chaque variable en fonction de l'hydro-écorégion de niveau 1 et de niveau 2.
- Une ACP et une CAH sont réalisées ensuite permettant d'expliquer la variabilité inter-stationnelle.

Remarque : la variable « débit plein bord (m3/s) est nommée « débit » dans la suite du rapport.

B. Résultats

1. Protocole

Une partie des sections du protocole a été modifiée ou précisée selon les remarques des précédentes études, les analyses des données effectuées les années précédentes et les retours de terrain de cette année (tableau 6). Par exemple la section caractérisant la couche d'armure pouvait entraîner un biais observateur important, cette section a donc été modifiée proposant le relevé de deux caractéristiques à 3 modalités. La partie concernant la qualification de la ripisylve a quant à elle été précisée afin de faciliter les relevés de données ainsi que leurs analyses.

Enfin, des sous-sections conditionnelles ont été ajoutées en 2017 dans la section « Mesures du gabarit du lit à plein bord » afin d'identifier les phénomènes d'encaissement et/ou d'affleurement rocheux.

Tableau 6 : Différentes sections du protocole de caractérisation de l'hydromorphologie (version 2017)

Sections du protocole	
1 – Données générales	14 – Réseau hydraulique annexe sur la station
2 – Caractéristiques du tronçon	15 – Mesures du gabarit du lit à plein bord
3 – Formes de la vallée le long de la station	16 – Mesure du débit
4 – Délimitation de la station	17 – Granulométrie (station)
5 – Niveau d'intermittence des écoulements	18 – Evaluation des faciès d'écoulement de l'aval vers l'amont
6 – Mesure de la sinuosité sur la station	19 – Eléments diversifiant l'écoulement de l'aval vers l'amont
7 – Mesure de la pente sur la station	20 – Occupation du sol dans la bande rivulaire
8 – Estimation de la rugosité sur la station	21 – Evaluation des zones humides sur la station (évaluation floristique et pédologique)
9 – Indice d'incision	22 – Description de la ripisylve
10 – Segment rectifié (longueur artificialisée)	23 – Bancs alluvionnaires sur la station
11 – Type de travaux effectués	24 – Caractéristiques des berges (érodabilité générale ; fixation ; érosion sur la station ; angle de la berge)
12 – Couche d'armure	
13 – Indice de colmatage	

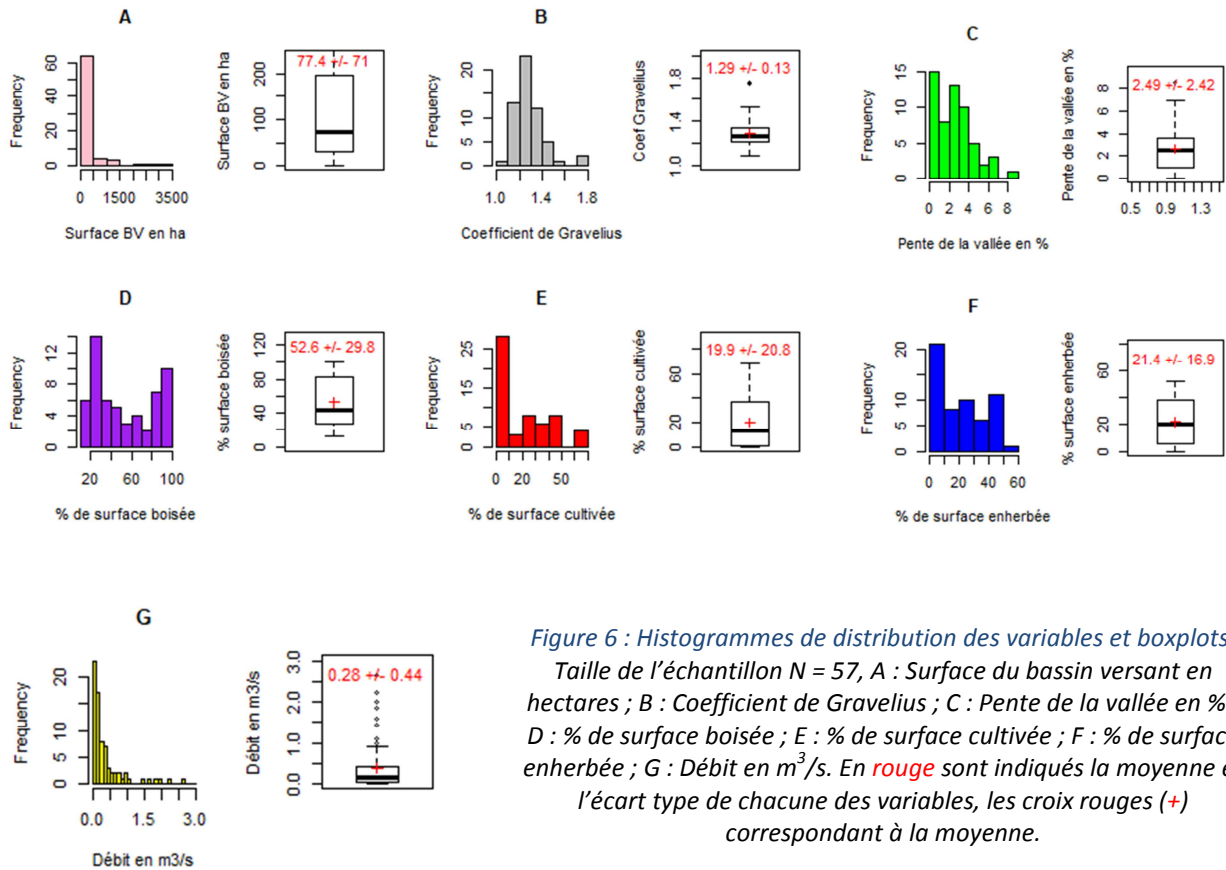
→ **En rouge** : Sections du protocole modifiées

Après révision et test du protocole de caractérisation de l'hydromorphologie, ce dernier a été validé. Le protocole complet est disponible en annexe 1.

Un guide technique associé au protocole a également été mis à jour à partir du guide rédigé par Alexandre Jan en 2013. Le guide ne sera pas présenté dans ce rapport, mais peut être fourni sur demande.

2. Analyses statistiques : description des variables de contrôle Dir 2

Remarque : Pour la réalisation des analyses statistiques, 57 sites ont été retenus sur 61 dans la base de données. Quatre stations n'ont pas été retenues afin d'éviter d'introduire un biais dû aux manques de valeurs dans l'analyse.



Les histogrammes de distribution (figure 6) permettent d'émettre l'hypothèse qu'aucune des variables ne suit une loi Normale. Afin de confirmer cette hypothèse, un test de Shapiro (test de normalité) a été appliqué sur chaque distribution avec H_0 : la distribution suit une loi Normale avec un seuil d'erreur $\alpha = 0.05$. Pour chaque variable, la p-value est inférieure au seuil 0.05 entraînant le rejet de H_0 et la confirmation qu'aucune variable ne suit une distribution normale.

Les boxplots (figure 6) fournissent des informations sur l'étendue des valeurs pour chaque variable. Une variabilité très importante est observée pour chacune d'entre elles sauf pour le coefficient de Gravelius. En effet, le débit moyen des cours d'eau étudiés est de $0.28 m^3/s$ avec un écart-type de $0.44 m^3/s$ dû à quelques valeurs hautes. La surface du bassin versant est de $77.4 ha$ en moyenne avec un écart-type de $71 ha$. La pente moyenne de la vallée est de 2.49% avec un écart-type de 2.42 . L'occupation du sol est caractérisée par une moyenne de 52.6% de surface boisée ($\pm 29.8\%$) ; 19.9% de surface cultivée ($\pm 20.8\%$) et 21.4% de surface enherbée ($\pm 16.9\%$). Le coefficient de Gravelius est de 1.29 en moyenne avec un écart-type de 0.13 .

3. Statistiques sur le jeu de données DIR 2 : stations de référence

a. Analyses en Composantes Principales (ACP)

L'analyse en composantes principales (ACP) a pour but notamment de fournir un résumé descriptif de l'ensemble des données en précisant les éventuels liens (corrélations) entre les variables. Les caractéristiques de ces liens donnent des informations sur les tendances dominantes du jeu de données. Ce dernier compte 57 sites de référence conservés pour l'analyse. L'ACP est réalisée à partir de 7 variables quantitatives correspondantes aux variables de contrôle qui s'exerce sur les cours d'eau : la pente de la vallée en %, le débit en m^3/s , le coefficient de Gravelius, la surface du bassin versant en ha, et l'occupation du sol du bassin versant décliné en 3 variables : le pourcentage de surface boisée, de surface cultivée et de surface enherbée. Une variable qualitative correspondante à l'hydro-écorégion de niveau 2, à 5 modalités (Massif Armoricain (MA) ouest, MA nord-est, MA est intérieur, MA côtes du nord et MA sud intérieur) est insérée dans l'analyse en variable supplémentaire.

Tout d'abord, un dotchart plot a été réalisé sur toutes les variables de contrôle quantitatives. Ce graphique permet de voir la distance statistique entre les sites afin de vérifier l'homogénéité du jeu de données et d'identifier d'éventuels sites « aberrants » pouvant entraîner un biais dans l'analyse. Le graphique (figure 7) permet de constater que les sites étudiés sont globalement homogènes, la distance entre les sites est relativement faible, aucun site n'est considéré comme « aberrant ».

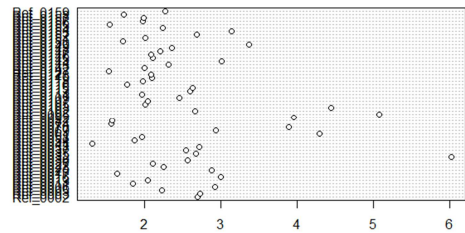


Figure 7 : Dotchart plot représentant la distance entre les sites du jeu de données Dir2

Réalisation de l'ACP :

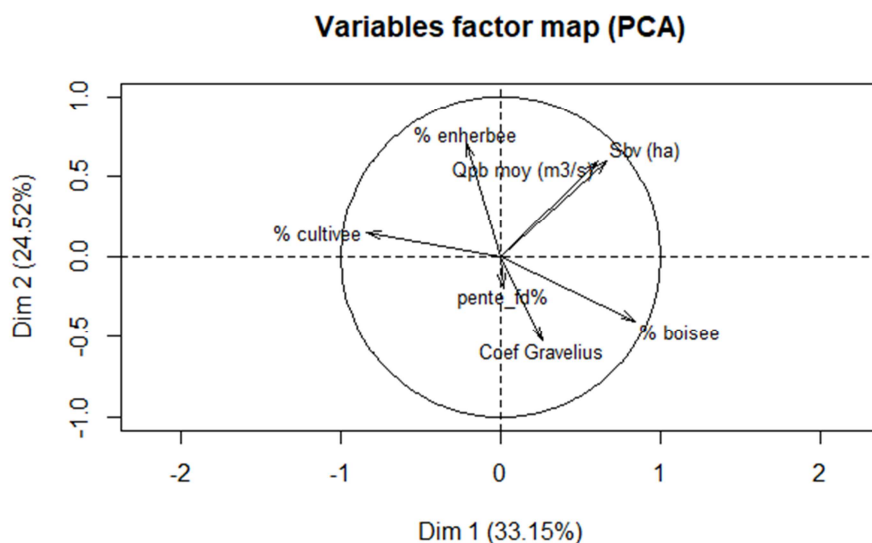


Figure 8 : Représentation graphique des dimensions 1 et 2 de l'ACP (Jeu de données DIR 2)

Les valeurs propres de l'ACP fournissent des informations sur le nombre d'axes (dimensions) à retenir pour interpréter les résultats en tenant compte du pourcentage de variabilité expliqué. Dans ce cas, les 4 premiers axes ont été retenus, permettant l'explication de 85% de la variabilité totale du jeu de données.

Tableau 7 : Coefficient de corrélation des différentes variables par rapport aux axes de l'ACP

Variables	Axes			
	Axe 1 33.15 %	Axe 2 24.52 %	Axe 3 15.22%	Axe 4 11.85 %
Débit en m ³ /s	0.6	0.6	-	-
Surface BV (ha)	0.65	0.6	-	-
% Surface boisée	0.83	-	-	-
% Surface cultivée	-0.83	-	-	-
% Surface enherbée	-	0.7	-	-
Pente vallée (%)	-	-	0.95	-
Coefficient de Gravelius	-	-	-	0.77

L'axe 1 permet l'explication de 4 variables, le débit, la surface du bassin versant, le pourcentage de surface boisée et le pourcentage de surface cultivée. Ces variables représentent 33.15% de la variabilité totale du jeu de données. L'axe 2 (24.52% de la variabilité totale) explique les variables « débit », « surface du bassin versant » et « pourcentage de surface enherbée ». La variable « pente » a une forte affinité avec l'axe 3 représentant 15.22% de la variabilité totale. Enfin, la variable « coefficient de Gravelius » a une affinité importante pour l'axe 4 représentant 11.85% de la variabilité totale du jeu de données. (Tableau 7)

b. Classification Hiérarchique Ascendante (CAH)

Une Classification Hiérarchique Ascendante (CAH) est effectuée à partir de l'ACP. Cette analyse permet de différencier des groupes de sites en fonction de certaines variables et ainsi caractériser les TBV de référence du territoire Bretagne-Pays de la Loire (figure 9 et 10).

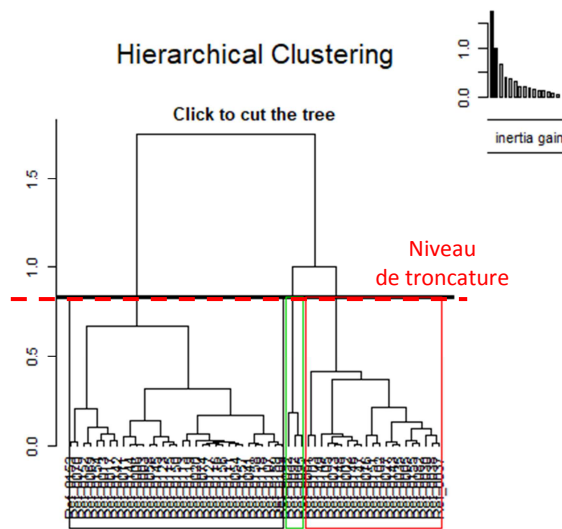


Figure 9 : Arbre obtenu par CAH à partir de l'ACP avec le niveau de troncature (Dir 2)

Hierarchical clustering on the factor map

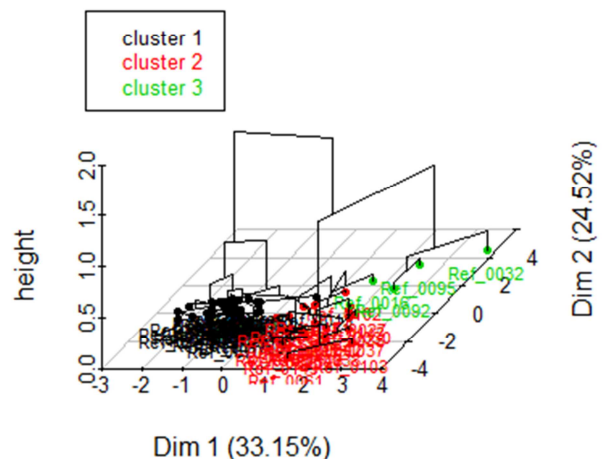


Figure 10 : Représentation dans l'espace des classes issues de la CAH (Dir 2)

Dans le but de conserver une inertie interclasse élevée, procurant une certaine robustesse à l'analyse, 3 classes ont été retenues.

Interprétation des classes par les variables :

Tableau 8 : Interprétation des classes en fonction des variables (CAH, Dir 2). Valeur V-test : Plus la valeur est grande en valeur absolue, plus la variable est caractéristique de la classe. Les valeurs **en rouge** sont les P-values significatives. Gravelius = Coefficient de Gravelius ; SBV = Surface de bassin versant

Classe	Variables	Valeur V-test	Moyenne +/- écart type des sites au sein de la classe	Moyenne +/- écart type de l'ensemble des sites	P-value issue du test de Wilcoxon-Mann-Whitney
1	SBV (ha)	-3.59	46.47 ± 33.03	77.44 ± 70.38	0.16
	Gravelius	-	1.26 ± 0.1	1.29 ± 0.13	0.39
	Pente vallée (%)	-	2.7 ± 2.13	2.64 ± 1.89	0.91
	% surface boisée	-6.32	29.82 ± 12.84	52.65 ± 29.53	9.44 e-04
	% surface cultivée	5.39	33.6 ± 18.47	19.99 ± 20.62	2.22 e-03
	% surface enherbée	2.98	27.57 ± 14.72	21.44 ± 16.79	0.08
	Débit (m ³ /s)	-3.24	0.11 ± 0.09	0.28 ± 0.44	0.11
2	SBV (ha)	-	96.9 ± 60.4		0.13
	Gravelius	2.42	1.34 ± 0.16		0.13
	Pente vallée (%)	-	2.6 ± 1.7		0.96
	% surface boisée	6.21	83.55 ± 15.86		8.41 e-05
	% surface cultivée	-4.72	3.59 ± 6.31		7.30 e-04
	% surface enherbée	-4.01	10.09 ± 12.33		5.51 e-03
	Débit (m ³ /s)	-	0.27 ± 0.24		0.24
3	SBV (ha)	4.58	234.31 ± 91.25		4.10 e-03
	Gravelius	-	1.22 ± 0.07		0.24
	Pente vallée (%)	-	2.6 ± 1.1		0.80
	% surface boisée	-	59.6 ± 23.7		0.59
	% surface cultivée	-	4.8 ± 8.3		0.19
	% surface enherbée	-	36.4 ± 19.3		0.09
	Débit (m ³ /s)	6.58	1.69 ± 0.41		2.11 e-03

Les variables ne suivent pas une loi Normale, donc la p-value générée par la CAH est remplacée par la p-value issue du test non paramétrique de Wilcoxon-Mann-Whitney avec H0 : les deux séries de données sont identiques et H1 : les deux séries sont significativement différentes l'une de l'autre avec un risque d'erreur au seuil 0.05.

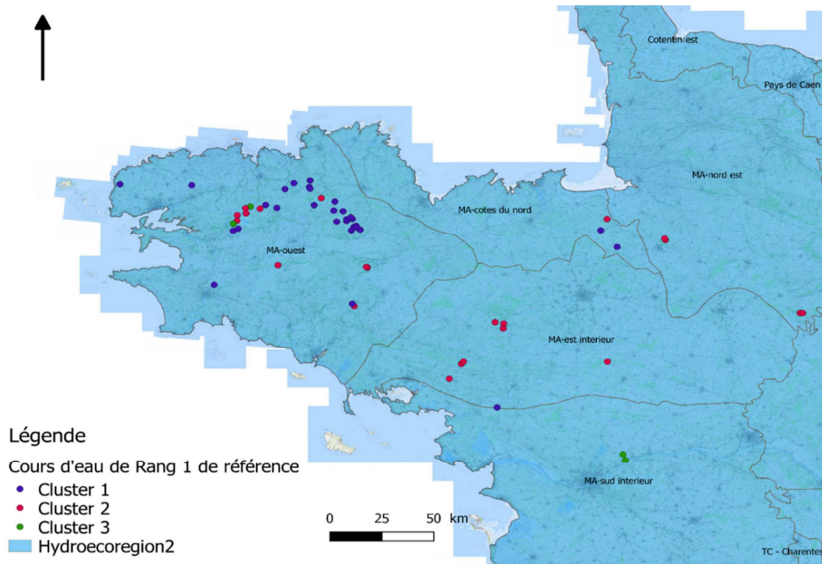
La classe 1 est représentée par 31 sites dont les bassins versants ont un pourcentage de surface cultivée et boisée d'environ 30 % chacune. La classe 2 est composée de 22 sites dont les bassins versant présentent un recouvrement à environ 80% de surface boisée (± 15%), très peu de surface cultivée et enherbée. La classe 3 regroupe 4 sites ayant un débit moyen de 1.69 m³/s (± 0.41) et une surface de bassin versant entre 150 et 320 ha environ en moyenne.

La variable illustrative « hydro-écorégion de niveau 2 » a également été catégorisée dans les 3 classes selon ses différentes modalités.

- **Classe 1** : 70 % des sites du MA ouest ; 12.5 % des sites du MA est intérieur
- **Classe 2** : 87.5% des sites du MA est intérieur ; 100 % des sites du MA nord est
- **Classe 3** : 100 % des sites du MA sud intérieur

Pour compléter l'information, les 3 classes ont été représentées sur une carte avec le logiciel QGIS dans le but de voir si elles permettent de distinguer des zones géographiques particulières :

Figure 11 : Carte représentant les sites d'études par classe en fonction des hydro-écorégions de niveau 2 (Dir 2)



La figure 11 montre que les classes issues de la CAH ne peuvent pas être interprétées en fonction des hydro-écorégions de niveau 2. Cependant, quelques tendances sont observées :

- Les zones MA est-intérieur et nord-est ne sont représentées que par des sites de la classe 2.
- La zone MA sud-intérieur n'est représentée que par des sites de la classe 3.

c. Analyses complémentaires : variables de réponse

Une ACP et une CAH sont également réalisées à partir des variables de réponse, les résultats de ces analyses n'ont pas été ceux attendus, les groupes générés par la CAH sont différents de ceux déterminés à partir des variables de contrôle. En conséquence, les résultats ne sont pas présentés. Les valeurs des variables de réponse correspondantes aux 3 groupes générés par l'analyse des variables de contrôle sont répertoriées dans le tableau suivant :

Tableau 9: Valeurs des variables de réponses correspondantes aux 3 groupes pour les cours d'eau en situation de référence (Dir 2). Les valeurs signalées en rouge sont celles pour lesquelles la p-value issue du test de Wilcoxon-Mann-Whitney, est significative entre les valeurs de classe et les valeurs de l'ensemble du jeu de données.

Variables de réponse	Moyenne +/- écart type des sites Classe 1	Moyenne +/- écart type des sites Classe 2	Moyenne +/- écart type des sites Classe 3	Moyenne +/- écart type de l'ensemble des sites
Pente de la ligne d'eau (%)	2.69 ± 2.13	2.66 ± 1.59	2.73 ± 2.11	2.62 ± 1.83
Coefficient de sinuosité	1.13 ± 0.08	1.10 ± 0.09	1.21 ± 0.24	1.12 ± 0.10
Moyenne de largeur plein bord (m)	1.31 ± 0.51	1.75 ± 0.7	3.00 ± 0.65	1.67 ± 0.79
Ratio largeur/profondeur	7.94 ± 6.21	7.41 ± 5.56	4.87 ± 0.69	7.49 ± 5.63
Longueur moyenne des radiers (m)	3.6 ± 6.32	2.8 ± 2.95	3.41 ± 1.29	3.15 ± 4.86
Longueur totale des radiers (m)	6.9 ± 7.68	7.4 ± 7.35	11.32 ± 6.58	7.17 ± 7.38
% de radiers par station	23 ± 25.6	24.7 ± 24.5	37.75 ± 21.92	23.91 ± 24.60
Granulométrie D16	4.67 ± 5.42	10.37 ± 11.64	26.80 ± 8.59	7.87 ± 10.08
Granulométrie D50	9.59 ± 11.2	20.66 ± 18.95	59.38 ± 22.09	16.22 ± 19.61
Granulométrie D84	19.49 ± 21.6	55.28 ± 66.99	109.53 ± 54.17	37.02 ± 46.92

Les valeurs des variables de chaque classe ont été comparées avec les valeurs des variables sur l'ensemble du jeu de données à l'aide d'un test non paramétrique de Wilcoxon-Mann-Whitney. Les valeurs significatives sont en rouge dans le tableau 9. Ce test nous permet de constater que seule la classe 3 est discriminée par 4 variables : la moyenne de la largeur plein bord (p-value = 6.6 e-03), la

granulométrie D16 (p-value = 4.2 e-03), D50 (p-value = 5.7 e-03) et D84 (p-value = 0.014). La classe 1 est différenciée seulement par la variable : moyenne de largeur plein bord avec une p-value de 0.045. En conséquence, dans l'écriture du guide de valeurs seuils à destination des gestionnaires pour les projets de restauration en TBV, les valeurs des variables de réponse des classes 1 et 2 ont été regroupées.

d. Caractérisation de la ripisylve

La ripisylve est un élément très important pour déterminer la qualité hydromorphologique des cours d'eau en TBV, les données récoltées depuis 2013 ayant été peu exploitées à ce jour sur ce compartiment, des statistiques descriptives sont réalisées afin de comparer les données en situation de référence et en situation altérée. Ces valeurs vont être également intégrées au guide de valeurs seuils à destination des gestionnaires.

Présence de la ripisylve :

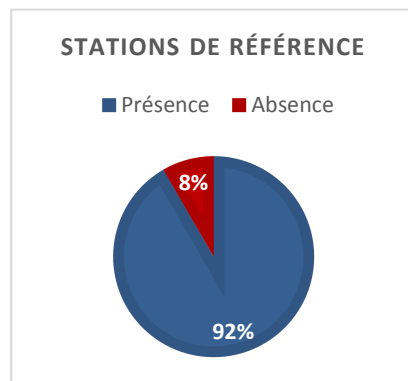


Figure 12 : Proportion des stations de référence sur le critère présence / absence de ripisylve (N=60)

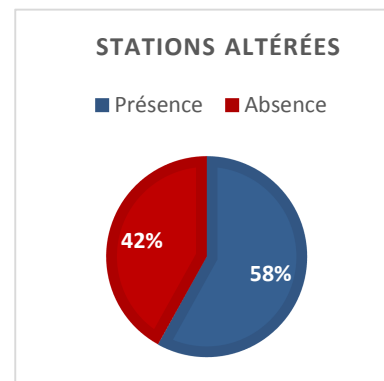


Figure 13 : Proportion des stations altérées sur le critère présence / absence de ripisylve (N=31)

Concernant les stations en situation de référence, 92 % présentent une ripisylve, cette dernière est absente pour 8 % d'entre elles (figure 12). Concernant les stations altérées, 58 % présentent une ripisylve et 42% d'entre elles sont caractérisées par l'absence de ripisylve (figure 13).

Épaisseur de la strate arborée de la ripisylve :

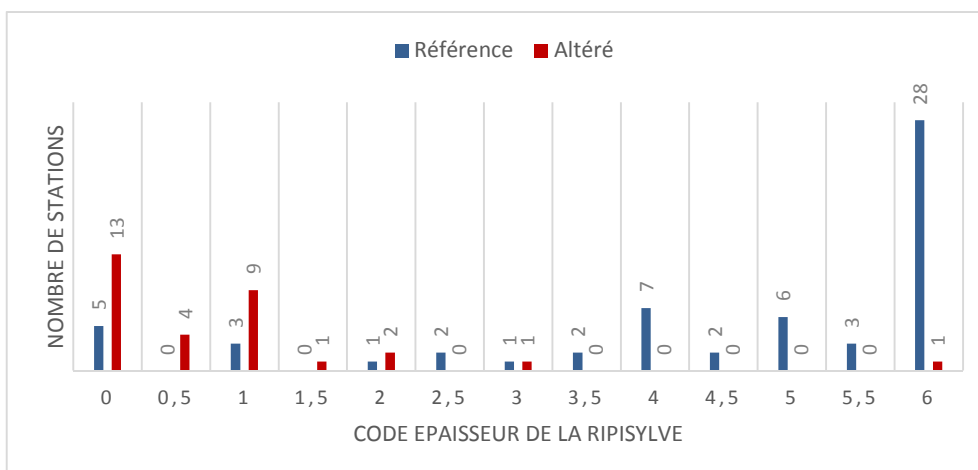


Figure 14 : Histogramme représentant le nombre de stations par catégorie d'épaisseur de la strate arborée pour les stations de référence et les stations altérées.

Légende :

- 0 = Aucune
- 1 = Eparses
- 2 = Rideau (0 – 2 m)
- 3 = 2 – 5 mètres
- 4 = 5 – 10 mètres
- 5 = 10 – 15 mètres
- 6 = Supérieure à 15 mètres

Remarque : Les codes intermédiaires sont dus au fait que les données soient récoltées en rive gauche et en rive droite et combinées par la suite.

La figure 14 indique la répartition des stations en situation de référence et des stations altérées en fonction de l'épaisseur de la strate arborée de la ripisylve. La strate arborée est composée d'arbres dont la hauteur est de 8m au minimum. Les stations de référence présentent majoritairement (46 stations sur 60 soit près de 77%) une ripisylve avec une strate arborée d'une épaisseur comprise entre « plus de 5 mètres » et « plus de 15 mètres ».

Les stations altérées où il y a présence d'une ripisylve sont plutôt représentées par les catégories d'épaisseur entre 0.5 et 3 c'est-à-dire d'une strate arborée éparse à une épaisseur de 5 mètres pour 17 stations sur 31. Seulement une station altérée présente une ripisylve avec une épaisseur de strate arborée supérieure à 15 mètres.

Caractérisation de la ripisylve des cours d'eau en situation de référence et en situation altérée :

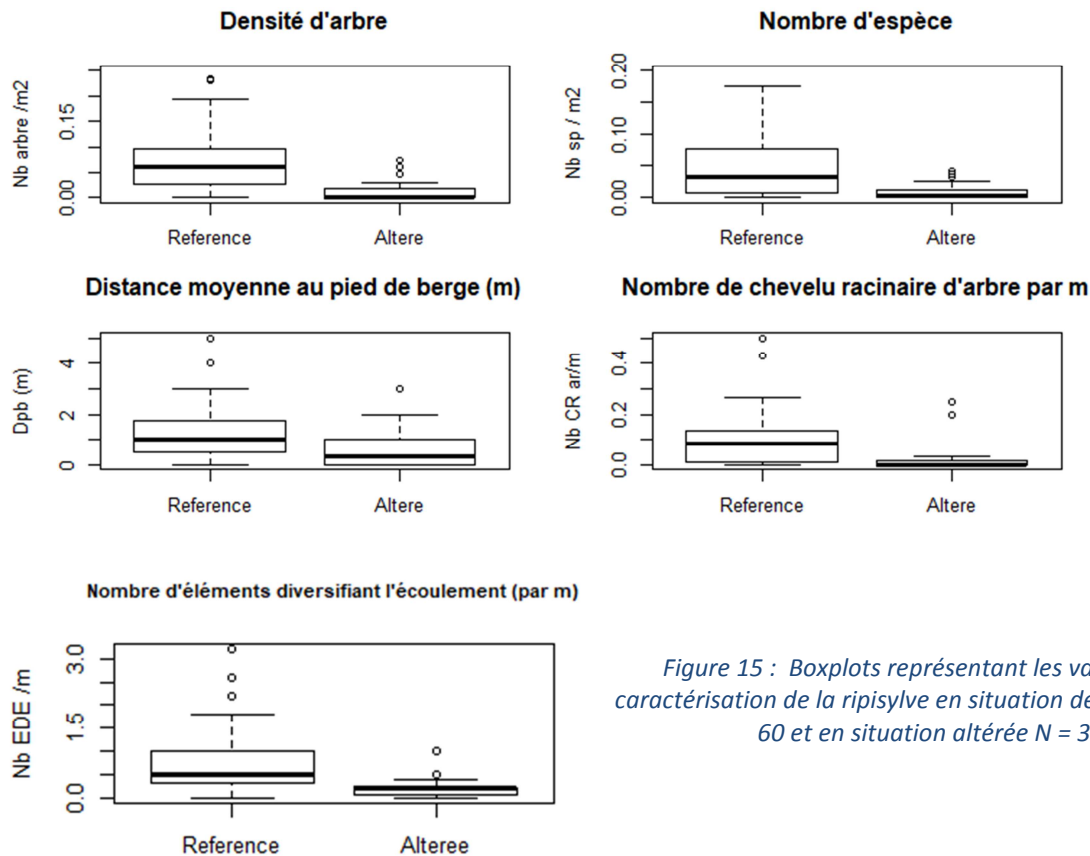


Figure 15 : Boxplots représentant les variables de caractérisation de la ripisylve en situation de référence N = 60 et en situation altérée N = 31

La figure 15 présente les variables de caractérisation de la ripisylve des cours d'eau en situation de référence et en situation altérée. Le tableau 9 ci-dessous donne les valeurs des moyennes et écart-types pour chaque variable ainsi que la significativité de ces valeurs pour la différenciation des cours d'eau de référence et altérés.

Tableau 10 : Moyennes, écart-types et P-values issus du test de Wilcoxon-Mann-Whitney pour chaque variable de caractérisation de la ripisylve.

La P-value est évaluée à un risque d'erreur de 5%, les valeurs significatives sont en rouge.

Variables	Moyenne ± écart-type en situation de référence	Moyenne ± écart-type en situation altérée	P-value Test de Wilcoxon-Mann-Whitney
Densité d'arbres (par m ²)	0,08 ± 0,09	0,01 ± 0,02	2,207.10 ⁻⁸
Nombre d'espèce (par m ²)	0,06 ± 0,07	7,79.10 ⁻³ ± 0,008	7,986.10 ⁻⁶
Distance moyenne au pied de berge en mètre	1,29 ± 1,23	1,16 ± 2,3	0,04993

Nombre de chevelus racinaires d'arbre par mètre	0,11 ± 0,14	0,02 ± 0,06	4,053.10 ⁻⁶
Éléments diversifiant l'écoulement (par m)	0,73 ± 0,64	0,18 ± 0,19	9,7.10 ⁻⁹

Concernant la densité d'arbres, la moyenne est de 0.08 arbre / m² en situation de référence et de 0.01 arbre / m² en situation altérée. Cette variable permet de discriminer les ripisylves des cours d'eau de référence et des cours d'eau altérés (p-value significative : 2,207.10⁻⁸). Cette variable a également été exprimée en nombre moyen d'arbre par rive pour une station de 30m :

- En situation de référence : en moyenne 12 arbres par rive
- En situation altérée : en moyenne 2 arbres par rive

Concernant le nombre d'espèces par station, c'est une variable discriminante puisqu'on dénombre :

- En situation de référence : 3 espèces d'arbres par station
- En situation altérée : 2 espèces d'arbres par station

La variable « distance moyenne au pied de berge » ne permet pas de discriminer les stations de référence et les stations altérées.

Le nombre de chevelu racinaire d'arbres par mètre est de 0.11 en situation de référence et 0.02 en situation altérée, cette variable est aussi exprimée en nombre de chevelu racinaire par station :

- En situation de référence : 2.8 chevelus racinaires d'arbre par station
- En situation altérée : 0.8 chevelu racinaire d'arbre par station

Enfin, la variable « éléments diversifiant l'écoulement » n'est pas une variable de caractérisation directe de la ripisylve mais c'est une variable informative car les éléments diversifiant les écoulements sont issus majoritairement de la ripisylve. Les éléments diversifiant les écoulements sont de 0.73 par mètre pour les cours d'eau de référence et de 0.18 par mètre pour les cours d'eau altérés en moyenne. La différence entre les moyennes en référence et en situation altérée est significative.

4. Statistiques sur le jeu de données DIR 2 et 4 : Stations de référence

a. Description des variables de contrôle communes Dir 2 et Dir 4

Tout d'abord, les distributions des variables de contrôle communes aux jeux de données Dir 2 et Dir 4 sont décrites par la figure 16 ci-dessous.

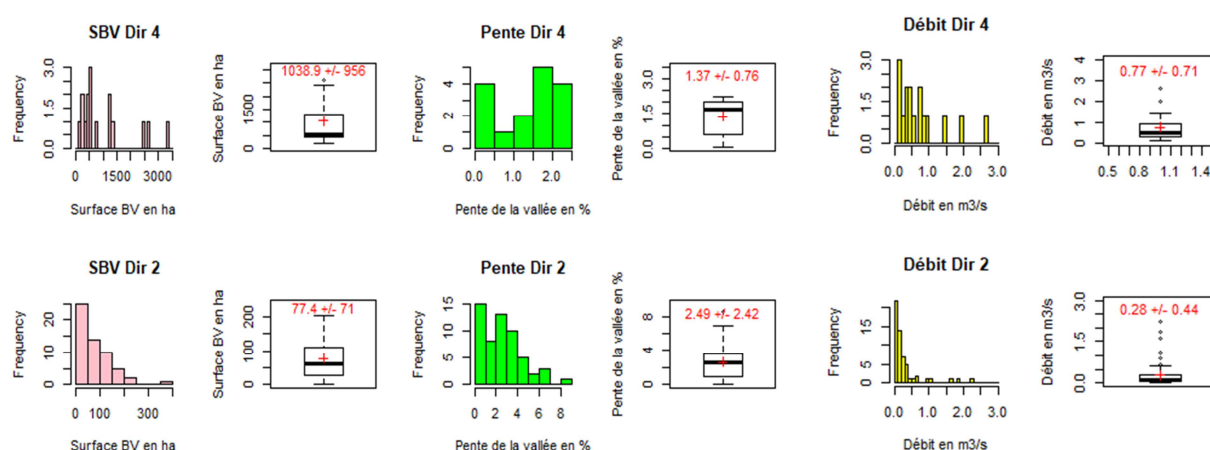


Figure 16 : Comparaison des histogrammes et boxplots de description des variables de contrôle entre les jeux de données Dir 2 et 4. Jeu de données Dir 2 : N = 60 ; jeu de données Dir 4 : N = 17

L'étude des variables de contrôle du jeu de données Dir 2 et 4 se limite à 3 variables quantitatives, la surface du bassin versant en hectare, la pente de la vallée en % et le débit en m³/s et une variable qualitative, l'hydro-écorégion de niveau 2. La figure 16 permet d'analyser les distributions des deux jeux de données pour les 3 variables quantitatives :

Les surfaces des bassins versants des stations du jeu de données Dir 4 ont tendance à être plus élevées (1038.9 ± 956) que pour les stations du jeu de données Dir 2 (77.4 ± 71). Au contraire, la pente des vallées Dir 4 (1.37 ± 0.76) est plus faible en moyenne que pour les stations Dir 2 (2.49 ± 2.42). Concernant les débits, ils sont faibles pour les deux jeux de données (moins d'1m³/s) mais il a quelques stations Dir 4 présentant des valeurs de débit plus importantes (2 à 3 m³/s).

b. Description de la variable « Hydro-écorégion de niveau 2 » :

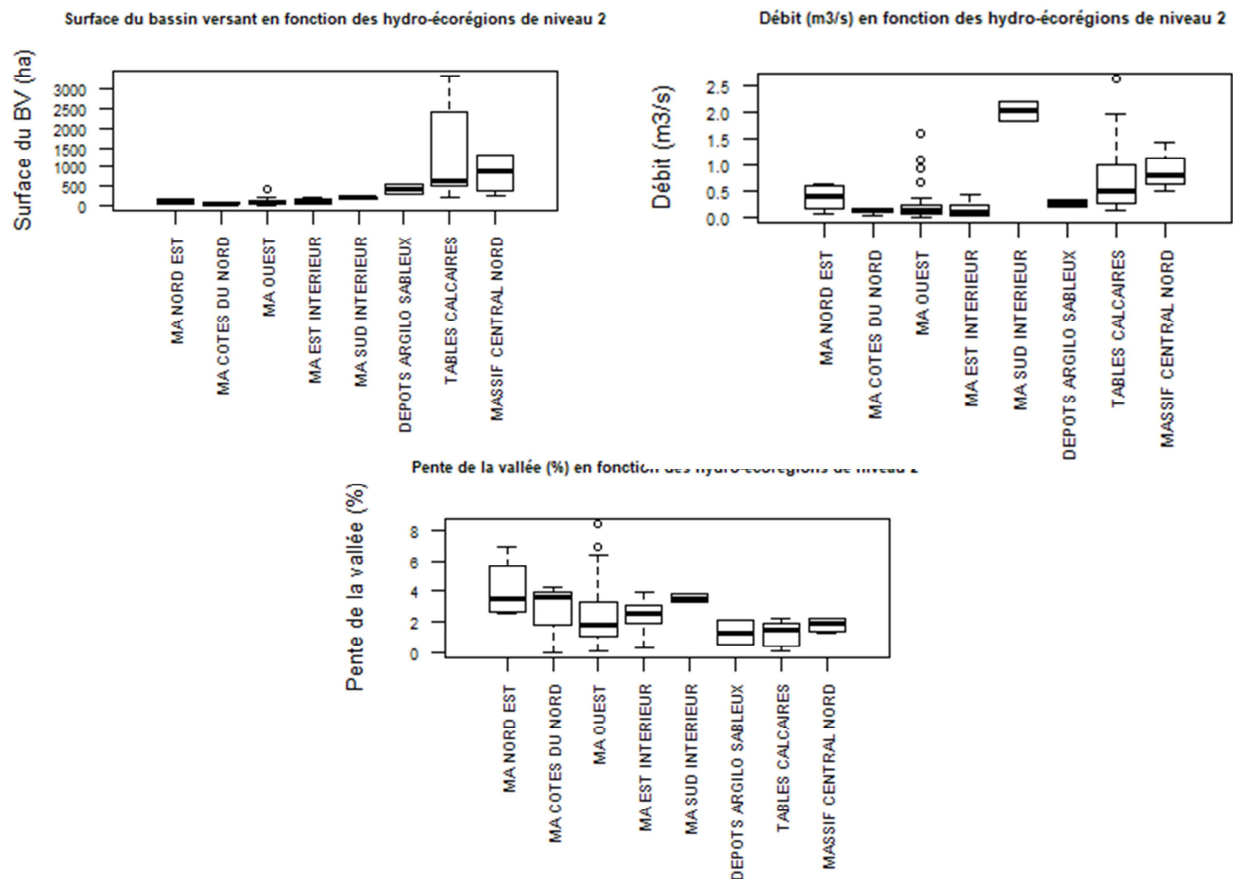


Figure 17 : Boxplots représentant les variables quantitatives en fonction de la variable hydro-écorégion de niveau 2 (Dir 2 et 4)

La distribution de la variable « surface du bassin versant » selon l'hydro-écorégion de niveau 2 révèle que les bassins versants ayant une surface élevée dans le jeu de données se situent plutôt dans les zones de tables calcaires et dans le massif central nord. Concernant la pente de la vallée, les valeurs les plus élevées sont localisées dans le massif armoricain nord-est, le massif armoricain côtes du nord et le massif armoricain ouest. Enfin, les débits les plus importants sont observés dans le massif armoricain sud intérieur, les tables calcaires et le massif central nord (figure 17).

Tableau 11 : Valeurs des variables de contrôle (moyenne \pm écart-type) en fonction de chaque hydro-écorégion de niveau 2 (Dir 2 et 4). Les valeurs **en rouge** sont celles dont les p-values issues du test de Wilcoxon-Mann-Whitney sont significatives

	Pente	Débit	Surface du bassin versant
Massif Armoricaïn (MA) ouest	2.44 \pm 2.01	0.22 \pm 0.32	71.7 \pm 70.9
MA Nord-est	4.14 \pm 2.06	0.37 \pm 0.26	84.3 \pm 71.0
MA Côtes du nord	2.62 \pm 2.29	0.11 \pm 0.07	42.4 \pm 23.4
MA Est intérieur	2.41 \pm 1.15	0.14 \pm 0.15	85.5 \pm 71.2
MA Sud intérieur	3.55 \pm 0.33	2.04 \pm 0.27	187.4 \pm 21.5
Dépôts argilo-sableux	1.26 \pm 1.15	0.26 \pm 0.11	411 \pm 179.6
Massif central nord	1.81 \pm 0.49	0.89 \pm 0.40	884 \pm 538.2
Tables calcaires	1.22 \pm 0.80	0.83 \pm 0.85	1246.4 \pm 1126.5

Les tests de Wilcoxon-Mann-Whitney ont été réalisés de la façon suivante : les séries de valeurs de chaque variable dans chaque hydro-écorégion de niveau 2 ont été comparées à l'ensemble des séries de valeurs de chaque variable.

D'après ces résultats, il n'est pas possible d'établir un classement des stations selon la variable hydro-écorégion de niveau 2. Cependant, quelques caractéristiques des cours d'eau selon leurs appartenances aux HER de niveau 2 semblent pouvoir être précisées (tableau 11).

La MA Nord-est présente des débits assez faibles de l'ordre de 0.37 m³/s (\pm 0.26), le MA ouest est caractérisé par des bassins versant d'environ 72 hectares (\pm 71), la MA sud-intérieur présente des débits élevés d'environ 2 m³/s (\pm 0.27). Le massif central nord est caractérisé par des débits de 0.89 m³/s (\pm 0.4) et des bassins versants d'une surface de 884 ha (\pm 538) et les tables calcaires présentent des débits de l'ordre de 0.83 m³/s (\pm 0.85) et des surfaces de bassin versant de 1246 ha (\pm 1126).

c. Analyses en composantes principales et classification

Une ACP et une CAH sont effectuées afin de déterminer si les variables de contrôle en commun du jeu de données Dir 2 et 4 permettent de réaliser une typologie des stations. La CAH a permis de mettre en évidence 4 classes de stations.

Tableau 12 : Interprétation des classes en fonction des variables (CAH, Dir 2 et 4). Les valeurs en rouge sont les P-values significatives.

Classe	Variables	Moyenne +/- écart type des sites au sein de la classe	Moyenne +/- écart type de l'ensemble des sites	P-value issue du test de Wilcoxon-Mann-Whitney
1	Surface BV (ha)	45.4 \pm 39.1	284.9 \pm 588.1	2.9 e -03
	Pente vallée (%)	4.7 \pm 1.5	2.33 \pm 1.78	1.092 e -06
	Débit (m ³ /s)	0.18 \pm 0.15	0.38 \pm 0.54	0.49
2	Surface BV (ha)	162.8 \pm 242.9		0.74
	Pente vallée (%)	1.43 \pm 0.85		0.017
	Débit (m ³ /s)	0.18 \pm 0.17		0.063
3	Surface BV (ha)	469.83 \pm 410.08		0.002
	Pente vallée (%)	2.13 \pm 0.9		0.901
	Débit (m ³ /s)	1.38 \pm 0.60		1.052 e -05
4	Surface BV (ha)	2793.7 \pm 411.9		5.26 e -03
	Pente vallée (%)	0.26 \pm 0.15		0.013
	Débit (m ³ /s)	0.85 \pm 1		0.26

Caractéristiques principales des 4 classes de stations (tableau 12) :

- **Classe 1** : 19 stations sont isolées selon la variable « pente de la vallée ». Ces stations sont caractérisées par une pente forte (4.7 ± 1.5) et des bassins versants ayant une superficie plus faible (45.4 ± 39.1). Cette classe n'est composée que de stations provenant du jeu de données Dir 2.
- **Classe 2** : 40 stations caractérisées par des valeurs de pente assez faibles (1.43 ± 0.85).
- **Classe 3** : 11 stations caractérisées par un débit important (1.38 ± 0.60) et des surfaces de bassin versant de l'ordre de 469.83 ± 410.08 hectares.
- **Classe 4** : 3 stations caractérisées par des surfaces de bassin versant élevées (2793.7 ± 411.9) et des pentes de vallée faibles (0.26 ± 0.15). Cette classe n'est composée que de stations provenant du jeu de données Dir 4.

Les classes mises en évidence par cette analyse sont différentes des classes obtenues avec la CAH effectuée sur le jeu de données Dir 2 seul. Etant donné qu'il n'est pas possible de conclure sur le caractère « homogène » des variables de contrôle pour la caractérisation des stations Dir 2 et 4, l'analyse des variables de réponse sur ces deux jeux de données n'a pas été réalisée.

C. Discussion

Un protocole spécifique aux cours d'eau en tête de bassin versant

Ces dernières années, un grand nombre de protocoles ont été développés pour la caractérisation de l'hydromorphologie des cours d'eau (Gob *et al.*, 2014). Cependant, aucun d'entre eux n'est spécifique aux cours d'eau en tête de bassin versant, bien qu'ils représentent entre 60 et 80 % du réseau hydrographique (Schumm, 1956 ; Shreve, 1969 ; Meyer & Wallace, 2001 ; Benda *et al.*, 2005 ; Le Bihan, 2009).

Un protocole spécifique aux têtes de bassin versant (cours d'eau de rang de Strahler 1) a donc été mis au point au cours d'études successives entre 2010 et 2015 (Mathieu, 2010 ; Jan, 2013 ; Bossis, 2014 ; Colin, 2015). Ce protocole s'est construit progressivement afin de bénéficier des retours d'expérience des années précédentes (terrain et analyses des données). Les données quantitatives sont privilégiées afin de limiter les biais « observateur ». De plus, pour sa validation, les cas particuliers tels que les affleurements rocheux ont été intégrés.

Ce protocole propose une méthode pouvant être qualifiée de « rapide ». Par exemple, pour les zones humides, une méthode d'évaluation est considérée comme rapide lorsque la partie bureau (comprenant la phase d'analyses) ainsi que la phase terrain ne prennent qu'une demi-journée (Fennessy *et al.*, 2007). Les évolutions du protocole ainsi que la création d'une base de données répondent maintenant à ce qualificatif. Ainsi, sa mise en œuvre sur le terrain nécessite un minimum de matériel et s'applique raisonnablement en 1h30 à 2/3 personnes.

Etant développé sur le territoire Bretagne Pays de la Loire, il peut nécessiter des adaptations s'il est utilisé sur des milieux particuliers (cours d'eau à forte pente, marais ...).

La notion de rang et ses limites

La sélection des stations de référence selon les rangs de Strahler peut présenter des limites.

La qualification de rang 1 peut être différente si elle est effectuée à partir des cartes IGN (1 :25 000) ou à partir de prospections de terrain. Des rangs 1 sur une carte 1 :25 000 peuvent être en réalité des cours d'eau de rang 2 voire de rang 3. L'ordination de Strahler est en effet, très dépendante de l'échelle

d'observation. Par exemple, aux Etats-unis, il est estimé que l'ordre de Strahler est décalé de minimum un rang entre les échelles du 1 :100 000 et 1 :24 000, l'ordre réel mesuré sur le terrain était lui-même sous-estimé de 1 à 2 rangs par rapport à l'échelle 1 :24 000 (Hughes & Omernik, 1981).

Ces constatations permettent d'expliquer en partie les variations observées entre les données Bretagne Pays de la Loire (Dir 2) et les données Centre – Poitou-Charentes (Dir 4). En effet, les stations du jeu de données Dir 4 présentent des surfaces de bassin versant plus élevées, certaines de ces stations peuvent être des cours d'eau de rang supérieur selon l'échelle retenue.

Enfin, même en utilisant une échelle similaire pour déterminer les rangs, la surface des bassins versants amont peut varier fortement. Ainsi, des cours d'eau de rang 1 peuvent présenter des surfaces de bassin versant amont très importantes (20 km² à 30 km²) voire même plus grandes que certains rangs 2. Ce constat avait déjà été mis en évidence par des travaux de Hughes *et al.* en 2011 qui révèlent qu'à une même surface de bassin versant peut correspondre des variations de 1 à 4 rangs de Strahler pour les cours de différentes régions des Etats-Unis. Par conséquent, la combinaison des deux approches (rang de Strahler et surface de bassin versant) semble préférable pour la sélection de nouveaux cours d'eau de référence. Cette approche a été testée pour la gestion forestière en Tasmanie où ont été retenus les cours d'eau permanents de rang 1 présentant un bassin versant inférieur à 0.5 Km² (Hughes *et al.*, 2011).

Variables de contrôle et variables de réponse difficiles à appréhender à cette échelle

L'hydromorphologie, en générale, est caractérisée par des variables de contrôle et des variables de réponse. Les variables de contrôle s'imposent aux cours d'eau tandis que les variables de réponse s'ajustent en fonction de ces dernières.

Au sein des variables de contrôle, il existe des corrélations entre certaines variables, notamment entre la surface du bassin versant amont et le débit de plein bord (Petit *et al.*, 2005 ; Malavoi & Bravard, 2010). En 2013 et 2014, les études de Jan et Bossis n'ont pas permis de mettre en évidence un lien de causalité direct entre la surface du bassin versant et le débit de plein bord, même si ce lien semble exister pour une partie des stations. Dans notre étude le lien entre ces deux variables est observé et permet de discriminer le groupe 3 (ne représentant toutefois que 4 stations) de la CAH correspondant aux stations ayant des surfaces de bassin versant et des débits élevés. Il semble que le lien de causalité entre ces variables augmente lorsque les valeurs de surface de bassin versant et de débit augmentent.

De même pour la relation entre les variables de contrôle et les variables de réponse. L'absence de corrélation observée dans notre étude pourrait être expliquée par l'échelle d'observation. A l'échelle des rangs 1, le lien entre les variables de contrôle et les variables de réponses ne semble pas facile à établir (Colin, 2015).

En effet, nos analyses sur les cours d'eau Bretagne – Pays de la Loire (Dir 2) ont révélé que les cours d'eau ajustent leurs variables de réponse de la même façon qu'ils soient en classe 1 ou 2 de la CAH. Néanmoins, pour la classe 3, quatre variables sur 10 présentent des différences significatives par rapport à l'ensemble du jeu de données : la moyenne de largeur plein bord, et la granulométrie (D16, D50, D84). Ces différences significatives peuvent s'expliquer par le fait que les débits soient plus importants engendrant une granulométrie plus grossière, un débit solide plus important, une érosion latérale plus forte et en conséquence une moyenne de largeur plein bord plus importante.

Les analyses statistiques sur le jeu de données Dir 2 et Dir 4 ont été réalisées seulement à partir de trois variables de contrôle communes aux jeux de données initiaux. De ce fait, les résultats obtenus peuvent être considérés comme peu robustes, de fait, le lien avec les variables de réponse n'a pas été étudié.

Le rôle des hydro-écorégions de niveau 2 n'a pas pu être mis en évidence à l'échelle Dir 2 et à l'échelle Dir 2 et Dir 4, seules quelques tendances ont pu être observées. Néanmoins, le nombre de stations ainsi que leur répartition au sein des différentes hydro-écorégions de niveau 2 ne permettaient pas une bonne analyse de cette variable car un grand nombre de station sont localisées dans le massif armoricain ouest et seulement deux stations sont situées dans le massif armoricain sud intérieur par

exemple. Cela est dû au fait que le nombre de stations de référence n'étant pas très élevé, elles ont été choisies « par défaut ».

Enfin, les cours d'eau ayant conservé leur état de référence présentent souvent des caractéristiques à l'origine de leur préservation (exemples : cours d'eau à forte pente, vallées encaissées, zones gorgées d'eau, secteurs boisés).

Certaines variables de contrôle essentielles n'ont pas pu être intégrées dans l'étude (pédologie, historique des changements d'occupation du sol, apports solides amont ...).

L'ensemble de ces éléments atteste de la difficulté d'établir une typologie uniquement sur les cours d'eau de rang 1. En conséquence, il serait intéressant d'étendre l'étude aux cours d'eau de rang 2 ainsi que la récolte de données concernant les variables de contrôle non étudiées.

Vers une régionalisation des données

Afin de pouvoir effectuer des comparaisons entre les caractéristiques des cours d'eau en tête de bassin versant, il semble nécessaire d'avoir des variables de contrôle et des variables de réponse comparables entre différentes études réalisées à l'échelle nationale. Ce problème a été constaté lors de notre étude car seules trois variables de contrôle du jeu de données de la Dir 4 étaient comparables avec les variables du jeu de données Dir 2. Par conséquent, il semble important d'homogénéiser les variables à récolter nécessaires à l'étude de ces milieux au niveau national. Par ailleurs, l'utilisation du protocole sur d'autres territoires serait intéressante car cela permettrait d'effectuer des analyses à partir d'un échantillon de stations plus important.

La régionalisation des données est importante notamment pour les actions de restauration dans le but d'avoir une variabilité des données limitée. D'autant plus que la dispersion des données au niveau régional reste parfois forte (Malavoi & Bravard, 2010).

Des données essentielles à la restauration

Une variabilité importante des caractéristiques hydromorphologiques de référence est observée au sein d'un même territoire et sur l'étude de cours d'eau de rang de Strahler identique. Ce constat conforté au fil des études sur les cours d'eau de rang 1 démontre l'importance d'établir un diagnostic des conditions de référence pour chaque projet de restauration. Les conditions de référence peuvent être établies à l'amont, à l'aval et / ou extrapolées (Mathieu, 2010). Dans le cas d'absence de cours d'eau en situation de référence, il est possible de trouver des stations présentant un maximum de caractéristiques communes avec la référence. Ces caractéristiques font l'objet du guide de valeurs seuils présenté en annexe 3.

Les données de caractérisation de la ripisylve ont été incluses au guide de valeurs seuils permettant l'appréhension de la dynamique du cours d'eau dans son ensemble et ouvrant ainsi des réflexions sur la restauration.

La présence d'une ripisylve relativement épaisse pour 92 % des cours d'eau de référence témoigne de l'importance de celle-ci pour la qualité hydromorphologique des cours d'eau. En situation altérée, lorsque la ripisylve est présente, son épaisseur est moins importante. L'étude d'Hayot en 2011 a révélé que la densité et la richesse spécifique sont des critères discriminants entre ripisylve « naturelle » et ripisylve plantée. Notre étude a également révélé que la ripisylve est plus dense et la richesse plus élevée pour les cours d'eau en situation de référence.

Le niveau d'hétérogénéité des caractéristiques hydromorphologiques est rappelé dans cette étude. La diversité importante des habitats, favorisée par les éléments diversifiant l'écoulement (Dufour & Piégay, 2006) sont présents en nombre important en situation de référence. Ces constatations doivent alimenter les réflexions sur l'évolution des techniques de restauration notamment en réconciliant les techniques de restauration hydromorphologique avec les techniques de restauration des habitats.

Ainsi, la restauration serait plus optimale et pourrait garantir le retour aux conditions favorisant la biodiversité.

D. Conclusion

Cette étude a permis la validation d'un protocole spécifique aux cours d'eau en tête de bassin versant (rang de Strahler 1) avec ses points forts et ses limites.

Le protocole est rapide et adapté aux têtes de bassin, cependant, la sélection des stations de référence est difficile à partir du rang car la variabilité du rang de Strahler selon l'échelle d'étude est mise en cause. Les relations entre variables de contrôle et variables de réponse sont compliquées à appréhender. Les données ne sont pas exhaustives et leur dispersion est élevée.

Les résultats de notre étude orientent vers une régionalisation des données pour optimiser les actions de restauration d'une part, et d'autre part vers la prise en compte du cours d'eau dans son ensemble y compris la ripisylve ouvrant la réflexion sur les techniques de restauration.

Enfin, un guide de valeurs seuils regroupant les intervalles de valeurs de plusieurs variables (de contrôle et de réponse) pour les cours d'eau en situation de référence sur le territoire Bretagne-Pays de la Loire a été rédigé. Ce guide pourra permettre d'orienter les actions de restauration et de les améliorer.

III. La biologie des cours d'eau en tête de bassin versant (Macro-invertébrés et ichtyofaune)

A. Méthodes d'étude

Dans un premier temps, le protocole de caractérisation de la biodiversité des cours d'eau de rang 1 a été révisé. Dans un second temps, des analyses statistiques ont été réalisées à partir des données récoltées sur le terrain cette année ainsi que des données récoltées en 2016 par Guillaume Bouas. Ces analyses ont pour objectif la validation du protocole.

Concernant les peuplements piscicoles, la station de pêche d'une distance de 30 mètres est installée en aval de la station de prélèvement des macro-invertébrés afin de limiter le piétinement. Les stations sont prospectées par pêche complète en un seul passage par la méthode de pêche à l'électricité à l'aide d'un Martin pêcheur. Les données piscicoles ne seront pas analysées dans cette étude.

1. Protocole d'étude des macro-invertébrés en TBV

a. Présentation du jeu de données

Les sites étudiés pour la validation du protocole d'étude des macro-invertébrés sont identiques à ceux prospectés pour le protocole de caractérisation de l'hydromorphologie (rappel Figure 4, tableau 13).

Tableau 13: Description des stations prospectées en 2017 lors de la phase de terrain

Département	Stations	Etats hydromorphologiques
Morbihan (56)	Camors	Altérée prospectée en 2014
	Molac	Référence prospectée en 2014
Ille-et-Vilaine (35)	Vern-Sur-Sèche : Le Boël amont et aval	Altérée en partie, état initiale pour l'étude des sites locaux
	Bazouges-la-Pérouse	Référence prospectée en 2014
Loire-Atlantique (44)	Avessac : Le Rubis	Altérée, état initiale pour l'étude des sites locaux

En 2016, Guillaume Bouas a étudié 23 stations, dont 13 en situation de référence hydromorphologique et 10 en situation altérée. En incluant les données récoltées cette année le jeu de données complet regroupe 28 stations dont 15 stations en situation de référence et 13 en situation altérée.

b. Présentation du protocole

En 2016, Guillaume Bouas a proposé un protocole de prélèvement des macro-invertébrés aquatiques spécifiques aux cours d'eau en tête de bassin versant. La méthode est inspirée en grande partie du protocole IBGN selon la norme européenne XP T90-333. Il était composé 9 prélèvements dont un qualifié de prélèvement supplémentaire (non soumis aux mêmes contraintes d'échantillonnage). Toutefois, il prévoyait de réduire le nombre de prélèvement à 6 si cela permettait l'obtention d'une richesse spécifique suffisante.

Afin de déterminer définitivement le nombre de prélèvement nécessaire pour obtenir une évaluation de qualité de la richesse spécifique. Le nombre de prélèvement a été augmenté à 12 incluant 6 prélèvements qualifiés de supplémentaires. Cette augmentation permet d'obtenir une estimation de la richesse spécifique attendue avec un effort d'échantillonnage plus important. Les prélèvements sont effectués sur une station correspondante à une distance écologique de 30 m et représentative du tronçon étudié. Les échantillons récoltés sont conservés dans de l'éthanol à 96° jusqu'à la phase de tri et de détermination.

2. Analyses statistiques

L'estimation de la richesse spécifique attendue a été réalisée selon une approche asymptotique, via un modèle non paramétrique. Trois estimateurs sont utilisés (Chao1 – type estimators ; et Jackknife estimators 1 et 2) (Chao & Chiu, 2016).

L'estimateur Chao1 correspond à l'estimation de la borne inférieure de la richesse spécifique, il est basé sur les espèces non détectées en fonction du nombre de « singletons et doubletons » (espèce avec un seul ou deux individu(s) échantillonné(s)) (Chao & Chiu, 2016).

Les estimateurs Jackknife 1 et 2 ont été développés dans le but de réduire le biais des estimations tel que le nombre d'espèce observé dans un échantillon. Les deux estimateurs prennent en compte le nombre d'espèce de l'échantillon, dans le cas Jackknife 1 ce nombre est évalué par rapport au nombre de « singletons ». Dans le cas Jackknife 2 il est évalué en fonction du nombre de « singletons » et de « doubletons » (Chao & Chiu, 2016).

Avec les résultats de ces estimations de la richesse attendue, des courbes représentant le pourcentage de la richesse attendue en fonction du nombre de prélèvements pour chaque estimateur, sont construites pour chaque station échantillonnée en 2017.

Afin de compléter l'analyse, les données générées par Guillaume Bouas en 2016 sont également analysées. L'estimation est effectuée sur 8 prélèvements comme le prévoyait le protocole en 2016. Une courbe représentant le pourcentage moyen de la richesse attendue en fonction du nombre de prélèvements pour chaque estimateur est construite.

B. Résultats

1. Etude de la richesse spécifique en fonction du nombre de prélèvements

L'analyse des prélèvements récoltés sur le terrain ainsi que les traitements statistiques ont permis de mettre en lumière les résultats exposés dans le tableau suivant (tableau 14) :

Tableau 14 : Richesse cumulée observée par station et estimation de la richesse théorique attendue par trois estimateurs : Chao 1, Jackknife 1 et 2. (valeur ± écart-type)

Stations	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	P9	P10	P11	P12	Chao 1	Jackk 1	Jackk 2
Le Rubis	30	30	30	30	30	36	38	39	42	43	44	45	58 ± 9	58 ± 8	64
Boël amont	3	4	4	5	6	7	7	9	9	9	9	9	10 ± 2	11 ± 1	11
Boël aval	2	4	7	9	9	10	12	12	12	13	13	13	32 ± 16	19 ± 4	25
Bazouges	24	24	24	24	24	26	29	29	29	30	30	31	43 ± 11	39 ± 4	44
Camors	32	32	32	32	32	35	36	41	42	43	44	45	73 ± 19	61 ± 9	71

Le tableau 14 fournit la richesse spécifique cumulée observée pour chaque prélèvement de chaque station ainsi que la richesse attendue estimée par trois estimateurs : Chao 1 et Jackknife 1 et 2.

Concernant le Rubis, la richesse spécifique observée est de 45 espèces, les estimateurs Chao 1, Jackknife 1 et Jackknife 2 prévoit respectivement 58, 58 et 64 espèces (richesse attendue). Sur la station amont du Boël la richesse observée est de 9 espèces, les estimateurs prévoient 10 et 11 espèces. Sur la station aval, la richesse observée est de 13 espèces et la richesse attendue varie de 32 espèces pour Chao 1 à 19 espèces pour Jackknife 1 et à 25 espèces pour Jackknife 2. A Bazouges, 31 espèces sont échantillonnées, les estimateurs prévoient entre 39 et 44 espèces pour la richesse attendue. Enfin, à Camors, la richesse observée est de 45 espèces, la richesse attendue varie de 61 à 73 espèces.

2. Effort d'échantillonnage 2017

Les estimations générées par les 3 estimateurs ont permis la construction de courbes décrivant l'évolution du pourcentage cumulé de la richesse attendue en fonction du nombre de prélèvements pour chaque station (figure 18).

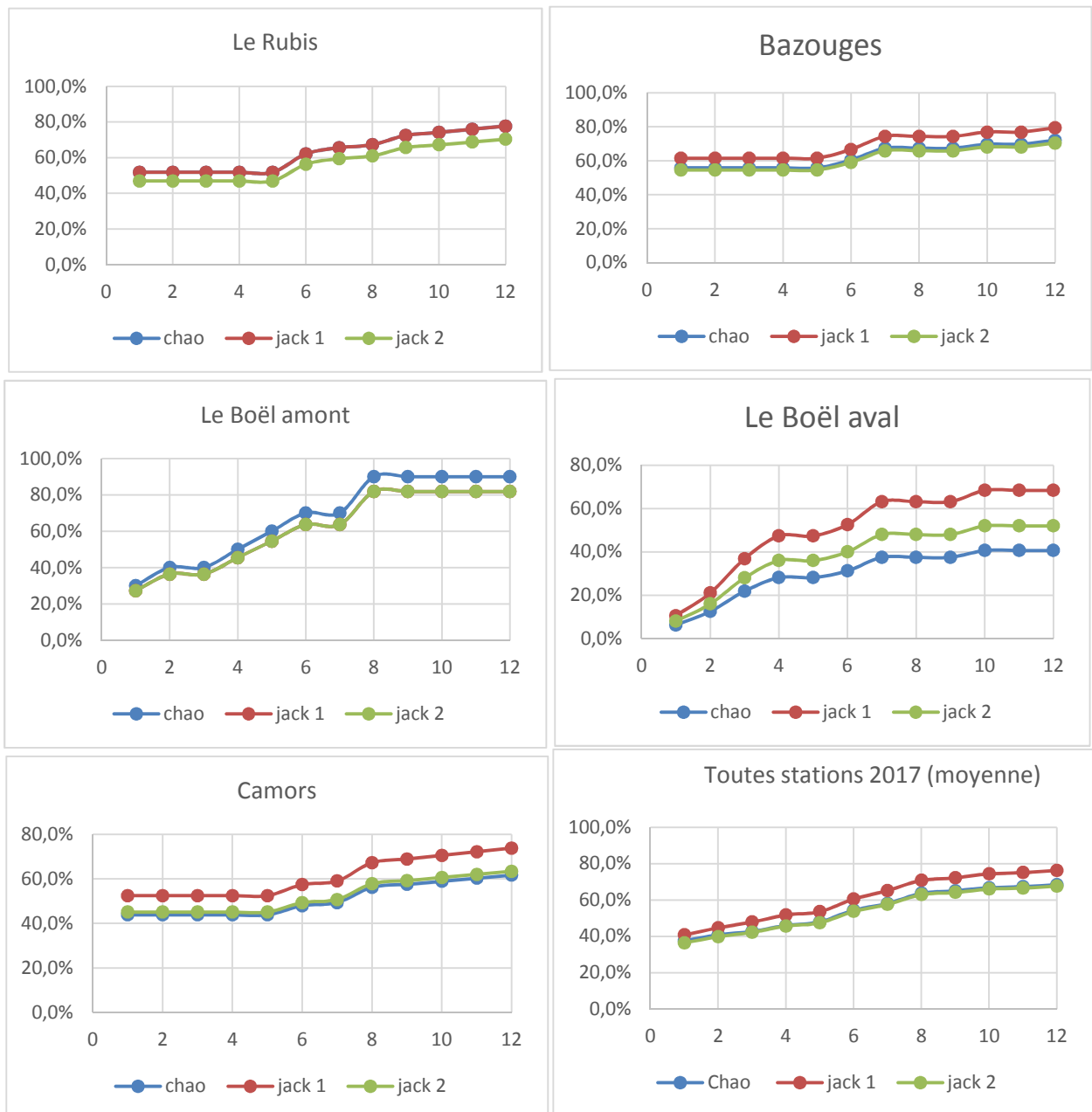


Figure 18 : Courbes représentant le pourcentage de richesse spécifique cumulée attendue en fonction du nombre de prélèvements selon les 3 estimateurs

La figure 18 donne accès aux pourcentages de la richesse spécifique cumulée attendue en fonction du nombre de prélèvements. Pour le Rubis, l'estimateur Chao 1 et Jackknife 1 fournissent la même estimation, 77.6% de la richesse attendue est observée avec 12 prélèvements. Sur la station amont du Boël, les estimateurs Jackknife 1 et 2 sont cohérents et estiment que 81.8% de la richesse attendue est observée. Sur la station aval du Boël, les 3 estimateurs proposent une estimation différente, entre 40 et 68 % de la richesse attendue est observée. Concernant les stations Bazouges et Camors, les estimateurs Chao et Jackknife 2 proposent les mêmes estimations en moyenne 71% et 62 % de la richesse attendue

est observée pour Bazouges et Camors respectivement. Enfin, les courbes représentant la moyenne de richesse attendue pour toutes les stations montrent également que l'estimateur Chao et Jackknife 2 sont cohérents à estimer que 68 % de la richesse attendue est observée à 12 prélèvements. Le tableau suivant expose les résultats pour les prélèvements 6, 8 et 12 :

Tableau 15 : Pourcentages cumulés de la richesse attendue pour chaque station pour les prélèvements P6, P8 et P9

Station	Estimateur	P6	P8	P12
Le Rubis	Chao 1	62,1%	67,2%	77,6%
	Jackknife 1	62,1%	67,2%	77,6%
	Jackknife 2	56,3%	60,9%	70,3%
Le Boël amont	Chao 1	70,0%	90,0%	90,0%
	Jackknife 1	63,6%	81,8%	81,8%
	Jackknife 2	63,6%	81,8%	81,8%
Le Boël aval	Chao 1	31,3%	37,5%	40,6%
	Jackknife 1	52,6%	63,2%	68,4%
	Jackknife 2	40,0%	48,0%	52,0%
Bazouges	Chao 1	60,5%	67,4%	72,1%
	Jackknife 1	66,7%	74,4%	79,5%
	Jackknife 2	59,1%	65,9%	70,5%
Camors	Chao 1	47,9%	56,2%	61,6%
	Jackknife 1	57,4%	67,2%	73,8%
	Jackknife 2	49,3%	57,7%	63,4%

Les valeurs des estimateurs indiquées en rouge correspondent à la meilleure estimation du pourcentage de richesse spécifique attendue. Elles ont été sélectionnées à l'aide de l'arbre de décision du meilleur estimateur du nombre d'espèces pour les différents ordres de Jackknife (Brose *et al.*, 2003).

3. Effort d'échantillonnage 2016 – 2017

Afin d'évaluer l'effort d'échantillonnage sur le jeu de données 2016-2017, des courbes représentant le pourcentage cumulé moyen de la richesse attendue pour chaque estimateur ont été créées (figure 19)

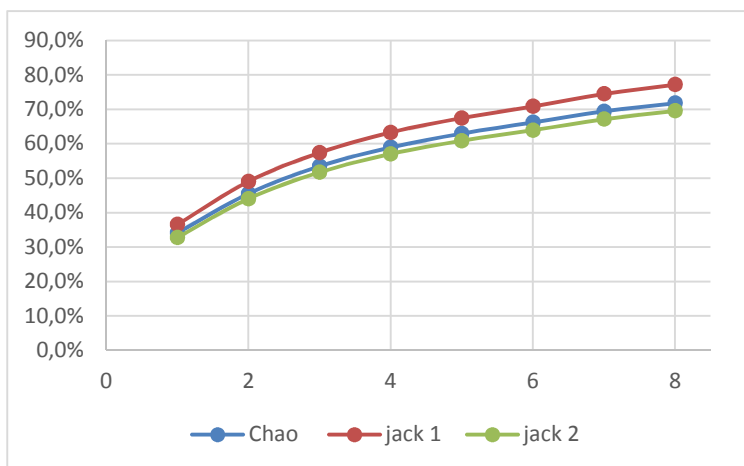


Figure 19 : Pourcentage cumulé moyen de la richesse attendue selon les trois estimateurs Chao 1 et Jackknife 1 et 2 (stations 2016 et 2017)

Les courbes (figure 19) permettent de voir le pourcentage cumulé moyen de la richesse attendue pour les 28 stations échantillonnées. Au prélèvement 8, selon les estimateurs, entre 69 et 77 % de la richesse attendue a été observée, au prélèvement 6, entre 64 et 71 %.

C. Discussion

La richesse spécifique attendue et notamment la comparaison des différentes méthodes d'estimation de cette richesse est très étudiée par les scientifiques. Une multitude de protocoles d'échantillonnage et de méthodes d'estimation ont été développés ces dernières décennies. Cependant, aucun protocole de caractérisation de la biologie n'est défini spécifiquement pour les cours d'eau de rang de Strahler 1. En TBV, la richesse spécifique en macro-invertébrés est qualifiée de « hautement variable » par Clarke *et al.*, 2008 et de fait son estimation peut être souvent biaisée.

Afin d'estimer la richesse spécifique des TBV de rang 1 de cette étude, les estimateurs Chao 1 et Jackknife d'ordre 1 et 2 ont été utilisés. Ces estimateurs ont été appliqués par rapport au nombre de prélèvements effectués. Selon l'estimateur, des différences de richesse spécifique attendue sont observées pour une même station.

Les résultats concernant les 5 stations étudiées en 2017 avec un protocole à 12 prélèvements, montre que 60 à 80 % de richesse attendue est observée selon les estimateurs. L'extension des analyses aux données 2016 – 2017 (28 stations) révèlent que 69 à 77 % de la richesse attendue est observée avec 8 prélèvements.

Les estimateurs de la richesse spécifique laissent apparaître une certaine variabilité. Les études de Gotelli & Colwell en 2001 mettent en lumière le fait que les estimateurs de la richesse asymptotique sont imprécis (variances et intervalles de confiance élevés). Ils auraient tendance à sous-estimer la richesse réelle, d'autant plus pour les petits jeux de données.

Toutefois, plusieurs chercheurs s'accordent à avancer que les estimateurs Chao et Jackknife de différents ordres sont les plus performants (Gotelli & Colwell, 2001 ; Marcon, 2015 ; Béguinot, 2016).

A partir des travaux de Brose *et al.* en 2003 les estimateurs Jackknife d'ordre 1 et 2 ont été départagés. En effet, le choix de l'ordre dépend de la complétude de l'échantillon (nombre total d'espèces observées/nombre espèces total attendues). Lorsque la complétude se trouve entre 50 et 74 % l'estimateur Jackknife 2 est le plus performant et lorsqu'elle se situe entre 74 et 96% le Jackknife 1 apparaît comme le plus fiable (Brose *et al.*, 2003 ; Marcon, 2015).

Pour toutes les stations étudiées en 2017, l'estimateur Jackknife 1 serait le plus précis excepté pour la station aval du Boël où le Jackknife 2 serait le meilleur estimateur.

Concernant l'estimateur Chao 1, Chiu *et al.*, 2014, préfèrent son utilisation au Jackknife, qui, selon leurs études, aurait laisser apparaître un biais pour les très petits et très grands jeux de données. Ils avancent le fait que dans le cas d'échantillons suffisamment grands, les estimateurs Chao ont une robustesse théorique plus importante et de plus une cohérence avec l'estimateur Jackknife 1.

Cependant, les données de cette étude font ressortir une cohérence entre l'estimateur Chao 1 et le Jackknife 2 sur le jeu de données à 28 stations (2016 – 2017). L'estimateur Jackknife 1 prévoit des richesses attendues plus élevées. A la suite de ces constatations, il est difficile de trancher pour un estimateur ou un autre.

Quant au nombre de prélèvements nécessaires à l'atteinte d'un pourcentage considéré comme acceptable de la richesse réelle, plusieurs études proposent un seuil.

L'étude de Feelay *et al.* en 2012, sur les méthodes d'échantillonnage des macro-invertébrés en TBV propose une borne limite de 70 % pour l'évaluation de la biodiversité qu'ils qualifient « d'arbitraire et subjective ». Néanmoins, d'autres études sont en accord avec ces propos notamment Mackey *et al.*, 1984 ; Oertli *et al.*, 2005 et Kibichii *et al.*, 2009.

L'idée de départ était la proposition d'un protocole à 6 prélèvements qui selon les résultats obtenus pourrait fournir entre 64 et 71 % de la richesse attendue. Toutefois, les résultats obtenus dans cette étude ainsi que les recherches effectuées permettent une orientation vers un protocole à 7 prélèvements afin d'atteindre entre 67 et 75 % de la richesse attendue. La différence entre le

pourcentage de richesse attendue à 6 et à 7 prélèvements n'est pas très élevée, c'est pourquoi le 7^{ème} prélèvement pourrait être proposé en prélèvement facultatif.

A noter que le nombre de prélèvements peut être adapté au cas par cas selon les études réalisées. Les tableaux de données complets sont présentés en annexe 6 et 7.

Enfin, un protocole spécifique pour les TBV de rang 1 à 7 prélèvements dont un supplémentaire semble être un bon compromis entre l'effort d'échantillonnage et les résultats attendus.

D. Conclusion

L'analyse des données récoltées en 2016 et en 2017 ainsi que l'étude de la bibliographie ont permis de mieux comprendre la dynamique de recherche de la richesse spécifique attendue. Les estimateurs de cette richesse ont été déterminants dans cette étude ainsi que les retours d'expériences concernant l'utilisation de ces estimateurs, leur fiabilité, leur faiblesse, etc.

La conclusion de cette étude est donc de proposer un protocole de caractérisation des peuplements de macro-invertébrés spécifique pour les cours d'eau de rang 1 et composé de 7 prélèvements organisés comme suit :

- 5 prélèvements en substrat biogène
- 1 prélèvement en substrat peu biogène
- 1 prélèvement supplémentaire non soumis à la qualité du substrat (facultatif).

CONCLUSION GENERALE ET PERSPECTIVES

Cette étude avait pour objectif d'une part, de mettre en lumière les caractéristiques hydromorphologiques et biologiques des cours d'eau de rang 1 en situation de référence. D'autre part, l'objectif était la validation des protocoles spécifiques de caractérisation de l'hydromorphologie et de la biologie (macro-invertébrés et ichtyofaune) en tête de bassin versant.

L'hydromorphologie des cours d'eau de rang de Strahler 1 n'est pas facile à appréhender, les relations entre les différentes variables de contrôle et / ou de réponse sont difficiles à comprendre et à mettre en évidence. Toutefois, le protocole spécifique aux têtes de bassin versant a été validé et qualifié de rapide et adapté bien que la variabilité des données soit importante. Afin de limiter la dispersion des données, elles doivent être régionalisées et ainsi permettre l'optimisation de la restauration. Le guide de valeurs seuils rédigé pour décrire les caractéristiques principales des cours d'eau de rang 1 en situation de référence dans le massif Armoricaïn favorise également l'amélioration des actions restauration.

Dans l'optique d'établir une typologie plus robuste des cours d'eau en tête de bassin versant du massif Armoricaïn, il serait intéressant d'étendre les études aux cours d'eau de rang 2 et ainsi mettre en évidence, plus clairement les liens entre les différentes variables. L'application du protocole sur d'autres territoires favoriserait l'élargissement du jeu de données et ainsi l'enrichissement des connaissances sur les têtes de bassin versant. Ces connaissances pourront être utilisées pour améliorer les techniques de restauration.

L'étude de l'hydromorphologie est essentielle pour la préservation des têtes de bassin versant mais la qualité biologique est tout aussi importante, notamment l'étude des macro-invertébrés.

L'estimation de la richesse attendue a permis la validation d'un protocole de caractérisation des macro-invertébrés à sept prélèvements dont un facultatif. Ce protocole permet d'atteindre environ 70 % de la richesse estimée par les estimateurs utilisés (Chao 1, Jackknife 1 et 2).

Les travaux sur les macro-invertébrés doivent être poursuivis afin de récolter des données sur un plus grand nombre de stations qu'elles soient en situation de référence ou altérées. Ces données constitueraient un état initial de la qualité biologique des cours d'eau et seraient utiles pour les projets de restauration. La création d'une base de données regrouperait les connaissances acquises sur la biologie (macro-invertébrés et ichtyofaune) des cours d'eau de rang 1.

Pour conclure, les connaissances sur les cours d'eau en tête de bassin versant (rang 1) sont encore limitées. Toutefois, de plus en plus d'études sont menées sur ces milieux afin de répondre aux objectifs de la DCE en termes de qualité de l'eau mais aussi pour comprendre le fonctionnement global des bassins versants. Le développement de protocoles spécifiques permet de favoriser l'acquisition de données contribuant à des meilleures connaissances de l'hydromorphologie et de la biologie des cours d'eau en tête de bassin versant.

BIBLIOGRAPHIE

- ADAM P., DEBIAIS N. & MALAVOI J.-R., 2007,** « *Manuel de restauration hydromorphologique des cours d'eau* », Agence de l'eau Seine Normandie. 64 p.
- AFNOR, 2009.** Norme XP T90-333. Prélèvement des macro-invertébrés aquatiques en rivières peu profondes. 24p.
- ALBER A. & PIEGAY H., 2011.** Spatial disaggregation and aggregation procedures for characterizing fluvial features at the network-scale : Application to the Rhône basin (France). *Geomorphology* 125. p343–360.
- ALEXANDER G., HANSEN E., 1996.** Sand bed load in a brook trout stream. *North American Journal of Fisheries Management*. Vol 6, n°1 p9-23.
- ALEXANDER R.B., BOYER E.W., SMITH R.A., SCHWARZ G.E. & MOORE R.B., 2007.** (in CHOUCARD, 2011) The role of headwater streams in downstream water quality. *Journal of the American Water Resources Association (JAWRA)*, 43, p41-59.
- ALLAN J.-D., FLECKER A.-S., 1993.** Biodiversity conservation in running waters. *Bioscience*, Vol 43, n°1, p32-44.
- ARCHAIMBAULT & DUMONT, 2010.** L'indice biologique global normalisé (IBGN), principes et évolution dans le cadre de la directive cadre européenne sur l'eau. Sciences Eaux & Territoires, *Revue : L'évaluation du risque toxique dans les milieux aquatiques* n°01, p. 36-39. [en ligne] Disponible sur <URL : <http://www.set-revue.fr/lindice-biologique-global-normalise-ibgn-principes-et-evolution-dans-le-cadre-de-la-directive-cadre>> (consulté le 20/04/2017).
- BARBOUR M.T., J.B. STRIBLING, J. GERRISTEN & J.R. KARR, 1996.** Biological criteria : Technical guidance for streams and rivers. EPA/822-B-96-001. *US Environmental Protection office of Science and Technology*, Washington, DC.
- BEGUINOT J., 2016.** Basic Theoretical Arguments Advocating Jackknife-2 as Usually being the Most Appropriate Nonparametric Estimator of Total Species Richness. *Annual Research & Review in Biology* 10.1, p. 1–12.
- BENDA L., HASSAN M.-A., CHURCH M., MAY C.L., 2005.** Geomorphology of steepland headwaters: the transition from hillslopes to channels. *Journal of the American Water Resources Association (JAWRA)*, 41, p835-851.
- BERENZEN N., KUMBE T., SCHULZ H., SCHULZ R., 2005.** Macroinvertebrate community structure in agricultural streams: impact of runoff-related pesticide contamination, *Ecotoxicology and Environmental Safety*, 60, p37-46.
- BERTRAND M., PIEGAY H., PONT D., LIEBAULT F., SAUQUET E., 2013.** Sensitivity analysis of environmental changes associated with riverscape evolutions following sediment reintroduction: geomatic approach on the Drôme River network, *France International Journal of River Basin Management*, 11,1, p19-32.
- BJORNN T.C., BRUSVEN M.A., MOLNAU M.P., MILLIGAN J.H., KLANT J.H., CHACHO E., SCHAYE C., 1977.** Transport of granitic sediment in streams and its effects on insects and fish. Rapport B-036-IDA, College of forestry, wildlife and range sciences, 43 p.
- BÖHLKE J.K., J.W. HARVEY, M.A. VOYTEK, 2004.** Reachescale Isotope Tracer Experiment to Quantify Denitrification and Related Processes in a Nitrate-Rich Stream, Mid-continent USA. *Limnology and Oceanography*, 49, p821-838.
- BONADA N., N. PRAT, A. MUNNE, M. RIERADEVALL, J. ALBATERCEDOR, M. ALVAREZ, J. AVILES, J. CASAS, P. JAIMEZ-CUELLAR, A. MELLADO, G. MOYA, I. PARDO, S. ROBLES, GRAMON, M.L. SUAREZ, M. TORO, M.R. VIDAL-ABARCA, D. VIVAS & C. ZAMORA-MUNOZ, 2002.** Criterios para la selection de condiciones de referencia en los rios mediterraneos. Resultados del proyecto GUADALMED. *Limnetica*. 21, p99-114.
- BOSSIS M., 2014,** Étude de l'hydromorphologie à l'échelle stationnelle des cours d'eau de tête de bassin versant armoricains en situation de référence, Rapport de stage de Master 2, ONEMA / Université de Rennes 1, 19 pages + Annexes.
- BOUAS G., 2016,** Étude de la biodiversité (Macro-invertébrés et ichtyofaune) des cours d'eau en tête de bassin versant, Rapport de stage de Master 2, ONEMA / Polytech, Tours, 57 pages + Annexes.
- BOULEAU G. & PONT D., 2014.** Les conditions de référence de la directive cadre européenne sur l'eau face à la dynamique des hydrosystèmes et des usages. *Natures Sciences Sociétés*, 2014. 22, 3-14. 14 p.
- BRAVARD J.P., 2003.** Dynamiques à long terme des systèmes écologiques ou de l'Eden impossible à la gestion de la variabilité. In Leveque C. et Van Der Leeuw. (Ed.) : *Quelles natures voulons-nous ?* Elsevier, Paris, p133-139.
- BROOKES A., 1985.** River channelization: traditional engineering methods, *Progress in Physical Geography*, n°9, p 44-73.
- BROOKES A., 1988.** Rivers channelization, Perspectives for environmental management, *Wiley interscience*, 326 p.

- BROSE, U., N.D MARTINEZ & R.J WILLIAMS, 2003.** Estimating species richness : sensitivity to sample coverage and insensitivity to spatial patterns. *Ecology* 84.9 p. 2364 – 2377 (cf p. 34, 35, 70)
- CARLISLE D. & CLEMENTS W., 2003.** (in WOODCOCK & URING, 2007). Growth and secondary production of aquatic insects along a gradient en Zn contamination in Rocky Mountain streams. *Journal of the North American Benthological Society* 22, n°4 p582-597.
- CASTELAIN L., PEETERS A., HALLEUX M., DE LE COURT B., VERNIERS G., 2016.** « *Walphy, un projet expérimental de réhabilitation de cours d'eau : suivis hydromorphologiques et écologiques* », Université de Namur, Belgique. 27 p.
- CHANDESRI A., MENGIN N., MALAVOI J.R., SOUCHON Y., PELLA H., WASSON J.-G., 2008.** « *Système relationnel d'audit de l'hydromorphologie des cours d'eau : principes et méthodes* ». Rapport Cemagref-ONEMA, 64 p.
- CHAO A. & CHIU C-H., 2016.** Species richness : estimation and comparison. Institute of statistics, National Tsing Hua University, Hsin-Chu, Taiwan. 26p.
- CHAVES M.L., J.L. COSTA, P. CHAINHO, M.J. COSTA & N. PRAT, 2006.** Selection and validation of reference sites in small river basins. *Hydrobiologia*. 573, p133-154.
- CHIU, C-H., Y-T WANG., B-A WALTHER & A. CHAO. 2014a.** An improved nonparametric lower bound of species richness via a modified good-turing frequency formula. *Biometrics* 70.3, p. 671 – 682 (cf p. 26, 30, 35)
- CHOUCARD P., 2011.** « *Elaboration d'une méthodologie d'inventaire cartographique et de hiérarchisation des têtes de bassin versant dans le contexte armoricain, Application au bassin versant du Couesnon* ». Université de Rennes 1, 30 p.
- CLARKE A., MAC NALLY R., BOND N., LAKE P.S., 2008.** Macroinvertebrates diversity in headwaters stream : a review, 619, p39-54.
- COLIN M., 2015.** « *Etude de l'hydromorphologie à l'échelle stationnelle des cours d'eau en tête de bassin versant, évaluation de l'impact des travaux de chenalisation* », Rapport de stage Master 2, ONEMA / Université de Rennes 1, 31 pages + Annexes.
- DATRY T., SNELDER T., SAUQUET E., PELLA H., CATALOGNE C., LAMOUREUX N., 2012** « *Typologie des cours d'eau temporaires et cartographie nationale* », ONEMA, 41p.
- DOBSON M., HILDREW A-G., IBBOTSON A., GARTHWAITE J., 1992.** (in HAAPALA, 2003). Enhancing litter retention in streams : do altered hydraulics and habitat area confound field experiments ? *Freshwater Biology* 28 p71-79.
- DREAL LORRAINE, 2012.** Méthode rapide de prélèvement des macro-invertébrés, 18p.
- DUFOUR & PIEGAY, 2006.** Forêts riveraines des cours d'eau et ripisylves : spécificités, fonctions et gestion. *De la forêt à l'eau*, p 339 – 350
- DUFOUR S. & PIEGAY H., 2009.** From the myth of a lost paradise to targeted river restoration : Forget natural references and focus on human benefits. *River. Res. Appl.*, 2014. 25, p568–581.
- FEELEY H.B., WOODS M., BAARS J.R., KELLY-QUINN M., 2012.** Refining a kick sampling strategy for the bioassessment of benthic macroinvertebrates in headwater streams, *Hydrobiologia*, 683, p53-68
- FENNESSY, M.S., JACOBS, A.D. & KENTULA. M.E., 2007.** An evaluation of rapid methods for assessing the ecological condition of wetlands. *Wetlands*, 27, p543-560.
- GAYRAUD S., HEROQUIN E. & PHILIPPE M., 2002.** Le colmatage minéral du lit des cours d'eau : revue bibliographique des mécanismes et des conséquences sur les habitats et les peuplements de macro-invertébrés. *Bulletin Français de la pêche et de la pisciculture* 365/366, p339-355.
- GOB F., BILODEAU C., THOMMERET N., BELLIARD J., ALBERT M-B., TAMISIER V., BAUDOIN J-M. ET KREUTZENBERGER K., 2014.** Un outil de caractérisation hydromorphologique des cours d'eau pour l'application de la DCE en France (CARHYCE), *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, vol. 20 - n° 1, p57-72.
- GOTELLI, N. J. & R. K. COLWELL, 2001.** Quantifying bio- diversity : procedures and pitfalls in the measurement and comparison of species richness. *Ecology Letters* 4.4, p. 379–391
- Guide d'application de la norme T90-733 (2012-03-01).** Qualité de l'eau - Guide d'application de la norme expérimentale XP T90-333 :2009 (prélèvement des macro-invertébrés aquatiques en rivières peu profondes).

- HAAPALA A., MUOTKA T., LAASONEN P., 2003.** Distribution of benthic macroinvertebrates and leaf litter in relation to streambed retentivity : implications for headwater stream restoration, *Boreal Environment Research*, 8, p19-30.
- HARVEY J.W., CONKLIN M.H., KOELSCH R.S., 2003.** Predicting changes in hydrologic retention in an evolving semi-arid alluvial stream. *Advances in Water Resources*, 26, p939- 950.
- HARVEY J.W., WAGNER B.J., 2000.** Quantifying Hydrologic Interactions Between Streams and Their Subsurface Hyporheic Zones. In « *Streams and Groundwaters* », JONES J.A., MULHOLLAND P.J., Academic Press, USA, p3-44.
- HAUER F.R, STANFORD J.A. & LORANG M.S., 2007.** Pattern and process in northern rocky mountain headwaters: ecological linkages in the headwaters of the crown of the continent, *Journal of the American Water Resources Association (JAWRA)*, 43 (1), p104-117.
- HAYOT, 2011.** Sur quels critères entreprendre la reconstitution de ripisylves diversifiées (en âge et en structure) et fonctionnelles sur le long terme ? Rapport de stage, ONEMA, Agro paris tech, 122 pages.
- HOWARTH R.W., BILLEN G., SWANEY D., TOWNSEND A., JAWORSKI N., LAJTHA K., DOWNING J.A., ELMGREN R., CARACO N., JORDAN T., BERENDSE F., FRENEY J., KUDEYAROV V., MURDOCH P., ZHAO-LIANG Z., 1996.** (in NGUYEN VAN, 2012) Regional Nitrogen Budgets and Riverine N & P Fluxes for the Drainages to the North Atlantic Ocean : Natural and Human Influences. *Biogeochemistry*, 35, p75-139.
- HUGHES, J-C HASKINS K. WASSON, E. WATSON, 2011.** Identifying factors that influence expression of eutrophication in a central California estuary. *Marine ecology progress series* 439. p. 31 - 43
- HUGHES, R-M & M. OMERNIK, 1981.** A proposed approach to determining regional patterns in aquatic ecosystems. Acquisition and utilization of aquatic habitat inventory information. American fisheries society, Western division, Bethesda, Maryland. p. 92 – 102.
- HYNES H.B.N., 1970.** The ecology of running waters. Liverpool University Press, Liverpool. 555 p.
- JAN A., 2013.** « *Etude du fonctionnement hydromorphologique de référence des cours d'eau en tête de bassin versant sur le Massif Armoricaïn* », Rapport de stage de Master 2, ONEMA / Université de Rennes 1, 40 p.
- JANISCH J.E., FOSTER A.D., EHINGER W.J., 2011.** Characteristics of small headwater wetlands in second-growth forests of Washington, USA. *Forest Ecology and Management*, 261, p1265-1274.
- KIBICHII, S., J.-R. BAARS & M. KELLY-QUINN, 2009.** Optimising sample volume and replicates using the Bou-Rouch method for the rapid assessment of hyporheic fauna. *Marine & Freshwater Research* 60: 83–96.
- LAMOUREUX N., PELLA H., VANDERBECQ A., SAUQUET E., LEJOT J., 2010.** Estimkart 2.0 : Une plate-forme de modèles écohydrologiques pour contribuer à la gestion des cours d'eau à l'échelle des bassins français. Version provisoire. Cemagref - Agence de l'Eau Rhône-Méditerranée-Corse-Onema, 45 p.
- LANE E., 1955.** The importance of Fluvial Morphology in hydrolic Engineering. Proceeding of the American Society of Civil Engineers, *Journal of the Hydraulics Division* 81, paper n°745.
- LE BIHAN M., 2009.** L'enterrement des cours d'eau en tête de bassin en Moselle (57)., Université Paul Verlaine de Metz, 46 p.
- Legifrance.gouv.fr** (consulté le 5/03/2017)
- LIFE 2004 – 2009.** Etude technique pour la préservation des ruisseaux. *Ruisseaux de têtes de bassin et faune patrimoniale associée*. 84 p.
- LEONARD. A., ZEGEL. P., AUGU. H., KREUTZENBERGER. K, 2013.** Référentiel des Obstacles à l'Écoulement, *Descriptif du contenu de la version simplifiée, Version 5.0.* Guide technique ONEMA, 33 p.
- MALAVOI J.R. & BRAVARD J.P., 2010.** « *Eléments d'hydromorphologie fluviale* », ONEMA, 224 p.
- MACKEY, A. P., D. A. COOLING & A. D. BERRIE, 1984.** An evaluation of sampling strategies for qualitative surveys of macroinvertebrates in rivers, using pond-nets. *Journal of Applied Ecology* 21: 515–534.
- MARCON. E, 2015.** Mesures de la biodiversité. Master. Kourou, France. 2015
- MARIDET, L., 1995.** (in Oraison, 2011). Rôle des formations végétales riveraines. Recommandations pour une gestion régionalisée. Rapport final, Cemagref BEA/LH Q, Ministère de l'Environnement, Direction de l'Eau, SDMAP PARIS, 69 p.

- MATHIEU, 2010**, Quels pré-requis pour la restauration des cours d'eau enterrés en tête de bassin ? Rapport de stage, ONEMA/Université de Rennes 1, 36 pages.
- MC CARTNEY M.P., C. NEAL, M. NEAL, 1998**. Use of deuterium to understand runoff generation in headwaters catchment containing a dambo. *Hydrology and Earth System Sciences* **2**, p65-76
- MC CANDLESS, T.L. & R.A. EVERETT, 2002**. Maryland stream survey: Bankfull discharge and channel characteristics in the Piedmont hydrologic region. U.S. Fish and Wildlife Service, Annapolis, MD. CBFO-S02-02. 41 pp.
- MCINTOSH. A-R & TOWNSEND. C-R, 1996**. Interactions between fish, grazing invertebrates and algae in a New Zealand stream : a trophic cascade mediated by fish-induced changes to grazer behavior ? *Oecologia* **108** : 174 – 181
- MEYER J.L. & WALLACE J.B., 2001**. Lost Linkages and Lotic Ecology: Rediscovering Small Streams. In « *Ecology: Achievement and Challenge* », PRESS M., HUNTLY N., LEVIN S., Cambridge University Press, Royaume-Uni, p295-317.
- MEYER J.L., STRAYER D.L., WALLACE J.B., EGGERT S.L., HELFMAN G.S, LEONARD N.E., 2007**. The contribution of headwaters streams to biodiversity in river networks. *Journal of the American water resources association (JAWRA)*, **43**, p86-103.
- MINSHALL G.W., 1984**. (in GAYRAUD, 2002). Aquatic insect-substratum relationships. In : Ecology of aquatic insects. RESH V.M., ROSENBERG D.M. (Eds.), p358-400.
- MONDY, C. P., VILLENEUVE, B., ARCHAIMBAULT, V. & USSEGLIO-POLATERA, P., 2012**. A new macroinvertebrate-based multimetric index (I2M2) to evaluate ecological quality of French wadeable streams fulfilling the WFD demands : A taxonomical and trait approach. *Ecological Indicators*, **18**, p452-467.
- MONTGOMERY D.R., B.D. COLLINS, J.M. BUFFINGTON, T.B. ABBE, 2003**. Geomorphic Effects of Wood in Rivers. *American Fisheries Society Symposium*, **37**, p21-47.
- MULHOLLAND P.J., H.M. VALETT, J.R. WEBSTER, S.A. THOMAS, L.W. COOPER, S.K. HAMILTON, B.J. PETERSON, 2004**. Stream Denitrification and Total Nitrate Uptake Rates Measured Using a Field 15N Tracer Addition Approach. *Limnology and Oceanography*, **49**, p809-820.
- NEWCOMBE C.P., MACDONALD D.D., 1991**. (in GAYRAUD, 2002). Effects of suspended sediments on aquatic ecosystems. N. Am. J. Fish. Manage, **11**, p72-82.
- NEWSON M.D. & LARGE A.R.G, 2006**. 'Natural' rivers, 'hydromorphologic quality' and river restoration : a challenging agenda for applied fluvial geomorphology. *Earth Surface Processes and Landforms* **31**, p1606-1624.
- NGUYEN VAN R., 2012**, « *Les altérations physiques en têtes de bassin versant sur les régions Bretagne-Pays de la Loire, A la recherche d'« aqua incognita* » », Rapport de stage, ONEMA DIR2/ UNIVERSITE PARIS DIDEROT, 97pages.
- OERTLI, B., D. A. Joye, E. CASTELLA, R. JUGE, A. LEHMANN & J.B. LACHAVANNE, 2005**. A standardized method for sampling and assessing the biodiversity in ponds. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems* **15**: 665–679.
- OFEV, 2009** : Réseau hydrographique: ordre des cours d'eau pour le réseau hydrographique numérique au 1/25 000 de la Suisse [en ligne], disponible sur <http://www.bafu.admin.ch/hydrologie/01835/02118/02120/index.html?lang=fr> (in NGUYEN VAN, 2012)
- ONEMA, 2015**, Têtes de Bassin - Comment concilier les enjeux sur ces territoires hors du commun? Paris, Espace Saint Martin les 4 et 5 Mars 2015, ONEMA
- ORAISON F., SOUCHON Y., LOOY K.V., 2011**, Restaurer l'hydromorphologie des cours d'eau et mieux maîtriser les nutriments : une voie commune ?, Synthèse bibliographique, ONEMA/CEMAGREF, 34 pages.
- PAIMPONT., 1994**. (in BOUAS, 2016). La Dérive des macro-invertébrés aquatiques, Exemple de *Chaoborus flavicans*, p1-28.
- PALMER M.A., BERNHARDT E.S., ALLAN J.D., LAKE P.S., ALEXANDER G., BROOKS S., CARR J., CLAYTON S., DAHM C., FOLLSTAD SHAH J., GALAT D.J., GLOSS S., GOODWIN P., HART D.H., HASSETT B., JENKINSON R., KONDOLF G.M., LAVE R., MEYER J.L., O'DONNELL T.K., PAGANO L., SRIVASTAVA P., SUDDUTH E., 2005**. Standards for ecologically successful river restoration. *Journal of Applied Ecology* **42**, p 208–217.
- PARC NATUREL REGIONAL DU MORVAN, 2008**. Analyse des peuplements de macro-invertébrés benthiques sur les stations à Moules perlières, 108p ; (Méthode MAG 20).

- PELLA H., LEJOT J., LAMOUREUX N., SNELDER T., 2012.** Le réseau hydrographique théorique (RHT) français et ses attributs environnementaux. *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, 3, p317-336.
- PETERMANN, 1996.** Biodiversity in forest ecosystems, *Forest Ecology and Management*.
- PETIT F., HALLOT E., HOUBRECHTS G., MOLS J., 2005.** Evaluation des puissances spécifiques des rivières de moyenne et de haute Belgique, *Bulletin de la Société Géographique de Liège*, 46, p37-50.
- RAVEN P.J., HOLMES N., CHARRIER P., DAWSON F., NAURA M. & BOON P.J., 2002.** (in GOB et al., 2014) Towards a Harmonized Assessment of Rivers in Europe: a Qualitative Comparison of Three Survey Methods. *Aquatic Conservation : Marine and Freshwater Ecosystems*, n°12, p405-424.
- RAVEN P.J., HOLMES N.T.H., FOX P.A., DAWSON F.H., EVERARD M., FOZZARD I.R., ROUEN K.J., 1998.** (in GOB et al., 2014) « *River Habitat Quality: The Physical Character of Rivers and Streams in the UK and the Isle of Man* ». Environment Agency: Bristol, 86 pages.
- RENARD J., 2002.** « *Les mutations des campagnes - Paysages et structures agraires dans le monde* », Armand Colin, 221 pages.
- RHEINHARDT R.D., M.C. RHEINHARDT, M.M. BRINSON & K.E. FASER Jr, 1999.** Application of Reference Data for Assessing and Restoring Headwater Ecosystems. *Restoration Ecology*. 7 (3), p241- 251.
- RINALDI M., BELLETTI B., VAN DE BUND W, BERTOLI W., GURNELL A., BUIJSE T., MOSSELMAN E., 2013a.** (in GOB et al., 2014) « *Review on ecohydromorphological methods* ». Deliverable D1.1, REstoring rivers for effective catchment Management, 202 p.
- ROUSSEL J.M. & BARDONNET A., 2002,** Synthèse bibliographique – Habitat de la truite commune (*Salmo trutta* L.) pendant la période juvénile en ruisseau : préférences, mouvements, variations journalières et saisonnières, *Bulletin Français de Pêche Piscicole*, 365/366, 435-454.
- SANCHEZ-MONTOYA M.M., M.R. VIDAL-ABARCA, T. PUNTI, J.M. POQUET, N. PRAT, M. RIERADEVALL, J. ALBA-TERCEDOR, C. ZAMORA-MUNOZ, M. TORO, S. ROBLES, M. ALAVREZ & M.L. SUAREZ, 2009.** Defining criteria to select reference sites in Mediterranean streams. *Hydrobiologia*. 619, p39-54.
- SCHEMA DIRECTEUR D'AMENAGEMENT ET DE GESTION DES EAUX (SDAGE) du bassin Loire-Bretagne 2016 – 2021 (2015)**
- SCHNEIDER, 2007.** Plaidoyer pour une restauration des cordons rivulaires naturels des ruisseaux et ruisselets forestiers. *Forêt wallone*. 86, p43-57.
- SCHULZ R. & LIESS M., 1999.** (in BERENZEN et al., 2005). Validity and ecological relevance of an active in situ bioassay using *Gammarus pulex* and *Limniphilus lunatus*. *Environmental toxicology and chemistry*. Vol 18, n°10, p 2243-2250.
- SCHUMM S.A., 1956.** Evolution of drainage systems and slopes in badlands at Perth Amboy, New Jersey. *Bulletin of the Geological Society of America*, 67, p597-646.
- SHREVE R.W., 1969.** Stream lengths and basin areas in topologically random channel networks. *Journal of Geology*, 77, p397-414.
- SMILEY P.C. Jr., DIBBLE E.D., SCHOENHOLTZ S.H., 2005.** (in NGUYEN VAN, 2012) Fishes of first order streams in north-central Mississippi. *Southeastern Naturalist*, 4, p219-236.
- STODDARD J.L., D.P. LARSE, C.P. HAWKINS, R.K. JONSON & R.H. NORRIS, 2006.** Setting expectations for the ecological conditions of streams : the concept of reference condition. *Ecological Applications*. 16, p1267-1276.
- STRAHLER A.N., 1957,** Quantitative analysis of watershed geomorphology, *American Geophysical Union Transaction* 38, p913-920.
- SZOSZKIEWICZ K., BUFFAGNI A., DAVY-BOWKER J., LESNY J., CHOJNICKI B.H., ZBIERSKA J., STANISZEWSKI R., ZGOLA T., 2006.** Occurrence and variability of River Habitat Survey features across Europe and the consequences for data collection and evaluation. *Hydrobiologia* 566, p267-280.
- THOMAS S.A., VALETT H.M., MULHOLLAND P.J., FELLOWS C.S., WEBSTER J.R., DAHM C.N., PETERSON C.G., 2001.** Nitrogen Retention in Headwater Streams : The Influence of groundwater- Surface Water Exchange. *The Scientific World*, 1, p623-631.
- VALETTE L., CHANDESRISS A., MENGIN N., MALAVOI J.-R., SOUCHON Y., WASSON J.-G., 2008.** « *Système Relationnel d'Audit de l'Hydromorphologie des Cours d'Eau SYRAH CE - Principes et méthodes de la sectorisation hydromorphologique* », Lyon, Cemagref, ONEMA.

VANNOTE R.L., MINSHALL G.W., CUMMINS K.W., SEDELL J.R. & CUSHING C.E., 1980. The river continuum concept, *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences*, 37, p103-137.

VILLENEUVE B., 2016. Modèles multi-stress et multi-échelles de l'état écologique : vers une analyse du risque d'altération des cours d'eau et des bassins versants. Ecologie, Environnement. Université de Lorraine. 364p. <NNT : 2016LORR0229>. <tel-01496899>.

WALLACE J.B., EGGERT S.L., MEYER J.L. & WEBSTER J.R., 1999. Effects of resource limitation on a detrital-based ecosystem, *Ecological Monographs*, 69, p409-442.

WALLIN M., T. WIEDERHOLM & R.K. JOHNSON, 2003. Guidance on establishing reference conditions and ecological status class boundaries for inland surface waters. Final Report to the European Commission from CIS Working Group 2.3 – REFCOND.

WASSON J.G., MALAVOI J.R., MARIDET L., SOUCHON Y. & PAULIN L., 1995. Impacts écologiques de la chenalisation des rivières, BEA-LHQ, Ministère de l'environnement, DE-Sdmap, Rapport final n°DE 30/93,168 p.

WEBSTER J.R., WALLACE J.B., BENFIELD E.F., 1995. Organic Processes in Streams of the Eastern United States, *River and Stream Ecosystems*, (eds.) C. E. Cushing, K. W. Cummins, G. W. Minshall. Elsevier, Amsterdam, 117-187.

WHITEHURST, 1991. (in BOUAS, 2016). The effects of sampling techniques on the *Gammarus* : *Asellus* ratio. *Water research*. Vol 25, n°6, p745-748.

WOODCOCK T., HURYN A.D., 2007. (in BOUAS, 2016). The response of macroinvertebrate production to a pollution gradient in a headwater stream, *Freshwater Ecology*, 52, p177-196.









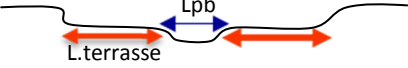
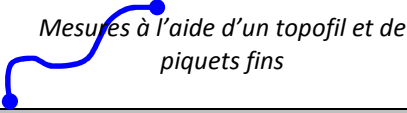
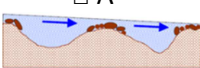
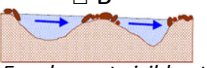
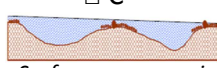
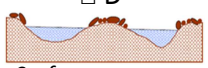

WYZGA B., ZAWIEJSKA J., RADECKI-PAWLIK A., HAJDUKIEWICZ H., 2012. (in GOB et al., 2014) Environmental change, hydromorphological reference conditions and the restoration of Polish Carpathian rivers. *Earth Surface Processes and Landforms* 37, p1213-1226.

YATES A.G. & R.C. BAILEY, 2009. (in JAN, 2013) Selecting objectively defined reference sites for stream bioassessment programs. *Environ Monit Assess*. DOI 10.1007/s10661-009-1221-1

ANNEXES

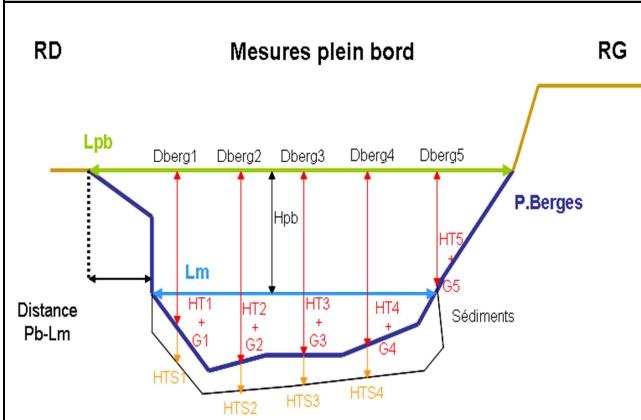
ANNEXE 1

Protocole de caractérisation de l'hydromorphologie des cours d'eau en tête de bassin versant

Protocole terrain			
1 – Données générales			Code station :
Date :	Observateurs :		Heure de début :
Commune :	Lieu-dit :	Toponyme :	Heure de fin :
Météo :	<input type="checkbox"/> 	<input type="checkbox"/> 	<input type="checkbox"/> 
2 – Caractéristiques du tronçon (section de la source à la confluence)			
Mesures GPS		N (WGS84)	W (WGS84)
Amont (Source)			
Aval (Première confluence)			
Distance source – début cours d'eau (m) :		Distance source – station (m) :	
3 – Forme de la vallée le long du tronçon (6 classes)			
<input type="checkbox"/> B1 	<input type="checkbox"/> B3 	<input type="checkbox"/> B5 	
<input type="checkbox"/> B2 	<input type="checkbox"/> B4 	<input type="checkbox"/> B6 	
		Préciser les rives : R... R...	
		Largeur des terrasses : (m) RD : RG :	
B1 : Pas de vallée évidente / B2 : Vallée peu encaissée, pente latérale < 30° du sol au sommet (horizon) / B3 : Vallée prononcée 30° < pente < 80° / B4 : Gorge, pente abrupte type falaise entre 80° et la verticale / B5 : Vallée asymétrique / B6 : Vallée en terrasse.			
4 – Délimitation de la station (Zone d'étude : distance écologique = 30m)			
	GPS	N (WGS84)	W (WGS84)
	Amont		
	Aval		
5 – Niveau d'intermittence des écoulements (5 classes)		Nb jours sans pluie :	
<input type="checkbox"/> A 	<input type="checkbox"/> B 	<input type="checkbox"/> C 	<input type="checkbox"/> D 
<i>Écoulement continu</i>	<i>Écoulement visible et interstitiel</i>	<i>Surface en eau mais pas d'écoulements</i>	<i>Surface en eau que dans les « profonds »</i>
<input type="checkbox"/> E 			
<i>Pas d'eau visible</i>			
6 – Mesure de la sinuosité de l'amont à l'aval (longueur = 30m)			
Distance euclidienne (en m) =			
7 – Mesure de la pente (longueur = 30m)			
Altitude amont		Altitude aval	
Ligne d'eau :	Fond du lit :	Ligne d'eau :	Fond du lit :
8 – Estimation de la rugosité sur la station – Méthode de Cowan			
Degré d'irrégularité des berges :	Variation de la section :	Présence d'obstacles (en % d'occupation de la section mouillée (SM)) :	Quantité de végétation :
<input type="checkbox"/> Lisses	<input type="checkbox"/> Uniforme	<input type="checkbox"/> Négligeable (< 5% SM)	<input type="checkbox"/> Négligeable
<input type="checkbox"/> Irrégularités légères	<input type="checkbox"/> Alternant occasionnellement	<input type="checkbox"/> Faible (5 - 15 % SM)	<input type="checkbox"/> Faible
<input type="checkbox"/> Irrégularités modérées	<input type="checkbox"/> Alternant	<input type="checkbox"/> Sensible (15 - 50 % SM)	<input type="checkbox"/> Moyenne
<input type="checkbox"/> Irrégularités importantes		<input type="checkbox"/> Très marqué (> 50 % SM)	<input type="checkbox"/> Importante
			<input type="checkbox"/> Très importante

9 – Indice d'incision (sur la station)			(Simon, 1989 in Le Bihan, 2014)		
Classes d'évolution morphodynamiques (6 classes)					
□ 1 A l'équilibre	□ 2 Recalibré	□ 3 Incisé	□ 4 Incisé et Elargi	□ 5 Accumulation et élargissement	□ 6 Quasi-équilibre
Remarque : Mouvement du lit					
10 – Segment rectifié (Longueur présentant une artificialisation)					
GPS	N (WGS84)	W (WGS84)	Longueur du segment morphologiquement homogène (m) :		
Amont			Source des données : <input type="checkbox"/> Terrain <input type="checkbox"/> Orthophoto		
Aval			Le segment est-il dans son talweg : <input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non Eloignement au talweg : Différence d'altitude au talweg :		
11 – Types de travaux effectués sur la station			Date des travaux :		
<input type="checkbox"/> Rectification → Sinuosité d'origine d (euclidienne) =30m :		<input type="checkbox"/> Recalibrage	<input type="checkbox"/> Curage	<input type="checkbox"/> Fixation des berges	
<i>Renseigner les parties correspondantes à chaque type de travaux (si les données sont connues)</i>					
12 - Couche d'armure		<input type="checkbox"/> Présence	<input type="checkbox"/> Absence		
Epaisseur (cm)		Cohésion			
<input type="checkbox"/> 0 < <30 <input type="checkbox"/> > 30		<input type="checkbox"/> Faible <input type="checkbox"/> Moyen <input type="checkbox"/> Fort			
<i>Cohésion à évaluer sur un radier par traction horizontale de la main</i> <i>Faible = Pas de résistance / Moyen = Résistance moyenne / Fort = Difficultés à tracter la couche d'armure</i>					
13– Indice de colmatage (sur la station)					
□ 1 Classe]0 - 25%] Les éléments sont posés	□ 2 Classe]25- 50%] Les éléments sont collés par une sous couche de limon	□ 3 Classe]50- 75%] Les éléments sont légèrement enchâssés	□ 4 Classe]75- 90%] Les éléments sont très enchâssés	□ 5 Classe]90- 100%] Les éléments sont recouverts de limon	
Nature du colmatage : <input type="checkbox"/> Organique <input type="checkbox"/> Minéral <input type="checkbox"/> Biologique <input type="checkbox"/> Indéterminée					
14 – Réseau hydraulique annexe sur la station			<input type="checkbox"/> Présence <input type="checkbox"/> Absence		
Rive gauche			Rive droite		
	Nombre	H / Hpb		Nombre	H / Hpb
Drain			Drain		
Fossés ouverts (>30 cm)			Fossés ouverts (>30 cm)		
Rigole (<30cm)			Rigole (<30cm)		
Buse			Buse		
Remarque : H/Hpb = hauteur par rapport à la hauteur plein bord					

15 – Mesures du gabarit du lit à plein bord → Station L = 30m 6 transects, tous les 6 m et 5 mesures par transect



Lpb : Largeur plein bord / **Dberg** : Distance à la berge / **Hpb** : Hauteur plein bord (ligne d'eau – ligne pb) / **Lm** : largeur mouillée / **HT** : Hauteur total à plein bord / **HTS** : Hauteur des sédiments / **P.Berges** : Périmètres des berges

¹Granulométrie (G) Mesure de la **2ème plus grande largeur** : **5 mesures dans le lit mouillé en mm** → Si le sédiment ne peut pas être mesuré préciser la classe granulométriques :
A : Argiles / **L** : Limons / **S** : Sables / **GF** : Gravier fins

Toujours débiter les relevés par la rive avec le débordement le plus bas | **Cases à utiliser lors de suivis de restauration → méthode des points d'inflexion**

5 mesures tous les 1/6 de la largeur plein bord (Lpb)

	Débordement le plus bas : <input type="checkbox"/> RG <input type="checkbox"/> RD	D _{berg}	D _{berg} 1	D _{berg} 2	D _{berg} 3	D _{berg} 4	D _{berg} 5	D _{berg} 6	D _{berg} 7	D _{berg} 8	D _{berg} 9
			HT	HTS	Heau	G ¹ (mm)					
Aval 1		D _{berg}									
	Lpb : Hpb : P.Berges : Faciès :	HT HTS									
	Distance pb – Lm : Lm :	Heau									
	Sous – berges : <input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non	G ¹ (mm)									
2		D _{berg}									
	Lpb : Hpb : P.Berges : Faciès :	HT HTS									
	Distance pb – Lm : Lm :	Heau									
	Sous – berges : <input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non	G ¹ (mm)									
3		D _{berg}									
	Lpb : Hpb : P.Berges : Faciès :	HT HTS									
	Distance pb – Lm : Lm :	Heau									
	Sous – berges : <input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non	G ¹ (mm)									
4		D _{berg}									
	Lpb : Hpb : P.Berges : Faciès :	HT HTS									
	Distance pb – Lm : Lm :	Heau									
	Sous – berges : <input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non	G ¹ (mm)									
5		D _{berg}									
	Lpb : Hpb : P.Berges : Faciès :	HT HTS									
	Distance pb – Lm : Lm :	Heau									
	Sous – berges : <input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non	G ¹ (mm)									
6 Amont		D _{berg}									
	Lpb : Hpb : P.Berges : Faciès :	HT HTS									
	Distance pb – Lm : Lm :	Heau									
	Sous – berges : <input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non	G ¹ (mm)									

	Si encaissement (en m)		Si affleurement			
	RG	RD	RG		RD	
1			<input type="checkbox"/> Argile	<input type="checkbox"/> Roche mère	<input type="checkbox"/> Argile	<input type="checkbox"/> Roche mère
2			<input type="checkbox"/> Argile	<input type="checkbox"/> Roche mère	<input type="checkbox"/> Argile	<input type="checkbox"/> Roche mère
3			<input type="checkbox"/> Argile	<input type="checkbox"/> Roche mère	<input type="checkbox"/> Argile	<input type="checkbox"/> Roche mère
4			<input type="checkbox"/> Argile	<input type="checkbox"/> Roche mère	<input type="checkbox"/> Argile	<input type="checkbox"/> Roche mère

16 – Mesure du débit (Débitmètre acoustique à effet Doppler (ADV) à privilégier si à disposition)

<p align="center">Mesures du lit mouillé</p> <p align="center">5 mesures tous les 1/6 de la largeur mouillée (Lm)</p>	<p align="center">Mesures obligatoire d'une section mouillée (Sauf si mesure au débitmètre à effet Doppler)</p>																						
	<table border="1"> <tr> <td></td> <td>D_{berg1} (RD)</td> <td>D_{berg2}</td> <td>D_{berg3}</td> <td>D_{berg4}</td> <td>D_{berg5} (RG)</td> </tr> <tr> <td>D_{berg} = (cm)</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>H_m = (cm)</td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> <td></td> </tr> </table>		D _{berg1} (RD)	D _{berg2}	D _{berg3}	D _{berg4}	D _{berg5} (RG)	D _{berg} = (cm)						H _m = (cm)									
	D _{berg1} (RD)	D _{berg2}	D _{berg3}	D _{berg4}	D _{berg5} (RG)																		
D _{berg} = (cm)																							
H _m = (cm)																							
<p>Lm (cm) =</p>		<p>Pm (cm) =</p>																					

Lm = Largeur lit mouillé ; V = Vitesse (m/s) ; Pm = Périmètre section mouillée ; D_{berg} = Distance berge ; Hm = Hauteur d'eau ; Q = Débit (L/s)

<p align="center">Courantomètre mécanique ou électromagnétique</p> <ul style="list-style-type: none"> - Si le tirant est trop faible (<20 cm) : 1 point de mesure par verticale à 0.6h ou 2 points à 0.2h et à 0.8h - 5 verticales pour une section hétérogène, seulement 3 si la section est homogène (D_{berg1}, D_{berg3} et D_{berg5}) 						<p align="center">Mesures au débitmètre acoustique à effet Doppler</p>						
	D _{berg1} (RD)	D _{berg2}	D _{berg3}	D _{berg4}	D _{berg5} (RG)	Lm (m) =	P _{moy} (m) =	Section (m ²) =				
						K =	V _{moy} (m/s) =		Q (m ³ /s) =			
D _{berg} = (cm)						<p align="center">Méthode dite « du bouchon » (T(s) = TEMPS en seconde)</p>						
H _m = (mm)						<p>Sur une distance de :</p>		T ₁ (s)	T ₂ (s)	T ₃ (s)	T ₄ (s)	T ₅ (s)
h1 (mm)												
h2 (mm)						<p align="center">Méthode volumétrique (du seau)</p>						
h3 (mm)						<p>Volume du seau utilisé :</p>	Hauteur :					
V1 (m/s) =							Rayon :					
V2 (m/s) =						<p>Mesures :</p>	T ₁ (s)	T ₂ (s)	T ₃ (s)	T ₄ (s)	T ₅ (s)	
V3 (m/s) =												

17 – Granulométrie (Wolman sur un radier ; 50 prélèvements de la 2^{ème} plus grande largeur de l'élément - mm)

20 – Occupation du sol dans la bande rivulaire (15m par rive)

Rive gauche					Rive droite				
<input type="checkbox"/> Culture	<input type="checkbox"/> Prairie	<input type="checkbox"/> Forêt	<input type="checkbox"/> Urbain	<input type="checkbox"/> ZH	<input type="checkbox"/> Culture	<input type="checkbox"/> Prairie	<input type="checkbox"/> Forêt	<input type="checkbox"/> Urbain	<input type="checkbox"/> ZH
<input type="checkbox"/> Landes	<input type="checkbox"/> Autres	<input type="checkbox"/> Bande enherbée			<input type="checkbox"/> Landes	<input type="checkbox"/> Autres	<input type="checkbox"/> Bande enherbée		

Remarques :

NB : Préciser pour chaque rive s'il y a présence d'une ZNT (Zone non traitée)

21 - Evaluation des zones humides sur la station Présence Absence ZH remblayée

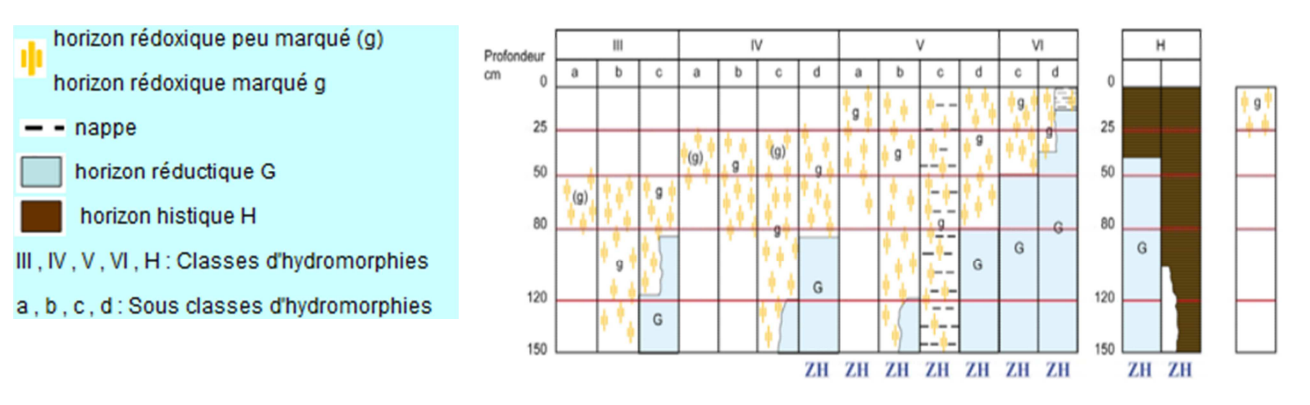
21A – Evaluation floristique

N° ¹	Rive	Code CORINE biotope niveau 3 ²	Espèces Végétales indicatrices		Recouvrement par strate ³	
1	<input type="checkbox"/> RD <input type="checkbox"/> RG		Sp I		Muscinale :	Herbacée :
			Sp II		Arbustives :	Arborée :
2	<input type="checkbox"/> RD <input type="checkbox"/> RG		Sp I		Muscinale :	Herbacée :
			Sp II		Arbustives :	Arborée :
3	<input type="checkbox"/> RD <input type="checkbox"/> RG		Sp I		Muscinale :	Herbacée :
			Sp II		Arbustives :	Arborée :
4	<input type="checkbox"/> RD <input type="checkbox"/> RG		Sp I		Muscinale :	Herbacée :
			Sp II		Arbustives :	Arborée :

Remarques sur les habitats observés :

¹: Par ordre décroissant de recouvrement estimé
²: Typologie CORINE comportant 3 chiffres (ex : 44.9) ; **Sp I** = espèce indicatrice principale et **Sp II** = espèce indicatrice secondaire
³: Strate herbacée < 2 m ≤ strate arbustive < 7 m ≤ strate arborée
Recouvrement de l'ensemble de l'appareil végétatif au niveau de la cime pour chaque strate.
Classe de recouvrement : r = R ≤ 1% ; 1 = 1 < R < 5% ; 2 = 5 ≤ R < 25% ; 3 = 25 ≤ R < 50% ; 4 = 50 ≤ R < 75% ; 5 = R ≥ 75%

21B – Evaluation pédologique (MEEM, 2013)



Rive droite	Rive gauche
Classe et sous-classe :	Classe et sous-classe :

Remarque :

ANNEXE 2

**Protocole de caractérisation de la
biologie (macro-invertébrés et
ichtyofaune) des cours d'eau en tête
de bassin versant**

Fiche d'échantillonnage macro-invertébrés

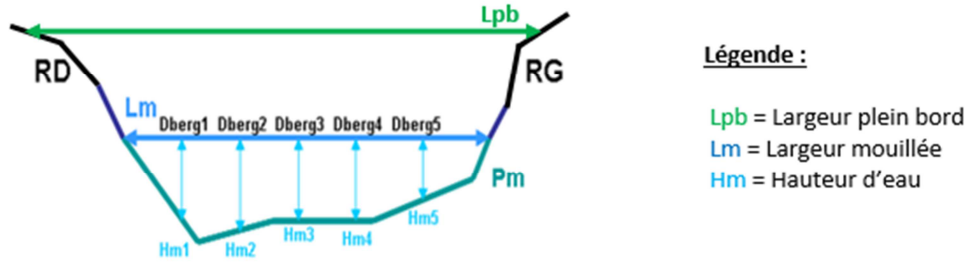
Date : Station : Nom du cours d'eau : Début/fin Mesures + identification : Début/fin des prélèvements :	Coordonnées GPS de la station : Amont : X : Y : Aval : X : Y :	pH : O ₂ dissous : Nitrates : Largeur plein bord : Superficie mouillée :	Conductivité : Température : Autres : Largeur mouillée : <div style="text-align: right;">(Unité : m)</div>
---	---	---	---

	Substrats		Zone de radier/courant		Zone de mouille/sans courant		Aucune distinction de faciès	
	Habitabilité	Recouvrement ¹	Présence / Absence	Prélèvements	Présence / Absence	Prélèvements	Présence / Absence	Prélèvements
Prélèvement 1 à 5	11 : Bryophytes							
	10 : Hydrophytes							
	9 : Litière, Branchages							
	8 : Racines							
	7 : Pierres, galets (25-250 mm)							
Prélèvement 6	6 : Blocs (>250 mm)							
	5 : Granulats (2.5-25mm)							
	4 : Hélophytes							
	3 : Vases							
	2 : Sables (<2 mm) et limons							
	1 : Algues							
	0 : Dalles, argiles							

¹ *Classes de recouvrement des substrats : P = Présence ; PF = Présence faible (<1%) ; PNE = Présence non échantillonnable ; A = Absence*

Remarques :

Fiche échantillonnage piscicole et éléments d'hydromorphologie

Géométrie du lit									Couche d'armure																																																														
 <p style="text-align: center;">Légende : Lpb = Largeur plein bord Lm = Largeur mouillée Hm = Hauteur d'eau</p>									Epaisseur (cm)		Cohésion																																																												
									<input type="checkbox"/> Absente <input type="checkbox"/> 0 < < 30 <input type="checkbox"/> > 30		<input type="checkbox"/> Faible <input type="checkbox"/> Moyen <input type="checkbox"/> Fort																																																												
Cohésion à évaluer sur un radier par traction horizontale de la main Faible = Pas de résistance / Moyen = Résistance moyenne / Fort = Difficultés à tracter la couche d'armure									<p>Remarques :</p>																																																														
<table border="1" style="width: 100%; border-collapse: collapse; text-align: center;"> <thead> <tr> <th>N° T</th> <th>Lpb</th> <th>Lm</th> <th>Hm1</th> <th>Hm2</th> <th>Hm3</th> <th>Hm4</th> <th>Hm5</th> <th>Hmoy</th> </tr> </thead> <tbody> <tr><td>1</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>2</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>3</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>4</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>5</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> <tr><td>6</td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td><td></td></tr> </tbody> </table> <p>La hauteur d'eau (Hm) est mesurée tous les 1/6^{ème} du transect</p> <p>Superficie mouillée =</p>												N° T	Lpb	Lm	Hm1	Hm2	Hm3	Hm4	Hm5	Hmoy	1									2									3									4									5									6					
N° T	Lpb	Lm	Hm1	Hm2	Hm3	Hm4	Hm5	Hmoy																																																															
1																																																																							
2																																																																							
3																																																																							
4																																																																							
5																																																																							
6																																																																							

Relevé piscicole															
Individu	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
TRF															
LOF															
CHA															
LPP															

TRF = Truite fario ; LOF = Loche franche ; CHA = Chabot ; LPP = Lamproie planaire
La longueur à la fourche des individus est relevée ; unité : mm

ANNEXE 3

**Guide de valeurs seuils pour
l'hydromorphologie de référence des
cours d'eau en tête de bassin versant
(rang de Strahler 1)**

2017

Caractéristiques hydromorphologiques de référence des cours d'eau en tête de bassin versant

Valeurs indicatrices pour les cours d'eau de rang de Strahler 1



© Bossis, 2014

Laura MONDESIR

Amélie VALSANGIACOMO

Agence Française pour la Biodiversité

07/08/2017

AVANT - PROPOS

Ce document a été élaboré à partir de plusieurs études réalisées depuis 2013 sur les cours d'eau de rang 1 en tête de bassin versant (TBV) en situation hydromorphologique de référence sur le territoire de Bretagne – Pays de la Loire (Jan, 2013 ; Bossis, 2014). L'ensemble des données pour chaque variable est issu d'études de terrain et d'études sous SIG (logiciel QGIS). Les données récoltées sur le terrain ont été relevées sur la base d'un protocole de caractérisation de l'hydromorphologie développé spécifiquement pour les petits cours d'eau de rang 1. Ces données sont stockées dans une base de données Access.

Les documents suivants sont consultables et disponibles à ...

- Base de données
- Etats hydromorphologiques de chaque station répertoriée dans la base de données
- Protocole de caractérisation de l'hydromorphologie en TBV (fiche de terrain)
- Guide du protocole

Les valeurs indicatrices proposées dans ce guide proviennent d'analyses statistiques multivariées descriptives : Analyses en Composantes Principales (ACP), Classification Ascendante Hiérarchique (CAH), boîtes à moustache. Elles sont appuyées par des tests non paramétriques de comparaison de moyennes (test de rang) : Test de Wilcoxon-Mann Whitney avec un risque d'erreur à 5% (Valeurs en rouge dans les tableaux 1 à 3).

Ces analyses ont permis de mettre en lumière une forte hétérogénéité des données pour la plupart des variables, de ce fait, seules quelques-unes d'entre elles permettent de discriminer les stations de référence selon 3 groupes.

L'hydromorphologie est caractérisée par 2 types de variables, les variables de contrôle et les variables de réponse (Malavoi & Bravard, 2010) :

- Les variables de contrôle correspondent au débit liquide (Q), au débit solide (Qs), à la pente et à la géométrie de la vallée dépendant du bassin versant, de son histoire géologique et de son climat.
- Les variables de réponse s'expriment à l'échelle du tronçon et sont liées à la géométrie du lit (largeur, profondeur, sinuosité ...), et au profil en long (faciès d'écoulement). L'expression de ces variables résultent de l'adaptation du cours d'eau aux variables de contrôle.

Le document ci-après s'utilise de la façon suivante :

- Une première rubrique fournit les valeurs des variables de contrôle s'exerçant sur les cours d'eau :
 - Débit moyen en m³/s
 - Pente de la vallée (%)
 - Surface du bassin versant en hectare
 - Coefficient de Gravelius (Indice de la forme du bassin versant)
 - Occupation du sol à l'échelle du bassin versant déclinée en 3 sous-variables : pourcentage de surface cultivée, boisée et enherbée).

Les analyses statistiques réalisées ont permis de discriminer 3 groupes selon ces variables, la première étape est de savoir dans quel catégorie le cours d'eau étudié se situe.

- Une seconde rubrique expose les valeurs des variables de réponses discriminées selon 2 groupes. Autrement dit, ces valeurs donnent les dimensions et caractéristiques principales que devraient avoir le cours d'eau après les travaux de restauration.
- Une troisième rubrique fournit des informations générales sur les caractéristiques d'une

N° de groupe	Pente de la vallée (%)	Surface du bassin versant (ha)	% surface cultivée	% surface boisée	% surface enherbée	Coefficient de Gravelius	Débit moyen (m ³ /s)
1	2.7 ± 2.1	46.5 ± 33	34 ± 19	30 ± 13	28 ± 15	1.26 ± 0.1	0.11 ± 0.09
	Min : 0.3 Max : 8.5	Min : 10.1 Max : 147.3	Min : 0 Max : 68	Min : 13 Max : 73	Min : 0 Max : 52	Min : 1.09 Max : 1.53	Min : 0.004 Max : 0.3
2	2.6 ± 1.7	97 ± 60	4 ± 6	84 ± 16	10 ± 12	1.34 ± 0.16	0.27 ± 0.24
	Min : Max : 6.9	Min : 1.88 Max : 202.8	Min : 0 Max : 27	Min : 43 Max : 100	Min : 0 Max : 41	Min : 1.16 Max : 1.76	Min : 0.02 Max : 0.93
3	2.6 ± 1.1	234 ± 91	5 ± 8	60 ± 24	37 ± 19	1.22 ± 0.07	1.69 ± 0.41
	Min : 1.6 Max : 3.8	Min : 171.6 Max : 390.9	Min : 0 Max : 17	Min : 29 Max : 86	Min : 8 Max : 50	Min : 1.12 Max : 1.3	Min : 1.09 Max : 2.22

ripisylve naturelle.

I. Variables de contrôle

Cette rubrique vous aide à caractériser le cours d'eau à restaurer selon les différents groupes détaillés dans le tableau1.

Tableau 16: Valeurs moyennes des variables de contrôles des stations de référence selon les 3 groupes. Valeurs : moyenne ± écart-type

Les valeurs indiquées **en rouge** sont les données permettant de différencier les trois groupes, elles ont été sélectionnées par analyses statistiques (CAH, confirmée par le test de Wilcoxon-Mann-Whitney). Ces valeurs doivent être prises en compte en priorité afin de déterminer le groupe d'appartenance du cours d'eau étudié.

NB : La pente de la vallée et le coefficient de Gravelius sont communiqués à titre indicatif car ces variables ne permettent pas de classer le cours d'eau à restaurer parmi l'un des trois groupes. Les valeurs concernant le débit sont également données à titre indicatif.

Le principe est de déterminer la surface ainsi que l'occupation du sol du bassin versant dans lequel se trouve le cours d'eau à restaurer. Ceci peut être fait simplement à l'aide d'un logiciel SIG type QGIS. Ceci vous donnera le groupe d'appartenance de votre cours d'eau.

Afin d'obtenir un complément d'informations, les stations de référence les plus représentatives des 3 groupes sont précisées ci-dessous :

Groupe 1	Ref_0116	Ref_0074	Ref_0156	Ref_0041	Ref_0127
Groupe 2	Ref_0037	Ref_0038	Ref_0148	Ref_0147	Ref_0105
Groupe 3	Ref_0016	Ref_0032	Ref_0092	Ref_0095	

Les états hydromorphologiques de ces stations de référence peuvent être consultés dans la base de données Access. Contacter Mikaël Le Bihan et Olivier Ledouble de la direction interrégionale de Rennes.

II. Variables de réponses

Cette rubrique donne un aperçu des valeurs des variables de réponses à obtenir à l'issue des travaux de restauration.

Tableau 17 Valeurs moyennes des variables de réponse des stations en situation de référence
Valeurs : moyenne \pm écart-type

N° de groupe	Pente de la ligne d'eau (%)	Sinuosité	Moyenne de largeur plein bord (m)	Ratio de forme (L/P)	D16	D50	D84	Longueur moyenne radier (m)	Longueur totale radier (m)	% radiers
1 et 2	2.7 \pm 1.9	1.19 \pm 0.09	1.5 \pm 0.6	8 \pm 6	7 \pm 8.9	14.2 \pm 15.7	34.3 \pm 46.8	3.3 \pm 5.2	7.1 \pm 7.5	23.8 \pm 24.9
	Min : 0.3 Max : 8.5	Min : 1.02 Max : 1.38	Min : 0.6 Max : 3.7	Min : 2 Max : 31	Min : 0 Max : 45.8	Min : 0 Max : 72.5	Min : 0 Max : 270.8	Min : 0 Max : 30	Min : 0 Max : 30	Min : 0 Max : 100
3	2.7 \pm 1.1	1.21 \pm 0.24	3 \pm 0.7	5 \pm 1	26.8 \pm 8.6	59.4 \pm 22.1	109.5 \pm 54.2	3.4 \pm 1.3	11.3 \pm 6.6	37.8 \pm 21.9
	Min : 1.6 Max : 3.9	Min : 1.02 Max : 1.53	Min : 2.46 Max : 3.72	Min : 4 Max : 6	Min : 19.8 Max : 37.7	Min : 27 Max : 73.5	Min : 35 Max : 159.2	Min : 2.2 Max : 5.2	Min : 6 Max : 20.9	Min : 20 Max : 69.7

Les histogrammes de distribution de chacune des variables pour les groupes 1-2 (figure 1) et 3 (figure 2) sont disponibles en annexe.

III. Ripisylve naturelle

Selon le protocole de caractérisation de l'hydromorphologie des cours d'eau (rang 1) en tête de bassin versant, les données concernant la ripisylve sont relevées sur une station de 30 mètres de longueur (distance écologique) et de 15 mètres de largeur sur chaque rive (figure 1).

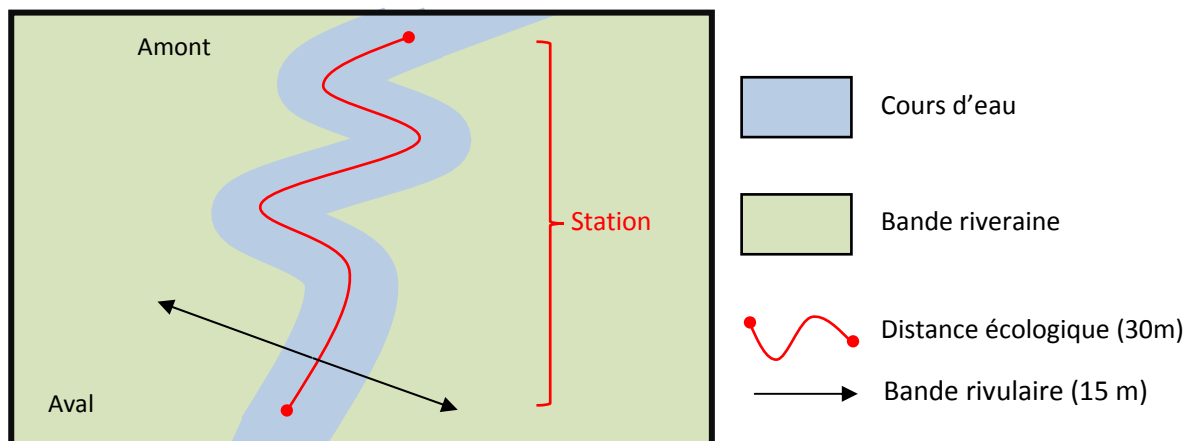


Figure 1 : Schéma représentant les dimensions d'une station

Tableau 18 : Données indicatives sur les ripisylves naturelles
Valeurs : moyenne \pm écart-type

Variabes	Distance moyenne au pied de berge en mètre	Nombre moyen de chevelu racinaire d'arbre par rive	Densité moyenne d'arbres (par rive ; 30x15m)	Nombre moyen d'espèce par station	Nombre moyen d'éléments diversifiant l'écoulement (par m linéaire)
Moyenne \pm écart-type en situation naturelle	1.29 \pm 1.23	3 \pm 3	12 \pm 13	3 \pm 1	0.73 \pm 0.64
Valeurs Min	0	0	0	1	0
Valeurs Max	6	15	76	6	3.2

Essences les plus représentatives des ripisylves naturelles en tête de bassin versant (rang 1) :

- Saule (*sp.*)
- Chêne pédonculé
- Frêne commun
- Charme
- Noisetier
- Aulne glutineux

Ces valeurs sont données à titre indicatives, elles peuvent servir d'appui pour des projets de restauration de la ripisylve.

Annexes

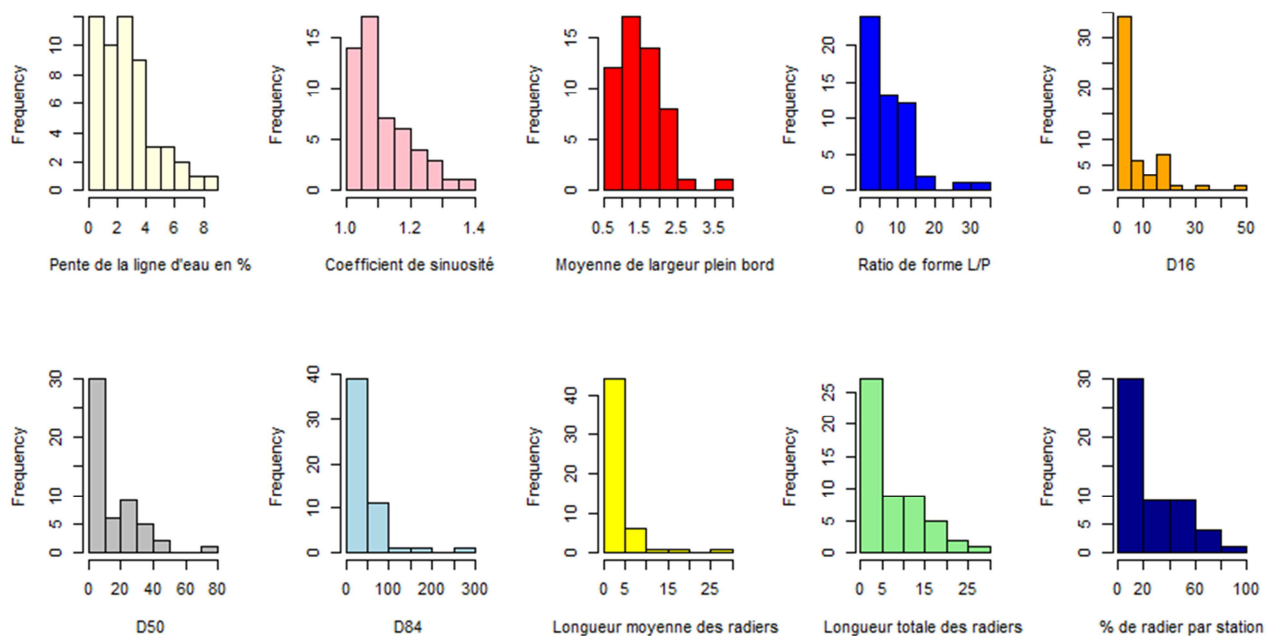


Figure 9: Histogrammes de distribution des variables de réponse pour le groupe 1 et 2

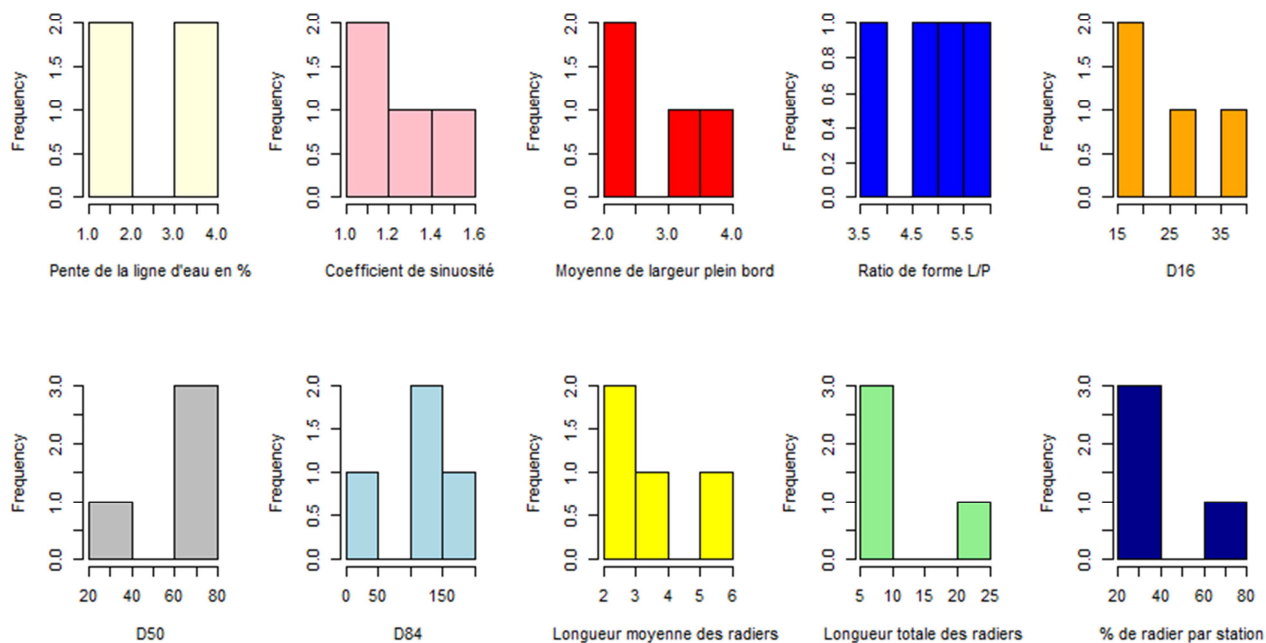


Figure 10 : Histogrammes de distribution des variables de réponse pour le groupe 3

ANNEXE 4 : Note IBGN (stations 2017)

Stations	Richesse spécifique	Classe de variété	Groupe faunistique indicateur	Note	Etat
<i>Le Rubis</i>	46	13	8	21	Très bon
<i>Bazouges la Pérouse</i>	31	9	8	17	Très bon
<i>Camors</i>	45	13	9	22	Très bon
<i>Le Boël amont</i>	9	3	2	5	Médiocre
<i>Le Boël aval</i>	13	5	3	8	Médiocre

ANNEXE 5

**Données brutes : hydromorphologie
(partielle)**

Ref_ sta	pente_ fd%	Sin uo	Moyenne DeLpb	Qpb moy (m3/s)	Sbv (ha)	D16	D50	D84	D16/D84	%Rad/ Station	Coef Gravelius	% bois ee	% enher bee	% cultiv ee	Geol du fond du CE	HER 2
Ref_0002	4.37	1.03	1.7833333333333333	0.6257	42.57	3.84	21,00	50.8	0.0755905511811024	48.33	1.21	100,00	0,00	0,00	roches plutoniques	MA NORD EST
Ref_0003	4.25	1.08	2.325	0.1623	25.34	1,00	3,00	19.08	0.0524109014675054	43.33	1.19	26.59	7.99	61.47	alluvions et colluvions	MA COTES DU NORD
Ref_0005	-9,00	1.03	2.066666666666667	0.1385	69.03	0.0332	0.0332	1.3199999999999999	0.025151515151515153	6.67	1.34	86.82	5.65	6.06	granite	MA COTES DU NORD
Ref_0006	3.61	1.13	1.15	0.038	32.83	0.0332	1,00	3,00	0.01106666666666667	0,00	1.2	16.07	16.1	67.86	schiste	MA COTES DU NORD
Ref_0011	4.53	1.11	1.6	0.2241	80.85	1,00	5,00	21,00	0.0476190476190476	48,00	1.3	25.06	28.74	43.59	alluvions et colluvions	MA OUEST
Ref_0013	3.32	1.19	1.981666666666667	0.2553	147.29	16,00	29,00	62,00	0.258064516129032	12.33	1.29	52.13	47.39	3.58	alluvions et colluvions	MA OUEST
Ref_0016	1.75	1.27	2.46	1.0883	171.64	37.68	63.5	106.56	0.353603603603604	32.67	1.22	58.98	46.89	0,00	alluvions et colluvions	MA OUEST
Ref_0017	4.16	1.02	1.171666666666667	0.3128	100.49	30.68	50,00	89.64	0.342257920571174	53,00	1.16	58,00	27.17	2.55	alluvions et colluvions	MA OUEST
Ref_0020	1,00	1.19	2.4833333333333333	0.044	60.35	1,00	1,00	2,00	0.5	0,00	1.25	13.9	19.71	67.52	alluvions et colluvions	MA OUEST
Ref_0023	3.46	1.19	1.65	0.2038		19,00	27,00	45,00	0.4222222222222222	17.33	1.37	90.97	8.24	0,00	colluvions	MA OUEST
Ref_0027	2.026667	1.04	1.505	0.6778	134.19	12.84	26,00	150.96	0.0850556438791733	16.67	1.18	80.04	12.3	0,00	granite	MA OUEST
Ref_0030	2.833333	1.22	2.096666666666667	0.9282	70.84	45.84	72.5	118.96	0.385339609952925	36.33	1.41	98.4	29.03	0,00	colluvions	MA OUEST
Ref_0032	1.563333	1.53	3.7233333333333333	1.609	390.87	29.68	73.5	159.16	0.186479014827846	69.67	1.11	86.31	49.63	0.34	alluvions et colluvions	MA OUEST
Ref_	2.533	1.	1.725	0.269	167.	22.3	38,	73.28	0.3051310	80,00	1.18	96.0	0,00	0,00	gres	MA NORD

0035	333	13			04	6	00		04366812			7				EST
Ref_0037	2.7	1.02	1.65	0.547	117.11	12,00	38,00	70,00	0.171428571428571	33.33	1.4	99.17	0,00	0,00	alluvions	MA NORD EST
Ref_0038	1.57	1.1	2.46833333333333	0.109	106.22	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1.47	97.09	0.03	0.3	metagranite. orthogneiss	MA EST INTERIEUR
Ref_0041	1,00	1.24	1.29833333333333	0.029	30.83	2,00	3,00	5.16	0.387596899224806	0,00	1.27	47.36	25.29	25.12	alluvions et colluvions	MA OUEST
Ref_0054	0.5	1.19	2.19416666666667	0.0718	55.55	4,00	5,00	12.16	0.328947368421053	0,00	1.24	28.2	31.18	36.73	alluvions et colluvions	MA OUEST
Ref_0058	1.266667	1.05	0.753333333333333	0.0125	13.41	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1.22	39.43	15,00	44.77	alluvions et colluvions	MA OUEST
Ref_0061	2.73	1.05	1.12833333333333	0.0165	1.88	10,00	15,00	25,00	0.4	11.67	1.76	96.46	7.92	0,00	alluvions	MA OUEST
Ref_0065	0.0766667	1.3	1.46666666666667	0.0483	49.44	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0	MA OUEST
Ref_0069	6.433333	1.09	2,00	0.1987	43.07	0.690624	1,00	6,00	0.115104	60,00	1.16	32.11	47.23	8.09	alluvions	MA OUEST
Ref_0070	8.473333	1.02	1.88833333333333	0.1207	10.06	16.84	32,00	61.16	0.275343361674297	100,00	1.53	32.3	33.14	25.39	alluvions	MA OUEST
Ref_0074	1.716667	1.3	0.631666666666667	0.0427	72.78	1,00	1,00	1,00	1,00	0,00	1.29	32.2	18.55	44.16	alluvions	MA OUEST
Ref_0082	0.733333	1.26	1.51666666666667	0.3088	112.46	3,00	4,00	270.8	0.0110782865583456	38.33	1.33	42.99	5.3	15.41	alluvions	MA OUEST
Ref_0092	3.313333	1.02	2.45833333333333	1.849	172.14	19.84	27,00	35,00	0.566857142857143	28.67	1.23	64.42	7.97	17.21	orthogneiss	MA SUD INTERIEUR
Ref_0095	3.786667	1.02	3.38333333333333	2.2243	202.59	20,00	73,05	137.4	0.145560407569141	20,00	1.3	28.82	41.09	1.67	gneiss	MA SUD INTERIEUR
Ref_0102	0.233333	1.06	3,00	0.3057	202.83	2.84	11,00	19.16	0.148225469728601	0,00	1.25	63.97	40.83	3.13	colluvions	MA EST INTERIEUR
Ref_0103	2.756667	1.03	2.36666666666667	0.122	180.36	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1.75	97.48	0,00	0.06	metagranite et orthogneiss	MA EST INTERIEUR

ANNEXE 6

**Données biologie : Richesse cumulée
par prélèvement et valeurs des
estimateurs Chao 1, Jackknife 1 et 2
(se : écart-type)**

station	p1	p2	p3	p4	p5	p6	p7	p8	p9	chao 1	se chao 1	jackk 1	se jackk 1	jackk2
sta 0	12	19	25	27	29	30	33	34		35	2	39	2	37
sta 1	6	10	16	17	17	17	17	18		26	5	28	3	31
sta 2	8	9	13	13	16	16	17	18		26	9	23	3	26
sta 3	15	22	22	23	24	25	26	26	26	27	1	28	1	27
sta 13	8	14	18	18	18	18	19	19	19	21	3	22	2	23
sta 17	14	20	23	23	24	24	24	24	24	29	5	30	4	33
sta 23	4	14	15	16	16	16	16	16	20	73	63	30	7	38
sta 27	5	12	14	14	14	14	16	16	16	18	3	19	2	20
sta 37	11	16	19	23	24	26	26	27	30	52	16	42	5	50
sta 41	18	25	27	27	27	29	29	32	33	40	6	41	4	45
sta 103	7	9	9	9	11	11	13	13		20	10	16	2	19
sta 128	8	11	11	13	13	14	15	15		18	4	13	3	21
sta 142	11	16	19	22	29	31	32	33	33	38	5	40	3	43
sta 201	13	15	22	23	28	28	28	28	28	35	7	35	4	38
sta 203	12	19	19	25	29	29	30	32	32	37	4	39	3	41
sta 204	14	16	20	20	21	21	23	24		29	5	31	4	34
sta 206	2	3	4	6	6	7	7	7		7	1	9	1	8
sta 208	12	14	18	21	26	29	29	29		41	11	37	5	42
sta 212	16	17	18	20	21	24	27	27		34	6	35	4	38
sta 213	13	14	16	17	17	17	17	17	20	28	9	25	3	28
sta 216	6	10	11	15	15	16	17	18		53	43	26	4	32
sta 220	13	14	22	30	31	31	31	31		35	4	39	5	40
sta 225	10	11	15	16	17	17	18	22		85	73	32	5	41

ANNEXE 7

**Données biologie : Pourcentages de la
richesse attendue par prélèvement
pour chaque estimateur (Chao 1,
Jackknife 1 et 2)**

		P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8
sta 0	chao 1	34,3%	54,3%	71,4%	77,1%	82,9%	85,7%	94,3%	97,1%
	Jackk 1	30,8%	48,7%	64,1%	69,2%	74,4%	76,9%	84,6%	87,2%
	Jackk 2	32,4%	51,4%	67,6%	73,0%	78,4%	81,1%	89,2%	91,9%
sta 1	chao 1	23,1%	38,5%	61,5%	65,4%	65,4%	65,4%	65,4%	69,2%
	Jackk 1	21,4%	35,7%	57,1%	60,7%	60,7%	60,7%	60,7%	64,3%
	Jackk 2	19,4%	32,3%	51,6%	54,8%	54,8%	54,8%	54,8%	58,1%
sta 2	chao 1	30,8%	34,6%	50,0%	50,0%	61,5%	61,5%	65,4%	69,2%
	Jackk 1	34,8%	39,1%	56,5%	56,5%	69,6%	69,6%	73,9%	78,3%
	Jackk 2	30,8%	34,6%	50,0%	50,0%	61,5%	61,5%	65,4%	69,2%
sta 3	chao 1	55,6%	81,5%	81,5%	85,2%	88,9%	92,6%	96,3%	96,3%
	Jackk 1	53,6%	78,6%	78,6%	82,1%	85,7%	89,3%	92,9%	92,9%
	Jackk 2	55,6%	81,5%	81,5%	85,2%	88,9%	92,6%	96,3%	96,3%
sta 13	chao 1	38,1%	66,7%	85,7%	85,7%	85,7%	85,7%	90,5%	90,5%
	Jackk 1	36,4%	63,6%	81,8%	81,8%	81,8%	81,8%	86,4%	86,4%
	Jackk 2	34,8%	60,9%	78,3%	78,3%	78,3%	78,3%	82,6%	82,6%
sta 17	chao 1	48,3%	69,0%	79,3%	79,3%	82,8%	82,8%	82,8%	82,8%
	Jackk 1	46,7%	66,7%	76,7%	76,7%	80,0%	80,0%	80,0%	80,0%
	Jackk 2	42,4%	60,6%	69,7%	69,7%	72,7%	72,7%	72,7%	72,7%
sta 23	chao 1	5,5%	19,2%	20,5%	21,9%	21,9%	21,9%	21,9%	21,9%
	Jackk 1	13,3%	46,7%	50,0%	53,3%	53,3%	53,3%	53,3%	53,3%
	Jackk 2	10,5%	36,8%	39,5%	42,1%	42,1%	42,1%	42,1%	42,1%
sta 27	chao 1	27,8%	66,7%	77,8%	77,8%	77,8%	77,8%	88,9%	88,9%
	Jackk 1	26,3%	63,2%	73,7%	73,7%	73,7%	73,7%	84,2%	84,2%
	Jackk 2	25,0%	60,0%	70,0%	70,0%	70,0%	70,0%	80,0%	80,0%
sta 37	chao 1	21,2%	30,8%	36,5%	44,2%	46,2%	50,0%	50,0%	51,9%
	Jackk 1	26,2%	38,1%	45,2%	54,8%	57,1%	61,9%	61,9%	64,3%
	Jackk 2	22,0%	32,0%	38,0%	46,0%	48,0%	52,0%	52,0%	54,0%
sta 41	chao 1	45,0%	62,5%	67,5%	67,5%	67,5%	72,5%	72,5%	80,0%

	Jackk 1	43,9%	61,0%	65,9%	65,9%	65,9%	70,7%	70,7%	78,0%
	Jackk 2	40,0%	55,6%	60,0%	60,0%	60,0%	64,4%	64,4%	71,1%
sta 103	chao 1	35,0%	45,0%	45,0%	45,0%	55,0%	55,0%	65,0%	65,0%
	Jackk 1	43,8%	56,3%	56,3%	56,3%	68,8%	68,8%	81,3%	81,3%
	Jackk 2	36,8%	47,4%	47,4%	47,4%	57,9%	57,9%	68,4%	68,4%
sta 128	chao 1	44,4%	61,1%	61,1%	72,2%	72,2%	77,8%	83,3%	83,3%
	Jackk 1	61,5%	84,6%	84,6%	100,0%	100,0%	107,7%	115,4%	115,4%
	Jackk 2	38,1%	52,4%	52,4%	61,9%	61,9%	66,7%	71,4%	71,4%
sta 142	chao 1	28,9%	42,1%	50,0%	57,9%	76,3%	81,6%	84,2%	86,8%
	Jackk 1	27,5%	40,0%	47,5%	55,0%	72,5%	77,5%	80,0%	82,5%
	Jackk 2	25,6%	37,2%	44,2%	51,2%	67,4%	72,1%	74,4%	76,7%
sta 201	chao 1	37,1%	42,9%	62,9%	65,7%	80,0%	80,0%	80,0%	80,0%
	Jackk 1	37,1%	42,9%	62,9%	65,7%	80,0%	80,0%	80,0%	80,0%
	Jackk 2	34,2%	39,5%	57,9%	60,5%	73,7%	73,7%	73,7%	73,7%
sta 203	chao 1	32,4%	51,4%	51,4%	67,6%	78,4%	78,4%	81,1%	86,5%
	Jackk 1	30,8%	48,7%	48,7%	64,1%	74,4%	74,4%	76,9%	82,1%
	Jackk 2	29,3%	46,3%	46,3%	61,0%	70,7%	70,7%	73,2%	78,0%
sta 204	chao 1	48,3%	55,2%	69,0%	69,0%	72,4%	72,4%	79,3%	82,8%
	Jackk 1	45,2%	51,6%	64,5%	64,5%	67,7%	67,7%	74,2%	77,4%
	Jackk 2	41,2%	47,1%	58,8%	58,8%	61,8%	61,8%	67,6%	70,6%
sta 206	chao 1	28,6%	42,9%	57,1%	85,7%	85,7%	100,0%	100,0%	100,0%
	Jackk 1	22,2%	33,3%	44,4%	66,7%	66,7%	77,8%	77,8%	77,8%
	Jackk 2	25,0%	37,5%	50,0%	75,0%	75,0%	87,5%	87,5%	87,5%
sta 208	chao 1	29,3%	34,1%	43,9%	51,2%	63,4%	70,7%	70,7%	70,7%
	Jackk 1	32,4%	37,8%	48,6%	56,8%	70,3%	78,4%	78,4%	78,4%
	Jackk 2	28,6%	33,3%	42,9%	50,0%	61,9%	69,0%	69,0%	69,0%
sta 212	chao 1	47,1%	50,0%	52,9%	58,8%	61,8%	70,6%	79,4%	79,4%
	Jackk 1	45,7%	48,6%	51,4%	57,1%	60,0%	68,6%	77,1%	77,1%
	Jackk 2	42,1%	44,7%	47,4%	52,6%	55,3%	63,2%	71,1%	71,1%

sta 213	chao 1	46,4%	50,0%	57,1%	60,7%	60,7%	60,7%	60,7%	60,7%
	Jackk 1	52,0%	56,0%	64,0%	68,0%	68,0%	68,0%	68,0%	68,0%
	Jackk 2	46,4%	50,0%	57,1%	60,7%	60,7%	60,7%	60,7%	60,7%
sta 216	chao 1	11,3%	18,9%	20,8%	28,3%	28,3%	30,2%	32,1%	34,0%
	Jackk 1	23,1%	38,5%	42,3%	57,7%	57,7%	61,5%	65,4%	69,2%
	Jackk 2	18,8%	31,3%	34,4%	46,9%	46,9%	50,0%	53,1%	56,3%
sta 220	chao 1	37,1%	40,0%	62,9%	85,7%	88,6%	88,6%	88,6%	88,6%
	Jackk 1	33,3%	35,9%	56,4%	76,9%	79,5%	79,5%	79,5%	79,5%
	Jackk 2	32,5%	35,0%	55,0%	75,0%	77,5%	77,5%	77,5%	77,5%
sta 225	chao 1	11,8%	12,9%	17,6%	18,8%	20,0%	20,0%	21,2%	25,9%
	Jackk 1	31,3%	34,4%	46,9%	50,0%	53,1%	53,1%	56,3%	68,8%
	Jackk 2	24,4%	26,8%	36,6%	39,0%	41,5%	41,5%	43,9%	53,7%



Diplôme : Master 2

Spécialité : Ressources aquatiques et exploitation durable

Spécialisation / option : Gestion des pêches et des écosystèmes continentaux et côtiers

Enseignant référent : Dominique Ombredane

Auteur : Laura MONDESIR

Date de naissance* : 27/07/1993

Nb pages : 78 **Annexes** : 7 (30 pages)

Année de soutenance : 2017

Organisme d'accueil : Agence Française pour la Biodiversité – Direction interrégionale Bretagne – Pays de la Loire

Adresse : 84 rue du Rennes, 35 510 Cesson-Sévigné

Maîtres de stage : Mikaël Le Bihan et Olivier Ledouble

Titre français : Synthèse des connaissances et validation de protocoles pour l'hydromorphologie et la biologie des cours d'eau en tête de bassin versant (Rang de Strahler 1)

Titre anglais : Synthesis of knowledge and validation of protocols for the hydromorphology and biology of watercourses at the head of catchment (Strahler Order 1).

Résumé :

La Directive Cadre sur l'Eau a pour objectif la mise en œuvre du « bon état écologique » des masses d'eau à l'horizon 2027 afin de garantir un usage durable ainsi que l'approvisionnement en eau.

Les cours d'eau de rang de Strahler 1 sont des milieux indispensables au bon fonctionnement des bassins versants. Les connaissances sur ces milieux sont limitées, aucun protocole de caractérisation de l'hydromorphologie et de la biologie spécifique aux têtes de bassin versant n'a été développé à l'échelle nationale. Cette étude a permis la validation de protocoles pour l'étude de ces cours d'eau en Bretagne et Pays de la Loire. Les variables étudiées en hydromorphologie montrent la complexité de ces milieux et la nécessité d'une régionalisation des données. Les résultats de ces analyses ont permis la rédaction d'un guide valeurs seuils destiné à orienter les actions de restauration. L'étude de la biologie (communautés de macro-invertébrés) est centrée sur l'estimation de la richesse spécifique attendue. Le protocole de caractérisation de la biologie mis au point permet l'atteinte d'environ 70% de cette richesse selon différents estimateurs. Enfin, cette étude ouvre des perspectives pour l'enrichissement des connaissances sur ces milieux dans le futur.

Abstract :

The Water Framework Directive aims to implement the "good environmental status" of water bodies by 2027 to ensure sustainable use and water supply.

Streams designated as number 1 by the Strahler order are essential for the proper functioning of watersheds. Knowledge about these environments is limited, and no national protocol has been developed to characterize the hydromorphology and the biology of these watershed heads. The present work has enabled the validation of protocols to study these rivers in Brittany and Pays de la Loire. The complexity of the hydromorphology variables of these typical streams has showed the need for a data regionalisation. The study results led to the drafting of a guide listing the threshold values dedicated to help the rehabilitation of such environments. Regarding biology, specific richness has been estimated by the study of the macro-invertebrate communities living within the river. The protocol chosen during this work enabled to evaluate about 70 % of the river richness. Finally, this study opens up prospects for the enrichment of knowledge about these environments in the future.

Mots-clés : hydromorphologie, macro-invertébrés, protocoles, tête de bassin versant, rang de Strahler 1, restauration

Key Words : hydromorphology, macroinvertebrates, protocols, head of catchment, Strahler Order 1, rehabilitation