



Rapport de stage de fin d'études

# Etude sur les caractéristiques des méandres de cours d'eau sur le territoire Bretagne - Pays de la Loire



Soutenu à Rennes le 12 septembre 2018

Responsable universitaire :

**CRAVE Alain**  
Chargé de recherches \_ Géosciences Rennes

Etudiant :

**PECHARD Matthieu**  
Master 2 GHBV 2017-2018

Tuteur dans l'établissement :

**LE BIHAN Mikaël**  
Technicien supérieur de l'environnement

**BARRY Josselin**  
Technicien supérieur de l'environnement

Organisme d'accueil :

**AFB \_ Direction interrégionale  
Bretagne - Pays de la Loire**  
84 Rue de Rennes  
35510 Cesson - Sévigné



## Remerciements

Pour commencer, je tiens à adresser mes premiers remerciements auprès de tout le personnel de la DIR, m'ayant accueilli et entouré durant ces six derniers mois. La bonne humeur quotidienne de chacun a rendu le travail au bureau toujours agréable. Je remercie l'ensemble de l'équipe administrative composée de Patricia, Martine, Nelly et Pascale pour toutes leurs petites attentions portées au quotidien.

Je remercie également :

Sylvie, Hélène, Morgane, Marie-Andrée, Nathalie, Eric et Bruno pour leur gentillesse de tous les jours et les bons moments partagés pendant les repas.

Bruno pour ses anecdotes racontées chaque midi... La canicule m'emballé !

Laurent et Pierre-Marie, avec lesquels j'ai partagé mes ressentis sur les actualités sportives au quotidien.

Thibault et Philippe pour les anecdotes sur nos parties de pêche respectives.

Florian et Lara, mes compatriotes de stages avec qui j'ai passé de très bons moments !

Alexandra Hubert pour son sens de l'humour et pour avoir pris soin de mon régime alimentaire. Tu as fait preuve de compréhension, de persévérance et de motivation à toute épreuve.

Denis Robert pour m'avoir intégré aux journées de terrains du service « production et valorisation des connaissances », ainsi que pour m'avoir ouvert les yeux sur la réalité des fest-noz.

Olivier Ledouble, sans qui les repas, journées et sorties post travail n'auraient pas été aussi joyeuses.

Et enfin, pour finir en beauté, j'adresse des remerciements appuyés au duo de techniciens supérieurs de l'environnement qui ont co-encadrés ce stage : **Mikael LE BIHAN** et **Josselin BARRY**. Leurs compétences intarissables sur les milieux aquatiques, leur implication et nos échanges, autant sur le plan professionnel que personnel, m'ont permis de réaliser un stage de très bonne qualité. Ça a été un plaisir pour moi de pouvoir travailler à vos côtés.

Merci à toi Jo de m'avoir apporté ton soutien technique avec le logiciel SIG, ainsi que pour les bons moments passés à discuter « navigation » !

Merci à toi Mikaël d'avoir partagé ton bureau avec moi. Tous ces moments mêlant sérieux professionnels et humour parfois subtile (en toute amitié...) me donnaient chaque matin envie de venir au travail. Merci d'avoir répondu à tous mes besoins, ce qui m'a permis de finir ce rapport à la manière d'un canard, c'est-à-dire toujours dans « les temps »...

Je remercie aussi l'ensemble des agents des Services Départementaux que j'ai côtoyé. Sans leurs connaissances du terrain, le travail aurait été bien plus fastidieux. Mention particulière pour Anthony, avec qui j'ai passé d'excellents moments, ainsi que Christine et Stéphane, avec qui j'ai pu partager des parties de pêche en bord de mer (en plus d'être bon pêcheur, il est bon cuisinier !).

Par la même occasion, je remercie les personnes qui ont pu contribuer de près ou de loin à ce rapport. Pour cela, j'adresse des remerciements particuliers auprès de toutes les personnes qui m'ont accompagné durant la phase terrain du stage, ainsi que les différents techniciens rivières ayant su dégager de leur temps pour répondre à mes sollicitations. Parmi eux, je souhaite nommer François Bontemps, ami et actuel chargé de mission à Dinan Agglo, sans qui je ne serai probablement pas arriver jusque-là. Le hasard de notre rencontre et le stage réalisé il y a quelques années à ses côtés ont été les éléments déclencheurs de mon parcours professionnel.

Je tiens également à remercier Alain Crave de l'université de Rennes 1, d'avoir accepté d'être mon tuteur universitaire et de m'avoir reçu plusieurs fois pour discuter de l'étude.

Pour terminer, je tiens à remercier Kyriad, ¼ detaz et Baptiste avec qui j'ai passé la plupart de mes weekends. Et enfin, merci à mes parents et mon frère, dont l'humour sans limites et l'incroyable répartie a rendu très agréable les moments de travail au domicile parental.



## Présentation de l'organisme d'accueil

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

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

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

L'agence est issue du regroupement de l'Agence des Aires Marines Protégées (AAMP), de l'Office National de l'Eau et des Milieux Aquatiques (ONEMA), de l'Atelier Technique des Espaces Naturels (ATEN) et des Parcs Nationaux de France (PNF). Elle est composée de sept directions régionales et trois directions interrégionales. Les services centraux sont localisés à Vincennes (94), à Montpellier (34) et à Brest (29) (cf. carte page suivante).

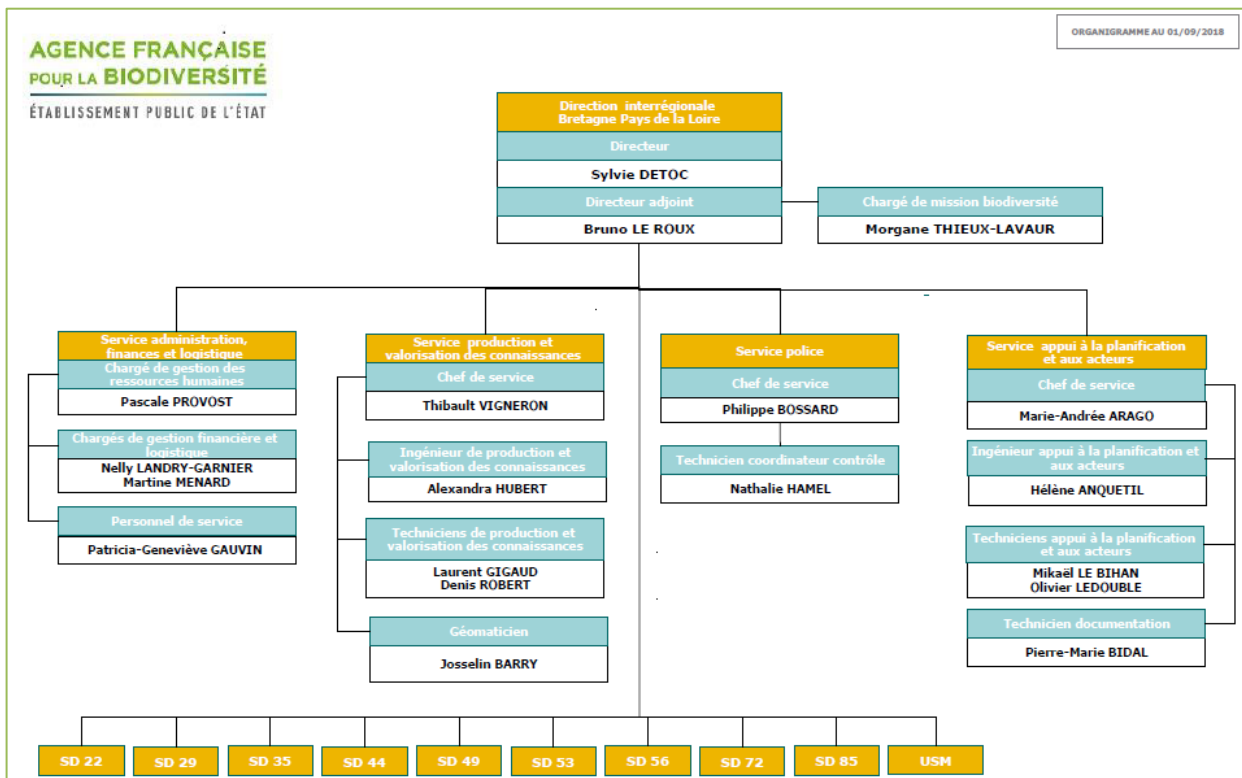
Le stage se déroule au sein de la Direction InterRégionale (DIR) Bretagne - Pays de la Loire (cf. organigramme page suivante), basée à Cesson Sévigné (35). Les missions de la DIR Bretagne - Pays de la Loire (ex Office National des Eaux et des Milieux Aquatiques) s'organisent autour de différents axes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

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

## Carte : Implantation de l'AFB en France métropolitaine



## Organigramme : Présentation de la DIR Bretagne – Pays de la Loire



## Abréviations

**AFB** : Agence Française pour la Biodiversité

**ONEMA** : Office National des Eaux et des Milieux Aquatiques (maintenant rattaché à l'AFB)

**MNT** : Modèle numérique de terrain utilisé sous SIG pour traiter des données relatives à la pente.

**SIG** : Système d'Information Géographique conçu pour recueillir, stocker, traiter, analyser, gérer et présenter tous les types de données spatiales et géographiques.

## Glossaire

**Accrétion** : processus d'accroissement en volume et/ou en superficie d'un espace fluvial, par un processus de sédimentation

**Apport solide** : apports de sédiments à un cours d'eau, provenant du bassin versant amont, du lit majeur (terrasses alluviales) ou bien directement du lit mineur du cours d'eau.

**Erosion régressive / progressive** : processus d'érosion verticale du lit sur un secteur de cours d'eau se manifestant de l'aval vers l'amont (régressive) ou de l'amont vers l'aval (progressive).

**Faciès d'écoulement** : correspond à une section de cours d'eau défini selon une vitesse de courant, une hauteur d'eau, une pente, une granulométrie et un profil géométrique homogène.

**Mouille** : une mouille, parfois appelée fosse, est une partie de cours d'eau caractérisée par une faible pente, une hauteur d'eau supérieure à celle de l'ensemble du lit, et à une faible vitesse d'écoulement. Une mouille est dite « de concavité » lorsqu'elle est présente dans la partie concave d'une boucle de méandre. C'est un faciès d'écoulement lentique.

**Radier** : partie d'un cours d'eau peu profonde à forte pente et à écoulement rapide, généralement au-dessus d'un substrat de cailloux. C'est un faciès d'écoulement lotique.

**Rang de Stralher** : c'est une méthode de classification des réseaux hydrographiques des cours d'eau pour indiquer le niveau de complexité de son réseau d'affluents. Dans cette méthode, deux tronçons de même ordre qui se rejoignent forment un tronçon d'ordre supérieur, tandis qu'un tronçon qui reçoit un tronçon d'ordre inférieur conserve le même ordre.

**Résilience** : la résilience écologique est la capacité d'un écosystème à subir une perturbation, puis à se réorganiser pour retrouver des capacités initiales de structures ou de fonctions présentes avant perturbation.

**Talweg** : correspond à la ligne matérialisant les points les plus bas d'une vallée. Le principe de gravité fait que naturellement, un cours d'eau non contraint s'écoule au sein du talweg de la vallée.

**Tronçon de cours d'eau** : sectorisation et découpage d'un faible linéaire de cours d'eau, basée sur des caractéristiques hydro morphologiquement homogènes.

**Variables morphométriques des méandres** : variables constituant des données mesurables de la morphologie d'un méandre, se référant à l'analyse quantitative de la forme et de la taille du méandre étudié.




## Introduction

Introduite dans la Directive Cadre Européenne de 2000, l'hydromorphologie des cours d'eau est une discipline scientifique qui traite de l'étude des processus physiques régissant la dynamique fluviale, ainsi que des formes qui en résultent (Malavoi & Bravard, 2010). Bien qu'intégrée récemment dans les textes réglementaires, l'hydromorphologie a déjà été largement étudiée auparavant (Leopold & Maddock, 1953 ; Wolman, 1954 ; Strahler, 1957). Dans l'étude de la dynamique fluviale, il est démontré qu'une rivière tend à établir une combinaison dynamiquement stable entre deux types de variables (Schumm, 1977) :

**Les variables de contrôle** intervenant à l'échelle du bassin versant, qui s'imposent à la rivière et contrôlent son évolution physique. Elles sont dépendantes du climat, de la géologie, du relief ou encore de la couverture végétale. Le débit liquide et le débit solide sont, à l'échelle du bassin versant, les variables majeures du contrôle des processus géodynamiques (Malavoi & Bravard, 2010).

**Les variables de réponse** permettent au cours d'eau de s'ajuster aux évolutions des variables de contrôle et s'expriment à l'échelle du tronçon de cours d'eau (Schumm, 1963). Il existe trois types de variables de réponse (Malavoi & Bravard, 2010), définis dans le tableau 1 ci-dessous :

Tableau 1 : Définition des trois variables de réponse d'un cours d'eau

Variable de réponse	Terme anglais	Définition	Schéma type
Tracé en plan	Channel pattern	Tracé géométrique qui représente en vue du dessus la forme prise par le lit du cours d'eau. Il permet d'étudier les formes du cours d'eau selon une vue aérienne.	<p style="text-align: center;"><b>Style fluvial</b></p> 
Profil en long	Long profil	C'est le tracé en coupe d'un cours d'eau dans l'axe amont-aval. Deux types de profil en long sont souvent représentés : le profil en long du fond du lit (réalisé en suivant les points bas du lit mineur) et le profil en long de la ligne d'eau.	<p style="text-align: center;"><b>Pente</b></p> 
Profil en travers	Cross section	C'est le tracé en coupe d'un cours d'eau dans un axe perpendiculaire aux berges. Il permet de visualiser le ratio de forme « largeur plein bord - profondeur du lit »	<p style="text-align: center;"><b>Géométrie du lit</b></p> 

Ainsi, l'étude de la sinuosité des cours d'eau à méandres repose sur la compréhension de la variable de réponse « tracé en plan ».

De nombreux travaux témoignent de l'importance des caractéristiques physiques des cours d'eau à méandres pour façonner les communautés vivantes (Bunn & Arthington, 2002 ; Nilsson & Svedmark, 2002). L'action de l'homme, en modifiant le régime hydrologique des rivières et en altérant leur hydromorphologie, est susceptible d'induire des perturbations importantes sur la biodiversité (Elosegi *et al.*, 2010). L'amélioration de la qualité biologique des cours d'eau visée par la DCE ne peut donc se faire sans considérer le contexte hydromorphologique (Direction de l'eau, 2005).

D'ailleurs, de nombreux cours d'eau du territoire ont fait l'objet de travaux de rectification perturbant leur hydromorphologie (Bardon, 2009). Ces rectifications ont notamment pour conséquences physique la perte des méandres (Malavoi & Adams, 2007).

Dans l'optique d'étudier les principales variables de contrôle et d'ajustement des méandres de cours d'eau, la présente étude repose sur deux axes. Dans un premier temps, ce stage a pour objectif **d'améliorer les connaissances sur les variables caractéristiques du méandrage à l'échelle des régions Bretagne et Pays de la Loire**. Puis, dans un second temps, dans le cadre de projet de reméandrage, cette étude consiste à **apporter des connaissances afin d'être en capacité d'assurer un encadrement technique de précision sur le dimensionnement des travaux de reméandrage**.



# 1. Etat de l'art

## 1.1 Le style fluvial : une variable de réponse

### 1.1.1 Les styles fluviaux majeurs

Le style fluvial représente la manifestation spatiale du fonctionnement hydro-morphologique du cours d'eau (Ioana-Toroimac, 2009) et est considéré comme une des variables de réponse dont dispose un cours d'eau naturel pour s'adapter aux variations des paramètres de contrôle (Malavoi & Bravard, 2010).

Selon les études réalisées sur les styles fluviaux, il est classiquement admis qu'il existe plusieurs types de style fluviaux majeurs, distingués à partir de critères morphologiques, de la multiplicité des chenaux et de la sinuosité (Leopold & Wolman, 1957 ; Amoros & Petts, 1993 ; Bravard & Petit, 1997) :

- Le **style rectiligne** : lit à chenal unique dont la sinuosité est inférieure à 1,05. Il est souvent indicateur d'une intervention anthropique (Malavoi & Bravard, 2010).
- Le **style sinueux à très sinueux** : lit à chenal unique dont la sinuosité varie entre 1,05 et 1,5 (Kleinhans & Van Den Berg, 2011).
- Le **style méandriforme** : lit à chenal unique caractérisé par une sinuosité supérieure à 1,5 (Leopold & Wolman, 1957 ; Brice, 1974 ; Bravard & Petit, 1997).
- Le **style à tresses** : lit à chenaux multiples mais à faible sinuosité des chenaux. Les chenaux sont très dynamiques latéralement et sont séparés par des bancs vifs ou faiblement végétalisés, le tout faisant partie du lit mineur (Beechie *et al.*, 2006 ; Zanoni *et al.*, 2009).
- Le **style anastomosé** : le lit se divise en plusieurs bras, sinueux et étroits, relativement peu dynamiques, séparés par des îles végétalisées dont le niveau topographique est celui de la plaine alluviale. Les anastomoses sont des formes fluviales du lit majeur (Church, 2002).

Il semble important de rappeler que la distinction entre les différents styles fluviaux, leur genèse et leur évolution spatio-temporelle font encore l'objet de recherches scientifiques dans de nombreux pays (Malavoi & Bravard, 2010).

### 1.1.2 Le style fluvial : un système non figé

Sous l'action des débits liquides et solides, le cours d'eau se déplace latéralement dans son lit majeur (Bramard, 2012). Ainsi, le style fluvial peut s'auto-ajuster et tendre vers un nouveau style pour répondre à de nouvelles conditions environnementales (Brewer & Lewin, 1998). Certaines métamorphoses de style fluvial peuvent se produire à l'échelle de quelques décennies (cf. figure 1) (Malavoi & Bravard, 2010).

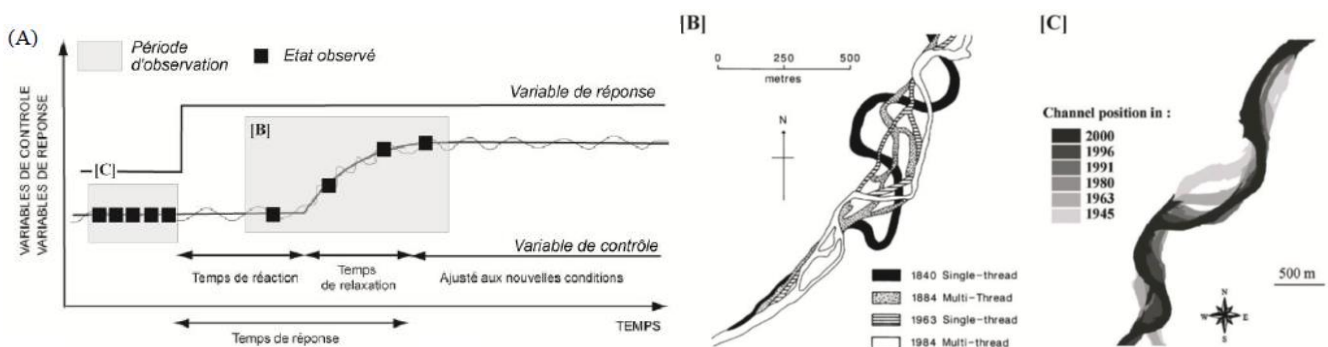


Figure 1 : Distinction sur un axe de temps (A) entre les notions d'ajustement (B) et de mobilité latérale (C) des styles fluviaux de la rivière d'Ain vers Gourdan, issues respectivement de Rollet (2007) ; Brewer & Lewin (1998) et Piégay *et al.* (2005). Modifié par Alber (2012)

## 1.2 Propriété physique des rivières à méandres

### 1.2.1 Définition d'un méandre

Le terme « méandre » vient du nom d'un dieu attaché au fleuve Meandre (Maïandros), actuel Büyük Menderes en Turquie, et qui présente un nombre incalculable de boucles.

La définition d'un méandre est longtemps restée scientifiquement imprécise, telle que l'a décrit Taillefer (1949) « Il faut que la rivière s'écarte de la direction générale suivie par l'écoulement, indépendamment de l'axe de la vallée, pour y revenir après avoir décrit une courbe plus ou moins prononcée ». Il est difficile de donner une définition simple d'un méandre. Il faut plutôt considérer les boucles comme faisant partie intégrante d'un système à méandres, qui est dynamique dans le temps et dans l'espace. Cette étude s'intéresse à un état de ce système à un instant  $t$ , lorsque le système méandre forme des boucles prononcées dans le tracé en plan du cours d'eau.

### 1.2.2 Géométrie en plan d'un méandre

La sinuosité du cours d'eau génère une asymétrie des vitesses au sein du chenal, proportionnelle à la courbure du tronçon (Larsen *et al.*, 2006). La berge concave est soumise à des vitesses plus importantes que la berge convexe, et subit une érosion. Par conservation de la largeur du chenal, la charge de fond (sables et graviers) se dépose sur la berge convexe (cf. figure 2). Au fil du temps, la sinuosité augmente avec le développement des méandres (Leroux, 2009).

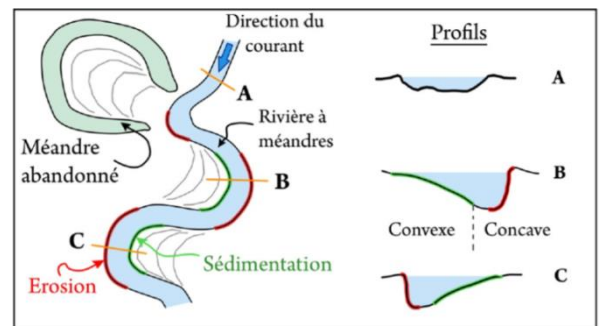


Figure 2 : Description schématique d'un méandre, Leroux (2009)

### 1.2.3 Faciès d'écoulement et profil longitudinal

Le profil longitudinal du fond du lit est formé d'ondulations verticales, responsables de l'alternance de radiers et de mouilles (Wasson *et al.*, 1998). Dans une rivière à méandres, les radiers sont situés aux points d'inflexions des courbures, et les mouilles dans les concavités (cf. figure 4). Ces unités morphodynamiques peuvent migrer le long du linéaire sans modifier les caractéristiques générales du tronçon. L'alternance de ces séquences permet la déperdition de l'énergie mécanique de l'eau (Cacas *et al.*, 1986). Elles ont donc une fonction principale de maintien des formes majeures du lit, par création de zones préférentielles d'érosion et de dépôt. Une séquence de ce type dissipe plus d'énergie qu'un tronçon rectiligne de même longueur (Cacas *et al.*, 1986).

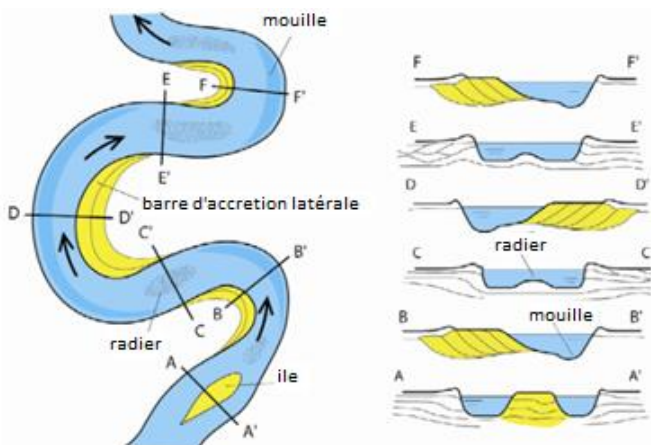


Figure 4 : Morphologie en plan et en coupe d'un chenal méandriforme (Allen, 1984 repris par Held, 2011)

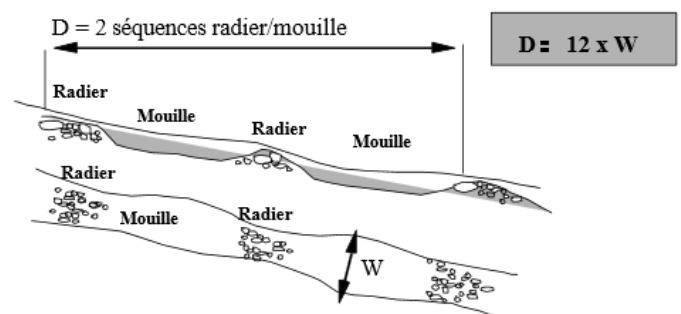


Figure 3 : Alternance des radiers (Thorne *et al.*, 1992)

La distance moyenne entre deux radiers rapportée à la largeur à plein bord ( $W$ ) reste la même dans un lit méandrique (Newbury & Gaboury, 1993). Dans leurs travaux, Thorne *et al* (1992) ont trouvé que la longueur moyenne d'une séquence radier/mouille est de l'ordre de 6 fois la largeur à plein bord (cf. figure 3). Ces rapports s'appliquent pour une très large gamme de situations naturelles (les valeurs extrêmes étant comprises entre  $4W$  et  $10W$ ). Très souvent, des plats s'intercalent entre ces deux types de faciès dans les portions rectilignes (Malavoi, 1989).

#### 1.2.4 Diversité des méandres

Il existe trois grands types de méandres, les méandres libres, les méandres contraints et les méandres encaissés (Malavoi & Bravard, 2010). Le territoire de la DIR Bretagne-Pays de la Loire possède surtout ces deux premiers types de méandres.

**Les méandres libres** sont des méandres à formes migratrices autonomes, inscrites sur des surfaces alluviales du cours d'eau (Blache, 1944). Les systèmes alluviaux présentant ce type de méandres se situent généralement dans les cours inférieurs (Amoros & Petts 1993, Roché & Frochot 1993, Bravard & Petit, 1997) où les méandres peuvent établir un tracé en plan sans contraintes géologiques majeures (Malavoi & Bravard, 2010).

**Les méandres contraints** présentent un comportement morpho dynamique qui a été fortement contraint latéralement par la présence de versants difficilement érodables (Lewin & Brindle, 1977 ; Milne, 1983) de nature géologique ou anthropique (tels que des protections de berges, routes, dérivation de cours d'eau...). Ces points durs déforment l'élongation des courbures de méandres (Thorne, 1997) et créent un blocage latéral d'une partie de leur sinuosité (Malavoi & Bravard, 2010), ce qui reporte l'érosion sur les convexités des boucles (Dépret *et al.*, 2012). En conséquence, ils présentent des formes dissymétriques.

**Les méandres encaissés**, divagants à l'origine, sont des méandres qui se sont érodés et incisés au cours de millions d'années d'histoire géologique dans un substratum de roches dures en voie de soulèvement lent (De Lapparent, 1907). Dans ce cas, cours d'eau et méandres ont existé avant les vallées qui les abritent aujourd'hui. Pour cette raison, ils sont qualifiés d'antécédents (Vacher, 1909). Ces méandres présentent aujourd'hui un tracé en plan figé, durable et profondément ancré dans le relief (Blache, 1944). Ils sont souvent le siège d'un important transport solide (Malavoi & Bravard, 2010).

### 1.3 Caractéristiques morpho-métriques des méandres

La variabilité de la sinuosité des courbes de rivière déterminent certaines caractéristiques morpho-métrique des méandres.

#### 1.3.1 Le coefficient de sinuosité : principale variable descriptive

Noté  $SI$ , le coefficient de sinuosité est la principale variable descriptive pour caractériser la sinuosité à l'échelle d'un tronçon de cours d'eau (Hooke, 2003 ; Harmard & Clifford, 2006).

Il est important de rappeler que le coefficient de sinuosité est une variable dynamique dans le temps, à l'instar du système méandre. Cette étude s'intéresse surtout à un état du système méandre

dans lequel les boucles du cours d'eau présentent un coefficient de sinuosité d'au moins 1,5 tel que l'ont décrit [Leopold & Wolman \(1957\)](#), [Leopold & Langbein \(1966\)](#) et [Brice \(1974\)](#).

La sinuosité d'un tronçon de cours d'eau peut être calculée par différentes méthodes :

- En prenant l'axe de la vallée ([Malavoi & Bravard, 2010](#)) ;
- En prenant l'axe de l'enveloppe de méandrage ([Brice, 1964](#)) ;
- En prenant l'axe passant par les points d'inflexions du lit ([Allen, 1984](#)).

Le choix de la méthode de calcul influence fortement la valeur du coefficient de sinuosité obtenue. Ces différentes mesures sont schématisées en figure 5 ci-dessous.

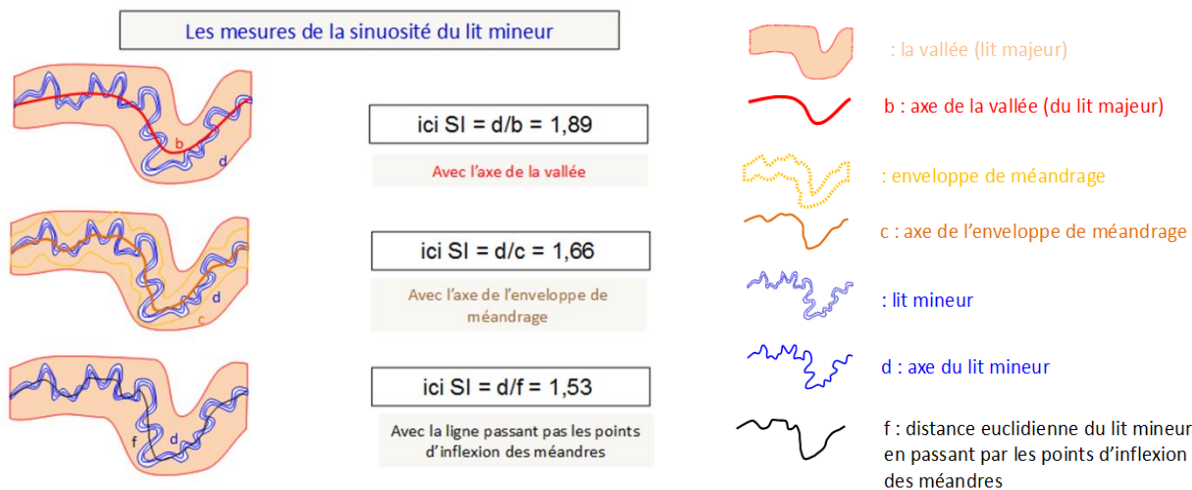


Figure 5 : Mesures de la sinuosité, tirée de [Bramard 2018](#) (com perso AFB)

Selon la méthode d'[Allen \(1984\)](#), le coefficient de sinuosité est défini par le ratio entre la longueur développée du lit et la ligne passant par tous les points d'inflexions des méandres du tronçon. Cette méthode est la moins sujette à controverse, car elle permet de limiter les imprécisions de calcul dues aux particularités locales des vallées ([Bramard, com.perso AFB 2018](#)).

D'après les travaux de [Leopold & Wolman \(1957\)](#), [Leopold & Langbein \(1966\)](#) et [Brice \(1974\)](#), quatre classes de sinuosité sont généralement proposées et permettent une classification morphologique des cours d'eau (cf. tableau 2 et figure 6).

Tableau 2 : Classe de sinuosité des cours d'eau

Indice ou coefficient de sinuosité	Classe de sinuosité du cours d'eau
$SI < 1,05$	rectiligne
$1,05 < SI < 1,25$	sinueux
$1,25 < SI < 1,5$	très sinueux
$SI > 1,5$	méandrique

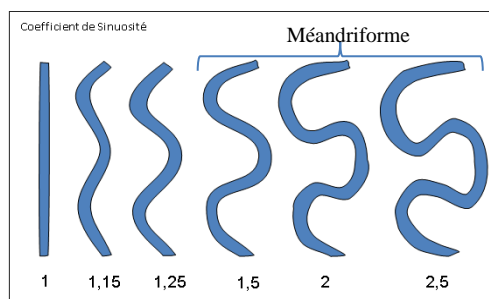


Figure 6 : Représentation des coefficients de sinuosité

### 1.3.2 Liens entre variables descriptives

L'étude de tronçons hydro-morphologiquement homogènes d'un cours d'eau consiste à décrire un certain nombre de ses caractéristiques en plan. Les variables descriptives des cours d'eau à méandres à chenal unique (cf. figure 7) sont la longueur d'onde ( $\lambda$ ), l'amplitude ( $A$ ) et le rayon de

courbure ( $R_c$ ) (Nanson & Hickin, 1983 ; Hooke, 2007 ; Heo *et al.*, 2009). Dans leurs travaux, Malavoi & Bravard (2010) citent également la longueur d'arc des méandres et la largeur du fond de vallée.

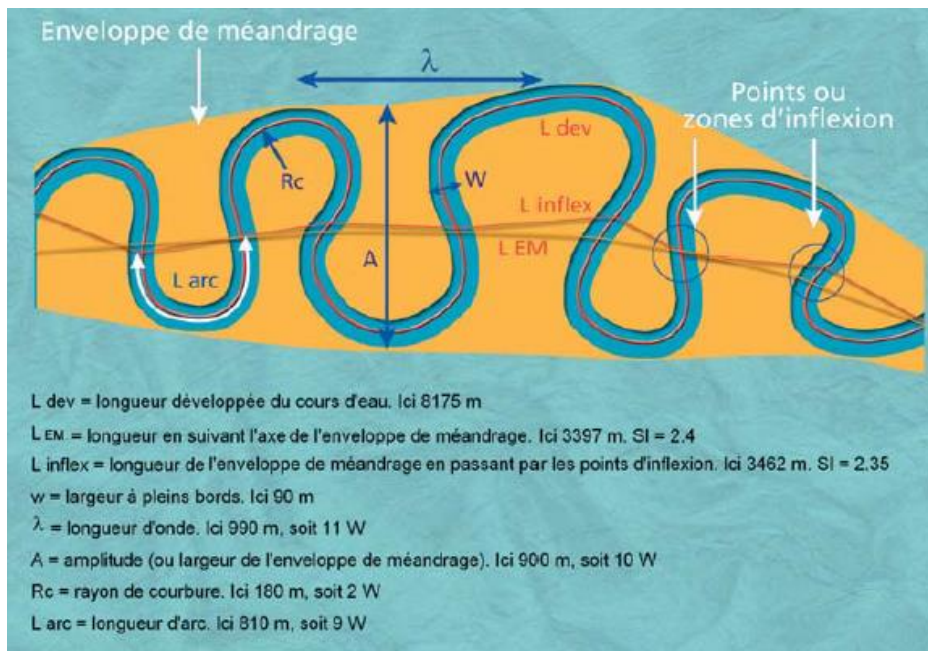


Figure 7 : Caractéristiques morphométriques des méandres, selon Malavoi & Bravard (2010)

La largeur à plein bord, quant à elle, n'est pas une variable propre aux cours d'eau à méandres, mais est une variable générale qui revient dans toutes les études hydromorphologiques. Notée W (width), la largeur à plein bord est la largeur limite du lit au-delà de laquelle l'eau déborde se répand dans la plaine d'inondation. Elle permet de comparer des cours d'eau de tailles différentes, et d'en tirer des lois hydromorphologiques (Malavoi & Bravard, 2010). Elle se mesure au niveau des points d'inflexions entre deux méandres pour éviter les sur-largeurs observées dans les sinuosités actives en raison des phénomènes d'érosion et de sédimentation (Hooke, 2006 ; Beechie *et al.*, 2006 ; Larsen *et al.*, 2006 ; Zolezzi *et al.*, 2012). Il est conseillé de répéter plusieurs mesures aux points d'inflexions sur des tronçons de longueur limitée, via des méthodes de levées topographiques in situ qui sont adaptées pour suivre l'évolution des profils en travers (Larsen *et al.*, 2006).

Des liens entre la largeur à plein bord et toutes les variables morpho-métriques propres aux méandres ont été établis et répertoriés dans le tableau 3 ci-après. Les relations empiriques entre les caractéristiques morpho-métriques abordées dans cette partie ne font qu'accentuer l'interdépendance des différents éléments d'un méandre (Saint-Onge *et al.*, 1976).

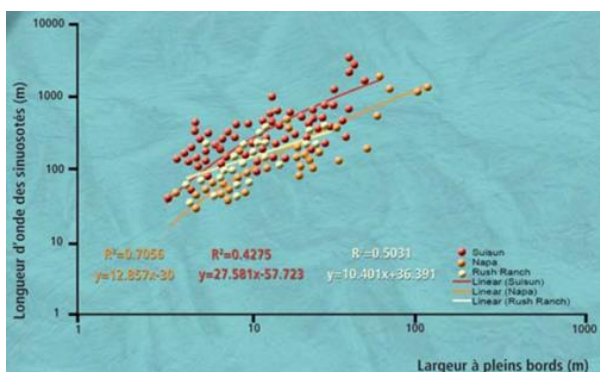


Figure 8 : Relation entre longueur d'onde des méandres et largeur à plein bord (Pearce & Collins, 2004)

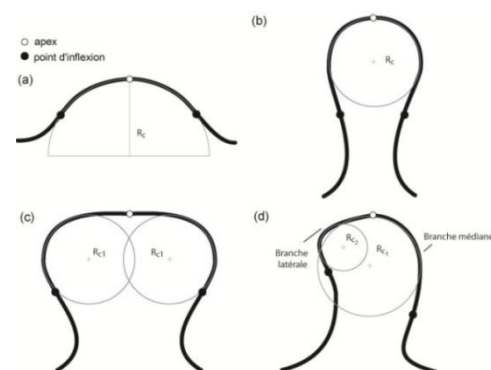


Figure 9 : Représentation des rayons de courbure au sein d'un méandre (Frothingham & Rhoads, 2003)

Tableau 3 : Relations entre variables morphométriques

Variables morphométriques	Définition et mesure	Relations et liens entre variables
Longueur d'onde ( $\lambda$ )	<p><math>\lambda</math> se mesure entre deux sommets de sinuosités de même phase (Malavoi &amp; Bravard, 2010).</p> <p>Les faibles valeurs de <math>\lambda</math> sont généralement associées aux cours d'eau très méandriformes avec des sinuosités écrasées, généralement à faible débit et à faible activité géodynamique Dury (1965).</p>	<p><math>\lambda = 8-15W</math>, pour une valeur médiane de 10-12W avec une gamme de largeur à plein bord allant de 0,3 à 300 m (Newbury &amp; Gaboury, 1993 ; Yalin &amp; Da Silva, 2001).</p> <p>Très forte dispersion des valeurs malgré la régionalisation (Pearce &amp; Collins, 2004) visible en figure 8.</p> <p>Relation linéaire entre <math>\lambda</math> et le débit : Si le débit augmente, alors <math>\lambda</math> augmente Dury (1965).</p>
Amplitude (A)	<p>L'amplitude se mesure entre deux sommets de sinuosités de phase opposée (Malavoi &amp; Bravard, 2010) en calculant généralement une moyenne pour l'ensemble d'un tronçon homogène (Larsen <i>et al.</i>, 2006).</p>	<p>A = 6-10 W (Chang, 1988 ; Pacaud &amp; Roulier, 2010).</p> <p>Très forte dispersion des valeurs malgré la régionalisation (Pearce &amp; Collins, 2004).</p>
Rayon de courbure (Rc)	<p>Rc se mesure en faisant passer un cercle par les deux points d'inflexions d'une sinuosité, en essayant d'épouser au plus près la forme générale de la sinuosité (Malavoi &amp; Bravard, 2010). Les rayons de courbures au sein d'un méandre sont représentés en figure 9.</p>	<p>Rc = 2-3 W pour les boucles de méandres complètement développées, ayant subies une forte érosion latérale (Leopold &amp; Wolman, 1960 ; Chang, 1988).</p> <p>Un rapport constant de <math>\lambda/Rc</math> indique la régularité des boucles de méandres (Leopold &amp; langbein, 1966).</p> <p>Relation linéaire entre Rc et la profondeur à l'apex du méandre : Rc diminue quand la profondeur à l'apex augmente (Leliavski, 1955).</p>
Largeur du fond de vallée (LFV)	<p>Zone plane de part et d'autre du cours d'eau, située dans la dépression de la vallée et délimitée par deux versants.</p>	<p>Dans une rivière naturelle à faible énergie, la largeur du fond de vallée remaniée par les processus érosifs correspond environ à 12W. C'est la largeur minimum nécessaire pour que l'équilibre morphodynamique puisse s'ajuster (Chang, 1988).</p>
Longueur d'arc (Larc)	<p>Larc correspond à la longueur développée de cours d'eau entre deux points d'inflexion d'un méandre (Malavoi &amp; Bravard, 2010).</p>	<p>Des relations existent entre Larc, W, Rc et A (Morisawa, 1968 ; Strahler, 1968). Mais ces relations se situent dans une gamme de valeurs très variables (exemple : Larc = 5-30 W).</p>

## 1.4 Dynamique et mobilité des méandres

### 1.4.1 Méandres : premier signe d'évolution des lits

Les travaux de Cluer & Thorne (2013) démontrent que dans un état initial non perturbé « stage 0 », les cours d'eau sont présents sous forme anastomosés à bras multiples (cf. figure 10). Les lits uniques représentent donc un premier stade de perturbation ou d'évolution du cours d'eau. Ainsi, la présence de méandres témoigne des premiers signes d'évolution des lits.

De plus, les ruisseaux à lit unique assimilés à un état de référence en Bretagne - Pays de la Loire ne sont en réalité pas systématiquement des systèmes primaires de cours d'eau. Ils peuvent déjà avoir subis des perturbations ou des évolutions, puis sont revenus par résilience à un état « stage » précédant.

Sur la figure 10, l'étape 2 représente les travaux de rectification et de chenalisation.

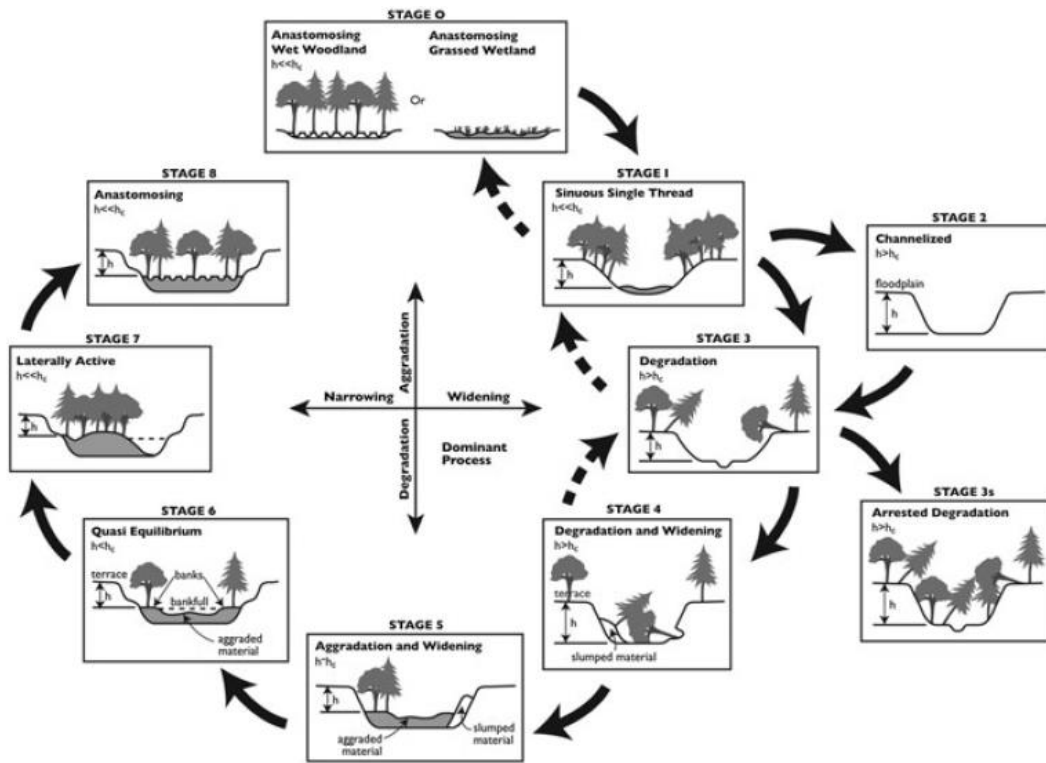


Figure 10 : Modèle cyclique d'évolution temporelle des cours d'eau avec ou sans perturbation, selon Cluer & Thorne (2013)

### 1.4.2 Genèse des méandres : modèle de développement

Ce sont les érosions de berge qui vont amorcer la phase d'initiation du méandrage (Alber, 2012). Le débit et la présence d'argiles et de limons dans la berge jouent un rôle important dans son érosion (Nanson & Hickin, 1986 ; Julian, 2006). En effet, la berge sera plus vulnérable si elle est constituée principalement de graviers plutôt que si elle contient du matériel cohésif, comme les argiles ou les limons.

Dans la première phase du mouvement, les vitesses de migration latérale maximales sont localisées à l'aval direct de l'apex, induisant un mouvement dominant de migration longitudinale. Le banc de convexité se développe par accretion latérale à mesure que la courbure migre (cf. figure 11), puis est progressivement colonisé par la végétation qui tend à maintenir une largeur de bande active constante. Puis les vitesses maximales d'érosion de berge migrent progressivement vers le sommet du méandre, imprimant à la courbure un mouvement d'élongation (Hickin & Nanson, 1986 ; Gilvear et al., 2000 ; Hooke & Yorke, 2010).

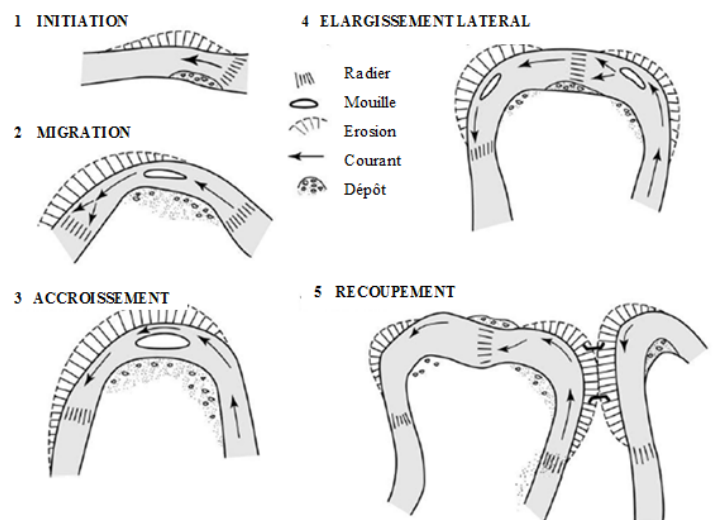


Figure 11 : Modèle conceptuel des phases de développement d'une courbure de méandre (Hooke & Yorke, 2010)

Les courbures de méandre peuvent également évoluer vers un tracé asymétrique et suivre un mouvement d'expansion dans une direction opposée à l'axe de la vallée (Hickin & Nanson, 1975 ; Lapointe & Carson, 1986).

### 1.4.3 Migration des boucles de méandres

Un méandre, s'il n'est pas contraint, change de configuration au fil du temps. Par le biais du recul de berge et du dépôt, il se déplacera sur sa plaine alluviale, aussi bien latéralement que longitudinalement (Saulas, 2008).

La migration d'un méandre n'est pas un phénomène régulier dans le temps (Hickin & Nanson 1975, Nanson & Hickin, 1983 ; Hooke 2003) et peut se suivre chronologiquement (Brice, 1975). Hooke (2007) note qu'un méandre évolue par une succession de deux étapes. La première est un recul de la berge concave, suivi d'un rétrécissement se faisant par l'avancée du banc de convexité.

Cependant, la dynamique latérale des courbures est modifiée lorsqu'elles sont contraintes latéralement (Lewin & Brindle, 1977 ; Milne, 1983). Dans ce cas, la migration se fait longitudinalement, sans modification de la forme en plan (Brice, 1982 ; Nicoll & Hickin, 2010).

### 1.4.4 Recoupement des boucles de méandres

Le recoupement interrompt le développement de la courbure et génère un lit rectiligne ou faiblement sinueux qui s'apparente au stade initial du cycle (Hooke, 1995) en faisant apparaître une boucle de méandre déconnectée du lit, appelé « oxbow lake ». Cet ancien méandre devient un bras mort, zone où l'eau, en période d'étiage, stagne ou disparaît totalement. En période de crue, le bras mort peut jouer le rôle d'un chenal secondaire, ou d'une annexe hydraulique (Saulas, 2008). Deux grands types de recoupement de méandres ont été décrits dans la littérature (cf. figure 12).

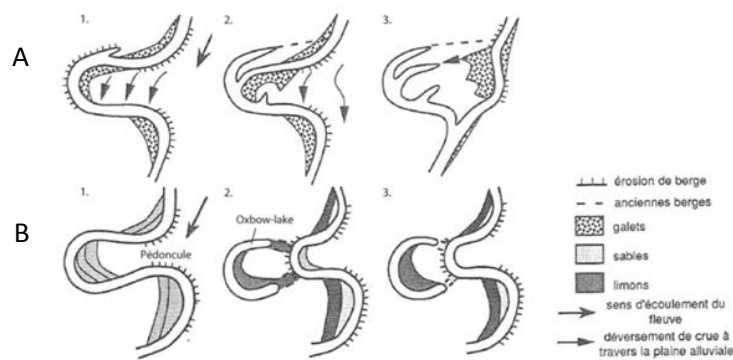


Figure 12 : Les deux grands types de recoupement des courbures de méandre, le recoupement par déversement (A) et par tangence (B) modifiée par Amoros & Petts (1993)

**Le recoupement par déversement** (cf. figure 12A) correspond à la formation d'un chenal en intérieur de courbure par la dissection du banc de convexité (Thorne & Lewin, 1979 ; Lewin, 1983). Ce processus a été décrit sur des cours d'eau méandriformes de sinuosité moyenne (Amoros & Petts, 1993).

**Le recoupement par tangence** (cf. figure 12B) survient lorsque deux boucles de méandre entrent en contact au niveau de leur pédoncule du fait de leur élongation. Ce processus a été décrit sur des cours d'eau méandriformes de sinuosité élevée (Gautier *et al.*, 2007 ; Michalkhova *et al.*, 2011).

## 1.5 Eléments de connaissances sur les opérations de rectification des cours d'eau

### 1.5.1 Définition des principales interventions anthropiques sur les cours d'eau

Des milliers de kilomètres de cours d'eau français ont vu depuis plusieurs décennies leurs caractéristiques hydromorphologiques fortement altérées par des interventions humaines diverses (Malavoi & Adams, 2007). Chaque type d'intervention a induit une grande variété d'altérations et de dysfonctionnements morpho-écologiques (Malavoi & Adams, 2007). Globalement, ces travaux



avaient pour objectif d'utiliser la force hydraulique des cours d'eau (Malavoi & Paris, 2003), ou bien de drainer les terres agricoles et de réduire la fréquence des inondations (Grosprêtre & Schmitt, 2008).

### a) Nature des travaux hydrauliques

Les quatre principaux travaux hydrauliques (Brookes, 1988) sont présentés dans le tableau 4.

Tableau 4 : Synthèse des principaux travaux hydrauliques sur les cours d'eau

Nature des travaux	Description	Conséquences hydromorphologiques
Extraction de matériaux	Extraction de granulats en lit mineur, équivalent à un pillage du matelas alluvial des cours d'eau (Couvert <i>et al.</i> , 1999).	Rupture du transit sédimentaire, phénomène d'incision (Bardon, 2009) ; déconnexion des annexes hydrauliques par diminution des débordements en lit majeur (Levet <i>et al.</i> , 2000).
Obstacle à la continuité écologique	Implantation d'ouvrages en travers des cours d'eau (barrage, seuil...).	Rupture de continuité biologique et sédimentaire (Malavoi <i>et al.</i> , 2007) ; incision en aval (Galay, 1983 ; Rollet, 2007) et envasement en amont (Mouille, 1982 ; Fustec <i>et al.</i> , 1998) ; aggravation de l'eutrophisation (Souchon <i>et al.</i> , 1996) et des variations de débits (Lafleur, 1999).
Chenalisation	Intervention visant à accélérer les écoulements par modification du tracé en plan, du profil en long ou en travers. La chenalisation comprend le recalibrage, la rectification et les protections de berges (Brookes, 1988).	Responsable d'une multitude de dysfonctionnement morphologique à l'échelle du lit mineur et majeur (Malavoi <i>et al.</i> , 2007) ; accentuation des inondations en aval (Hollis, 1975 ; Campana & Tucci, 2001) et des étiages (Wasson <i>et al.</i> , 1998) ; perturbation du transit sédimentaire (Park, 1977) ; modification et appauvrissement de la biodiversité (Bunusevac, 2007).
Enterrements de cours d'eau	Disparition de l'écoulement de surface du cours d'eau (Le Bihan, 2009). C'est l'intervention la plus traumatisante car elle fait disparaître totalement le milieu naturel (Meyer <i>et al.</i> , 2005).	Destruction de tous les habitats aquatiques et des interactions avec la ripisylve (May <i>et al.</i> , 1997) ; communautés biologiques impactées sur l'ensemble du réseau trophique (Freeman <i>et al.</i> , 2007) ; discontinuités écologiques (Bardon, 2009) ; suppression des capacités auto-épuratoires du cours d'eau (Kreuger, 1998 ; Oraison <i>et al.</i> , 2011).

### b) La rectification totale : responsable du rescindement de méandres

La rectification totale correspond au raccourcissement d'une portion de cours d'eau sinueux à méandrique par le recoupement artificiel des courbes du cours d'eau. Cette technique a pour objectif de faciliter la navigabilité des voies d'eau (Bardon, 2009), linéariser les parcelles agricoles ou réduire leur fréquence de submersion (Grosprêtre & Schmitt, 2008). Un cas extrême de rectification de tracé est le déplacement complet du cours d'eau au-delà de son talweg naturel.

Les têtes de bassins sont beaucoup plus vulnérables aux travaux de rectification que le réseau hydrographique aval (Lowe & Likens, 2005), du fait de leur petite taille et de leur grand nombre qui les prédisposent facilement aux modifications anthropiques (Smiley *et al.*, 2005).

La rectification d'un cours d'eau se traduit par des dysfonctionnements hydromorphologiques et écologiques caractéristiques présentés dans le tableau 5 :

Tableau 5 : Synthèse des conséquences d'un rescindement de méandre

Conséquences morphologiques	Linéarisation du tracé (Wasson <i>et al.</i> , 1998) Réduction du linéaire développée en recoupant les méandres (Wasson <i>et al.</i> , 1998) Augmentation de la pente sur le tronçon rectifié (Wasson <i>et al.</i> , 1998 ; Bardon, 2009) Incision du lit et colmatage du fond (Park, 1977) Homogénéisation des faciès d'écoulements (Malavoi & Adams, 2007)
Conséquences hydrauliques	Augmentation de la capacité d'évacuation hydraulique (Arnold <i>et al.</i> , 1982) Accentuation des étiages et des inondations en aval (Wasson <i>et al.</i> , 1998 ; Bardon, 2009) Déconnexion des annexes hydrauliques et de la nappe d'accompagnement
Conséquences biologiques	Homogénéisation des habitats (Lorenz <i>et al.</i> , 2009) Diminution de la densité des espèces piscicoles (Champkin <i>et al.</i> , 2018) Erosion de la biodiversité (Bunusevac, 2007)

Dès lors, les rectifications imposées aux cours d'eau ont conduit à des dysfonctionnements hydromorphologiques (Bardon, 2009), et consécutivement écologiques, qui contribuent à la dégradation de la qualité des cours d'eau et des milieux naturels, ainsi qu'à la chute de la biodiversité et de la biomasse (Malavoi & Adams, 2007).

### 1.5.2 Vision sociologique des rivières

Deux modèles de vision des rivières semblent se confronter :

**Patrimonialisation de la rivière aménagée :** Partout seuils, biefs, écrêteurs de crues et autres fossés d'irrigation jalonnent les fonds de vallées (Cador & Lespez, 2012). Cette première vision envisage ces infrastructures hydrauliques comme une ressource à conserver dans le cadre de la valorisation des paysages de vallées, témoin de la richesse historique du site (Germaine & Barraud, 2013).

**La rivière comme infrastructure naturelle :** Ce modèle s'ancre sur l'idée nord-américaine de Wilderness ou l'idéologie de la nature vierge (Arnould & Glon, 2006 ; Blandin, 2009). Dans cette vision, les infrastructures hydrauliques sont considérées comme un obstacle au bon fonctionnement des corridors écologiques. Dans ce modèle, les cours d'eau et zones humides associées sont envisagés comme des infrastructures naturelles, dont la forme et le fonctionnement doivent tendre au maximum vers une évolution naturelle du paysage (Mermet, 1995).

### 1.5.3 Une préférence culturelle pour les formes sinueuses

L'idée qu'il existe une préférence culturelle et sociologique pour les formes sinueuses ou ondulantes par rapport aux formes rigides et droites a été abordée dans plusieurs théories scientifiques (Kondolf, 2006).

D'abord, Hogarth, 1753 via sa théorie esthétique du paysage anglais, a identifié l'importance de la sinuosité des rivières à méandres, suivant des lignes ondulantes, dans notre perception de la beauté paysagère. Ainsi, selon sa théorie, la rivière se déplaçant de manière sinueuse présente les éléments nécessaires pour l'expérience de la beauté. Ensuite, dans son analyse paysagère, Cullen (1961) affirme qu'en termes d'esthétique paysagère les formes arrondies et les courbes sont préférables aux formes anguleuses. Appleton (1975) confirme et développe cette théorie de perception paysagère sur les rivières et les vallées.

Ainsi, il est démontré que les rivières à méandres, et plus généralement les paysages comprenant des formes sinueuses, suscitent la curiosité, un intérêt et une préférence culturelle pour ces courbes (Ulrich, 1983 ; Kaplan & Kaplan, 1984). En témoigne conception des routes et chemin serpentant à travers les paysages et les vallées (Myers, 2004).

## 1.6 La restauration physique des méandres

Les caractéristiques hydromorphologiques des cours d'eau conditionnent l'état et le fonctionnement écologique des milieux aquatiques. C'est pourquoi la restauration physique des cours d'eau est l'une des priorités de la Directive Cadre Européenne sur l'eau (DCE).

La restauration hydromorphologique a pour finalité d'aider le cours d'eau à reprendre une dynamique naturelle (Malavoi & Adams, 2007). Elle peut aussi être perçue comme une perturbation pour la rivière (Nilsson *et al.*, 2017), néanmoins indispensable sur le territoire où les cours d'eau ont été très fortement recalibrés et rectifiés. De nombreux cours d'eau n'ont pas la puissance spécifique pour se défaire de leurs contraintes et reprendre leur dynamique, ou alors ces ajustements pourraient prendre des centaines d'années. Les premiers travaux de reméandrage datent de la fin du 20<sup>ème</sup> siècle, après la prise de conscience que l'artificialisation et la chenalisation nuit à la qualité écologique des cours d'eau et à leurs milieux riverains (Pacaud & Roulier, 2010).

### 1.6.1 Point sémantique

Plusieurs termes reviennent souvent pour qualifier la restauration des méandres d'un cours d'eau. Sont principalement rencontrés « reméandrage », « re-méandrement », « reméandration », « reméandrisation »... Afin d'harmoniser le discours, c'est le terme « reméandrage » qui sera retenu, étant le plus fréquemment rencontré dans les retours d'expériences de l'AFB, les avis techniques et les bases de données de l'agence de l'eau.

### 1.6.2 Les méthodes de reméandrage

Afin de résorber la plupart des dysfonctionnements générés par le rescindement des méandres, une des méthodes les plus ambitieuses consiste à recréer un cours d'eau sinueux ou méandrique. Il est possible d'agir de deux manières :

- **Remise en eau totale**, en attribuant l'intégralité du débit du cours d'eau dans le nouveau lit restauré.
- **Remise en eau partielle**, en répartissant le débit du cours d'eau. Une partie du débit sera attribuée dans le nouveau lit, et l'autre partie sera conservée au sein de l'ancien tracé.

Pour cela, il existe 4 techniques principales :

#### a) Reconnexion de méandres coupés

La reconnexion de méandres coupés est considérée comme une composante clé de la restauration des rivières qui possédaient historiquement un style sinueux (Hauer *et al.*, 2007). Parfois, les anciens méandres rectifiés sont encore visibles dans la nature ou sur les photos cadastrales (cf. figure 13). Il est alors possible de les remettre en eau pour restaurer une dynamique d'écoulement le plus proche d'un fonctionnement naturel.

Il existe plusieurs solutions techniques pour reconnecter des méandres coupés (RCC, 2002) :

Soit le lit rectifié est bouché et tout le débit sera rétabli dans l'ancien méandre, qui sera complètement remis en eau. Cette méthode de remise en eau totale favorise la reprise de la dynamique hydromorphologique et augmente la diversité d'habitat (Amoros, 2001).

Soit seule une partie du débit est rétabli vers les anciens méandres, qui seront partiellement remis en eau, et un faible débit restant sera maintenu dans le lit rectifié. Pour cette méthode, Hein *et al.*, (1999) ont prouvé que plus le temps de résidence de l'eau dans les lits rectifiés augmentait, plus l'eutrophisation en aval était importante. Ainsi la première technique est recommandée, s'il n'y a pas de contrainte de décharge du débit lors des crues.



Figure 13 : coupure de méandres sur la rivière d'Andouillé (35)

## b) Technique des bouchons

**Le reméandrage par la technique des bouchons** (cf. figure 14) consiste à contraindre le lit rectifié à reprendre un aspect méandrique en implantant une série de bouchons étanches à chaque intersection entre le chenal rectiligne et les zones d'inflexion des méandres souhaitées (programme life, Lucot *et al.*, 2008). A moyens termes après les travaux de restauration, les matériaux qui constituent les bouchons se tassent et deviennent de plus en plus étanches (Malavoi, 2007). Les tronçons de lit rectilignes et les fossés relictuels devraient être partiellement comblés par l'accumulation de la matière organique (RCC, 2002). Pour favoriser ce processus naturel, l'enlèvement des bois en rivières et débris ligneux sont proscrits.

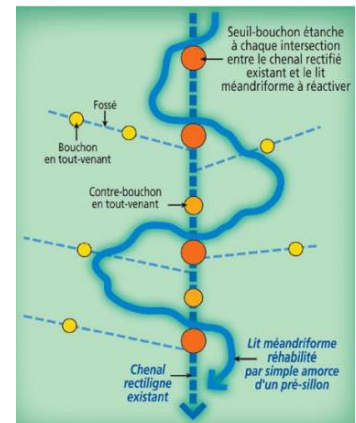


Figure 14 : Technique des bouchons (Lucot *et al.*, 2008)

## c) Remise dans le talweg

**Le reméandrage par remise dans le talweg** (cf. figure 15) et création d'un nouveau chenal est largement mis en avant (RCC, 2013). Dans ce cas, la forme du nouveau lit reméandré par remise dans le talweg est le plus souvent déduite de la lecture des cartes anciennes associée à un levé topographique des points bas sur le terrain (Germaine & Lespez, 2016). Parfois, la forme de l'ancien lit subsiste au centre de la vallée.

Selon la puissance spécifique du cours d'eau, le nouveau lit issu du reméandrage sera entièrement recreusé artificiellement au moyen d'engins de chantier, ou partiellement recreusé avec une simple initiation des méandres après suppression des contraintes latérales (Malavoi & Adams, 2007).

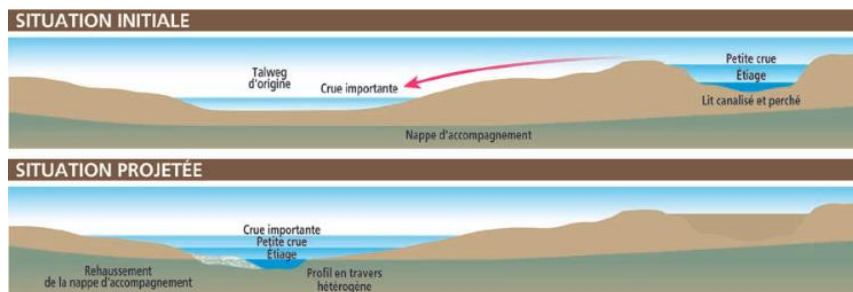


Figure 15 : Vue en coupe transversale d'une remise dans son talweg d'un cours d'eau perché (ONEMA, 2012)

## d) Libre divagation

**Le reméandrage par libre divagation** consiste à laisser le cours d'eau se réinstaller dans son talweg naturel sans aucun creusement artificiel d'un lit. Après suppression des contraintes latérales, le cours d'eau auto-ajuste sa morphologie (tracé en plan, profils en long et en travers) naturellement.

Pendant, cette méthode considérée comme une restauration passive nécessite que le cours d'eau possède une bonne puissance spécifique ainsi que des apports solides suffisants pour connaître des ajustements rapides et importants (Brookes, 1987). Cela traduit en quelque sorte la capacité de réaction d'une rivière à mobiliser les sédiments du lit pour le reconstruire (Brookes, 1988).

Cette méthode permettant au cours d'eau de reconquérir une dynamique naturelle sur un espace de mobilité et un espace de fonctionnalité (forêts alluviales ou zones humides), est considérée par certains auteurs comme la plus ambitieuse des méthodes de restaurations (Malavoi & Adam, 2007).

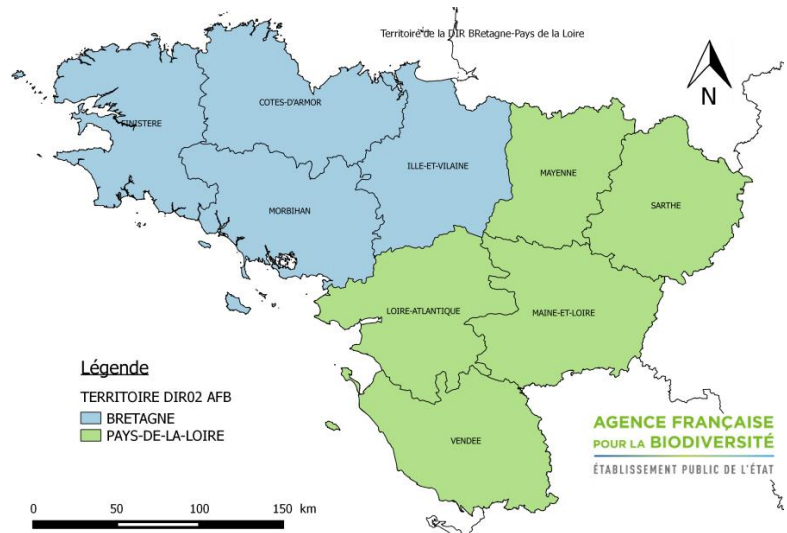
## 2. Méthodologie

### 2.1 Présentation du territoire d'étude

Le territoire de la DIR Bretagne-Pays de la Loire de l'AFB est composé des deux régions Bretagne et Pays de la Loire, comprenant neuf départements : les Côtes d'Armor, le Finistère, l'Ille-et-Vilaine, la Loire-Atlantique, le Maine-et-Loire, la Mayenne, le Morbihan, la Sarthe et la Vendée (cf. figure 16). D'une superficie de 59 730 km<sup>2</sup>, il totalise près de 76 000 km de cours d'eau (donnée BD Topo).

Ce secteur d'étude est sous l'influence d'un climat tempéré océanique, caractérisé par des amplitudes thermiques annuelles peu marquées ainsi qu'une pluviométrie abondante et régulière. Il est constitué de 2 HydroEcoRégions (HER) de niveau 1 « Massif Armoricain » pour le secteur Ouest et « Tables Calcaires » pour le secteur le plus à l'Est.

Figure 16 : Carte du territoire de la DIR Bretagne – pays de la Loire



### 2.2 Deux volets dans la même étude

Cette étude a pour principal objectif d'améliorer les connaissances sur les caractéristiques de méandrage des cours d'eau (premier volet), pour être en capacité d'assurer un encadrement technique sur le dimensionnement des opérations de reméandrage (deuxième volet) (cf. figure 17).

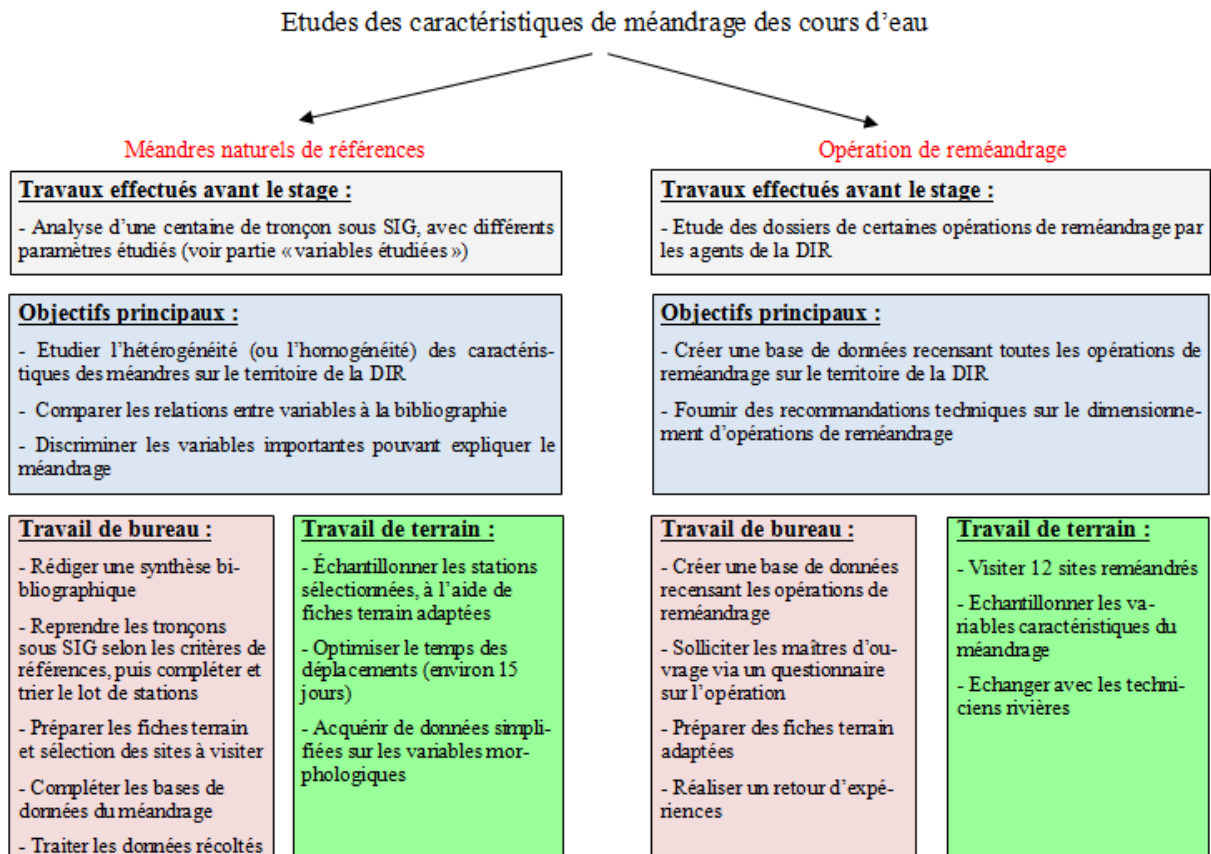


Figure 17 : Représentation schématique des deux volets de l'étude

## 2.3 Recensement des sites et échantillonnage terrain

### 2.3.1 Sélection sous SIG des tronçons de référence

Cette étude concerne des tronçons de cours d'eau présentant un « méandrage naturel », sans traces d'anthropisation apparentes, pouvant être assimilés à un « état de référence ». Il semble important de rappeler la difficulté de trouver des stations à méandres non altérées par les pressions anthropiques agissant à l'échelle d'un bassin versant.

Ainsi, certains critères (cf. tableau 6) ont été définis afin de choisir les tronçons de cours d'eau à méandres à étudier à l'aide d'un Système d'Information Géographique (SIG). Grâce à ces critères de discrimination, un lot de 168 tronçons a pu être analysé sous SIG (cf. annexes).

Pour la facilité d'échantillonnage et la reproductibilité de l'étude (à la fois sous SIG et sur le terrain), les tronçons de cours d'eau sélectionnés doivent être prospectables à pied. Ainsi, la base de données sur les méandres naturels issue de cette étude se limitera aux stations de cours d'eau méandrique prospectable à pied, ce qui peut constituer un biais de sélection.

Tableau 6 : Recensement des critères pour la sélection des tronçons à étudier sous SIG

Critères à présenter	Argumentaire	Données d'appui sur le SIG
Rivière à style sinueux ou méandrique, de sa source à la confluence	Pour étudier les boucles d'un système à méandres, il est plus représentatif d'étudier un cours d'eau avec des boucles sur tout son long, plutôt qu'un cours d'eau rectiligne présentant seulement une boucle de méandre, qui peut-être liée à une particularité très locale du terrain.	BD Topo © IGN ; SCAN 25 © IGN
Coefficient de sinuosité proche de 1,5	Tronçon de cours d'eau dont l'état actuel de ses boucles se rapproche du style méandrique (Léopold & Wolman, 1957 ; Léopold & Langbein, 1966 ; Brice, 1974)	Référentiel tronçon de cours d'eau BD Topo © IGN
La longueur de la station doit être supérieure à 14 fois la largeur à plein bord du lit mineur	Cette longueur permet de décrire au moins deux séquences de faciès de type radier/mouille/plat courant (Léopold & Wolman, 1957 ; Léopold <i>et al.</i> , 1964 ; Navratil <i>et al.</i> , 2004). Elle permet une bonne représentation du tronçon étudié.	BD Topo © IGN ; photographies aériennes de la BD Ortho © IGN et la SCAN 25 © IGN
Inclus dans un tronçon SYRAH	Assure au tronçon des caractéristiques hydromorphologiques homogènes (Chandesris <i>et al.</i> , 2008). La station ne présente donc pas d'affluent ni de confluence sur le linéaire étudié.	couche SIG de l'AFB « troncons_SYRAH_DIR2 »
Situé en dehors des zones estuariennes	L'influence des marées et du substrat vaseux modifie la morpho dynamique des méandres et n'est pas représentatif des conditions étudiées en rivière (Jean, 1971)	SCAN 25 © IGN
Absence d'indice d'artificialisation du tracé en plan	La notion de station de référence correspond à des segments dont la morphologie du lit est considérée comme peu ou pas altérée par des interventions anthropiques (ONEMA, 2017)	BD Topo © IGN ; cartes de l'état-major et photographies aériennes anciennes
Absence de contraintes liées à des infrastructures	Les routes, chemins de fer adjacents... écrasent et modifient la forme en plan des méandres et ont des conséquences sur la dynamique naturelle (Lewin & Brindle, 1977 ; Milne, 1983 ; Thome, 1997 ; Gutter, 2004)	SCAN 25 © IGN
Absence de changements importants de l'axe de la vallée	Méandre de cours d'eau au sein d'un axe de vallée rectiligne, sinon ce sont les méandres de vallée qui sont étudiés et non les méandres de cours d'eau (Bramard, com. perso AFB)	SCAN 25 © IGN

### 2.3.2 Choix des méandres naturels pour l'échantillonnage terrain

Il existe des recommandations pour l'identification des sites potentiels de référence (Hughes *et al.*, 1986 ; Hughes, 1995). En s'appuyant sur ces travaux déjà effectués, le cumul des critères présentés ci-dessous sera retenu pour qualifier une station de « référence » :

- L'absence de rectification (Malavoi & Bravard, 2010) ;
- L'absence de recalibrage (Malavoi & Bravard, 2010) ;

- L'absence de drains (Wallin *et al.*, 2003 ; Nijboer *et al.*, 2004) ;
- Une continuité écologique entre l'amont et l'aval du site (Wallin *et al.*, 2003) ;
- Une connectivité latérale avec la zone riparienne (Wallin *et al.*, 2003) ;
- L'absence d'extraction de granulats (Davies, 1994) ;
- Un substrat représentatif du type du cours d'eau et de sa région (Barbour *et al.*, 1996) ;
- Un recouvrement et une composition végétale appropriée au type de cours d'eau et à sa région (Barbour *et al.*, 1996 ; Wallin *et al.*, 2003) ;
- L'absence d'espèces exotiques animales ou végétales (Bonada *et al.*, 2004) ;
- La présence de bois en rivière (Barbour *et al.*, 1996 ; Bonada *et al.*, 2004).

Dans la recherche de méandres sur des cours d'eau de « référence », il convient de s'appuyer sur la connaissance du territoire des agents des services départementaux de l'AFB, en leur présentant les tronçons de cours d'eau retenus sous SIG. Les discussions avec les agents de terrain sont donc primordiales pour recenser les méandres « de références hydromorphologiques » à prospector. Au total, 13 stations à méandres naturels ont été échantillonnées sur le terrain (cf. carte annexe).

### 2.3.3 Recensement des opérations de reméandrage et choix des sites à visiter

Plusieurs organismes sur le secteur d'étude possèdent des données sur des tronçons de cours d'eau reméandrés, mais il n'existe pas de base de données commune. Ainsi, le recensement des opérations de reméandrage (le plus exhaustif possible) sur le territoire de la DIR a été réalisé en compilant dans un premier temps des données issues de l'Agence de l'eau Loire-Bretagne, des cellules du conseil départemental, des fédérations de pêches et des sources internes à l'AFB.

Puis dans un second temps, pour chaque opération de reméandrage, le maître d'ouvrage a été sollicité par l'intermédiaire d'un questionnaire, demandant quelques informations simplifiées sur l'opération (cf. questionnaire en annexe).

Le choix des sites à visiter dépendait de certains critères tels que la nature des réponses au questionnaire, la méthode de reméandrage employée, ou d'éventuels problèmes survenus post-travaux.

Au final, 12 sites ont été retenus pour faire l'objet d'une acquisition de données de terrain concernant les variables descriptives du reméandrage (cf. carte annexe).

## 2.4 Mesure des différentes variables descriptives du méandrage

La synthèse bibliographique a permis de définir les variables à étudier (SIG et terrain), tant de contrôle que de réponse (cf. tableau 7 page suivante).

Les traitements de ces valeurs sous SIG sont des **extractions par points**, à des endroits précis du méandre. Les résultats seraient potentiellement différents si ces extractions se faisaient de manière linéaire, comme une série spatiale continue sur toute la longueur du tronçon étudié. Malgré la précision de la méthode SIG, trois des variables étudiées sont difficiles à appréhender :

- **La largeur à plein bord** : Pour les petits cours d'eau, la précision de la mesure sous SIG est assez faible (par rapport à la largeur réelle du cours d'eau). De même, cette largeur à plein bord peut être impossible à évaluer si la couverture végétale du cours d'eau est trop dense.
- **La largeur de fond de vallée** : L'appréciation de la largeur de fond de vallée sous SIG est imprécise car les courbes de niveau du SCAN 25 représentent des pas altimétriques de 5m. Mais parfois sur le terrain, la rupture de pente avec les versants délimitant le fond de vallée se situe plus proche du cours d'eau que les lignes de niveau.

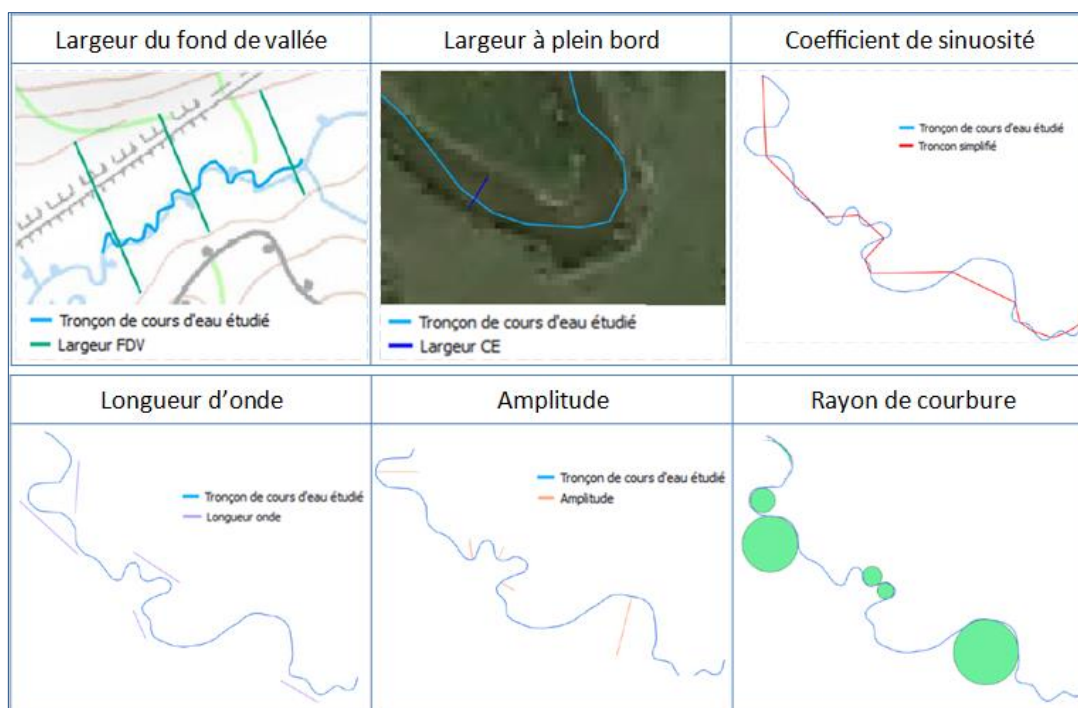
- **La pente** : Elle est calculée sous SIG avec une précision d'1m, ce qui la rend souvent nulle ou mal appréciée pour les stations de faible longueur.

Tableau 7 : Méthode de numérisation des variables étudiées sous SIG et sur le terrain

Variables étudiées		Travail sous SIG (méandres naturels)	Phase de terrain (méandres naturels et opération de reméandrage)
Variables de contrôle à l'échelle du bassin versant (dépendantes du climat et de la géologie)	Surface du bassin versant amont (m <sup>2</sup> )	Calculée à partir du point d'exutoire du tronçon, en utilisant un raster de drainage grâce à l'outil SIG « calculer un BV ».	-
	Débit liquide (m <sup>3</sup> /s)	Évalué par traitement SIG à partir des chroniques des stations de références de la banque hydro selon la proportion des surfaces de BV amont	-
	Largeur fond de vallée (m)	Numérisée à partir de la distance entre les deux courbes de niveau du SCAN25 © IGN les plus proches de part et d'autre du tronçon étudié (cf tableau)	Mesurée au décimètre dans la partie plane du fond de vallée, jusqu'à la limite où les versants commencent à remonter
	Végétation rivulaire	-	Décrit qualitativement via la fiche terrain
	Granulométrie du fond du lit	-	Étudiée selon le protocole Wolman 50 sur un radier, en mesurant la deuxième largeur la plus grande d'un cailloux, et en répétant cette mesure sur 50 cailloux
Variable de réponse : profil en long	Pente du cours d'eau	Calculée à partir des points amont et aval de chaque tronçon en utilisant les données altimétriques du MNT 25 (précision 1m), via l'outil SIG « calculateur de pente »	Calculée à la mire et au niveau entre les points amont et aval du segment échantillonné, idéalement situé en tête de radier (précision 1cm)
	Faciès d'écoulement	-	Cartographie des faciès d'écoulement du segment étudié de l'aval vers l'amont en considérant 5 unités morpho-dynamique : radier _ plat courant _ plat lent _ mouille de concavité _ fosse de dissipation (précision 10cm)
Variable de réponse : tracé en plan	Coefficient de sinuosité	Calculé via BD Topo © IGN et BD Ortho © IGN selon le rapport : longueur initiale du segment / longueur simplifiée passant par les points d'inflexions des méandres (cf tableau)	Calculé avec un décimètre entre les points amont et aval du segment étudié selon la méthode d'Allen.
	Longueur d'onde (m)	Mesurée entre deux sommets de méandres en même rive, à partir de tracé cartographiques. Numérisation de deux longueurs extrêmes et trois moyennes pour traduire la diversité du segment étudié (cf tableau)	Mesurée entre deux sommets de méandres en même rive via un décimètre (précision 10cm)
	Amplitude (m)	Mesurée à partir de tracés cartographiques, en traçant une perpendiculaire entre le sommet du méandre et l'écart au cours d'eau. Numérisation de deux amplitudes extrêmes et trois moyennes pour traduire la diversité du segment étudié (cf tableau)	Mesurée via un décimètre en traçant une perpendiculaire entre l'apex du méandre et l'écart au cours d'eau (précision 10cm)
	Rayon de courbure (m)	Mesuré via l'extension SIG « morphomètre », selon un cercle qui s'incruste dans la courbure du méandre. Numérisation de deux rayons extrêmes et trois moyens pour traduire la diversité du segment étudié (cf tableau). Cette extension a été développée en interne à l'AFB.	-
Variable de réponse : profil en travers	Largeur à plein bord (m)	Calculée à partir des photographies aériennes BD Ortho © IGN au niveau des points d'inflexions des méandres. Numérisation de 3 points (cf tableau)	Mesurée aux points d'inflexions des méandres via un décimètre (précision 10cm), et correspond à la largeur entre deux hauteurs de berges avant que le lit ne déborde dans la plaine inondable.
	Profondeur à plein bord	-	Mesurée à la mire au niveau des points d'inflexions des méandres

Un complément graphique concernant les méthodes de numérisation sous SIG est apporté par le tableau 8.

Tableau 8 : Représentation graphique de la numérisation de certaines variables sous SIG



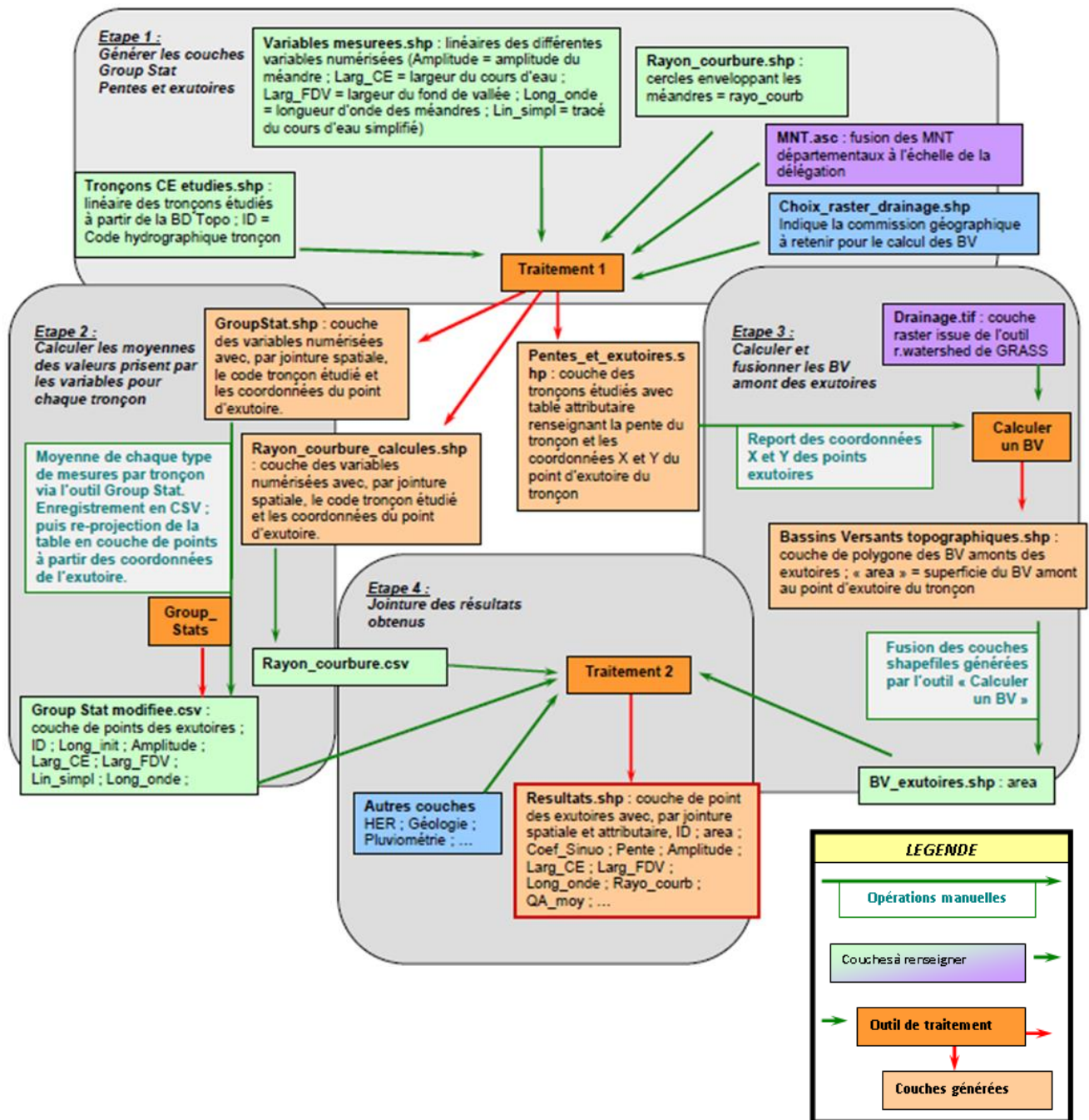


## 2.5 Traitement des données

### 2.5.1 Intégration et extraction des mesures sous SIG

La figure 18 ci-dessous présente l'ensemble des chaînes d'outils utilisées dans le cadre de la numérisation des variables sous SIG. Ces numérisations impliquent un certain nombre d'outils de traitement, issus de la boîte à outils Qgis, et également des opérations manuelles dont l'automatisation a été rendue impossible et qu'il faudra donc assurer.

Figure 18 : Représentation simplifiée de l'ensemble des chaînes d'outils utilisés dans le traitement de données SIG



**Traitement 1** : exécuté à partir des 5 couches de l'étape 1. Il génère 3 couches shapefiles :

- Pentes\_et\_exutoire : issue de la fusion des couches « MNT.asc », « Choix raster drainage.shp » et « Tronçon CE étudiés.shp » ainsi que la jointure de leurs tables.

- Groupstat : issue de la fusion des couches « Variables mesurées.shp » et « Tronçon CE étudiés.shp », ainsi que la jointure de leurs tables.
- Rayon\_courbure\_calculés : issue de la fusion des couches « Rayon\_courbure.shp » et « Tronçon CE étudiés.shp » ainsi que la jointure de leurs tables

**Traitement 2** : correspond à la fusion des couches et jointures des tables attributaires pour générer une couche de résultat final, compilant par tronçon l'ensemble des variables étudiées.

### 2.5.2 Analyses des données numériques

Les données issues des fiches terrains sont saisies individuellement sur un tableur Excel. Les variables comme le coefficient de sinuosité, la pente ou la largeur à plein bord aux points d'inflexions sont calculées automatiquement par des formules et intégrées à la base de données recensant les méandres naturels étudiés sur le territoire.

### 2.5.3 Analyses statistiques

Les analyses statistiques des données ont été réalisées grâce aux logiciels Rstudio et XLSTAT.

Dans un premier temps, afin de visualiser les différences entre les variables quantitatives principales, la distribution des valeurs est étudiée au sein du jeu de données. La dispersion des échantillons est représentée sous forme de «boîtes à moustaches» via le logiciel Rstudio. Elles permettent de visualiser l'étendue de la distribution des données.

Ensuite, les différences et similarités entre les stations étudiées sous SIG sont visualisées sur le jeu de données entier afin d'identifier les variables les plus discriminantes. Une Analyse en Composantes Principales (ACP) est réalisée sur les variables quantitatives principales afin de détecter celles qui sont les plus discriminantes. Cette analyse a pour but de séparer les stations en fonction des paramètres sélectionnés. En éliminant des variables par analyses successives, une meilleure modélisation est attendue. Grâce au modèle construit, de nouvelles stations peuvent être classées selon leur probabilité d'appartenir à un groupe ou bien à l'autre. Un travail similaire a été reproduit en transformant les valeurs brutes en  $\ln(x+1)$  pour écraser les grandes valeurs susceptibles d'introduire un biais dans l'étude discriminatoire. Ces traitements ont été réalisés sous Rstudio.

Enfin, les éventuelles corrélations entre variables descriptives du méandrage ont été testées. Le test non paramétrique de Spearman est donc choisi pour tester la corrélation entre deux variables morphométriques quantitatives. L'hypothèse  $H_0$  équivaut à affirmer qu'il n'y a aucune corrélation entre les deux variables étudiées. Le risque d'erreur alpha choisi est de 5%, ainsi l'hypothèse  $H_0$  est rejetée pour toute p-value inférieure à 0,05.

Si une corrélation est confirmée entre deux variables, alors le coefficient de corrélation  $R^2$  est déterminé sous Rstudio et la représentation graphique de la courbe de régression est réalisée sous Excel Stat. Les rapports entre les valeurs moyennes et médianes des variables quantitatives sont traités sous Excel et comparés aux rapports issus de la bibliographie.

### 3. Résultats

#### 3.1 Variabilité et distribution des données

Le jeu de données se compose de 13 variables quantitatives décrivant le méandrage. Les cours d'eau situés en tête de bassin versant, possédant une largeur à plein bord inférieure à deux mètres et un rang de Strahler 1 ou 2, représentent 44% du jeu de données. Seuls les variables morphométriques propres aux méandres simples ont été étudiés, sans prendre en compte celles d'oxbow-lake qui peuvent être éventuellement présents.

Dans un premier temps, la dispersion des échantillons a été décrite afin de répondre à l'objectif de caractérisation de la diversité des variables étudiées (cf. figure 19).

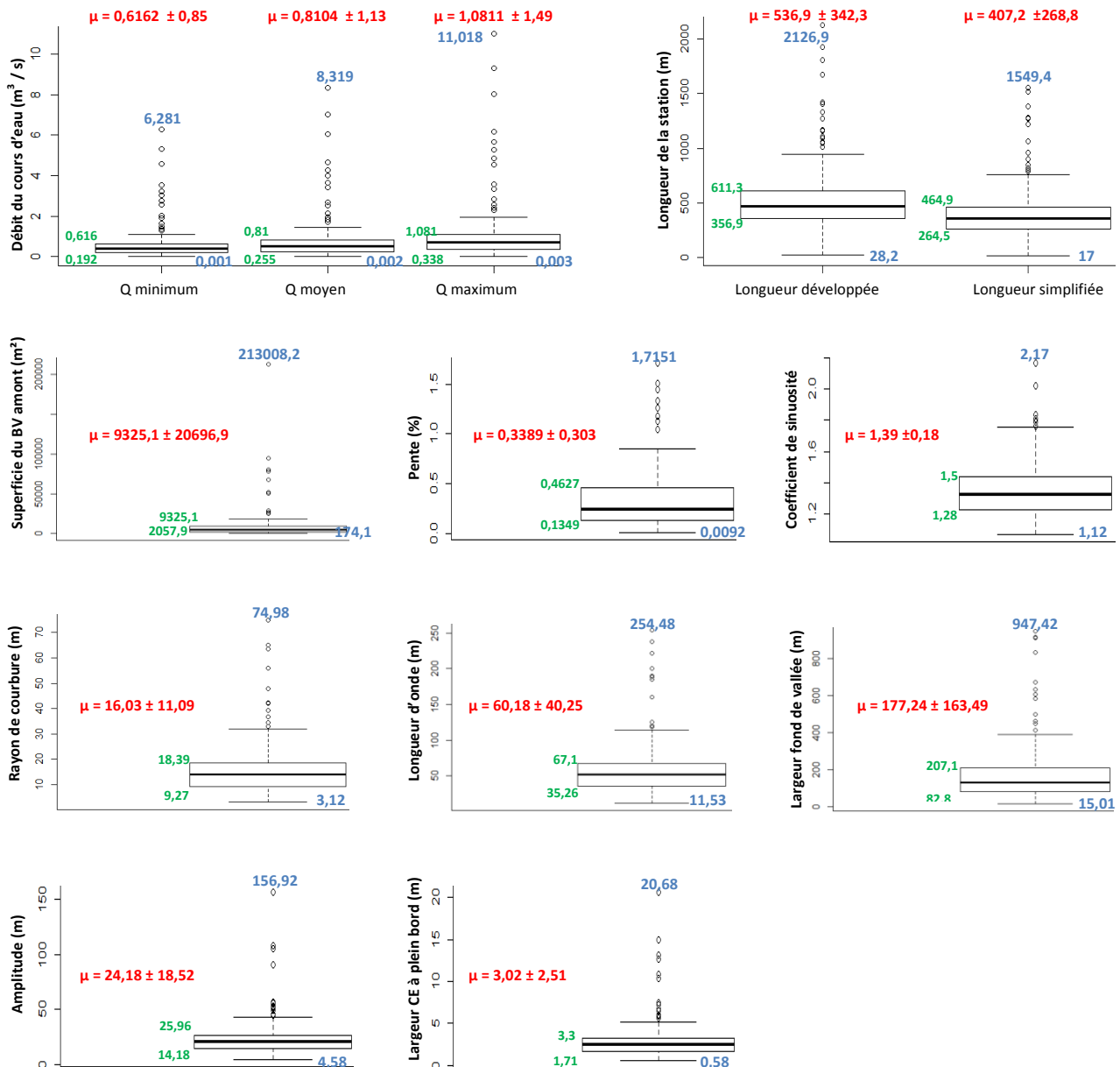


Figure 19 : Boîtes à moustaches représentant la dispersion des variables étudiées (en rouge,  $\mu$  = moyenne de l'échantillon  $\pm$  l'écart type ; les valeurs en bleu représentent les minimum et maximum ; les valeurs en vert représentent les premiers et troisièmes quartiles)

Pour les principales variables morphométriques étudiées (largeur à plein bord du cours d'eau, amplitude, rayon de courbure, longueur d'onde et largeur du fond de vallée), les écarts types inférieurs à la moyenne et les quantiles peu étalés sont signes d'une distribution limitée. Cependant, les huit autres variables présentent, à leurs échelles, une plus large dispersion.

### 3.2 Comparaison des coefficients de sinuosité numérisés puis calculés sur le terrain

La figure 20 expose la comparaison des coefficients de sinuosité de mêmes stations, entre ceux calculés par traitement SIG et ceux déterminés sur le terrain. Il existe une différence significative entre les deux, les coefficients calculés sur le terrain étant supérieurs aux coefficients déterminés par étude cartographique. Six stations sur treize présentent des écarts de mesure de plus de 0,2 unité entre les deux méthodes de calcul.

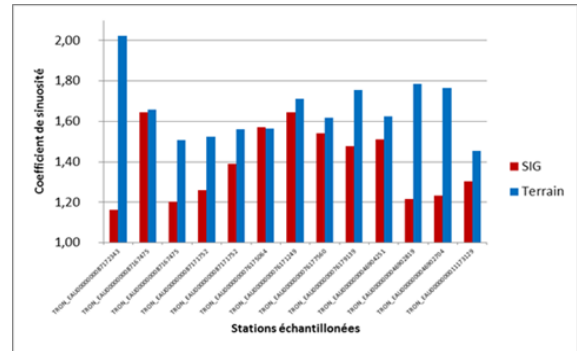


Figure 20 : Comparaison des coefficients de sinuosité déterminés sous SIG puis calculés sur le terrain pour un même tronçon

### 3.3 Discrimination des variables morphométriques

Dans un second temps, les relations entre variables du méandrage ont été étudiées grâce à plusieurs ACP centrée normée successives. Elles donnent la possibilité de visualiser d'éventuelles corrélations entre les variables quantitatives descriptives du méandrage, et d'en limiter le nombre. Les deux premiers axes de l'ACP ont été retenus, ils expliquent respectivement 60,7% et 10,2% de l'inertie totale (cf. figure 21). Le 1<sup>er</sup> axe est négativement corrélé à la pente et au coefficient de sinuosité, et positivement corrélé aux autres variables. Il traduit une opposition entre la pente et les variables morphométriques caractérisant les méandres. L'axe 2 quant à lui est particulièrement corrélé au coefficient de sinuosité et anti corrélé au débit et à la pente, mais il n'explique qu'un faible pourcentage d'inertie.

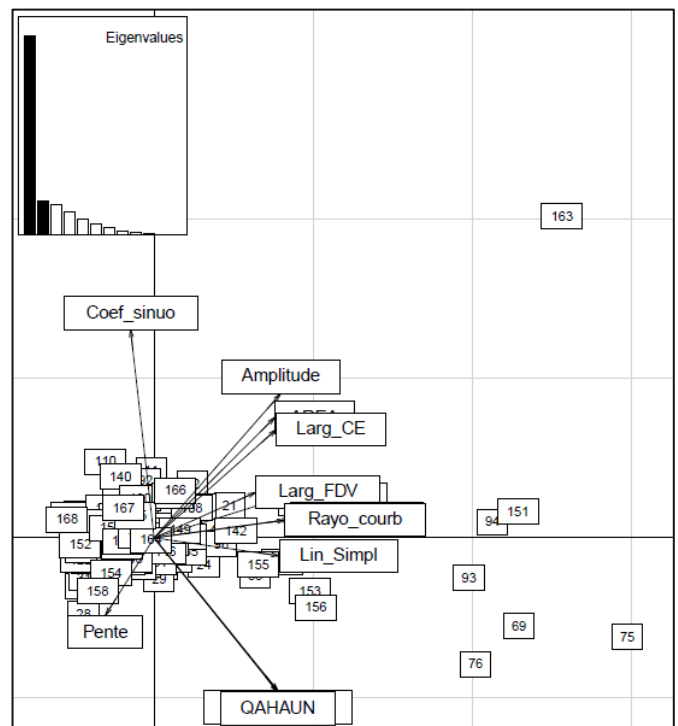


Figure 21 : Analyse en composante principale sur 13 variables quantitatives descriptives du méandrage (AREA : surface du bassin versant ; Larg\_CE : largeur à plein bord ; QAHAUN : débit à plein bord ; Coef\_sinuo : coefficient de sinuosité ; Larg\_FDV : largeur fond de vallée, Rayo\_courb : rayon de courbure ; Lin\_Simpl : linéaire simplifié de la station échantillonnée ; Amplitude : amplitude du méandre)

Cette ACP réalisée avec les données brutes ne présente que peu d'objets discriminants. Même en enlevant les stations qui sortent du lot, le nuage de stations reste concentré au centre de l'ACP. Ces travaux ont été réalisés de la même manière en utilisant les médianes, puis en transformant les données en  $\ln(x+1)$  (cf. annexes), mais ces démarches n'ont pas permis une meilleure discrimination des stations, elles restent regroupées à l'intersection des deux axes.

### 3.4 Corrélation entre variables descriptives

Les tests de Shapiro effectués sur l'ensemble des variables révèlent qu'elles ne suivent pas une loi normale. Ainsi, toutes les corrélations présentées en tableau 9 ont fait l'objet d'un test statistique non paramétrique de Spearman. A l'issue de ces tests, cinq couples de variables sont considérés comme ayant un lien entre elles (à ne pas confondre avec une relation de causalité entre l'une et l'autre) : la largeur à plein bord et l'amplitude ; la largeur à plein bord et le rayon de courbure ; la

largeur à plein bord et la longueur d'onde ; le débit et la longueur d'onde ; ainsi que la surface du bassin versant amont et l'amplitude des méandres.

Tableau 9 : Principaux résultats des corrélations entre variables morphométriques

Couple de variable	Pente - Coefficient de sinuosité	Largeur à plein bord - Amplitude	Largeur à plein bord - Rayon de courbure	Largeur à plein bord - Longueur d'onde	Largeur à plein bord - Largeur de fond de vallée	Longueur d'onde - Débit moyen	Amplitude - Surface du bassin versant
<b>P-value</b>	0,4231	$2,2*10^{-16}$	$8,9*10^{-13}$	$2,024*10^{-13}$	0,2643	$5,67*10^{-12}$	$2,1*10^{-16}$
<b>Corrélation</b>	NON	OUI	OUI	OUI	NON	OUI	OUI
<b>Valeur de r<sup>2</sup> si variable corrélées</b>	-	0,6505	0,5917	0,6094	-	0,5252	0,6794
<b>Rapport moyen</b>	-	A = 8,01 W	Rc = 5,31 W	$\lambda$ = 19,95 W	LFV = 53,09 W	-	-
<b>Rapport médian</b>	-	A = 8,19 W	Rc = 5,49 W	$\lambda$ = 20,25 W	LFV = 50,85 W	-	-

Pour ces corrélations, le coefficient  $R^2 > 0,5$  traduit une bonne représentation de la liaison entre deux variables. Ce sont les relations entre la largeur à plein bord et l'amplitude, ainsi que la surface du bassin versant amont et l'amplitude qui sont les mieux représentées par les régressions (cf. figure 22).

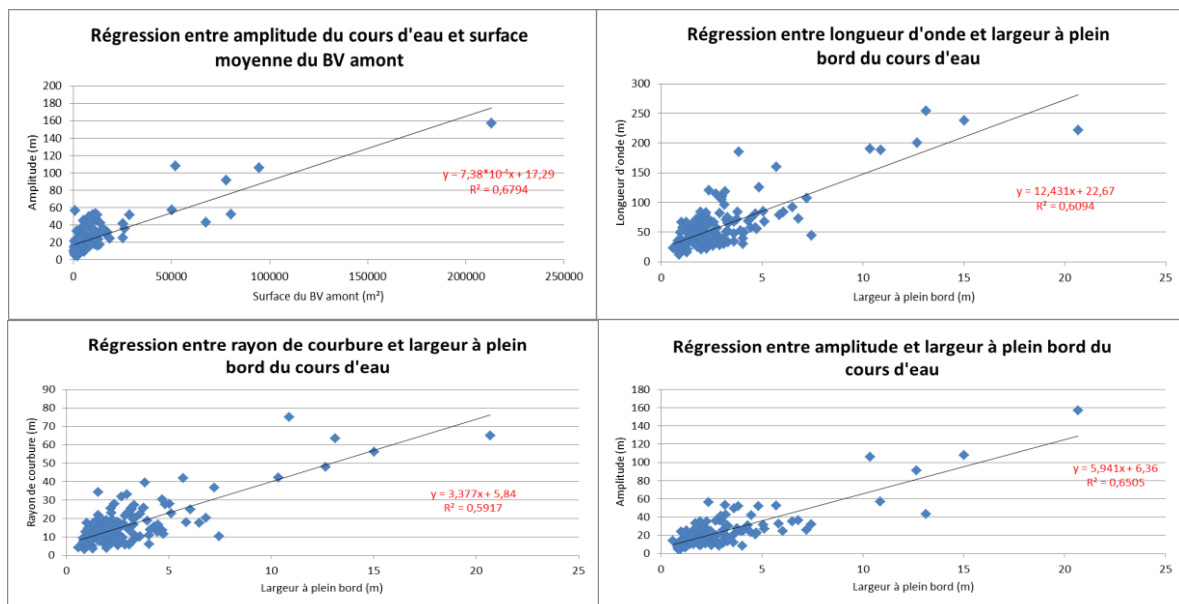


Figure 22 : Représentation graphique des régressions entre variables morphométriques

### 3.5 Résultats des opérations de reméandrage visitées

Parmi les 42 opérations de reméandrage recensées sur le territoire d'étude, douze ont été visitées sur le terrain (cf. tableau 10). En synthétisant les remarques formulées pour chaque site, les principales erreurs rencontrées sont regroupées en trois points :

- Profil en long : Pour 5 sites, la topographie du fond du lit restauré est mal dimensionnée, et la pente mal répartie sur le linéaire restauré. Cela engendre des côtes inter-radiers incohérentes ;
- Tracé en plan : Sur 6 sites, la disposition des faciès d'écoulement est faite de manière aléatoire. Parfois, les radiers sont absents par manque de recharge granulométrique ;
- Profil en travers : 5 sites présentent un lit restauré un peu trop enfoncé par rapport à une situation naturelle. Il faut prévoir des berges assez basses et subverticales, car des berges planes entraînent une sédimentation excessive au niveau des fosses.

Tableau 10 : Sites reméandrés ayant fait l'objet d'une visite sur le terrain

Département	Bassin versant	Toponyme cours d'eau	Commune	Technique de reméandrage	Longueur du lit mineur restauré (m)
22	Haute Rance	ruisseau du Clergé	Ereac	remise talweg	920
22	Ic	Ic	Binic	reconnexion ancien méandre	180
29	Aber Idult	Aber Idult	Saint Renan	remise talweg	1200
35	Ille et illet	ruisseau de la mare Bellanton	Liffré	remise talweg	450
35	Semnon	ruisseau de la Faroullais	Pléchâtel	bouchons	250
44	Marais Nord Loire	vallée des Soupirs	Savenay	remise talweg	150
49	Couasnon	Couasnon	Pontigné	remise talweg	425
49	Robinets et la Haie d'Allot	ru du Grand Bain	Liré	remise talweg	280
56	Ellé	Ellé	Langonnet	reconnexion ancien méandre	1100
56	Blavet	Fremeur	Pluméliau	remise talweg	150
56	Blavet	ruisseau de Stival	Malguénac	remise talweg	150
72	Huisne	Montreteaoux	Dehault	libre divagation	200

Ainsi, les principales techniques de reméandrage ont pu être étudiées (cf figure 23, 24, 25, 26).

Figure 24 : Reméandrage par remise dans le talweg

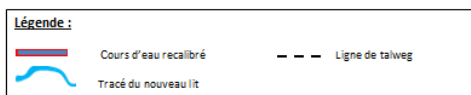
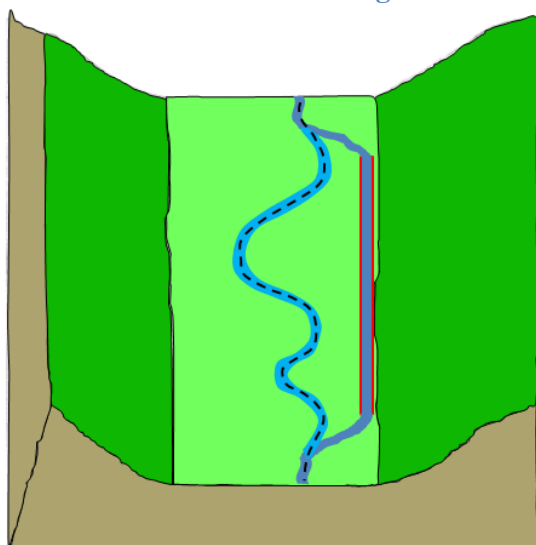


Figure 23 : Reméandrage par libre divagation des écoulements

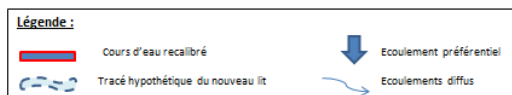
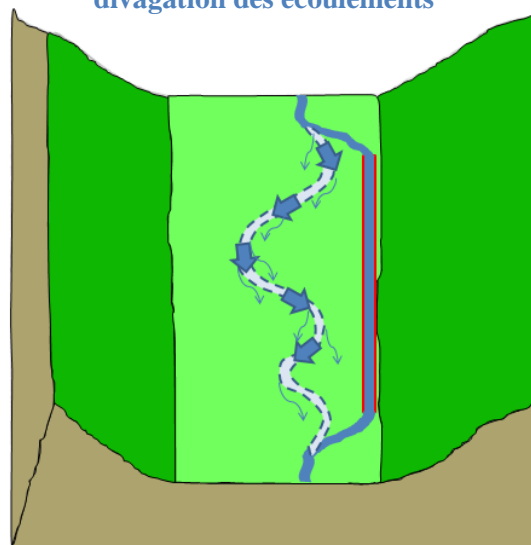


Photo n+2 travaux (53)



Photo n+1 travaux (56)



Photo avant travaux (72)



Photo n+1 travaux (72)



Photo n+3 travaux (72)



Photo n+5 travaux (72)

Figure 26 : Reméandrage par la technique des bouchons

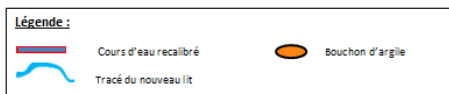
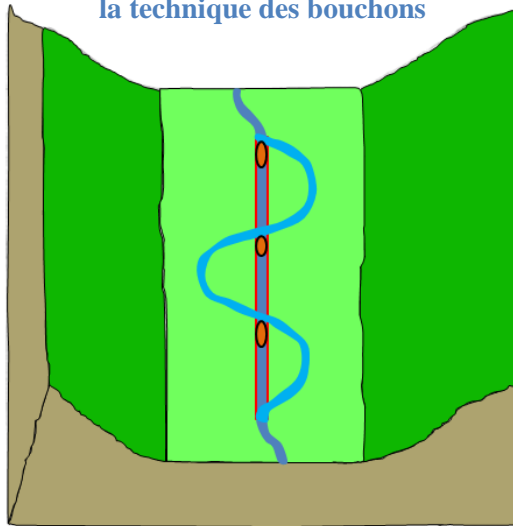
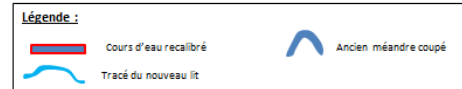
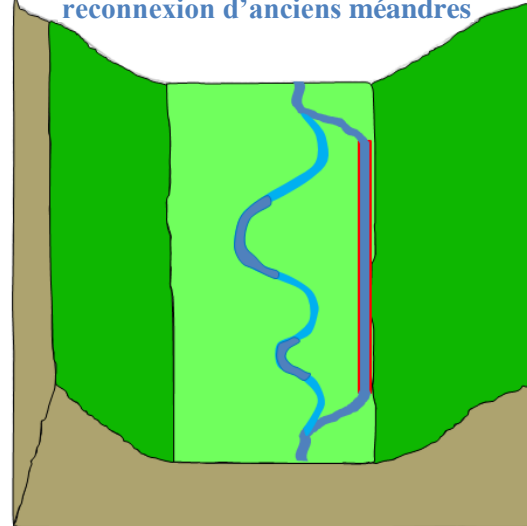


Figure 25 : Reméandrage par reconnexion d'anciens méandres



## 4. Discussion

### 4.1 Discussion : Liens entre variables

#### 4.1.1 Distribution et dispersion des données

##### a) Constat

Malgré les essais de discriminations des stations selon les variables caractéristiques des méandres, les analyses statistiques n'ont pas permis d'établir de relations précises entre les variables morphométriques. De plus, elles présentent de très fortes dispersions de valeurs (cf. figure 19). Ce constat est à mettre en lien avec les travaux de [Pearce & Collins \(2004\)](#) qui rappelle que même en régionalisant les données, la dispersion des valeurs est élevée. C'est la cause principale de la difficulté à établir des relations entre variables ([Malavoi & Bravard, 2010](#)).

La dispersion des valeurs prises par les variables sur les stations étudiées peut être expliquée par différentes hypothèses (cf. les deux prochains paragraphes).

##### b) Evolution temporelle des valeurs prises par les variables

Un cours d'eau naturel à méandres est un système dynamique dont la morphologie en plan évolue ([Saulas, 2008](#)). Ainsi les valeurs prises par les variables morphométriques évoluent elles aussi ([Held, 2011](#)). C'est l'état du système méandre à cet instant de l'étude qui va déterminer les valeurs prises par ces variables, d'où la possibilité d'observer de telle dispersion.

De plus, il est possible que certaines variables importantes dans la discrimination n'aient pas été échantillonnées. Les facteurs tels que le changement climatique, l'urbanisation ou la composition du sol modifient les variables de contrôle, et les variables morphométriques de réponse du tracé en plan s'ajusteront principalement en fonction de ces facteurs.

##### c) Limite de précision

Une limite de précision intervient lors de l'utilisation des images aériennes et de la BD TOPO. Ces images ne décrivent pas toujours bien la réalité du tracé en plan des cours d'eau, principalement pour ceux situés en tête de bassin, ou dans des zones à forte couverture végétale. Cette limite de précision peut contribuer à la dispersion des données.

Pour illustration, les différences de moyennes observées dans les coefficients de sinuosité en figure 20 peuvent s'expliquer par une meilleure précision de la mesure sur le terrain, et une plus

grande variabilité des mesures numérisées à partir de la BD TOPO. Ces différences relevées pour une même station suggèrent qu'il faut élever le coefficient de sinuosité dans le cas de mesures sous SIG.

L'étude Epteau (1998) sur l'Allier et le stage de Vierron (2015) à la DIR ONEMA Poitou-Charentes mentionnent que le calcul de la sinuosité est entaché d'un biais qui est fonction de la longueur de cours d'eau analysée, et de la localisation de la station étudiée au sein même du tronçon sinueux. Pour affiner les calculs, il peut être intéressant de fractionner le lit majeur selon des axes de vallée rectilignes, ou lorsqu'il y a des ruptures de pente, pour calculer des coefficients de sinuosité distincts (cf. figure 27).

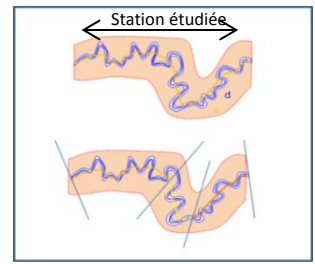


Figure 27 : fractionnement du lit pour le calcul de la sinuosité (Bramard, 2018 com.perso)

#### 4.1.2 Comparaison avec la bibliographie

##### a) Liens démontrés

Les corrélations entre les variables descriptives du méandrage exposées dans la bibliographie concernant la largeur à plein bord et l'amplitude (Pacaud & Roulier, 2010), le rayon de courbure (Chang, 1988) ou la longueur d'onde (Yalin & da Silva, 2001) sont des corrélations retrouvées dans notre jeu de données (cf. tableau 9). Cependant, les relations empiriques et le rapport de valeurs entre ces variables ne sont pas les mêmes que ceux présentés dans la bibliographie, excepté pour le rapport entre l'amplitude d'un méandre et la largeur à plein bord du cours d'eau :

$$\text{Amplitude d'un méandre} = 8,01 \times \text{Largeur à plein bord du cours d'eau}$$

##### b) Hypothèses avancées

Les rapports entre les variables descriptives et les gammes de valeurs obtenues en contradiction avec les études bibliographiques peuvent être expliquées selon différentes hypothèses :

- **Un biais d'échantillonnage des valeurs**, cette étude se limitant à une **extraction par points**, c'est-à-dire des valeurs prises par les variables à certains endroits fixes des tronçons étudiés. En effet, d'autres études peuvent travailler sur des valeurs extraites sur tout un linéaire de boucles étudiées, en considérant le tracé de la boucle comme une série spatiale continue de direction (Howard & Hemberger, 1991 ; Phillips & Robert, 2007). Par exemple, les valeurs de rayons de courbures ont été prises pour cinq cercles s'inscrivant au mieux dans les rayons formés par cinq boucles de méandre (cf. tableau 8). Ces valeurs seraient probablement différentes si elles étaient traitées en continues sur tout le linéaire du tronçon.

- **Une variance d'échelle**, cette étude étant composée presque pour moitié par des **cours d'eau en tête de bassin versant** avec des caractéristiques hydromorphologiques particulières associées au réseau hydrographique amont en tête de bassin versant. Or, les cours d'eau étudiés dans la bibliographie se situent généralement dans les cours inférieurs (Amoros & Petts, 1993 ; Roché & Frochet, 1993 ; Bravard & Petts, 2000). Ainsi les gammes de valeurs qui diffèrent de la bibliographie peuvent provenir de la particularité des têtes de bassins.

- **La dynamique des cours d'eau** (variation indépendante de l'échelle). La forme des méandres n'est peut-être pas liée à l'échelle à laquelle l'étude se situe, mais plutôt sur l'état dynamique des cours d'eau méandriformes étudiés. En effet, il faut considérer les cours d'eau à méandres comme un système à cycle évolutif et dynamique dans le temps. Indépendamment de l'échelle à laquelle l'étude se déroule, le système méandre forme un cycle avec des variables morphométriques communes, mais ces variables peuvent prendre des valeurs différentes selon



l'état du cycle. Par exemple, le rapport entre le rayon de courbure et la largeur à plein bord du cours d'eau dans cette étude est d'un ordre de grandeur deux fois supérieure à celui observé dans les travaux de Léopold & Wolman (1960) et de Chang (1988). La dynamique du système étudié peut être différente, et il n'est pas possible de situer précisément l'état du système à méandres à l'instant t du déroulement de cette étude. De même, l'état du système peut expliquer les coefficients de sinuosité inférieurs à 1,5 ; pouvant par exemple faire suite à un recouplement de boucle, ou à une expansion latérale dont la dynamique est très lente. En effet, la comparaison du tracé en plan des méandres entre les cartes anciennes et actuelles met en évidence que la dynamique des méandres sur le territoire est lente par rapport à ceux de la bibliographie étudiés sur le continent Américain, ces systèmes étant très dynamiques (forte pente et fort transfert solide) (Léopold & Wolman, 1960 ; Chang, 1988 ; Yalin & Da Silva, 2001; Phillips & Robert, 2007).

## 4.2 Discussion : Dimensionnement des opérations de reméandrage

Des premiers éléments issus des analyses de données et des observations de terrain ont pu être identifiés pour orienter les maîtres d'ouvrages lors des travaux de restauration des cours d'eau à méandres. Cette discussion sera découpée en trois axes, dont la prise en compte de chacun est indispensable lors du dimensionnement des travaux de reméandrage pour mener à bien ces opérations ambitieuses. Cette discussion concerne surtout la phase de dimensionnement, comme les constats font suite à des travaux déjà réalisés, et n'aborde que peu les phases de diagnostic et de suivi.

### 4.2.1 Tracé en plan

Aucune corrélation n'est prouvée entre le coefficient de sinuosité et la pente des cours d'eau étudiés (cf. tableau 9), alors que les travaux de Schumm (1963) et de Church (2002) proposaient des relations de corrélations entre ces deux paramètres. L'absence de lien peut provenir du choix d'étudier des coefficients de sinuosité proches. En effet, choisir des coefficients de sinuosité allant des styles fluviaux rectilignes à méandriformes aurait facilité la mise en évidence de lien entre ces variables.

Cependant, malgré le fait que certains résultats ne soient pas en adéquation avec ceux observés dans la littérature, les rapports entre les autres variables morphométriques étudiées (cf. tableau 9) dans cette étude présentent quelques valeurs guides pour le dimensionnement d'opérations sur le territoire. En moyenne, pour tout cours d'eau reméandré, les caractéristiques en plan de chaque méandre devraient se rapprocher de ces valeurs de références (cf. tableau 11) :

Tableau 11 : Rapport entre variables morphométriques et largeur à plein bord de petit cours d'eau

Relations entre variables et largeur à plein pour la restauration de petit cours d'eau
Amplitude $\approx 8 \times$ Largeur à plein bord
Longueur d'onde $\approx 20 \times$ Largeur à plein bord
Rayon de courbure $\approx 5,3 \times$ Largeur à plein bord

Ces rapports sont des valeurs de bases assez simples pour le dimensionnement de petits cours d'eau. De plus, l'analyse des variables morphométriques démontre une faible dispersion des distributions pour certaines d'entre elles, vérifiable par des quantiles peu étalés (cf. figure 19). Ainsi des ordres de grandeurs, compris entre le premier et le troisième quantile, concernant les valeurs descriptives des méandres étudiés sur le territoire peuvent être données pour guider les dimensionnements des travaux de reméandrage (cf. tableau 12). Globalement, la plupart des cours d'eau reméandrés sur le territoire possèdent des largeurs à plein bord identiques à la majorité des cours d'eau naturels étudiés, c'est-à-dire comprises entre 1,7 et 3,3m :

Tableau 12 : Ordre de grandeur indicatif pour un cours d'eau d'une largeur à plein bord comprise entre 1,7 et 3,3 m

Variables	Ordre de grandeur à respecter pour un cours d'eau d'une largeur à plein bord entre 1,7 et 3,3 m
Amplitude (m)	14 - 26
Longueur d'onde (m)	35 - 67
Rayon de courbure (m)	9 - 18

Pour les cas moins fréquents de reméandrage de plus grand cours d'eau ayant des largeurs à plein bord supérieures à 5 m, il est possible de suivre les équations issues des régressions (cf. figure 21 et tableau 13). Elles traduisent bien la variabilité du tracé en plan des grands cours d'eau :

Tableau 13 : Equation traduisant la valeur des variables morphométriques en fonction de la largeur à plein bord pour un cours d'eau > 5m

Relations entre variables et largeur à plein bord pour la restauration de grand cours d'eau
Amplitude = $5,94 \times$ Largeur à plein bord $\pm 6,36$ m
Longueur d'onde = $12,43 \times$ Largeur à plein bord $\pm 22,67$ m
Rayon de courbure = $3,37 \times$ Largeur à plein bord $\pm 5,84$ m

#### 4.2.2 Profil en long

L'ajustement du profil en long d'un cours d'eau est directement en lien avec la contrainte cisailante. Elle représente la contrainte mécanique de la force du courant appliquée le long du fond du lit, qui va modifier la pente du fond et donc son profil en long. La prise en compte de cet aspect est primordiale dans toute opération de reméandrage. En effet, un mauvais dimensionnement du profil en long du cours d'eau est susceptible de générer des impacts sur les écoulements et le transit sédimentaire. Ces variations locales de la pente sont particulièrement remarquables si les côtes du fond du lit sont comparées au niveau des radiers. Pour faciliter la compréhension des figures suivantes, les fosses de dissipations et les mouilles de concavité à l'aval immédiat des radiers n'ont pas été représentées dans le profil en long.

La figure 28 ci-dessous schématise un profil en long représentatif des méandres naturels, présentant des longueurs de séquences radier/mouille égales à 6 fois la largeur à plein bord du cours d'eau, avec une alternance de faciès et donc un bon fonctionnement hydromorphologique des méandres (Thorne *et al.*, 1992). La pente est répartie entre les radiers en suivant la relation : côte en tête de radier aval = côte en fin de radier amont.

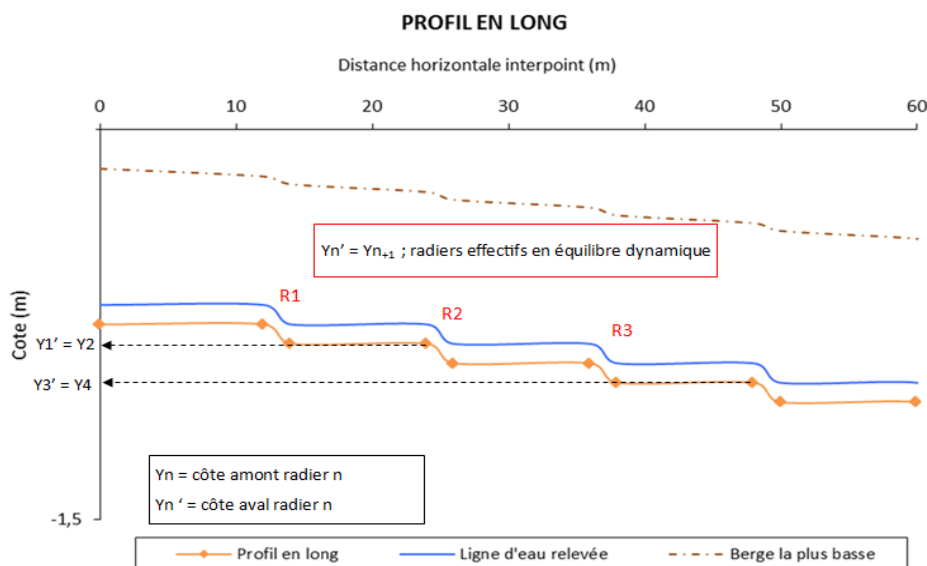


Figure 28 : Profil en long cohérent d'un tronçon de cours d'eau à méandres naturels



Radier naturel (35)



Radier naturel (35)

La figure 29 schématise un profil en long après reméandrage, présentant un aspect morphologique et des écoulements inadaptés à une situation de référence. Le profil en long présente des côtes incohérentes entre radiers, engendrant des conséquences soit sur l'érosion du fond (entre R1 et R2), soit sur une homogénéisation des écoulements et un colmatage du lit (entre R2 et R4). Ainsi, bien que les travaux de restauration visent une amélioration de l'état hydromorphologique, si les côtes de radiers ne sont pas minutieusement prises et respectées lors des travaux, il en résulte des erreurs de dimensionnements susceptibles de limiter les effets bénéfiques de la restauration.

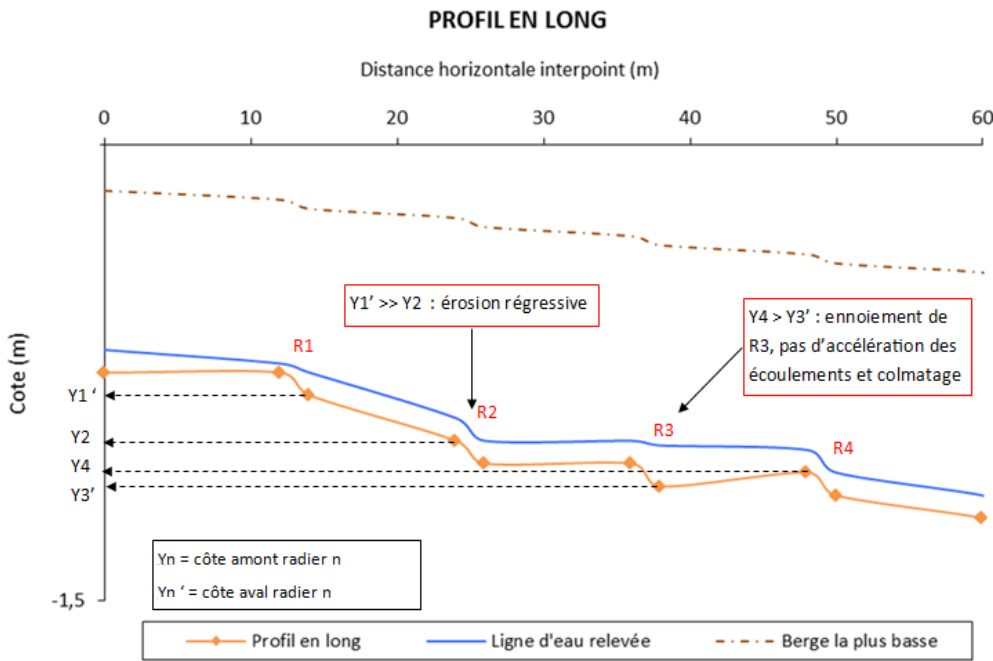


Figure 29 : profil en long incohérent après reméandrage



Radier érodé (72)



Radier colmaté (35)



Radier ennoyé (56)

De plus, la répartition de la pente du lit est en lien direct avec l'alternance de faciès retrouvée au sein des méandres. En effet, dans l'étude des méandres naturels, les radiers sont constamment localisés au niveau des points d'inflexions des méandres, et les mouilles (ou fosses) dans les concavités au niveau des coudes du méandre, comme décrit dans la bibliographie (Allen, 1984 ; Cacas *et al.*, 1986 ; Held, 2011). Quelques exceptions ponctuelles sur le positionnement des faciès existent, mais sont principalement dues aux obstacles naturels présents dans le lit mineur, créant des variations d'écoulements. Il semble important de rappeler qu'en plus du bénéfice hydromorphologique, ces alternances de faciès améliorent la diversité en habitat des milieux (Lorenz, 2009). Par conséquent, ils ont des effets bénéfiques sur les populations d'êtres vivants inféodés aux milieux aquatiques (Lorenz *et al.*, 2009 ; Roni *et al.*, 2014 ; Champkin *et al.*, 2018) et sur la qualité des eaux (Oraison *et al.*, 2011).

Suite à ces observations, il est donc préconisé lors d'un reméandrage par restauration active de prendre les côtes précises en tête et en fin de radier, en suivant cette équation :

$$\text{Côte en tête du radier aval} = \text{Côte en fin du radier amont}$$

Le respect de ces côtes au sein du tronçon restauré permet un équilibre entre diversité de faciès, accélération des écoulements et effet décolmatage des radiers. **Il faudra localiser ces radiers sur les zones d'inflexions entre deux méandres**, et créer si besoin les zones plus profondes dans les

concavités des méandres. Pour des cours d'eau à forte puissance spécifique, avec un substrat facilement érodable, il est possible de prendre à minima les côtes de radiers mais sans creuser les mouilles. Elles pourront se former toutes seules grâce à la force hydraulique. Ces précautions sont précieuses pour favoriser la reprise de la dynamique naturelle du système.

### 4.2.3 Géométrie en travers

Compte tenu de la spécificité du territoire d'étude (travaux de rectification lourds, faible pente, faible puissance spécifique...), si aucun travaux de restauration n'étaient entrepris, plusieurs centaines (voire milliers) d'années seraient nécessaires au déroulement du cycle d'auto-ajustement et de résilience des cours d'eau présenté par [Cluer & Thorne \(2013\)](#).

Or, une restauration active par reméandrage du cours d'eau en contraignant son nouveau tracé peut conduire à de nouvelles contraintes sur sa géométrie en travers, ralentissant la reprise de la dynamique naturelle du système. D'où l'intérêt de la méthode de reméandrage dite « par libre divagation » (cf. figure 24), permettant de remettre le système à zéro, puis de laisser naturellement le cours d'eau reconstruire ses méandres. Cette méthode d'intervention est possible si les contraintes sur la géométrie en travers et les contraintes mécaniques sont supprimées, afin que le système à méandres jouisse d'un espace minimum de mobilité pour auto-ajuster son profil en travers, en long et en plan, afin de permettre la reprise de la dynamique naturelle ([Brewer & Lewin, 1998](#) ; [Malavoi & Bravard, 2010](#)).

Pour aider le cours d'eau à se défaire de la contrainte mécanique du substrat, il faudra donc décaper le fond de vallée sur une largeur d'au moins 12 fois la largeur à plein bord du cours d'eau pour permettre les ajustements morphologiques ([Chang, 1988](#)). Cette valeur guide est décrite dans la bibliographie comme l'espace minimum de mobilité nécessaire pour l'ajustement et la migration latérale des méandres. Avec un espace de mobilité inférieur, le cours d'eau n'aura peut-être pas la place pour ajuster la morphologie de ses méandres.

Cependant, cette étude démontre que la largeur de fond de vallée moyenne est d'environ 50 fois la largeur à plein bord des cours d'eau du territoire (cf. tableau 9). Mais ces rapports sont rarement atteignables dans le cadre d'opération de reméandrage, principalement dû aux contraintes foncières et aux difficultés opérationnelles. De plus, les cours d'eau du territoire possédant peu d'apports solides provenant de l'amont, une recharge granulométrique peut-être à prévoir lors de la phase travaux, ou bien en année n+1 après travaux afin d'aider à la reconstitution du matelas alluvial. En raison des risques ponctuels de départ de matières en suspension, cette méthode n'est pas préconisée si de forts enjeux sont présents à l'aval immédiat : stations d'eau potable, présence d'écrevisses à pieds blancs, de moules perlières...

## 5. Conclusion et perspectives d'avenir

### Conclusion

L'objet de cette étude était d'améliorer les connaissances sur les principales caractéristiques des méandres de cours d'eau, pour être en capacité d'assurer un encadrement technique du dimensionnement des opérations de reméandrage. Les analyses montrent une très forte diversité des valeurs prises par les variables d'ajustement du tracé en plan des méandres. Cette diversité soulève de

nombreuses hypothèses, et les relations établies entre variables sur le territoire d'étude sont peu comparables à la bibliographie. La variabilité des systèmes est énorme, compliquée à maîtriser et les réponses du tracé en plan des méandres sont peut-être fonction de facteurs très locaux. Ces constats invitent à compléter les analyses de données et à intégrer de nouveaux paramètres responsables de la fluctuation des variables de contrôle et de réponse (évolution des débits dues à l'urbanisation, aux changements climatiques...) afin d'anticiper les évolutions du tracé en plan des méandres.

Au vu des difficultés à établir des liens entre variables, il est essentiel de se baser en priorité sur des références spatiales et/ou historiques pour le dimensionnement des opérations de reméandrage. Si ces dernières sont imprécises, il est intéressant d'avoir recours aux relations issues de la littérature.

Toutefois, certaines données de cette étude peuvent fournir des préconisations techniques opérationnelles à adopter dans le cadre de projet de reméandrage. Une restauration hydromorphologique combinant la forme en plan des méandres, la prise en compte des contraintes mécaniques de pente, la diversification des faciès et le respect des positionnements de ces derniers semble essentielle pour favoriser la résilience de l'hydrosystème. La reconfiguration de la forme du lit peut permettre de relancer la dynamique du système à méandres, de retrouver un cours d'eau avec un fonctionnement hydromorphologique naturel et une diversité du milieu en termes d'habitat.

### **Perspectives d'avenir et axe de recherche :**

De nombreux cours d'eau du territoire ont subi des travaux de rectifications lourds. Certains s'écoulent dans un contexte urbain, alors que d'autres sont localisés en pleine campagne, sans enjeux urbain ni même parfois agricole. Or, la restauration de ces derniers est primordiale dans l'atteinte du bon état des masses d'eau. Ainsi, des études pourraient voir le jour pour déterminer la faisabilité de reméandrer ces cours d'eau.

Il est important d'actualiser la base de données concernant les opérations de reméandrage sur le territoire de la DIR, dans l'optique d'obtenir *in fine* un recensement exhaustif des reméandrages. De même, il est judicieux de poursuivre l'acquisition de données régionalisées concernant les méandres naturels, afin de consolider la base de données pour à terme la mettre à disposition des acteurs locaux.

Les échanges avec les maîtres d'ouvrages ont démontré un manque de connaissance sur le reméandrage, un manque d'appui et de temps pour la réalisation de suivi écologique intégrant au minimum un état initial et un état  $n + x$  après travaux. Ces suivis pourront être facilités par la sortie imminente de guide spécifique aux suivis (guide suivi et Suivi Scientifique Minimal). Afin d'améliorer la technique de reméandrage, il est conseillé d'intégrer dans ces suivis une caractérisation précise des travaux réalisés. En effet, il semble intéressant d'aborder les résultats des opérations de reméandrage sous des angles différents en fonction de la méthode de reméandrage employée.

De plus, il est essentiel d'étudier les différentes techniques de reméandrage afin de définir leurs cadres d'application et leurs limites. Une des perspectives de la prise en compte de l'aspect dynamique du tracé en plan des cours d'eau lors d'un reméandrage serait de réaliser les travaux en intégrant les caractéristiques dynamiques des méandres, dont la présence d'ancien bras. Il apparaît ici un intérêt d'étudier la présence et les caractéristiques des « oxbow - lake » sur le territoire, dans l'objectif de les introduire lors de la phase de dimensionnement des travaux. Ce rapport donnera lieu à la rédaction d'une fiche synthétisant les recommandations sur la méthode de reméandrage.

Enfin, cette étude ne présente pas les données dynamiques nécessaires pour étudier ou prédire l'évolution des boucles de méandres. Si une étude similaire est reproduite dans le futur, il peut donc être intéressant de travailler sur d'autres éléments, tels que le changement climatique ou l'urbanisation, qui vont modifier les variables de contrôle et de réponses, pour anticiper les changements et les évolutions du tracé en plan dans ces zones à risques.

## Références bibliographiques

- ALBER, A. (2012).** Etude multi-échelle de la dynamique latérale des tronçons fluviaux. *Application au bassin rhodanien*. University of Lyon, PhD Thesis.
- ALLEN J.R.L. (1984).** Sedimentary structures, volume 11. Elsevier, Amsterdam.
- AMOROS, C. (2001).** The concept of habitat diversity between and within ecosystems applied to river side-arm restoration. *Environmental management*, 28(6), 805-817.
- AMOROS, C., PETTS, G.E. (1993).** Hydrosystèmes Fluviaux. Masson, Paris.
- APPLETON, J. (1975).** *The experience of landscape*. John Wiley, London, UK.
- ARNOLD C., BOISON P., PATTON P. (1982).** Sawmill Brook : an example of rapid geomorphic change related to urbanization. *Journal of Geology*, 90 : 155-166.
- ARNOULD, P., GLON, E. (2006).** Wilderness, usages et perceptions de la nature en Amérique du Nord, *Annales de Géographie*, 649, 227-238.
- BARBOUR, M. T., GIBSON, G. R., STRIBLING, J. B., GERRITSEN, J., & KARR, J. R. (1996).** *Biological Criteria: Technical guidance for streams and small rivers* (No. PB--96-209770/XAB; EPA--822/B-96/001). Environmental Protection Agency, Washington, DC (United States). Office of Water.
- BARDON, E. (2009).** Restauration hydromorphologique des petits cours d'eau de plaine : synthèse, comparaison et choix des techniques à appliquer. Master 2. Université de Poitiers, 115p.
- BEECHIE, T. J., LIERMANN, M., POLLOCK, M. M., BAKER, S., & DAVIES, J. (2006).** Channel pattern and river-floodplain dynamics in forested mountain river systems. *Geomorphology*, 78(1-2), 124-141.
- BLACHE, J. (1944).** « Les méandres ». *Géo carrefour*, p99-102.
- BLANDIN, P. (2009).** *De la protection de la nature au pilotage de la biodiversité*. Éditions Quae.
- BONADA, N., ZAMORA-MUÑOZ, C., RIERADEVALL, M., & PRAT, N. (2004).** Trichoptera (Insecta) collected in Mediterranean river basins of the Iberian Peninsula: taxonomic remarks and notes on ecology. *Graellsia*, 60(1), 41-69.
- BRAMARD M. (2012).** Formation sur la restauration des petits cours d'eau de plaine, supports de présentation
- BRAVARD J-P., PETIT F. (1997).** Les cours d'eau, Dynamique du système fluviale. Paris : Armand Colin, 221 p.
- BREWER, P. A., LEWIN, J. (1998).** Planform cyclicity in an unstable reach: complex fluvial response to environmental change. *Earth Surface Processes and Landforms*, 23(11), 989-1008.
- BRICE, J. C. (1964).** *Channel patterns and terraces of the Loup Rivers in Nebraska*. US Government Printing Office.
- BRICE J.C. (1974).** *Evolution of Meander Loops*, Geological Society of America Bulletin, vol. 85. p 581-586.
- BRICE J.C. (1975).** Air photo interpretation of the form and behavior of alluvial rivers. Final report to the U.S. Army Research Office, Washington, D.C.
- BRICE, J. C. (1982).** Stream channel stability assessment, Rep. FHWA/RD-82/Â02 , 42 pp., Off. of Res. and Dev., Federal High-way Admin., Washington, D. C.
- BROOKES, A. (1987).** River channel adjustments downstream from channelized streams in England and Wales. *Earth Surface Processes and Landforms*, 12, 337-351.
- BROOKES, A. (1988).** Rivers channelization, Perspectives for environmental management. Wiley interscience, 326 p.
- BUNN, S. E., & ARTHINGTON, A. H. (2002).** Basic principles and ecological consequences of altered flow regimes for aquatic biodiversity. *Environmental management*, 30(4), 492-507.
- BUNUSEVAC, M. (2007).** Renaturation des cours d'eau et gestion des zones humides - Ministère de l'Environnement, Ministère de l'Intérieur et de l'Aménagement du Territoire luxembourgeois, 99 p.
- CACAS, J., DEGOUTTE, G., DUTARTRE, A., GROSS, F., & VUILLOT, M. (1986).** Aménagement de rivières: trois études de cas.

- CADOR, J.-M., LESPEZ, L. (2012).** Les cours d'eau bas-normands aujourd'hui : entre hydrosystèmes et systèmes hydrauliques, in Lespez, L. (Ed.), *Paysages et gestion de l'eau : sept millénaires d'histoire des vallées en Normandie*, Bibliothèque du Pôle rural 3, Presses universitaires de Caen, MRSH Caen, 235-272.
- CAMPANA, N.A., TUCCI, C.E.M. (2001).** Predicting floods from urban development scenarios : case study of the Diluvio basin, Porto Alegre, Brazil. *Urban Water*, 3 : 113-124.
- CHANDESRI, A., MENGIN N., MALAVOI J.-R., SOUCHO, Y., PELLA H., WASSON J.-G. (2008).** *Système Relationnel d'Audit de l'Hydromorphologie des Cours d'Eau - Atlas à large échelle*. Cemagref Lyon BEA/LHQ et Ministère de l'aménagement du Territoire et de l'Environnement, Direction de l'Eau, 64 p.
- CHAMPKIN, J. D., COPP, G. H., SAYER, C. D., CLILVERD, H. M., GEORGE, L., VILIZZI, L., WALKER, A. M. (2018).** Responses of fishes and lampreys to the re-creation of meanders in a small English chalk stream. *River Research and Applications*, 34(1), 34-43.
- CHANG, H. (1988).** Cause of River Meandering. In *International Conference on River Regime. Hydraulics Research Limited, Wallingford, Oxon UK. 1988. p 83-93, 2 fig, 35 ref.*
- CHURCH, M. (2002).** Geomorphic thresholds in riverine landscapes. *Freshwater Biology* 47, 541-557.
- CLUER, B., THORNE, C. (2013).** A stream evolution model integrating habitat and ecosystem benefits. *River Research and Applications*, 30(2), 135-154.
- COUVERT, P. LEFORT, J.-L. PEIRY, P. BELLEUDY (1999).** La gestion des rivières, transports solides et atterrissements - Les études de l'Agence de l'eau n°65, ISSN 11610425, 97p.
- CULLEN, G. (1961).** *Townscapes*. Architectural Press, London, UK.
- DAVIS, R. J., GREGORY, K. J. (1994).** A new distinct mechanism of river bank erosion in a forested catchment. *Journal of Hydrology*, 157(1-4), 1-11.
- DEPRET, T., GAUTIER, E., HOOKE, J., GRANCHER, D. (2012).** « réajustement historique de méandres de faible énergie latéralement contraints (Cher). Université Paris 1, Paris 8, Laboratoire de Géographie Physique, CNRS, University of Liverpool Roxby Building, Liverpool, UK.
- DE LAPPARENT, A. (1907).** "Leçon de géographie physique" 3ème édition, p165.
- DURY, G. H. (1965).** *Theoretical implication of underfit streams* (Vol. 452). US Government Printing Office.
- ELOSEGI, A., DÍEZ, J., MUTZ, M. (2010).** Effects of hydromorphological integrity on biodiversity and functioning of river ecosystems. *Hydrobiologia*, 657(1), 199-215.
- EPTEAU AUVERGNE, D. I. R. E. N. (1998).** Étude de l'Allier entre Vieille-Brioude et Villeneuve. *Agence de l'eau Loire Bretagne, Orléans*.
- FREEMAN, M.C., PRINGLE, C.R. JACKSON. (2007).** Hydrologic Connectivity and the Contribution of Stream Headwaters to Ecological Integrity at Regional Scales. *Journal of the American Water Resources Association*, 43 : 5-14.
- FROTHINGHAM, K.M., RHOADS, B.L. (2003).** Three-dimensional flow structure and channel change in an asymmetrical compound meander loop, Embarras River, Illinois. *Earth Surface Processes and Landforms*, 28 (6), pp. 625-644.
- FUSTEC, E., GARNIER, I., SCHANEN, O., GAILLARD, S., DZANA, J.G. (1998).** Les zones riveraines : des milieux divers aux multiples fonctions. In « *La Seine en son bassin, Fonctionnement écologique d'un système fluvial anthropisé* », MEYBECL M., DE MARSILY G., FUSTEC E., Elsevier, Paris : 211-262.
- GALAY, V.J. (1983).** Causes of river bed degradation. *Water Resources Research*, 19 : 1057-1090.
- GAUTIER E., BRUNSTEIN D., VAUCHEL P., ROULET M., FUERTES O., GUYOT J.L., DAROZZES J., BOURREL L. (2007).** Temporal relations between meander deformation, water discharge and sediment fluxes, the Rio Beni floodplain (Bolivian Amazonia). *Earth Surface Processes and Landforms* 32 (2), pp. 230-248.
- GERMAINE, M. A., BARRAUD, R. (2013).** Les rivières de l'ouest de la France sont-elles seulement des infrastructures naturelles ? Les modèles de gestion à l'épreuve de la directive-cadre sur l'eau. *Natures Sciences Sociétés*, 21(4), 373-384.
- GERMAINE, M. A., LESPEZ, L. (2016).** La rivière désaménagée? Les paysages fluviaux et l'effacement des seuils et des barrages en Europe de l'Ouest et en Amérique du Nord-Est. *Bulletin de la Société Géographique de Liège*, 67, 223-254.
- GILVEAR, D., WINTERBOTTOM, S., SICHINGABULA, H. (2000).** Character of channel planform change and meander development: Luangwa River, Zambia. *Earth Surface Processes Landforms*, 25, pp. 421-436.

- GROSPRETRE, L., SCHMITT, L. (2008)** « Etude hydro-géomorphologique de l'Yzeron et définition d'indicateurs de suivi. Partie 1 : Diagnostic hydro-géomorphologique des affluents et sous-affluents de l'Yzeron et des branches principales du réseau hydrographique et mesures de réhabilitation. », SAGYRC, Grand Lyon, 130 p.
- GUITTER, E. (2004)**. Physique statistique de modèles contraints sur réseaux réguliers et aléatoires: des plages aux méandres. Physique mathématique [math-ph]. Université Pierre et Marie Curie – Paris VI, <tel-00006781>.
- HAUER, C., UNFER, G., SCHMUTZ, S., HABERSACK, H. (2007)**. The importance of morphodynamic processes at riffles used as spawning grounds during the incubation time of nase (*Chondrostoma nasus*). *Hydrobiologia*, 579(1), 15-27.
- HARMAR, O. P., CLIFFORD, N. J. (2006)**. Planform dynamics of the lower Mississippi River. *Earth Surface Processes and Landforms*, 31(7), 825-843.
- HEIN, T., BARANYI, C., HEILER, G., HOLAREK, C., RIEDLER, P., SCHIEMER, F. (1999)**. Hydrology as a major factor determining plankton development in two floodplain segments and the River Danube, Austria. *Large Rivers*, 439-452.
- HELD, A. E. (2011)**. Apport de la paléohydrologie dans la quantification des rôles respectifs du climat et de la tectonique des systèmes fluviaux méandriiformes fossiles: application à des systèmes oligo-miocènes d'Europe occidentale (Doctoral dissertation, Paris, ENMP).
- HEO, J., DUC, T. A., CHO, H. S., CHOI, S. U. (2009)**. Characterization and prediction of meandering channel migration in the GIS environment: A case study of the Sabine River in the USA. *Environmental monitoring and assessment*, 152(1-4), 155.
- HICKIN, E.J., NANSON, G.C. (1975)**. The Character of Channel Migration on the Beaton River, Northeast British Columbia, Canada. *Geological Society of America Bulletin*, 86, pp. 487-494.
- HOGARTH, W. (1753)**. *The analysis of beauty*. Reprinted in 1997 by Yale University Press, New Haven, Connecticut, USA.
- HOLLIS, G.E. (1975)**. The effects of urbanization on floods of different recurrence intervals. *Water Resources Research*, 11 : 431-435.
- HOOKE, J. (1995)**. River channel adjustment to meander cutoffs on the River Bollin and River Dane, northwest England. *Geomorphology*, 14, pp. 235-253.
- HOOKE, J. (2003)**. River meander behaviour and instability: a framework for analysis. *Transactions of the Institute of British Geographers*, 28(2), 238-253.
- HOOKE, J. (2006)**. *Spatial variability, mechanisms and propagation of change in an active meandering river*.
- HOOKE, J. (2007)**. Spatial variability, mechanisms and propagation of change in an active meandering river. *Geomorphology*, 84(3-4), 277-296.
- HOOKE, J.M., YORKE, L. (2010)**. Rates, distributions and mechanisms of change in meander morphology over decadal timescales, River Dane, UK. *Earth Surface Processes and Landforms*, 35 (13), pp. 1601-1614.
- HOWARD, A.D., HEMBERGER, A.T. (1991)**. Multivariate characteristics of meandering. *Geomorphology* 4: 161-186.
- HUGHES, R. M., LARSEN, D. P., OMERNIK, J. M. (1986)**. Regional reference sites: a method for assessing stream potentials. *Environmental management*, 10(5), 629-635.
- HUGHES, R. M. (1995)**. Defining acceptable biological status by comparing with reference conditions. *Biological assessment and criteria: tools for water resource planning and decision making*. CRC Press. Boca Raton, FL. p. 31-48.
- IOANA-TOROIMAC, G. (2009)**. La dynamique hydrogéomorphologique de la rivière Prahova (Roumanie): fonctionnement actuel, évolution récente et conséquences géographiques (Doctoral dissertation, Lille 1).
- JEAN, L. (1971)**. Sédimentologie des fonds lagunaires et estuariens variations morphologiques saisonnières de l'embouchure d'un fleuve en climat intertropical (le bandama-côte d'ivoire).
- JULIAN, J.P. (2006)**. Hydrolic erosion of cohesive riverbanks. *Geomorphologie* 73 : 193-206.
- KAPLAN, R., KAPLAN, S. (1989)**. *The experience of nature: a psychological perspective*. Cambridge University Press, New York, USA.
- KLEINHANS, M. G., VAN DEN BERG, J. H. (2011)**. River channel and bar patterns explained and predicted by an empirical and a physics-based method. *Earth Surface Processes and Landforms*, 36(6), 721-738.
- KONDOLF, G. M. (2006)**. River restoration and meanders. *Ecology and Society*, 11(2).
- KREUGER, J. (1998)**. Pesticides in stream water within an agricultural catchment in southern Sweden, 1990-1996. *The Science of the Total Environment*, 216 : 227-251.



- LAFLEUR, P.E., GRANDIENNOT, C., GREGOIRE, S. (1999).** « Etude préalable à la définition des conditions relatives à l'implantation de nouveaux plans d'eau dans le secteur Seine-amont. », O.G.E., Agence de l'eau Seine Normandie, 59 p.
- LAPOINTE, M.F., CARSON, M.A. (1986).** Migration patterns of an asymmetric meandering river: The Rouge River, Quebec. *Water Resources Research*, 22, pp. 731-743.
- LARSEN, E. W., FREMIER, A. K., GIRVETZ, E. H. (2006).** Modeling the effects of variable annual flow on river channel meander migration patterns, Sacramento River, California, USA. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 42(4), 1063-1075. A
- LARSEN, E. W., PREMIER, A. K., GRECO, S. E. (2006).** Cumulative effective stream power and bank erosion on the Sacramento River, California, USA. *JAWRA Journal of the American Water Resources Association*, 42(4), 1077-1097.
- LARSEN, E. W., GIRVETZ, E. H., FREMIER, A. K. (2006).** Assessing the effects of alternative setback channel constraint scenarios employing a river meander migration model. *Environmental Management*, 37(6), 880-897.
- LE BIHAN, M. (2009).** « L'enterrement des cours d'eau en tête de bassin en Moselle (57). », Université Paul Verlaine de Metz, 46 p.
- LELIAVSKY, S. (1955).** An introduction to fluvial hydraulics: London, Constable and Co., 257 p.
- LEOPOLD, L. B., LANGBEIN, W. B. (1964).** Quasi-equilibrium states in channel morphology. *American Journal of Science*, 262(6), 782-794.
- LEOPOLD, L. B., LANGBEIN, W. B. (1966).** River meanders. *Scientific American*, 214(6), 60-73.
- LEOPOLD, L. B., MADDOCK, T. (1953).** The hydraulic geometry of stream channels and some physiographic implications (Vol. 252). US Government Printing Office.
- LEOPOLD, L.B., WOLMAN, M.G. (1957).** River channel patterns-braided, meandering and straight, U.S. Geol. Surv. Prof. Paper 282 B, p39-85.
- LEOPOLD, L. B., WOLMAN, M. G. (1960).** River meanders. *Geological Society of America Bulletin*, 71(6), 769-793.
- LEROUX, J. (2009).** « La dynamique des méandres du rio Ucayali ». rapport de stage université Rennes 1. 18p.
- LEWIN, J., BRINDLE, B.J. (1977).** Confined meanders. In: *River channel changes*, Gregory K.J., Ed. Wiley, Chichester, pp. 221-233.
- LEWIN, J. (1983).** Changes of channel patterns and floodplains. In: *Background to paleohydrology: a perspective*, Ed. Gregory, Wiley J. and Sons, Chichester, pp. 303-319.
- LEVET, D., LAURANS, Y., SARRAZA, M., DUBIEN, I. (2000).** Effets de l'extraction de granulats alluvionnaires sur les milieux aquatiques - Les études des Agences de l'eau n°71 – ISSN 1161-0425, 41p.
- LORENZ, A., HERING, D., FELD, C.K., ROLAUFFS, P. (2004).** A new method for assessing the impact of morphological degradation on the benthic invertebrate fauna for streams in Germany. *Hydrobiologia* 516:107–127.
- LORENZ, A.W. JÄHNIG, S. C., HERING, D. (2009).** Restoration effort, habitat mosaics, and macroinvertebrates—does channel form determine community composition?. *Aquatic Conservation: Marine and Freshwater Ecosystems*, 19(2), 157-169.
- LOWE, W. H., LIKENS, G. E. (2005).** Moving headwater streams to the head of the class. *AIBS Bulletin*, 55(3), 196-197.
- LUCOT, G. (2008).** Les effets du reméandrement de ruisseaux temporaires en forêt de Chaux (Jura, France) sur le fonctionnement hydrique des sols riverains: premiers résultats.
- MALAVOI, J. R. (1989).** Typologie des faciès d'écoulement ou unités morphodynamiques des cours d'eau à haute énergie. *Bulletin Français de la Pêche et de la Pisciculture*, (315), 189-210.
- MALAVOI, J.R., ADAMS, P. (2007).** Les interventions humaines et leurs impacts hydromorphologiques sur les cours d'eau. *Ingénieries*, 50 : 35-48.
- MALAVOI, J.R., BRAVARD, J.P. (2010).** ONEMA. Cemagref pole etudes et recherches hydroecologie cours d'eau lyon, universite lyon 2. Eléments d'hydromorphologie fluviale. Collection Comprendre pour agir. 224p.
- MALAVOI, J. R., PARIS, P. (2003).** Stratégie d'intervention de l'agence de l'eau sur les seuils en rivière. *Orléans, Agence de l'eau Loire-Bretagne*.
- MAY, C.W., WELCH, R.R. HORNER, J.R. KARR, B.W. (1997).** «Quality Indices for Urbanization Effects on Puget Sound Lowland Streams. », Environmental Engineering and Science, Department of Civil Engineering, University of Washington, Washington, 229 p.

- MERMET, L. (1995).** Les infrastructures naturelles : statut, principe, concept, ou slogan ?, *Zones Humides Infos*, 7-9.
- MEYER, J.L., POOLE, G.C., JONES, K.L. (2005).** Buried alive: potential consequences of burying headwater streams in drainage pipes. In « *Proceedings of the 2005 Georgia Water resources Conference* », HATCHER K.J., University of Georgia, USA.
- MICHALKOVÁ, M., PIÉGAY, H., KONDOLE, G. M., GRECO, S. E. (2011).** Lateral erosion of the Sacramento River, California (1942–1999), and responses of channel and floodplain lake to human influences. *Earth Surface Processes and Landforms*, 36(2), 257-272.
- MILNE, J.A. (1983).** Patterns of confinement in some stream channels of upland Britain. *Geografiska Annaler*, A-65, pp. 67-83.
- MORISAWA, M. (1968).** Streams. their dynamics and morphology: New York, McGraw-Hill Book Co.. 175 p.
- MOUILLE, J. (1982).** « *Influence des plans d'eau sur les eaux courantes superficielles* ». SRAE Lorraine, Ministère de l'Agriculture, Région Lorraine, Service de l'Aménagement des eaux, Centralisateur du bassin Rhin Meuse, 38 p.
- MYERS, M. E. (2004).** The line of grace: principles of road aesthetics in the design of the Blue Ridge Parkway. *Landscape Journal* 23:121-140.
- NANSON, G. C., HICKIN, E. J. (1983).** Channel migration and incision on the Beatton River. *Journal of Hydraulic Engineering*, 109(3), 327-337.
- NANSON, G.C. HICKIN, E.J. (1986).** A statistical analysis of bank erosion and channel migration in western Canada. *Geological Society of America Bulletin*, 97: 497-504.
- NAVRATIL, O., ALBERT, M.-B., BOUDARD, C., GRESILLON, J.-M. (2004).** Using a 1D steady flow model to compare field determination methods of bank-full stage. In Greco M., Carravetta A., Della Morte R. (Ed.), *River Flow 2004*, Balkema Publishers, Leiden, 155-161.
- NEWBURY, R., GABOURY, M. (1993).** Exploration and rehabilitation of hydraulic habitats in streams using principles of fluvial behaviour. *Freshwater Biology*, 29 : 195-210.
- NICOLL, T.J., HICKIN, E.J. (2010).** Planform geometry and channel migration of confined meandering rivers on the Canadian Prairies. *Geomorphology*, 116, pp. 37-47.
- NIJBOER, R. C., VERDONSCHOT, P. F. M., JOHNSON, R. K., SOMMERHÄUSER, M., BUFFAGNI, A. (2004).** Establishing reference conditions for European streams. In *Integrated Assessment of Running Waters in Europe* (pp. 91-105). Springer, Dordrecht.
- NILSSON, C., SVEDMARK, M. (2002).** Basic principles and ecological consequences of changing water regimes: riparian plant communities. *Environmental management*, 30(4), 468-480.
- NILSSON, C., SARNEEL, J. M., PALM, D., GARDESTRÖM, J., PILOTTO, F., POLVI, L. E., LUNDQVIST, H. (2017).** How do biota respond to additional physical restoration of restored streams?. *Ecosystems*, 20(1), 144-162.
- ORAISON, F., SOUCHON, Y., VAN LOOY, K. (2011).** Restaurer l'hydromorphologie des cours d'eau et mieux maîtriser les nutriments: une voie commune?. *Pô Hydroécologie Cours Eau Onema-Irstea Lyon MAEPLHQ 42p*.
- PACAUD, G., ROULIER, C. (2010).** "Espace nécessaire au cours d'eau à méandres". Office fédérale de l'environnement, service conseil zones alluviales. 101 pages.
- PARK, C. (1977).** Man-induced changes in stream channel capacity. In « *River channel changes* », GREGORY K.J., Edition J.Wiley & Sons, USA : 121-144.
- PEARCE, S., COLLINS, J.N. (2004).** Analysis of reference tidal channel plan form for the Montezuma wetlands restoration project. San Francisco Estuary Institute, contribution n°80.
- PIÉGAY, H., DARBY, S. E., MOSSELMAN, E., SURIAN, N. (2005).** A review of techniques available for delimiting the erodible river corridor: a sustainable approach to managing bank erosion. *River research and applications*, 21(7), 773-789.
- PHILLIPS, R. T. J., ROBERT, A. (2007).** Hydrologic control of waveforms on small meandering rivers. *Earth Surface Processes and Landforms: The Journal of the British Geomorphological Research Group*, 32(10), 1533-1546.
- RCC (2002).** Manual of River Restoration Techniques, Web Edition [http://www.therrc.co.uk/rrc\\_manual.php](http://www.therrc.co.uk/rrc_manual.php).
- RCC (2013).** Manual of River Restoration Techniques.
- ROCHE, J., FROCHOT, B. (1993).** "Ornithological contribution to river zonation". *Acta Oecologica*, 14 (3). 415-434.
- ROLLET, A.J. (2007).** *Etude et gestion de la dynamique sédimentaire d'un tronçon fluvial à l'aval d'un barrage*. Géographie et Aménagement, Lyon, Université Jean Moulin Lyon III, 305 p.

- RONI, P., PESS, G. R., BEECHIE, T. J., HANSON, K. M. (2014).** *Fish-habitat relationships and the effectiveness of habitat restoration*. US Department of Commerce, National Oceanic and Atmospheric Administration, National Marine Fisheries Service, Northwest Fisheries Science Center.
- SAULAS, J. (2008).** Rapport de M2 Analyse de la dynamique latérale d'un méandre de rivière: application à la basse vallée de la Bruche (Bas-Rhin, France).
- ST-ONGE, D. A., LEMAY, M., ST-ONGE, M. R. (1976).** La Géométrie des Méandres, Une Méthode D'Analyse. *Geoscience Canada*, 3(4).
- SCHUMM, S. A. (1963).** Sinuosity of alluvial rivers on the Great Plains. *Geological Society of America Bulletin*, 74(9), 1089-1100.
- SCHUMM, S. A. (1977).** *The Fluvial System*. John Wiley and Sons, New York: 338 pages.
- SMILEY, J. R., KING, K. W., FAUSEY, N. R. (2009).** Hydrology of channelized and natural headwater streams/Hydrologie de cours d'eau recalibrés et naturels de tête de bassin. *Hydrological sciences journal*, 54(5), 929-948.
- SOUCHON, Y., PHILIPPE, M., MARIDET, L., COHEN, P., WASSON, J. G. (1996).** « Rôle et impact des étiages dans les cours d'eau. Les sécheresses menacent-elles les communautés végétales et animales des cours d'eau ? », CEMAGREF Lyon, Département Gestion des Milieux Aquatiques, Division des Ecosystèmes aquatiques, Laboratoire d'hydroécologie Quantitative, Ministère de l'Environnement, Direction de l'Eau, 89 p.
- STRAHLER, A. N. (1957).** Quantitative analysis of watershed geomorphology. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 38(6), 913-920.
- STRAHLER, A.N. (1968).** *Physical Geography*, 3rd Edition: John Wiley and Sons Inc., p. 481-497.
- TAILLEFER, F. (1949).** Les méandres des rivières. *L'Information Géographique*, 13(3), 120-125.
- THORNE, C. R., LEWIN, J. (1979).** Bank processes, bed material movement and planform development in a meandering river. In: *Adjustments of the fluvial system*, Rhodes D.D., Williams G.P., Ed. Kendall/Hunt, Dubuque, Iowa, pp. 117-137.
- THORNE, C. R. (1992).** Bend scour and bank erosion on the meandering Red River, Louisiana. *Lowland floodplain rivers: Geomorphological perspectives*, 95-115.
- THORNE, C. R. (1997).** Channel Types and Morphological Classification. In: *Applied fluvial geomorphology for river engineering and management*, Thorne C.R., Hey R.D., Newson M.D., Ed. Wiley J. and sons, Chichester, pp. 175-222.
- ULRICH, R. S. (1983).** Aesthetic and effective response to natural environment. Pages 85-125 in I. Altman and J. Wohlwill, editors. *Behavior and the natural environment*. Plenum, New York, USA.
- VACHER, A. (1909).** "rivières à méandres encaissés et terrains à méandres" 16p.
- VIERRON, A. (2015).** Caractérisation de stations de références hydro morphologique en régions centre et Poitou Charente, DIR ONEMA Rapport de stage M2 Imacof.
- WALLIN, M., WIEDERHOLM, T., JOHNSON, R. K. (2003).** Guidance on establishing reference conditions and ecological status class boundaries for inland surface waters. *CIS Working Group*, 2(3), 93.
- WASSON, J. G., MALAVOI, J. R., MARIDET, L., SOUCHON, Y., PAULIN, L. (1998).** Impacts écologiques de la chenalisation des rivières. *Regulated Rivers: Research & Management*, 1, 17-36.
- WOLMAN, M. G. (1954).** A method of sampling coarse river-bed material. *EOS, Transactions American Geophysical Union*, 35(6), 951-956.
- YALIN M. S., DA SILVA A. M. F. (2001).** "*Fluvial Processes*". IAHR. Delft. 216 pp.
- ZANONI, L., BERTOLDI, W., GURNELL, A., SURIAN, N., TOCKNER, K., ZILIANI, L., ZOLEZZI, G. (2009).** Understanding reference processes: linkages between river flows, sediment dynamics and vegetated landforms along the Tagliamento River, Italy. *River Research and Applications*, 25(5), 501-516.
- ZOLEZZI, G., LUCHI, R., TUBINO, M. (2012).** Modeling morphodynamic processes in meandering rivers with spatial width variations. *Reviews of Geophysics*, 50(4).

## Liste des figures

Figure 1 : Distinction sur un axe de temps (A) entre les notions d'ajustement (B) et de mobilité latérale (C) des styles fluviaux de la rivière d'Ain vers Gourdan, issues respectivement de Rollet (2007) ; Brewer & Lewin (1998) et Piégay et al. (2005). Modifié par Alber (2012) .....	2
Figure 2 : Description schématique d'un méandre, Leroux (2009).....	3
Figure 3 : Alternance des radiers (Thorne <i>et al.</i> , 1992) .....	3
Figure 4 : Morphologie en plan et en coupe d'un chenal méandrique (Allen, 1984 repris par Held, 2011) .....	3
Figure 5 : Mesures de la sinuosité, tirée de Bramard 2018 (com perso AFB) .....	5
Figure 6 : Représentation des coefficients de sinuosité .....	5
Figure 7 : Caractéristiques morphométriques des méandres, selon Malavoi & Bravard (2010).....	6
Figure 8 : Représentation des rayons de courbure au sein d'un méandre (Frothingham & Rhoads, 2003) .....	6
Figure 9 : Relation entre longueur d'onde des méandres et largeur à plein bord (Pearce & Collins, 2004) .....	6
Figure 10 : Modèle cyclique d'évolution temporelle des cours d'eau avec ou sans perturbation, selon Cluer & Thorne (2013).....	8
Figure 11 : Modèle conceptuel des phases de développement d'une courbure de méandre (Hooke & Yorke, 2010) .....	8
Figure 12 : Les deux grands types de recoupement des courbures de méandre, le recoupement par déversement (A) et par tangence (B) modifiée par Amoros & Petts (1993).....	9
Figure 13 : coupure de méandres sur la rivière d'Andouillé (35) .....	12
Figure 14 : Technique des bouchons (Lucot <i>et al.</i> , 2008).....	13
Figure 15 : Vue en coupe transversale d'une remise dans son talweg d'un cours d'eau perché (ONEMA, 2012).....	13
Figure 16 : Carte du territoire de la DIR Bretagne – pays de la Loire .....	14
Figure 17 : Représentation schématique des deux volets de l'étude .....	14
Figure 18 : Représentation simplifiée de l'ensemble des chaînes d'outils utilisés dans le traitement de données SIG .....	18
Figure 19 : Boîtes à moustaches représentant la dispersion des variables étudiées (en rouge, $\mu$ = moyenne de l'échantillon $\pm$ l'écart type ; les valeurs en bleu représentent les minimum et maximum ; les valeurs en vert représentent les premiers et troisièmes quartiles) .....	20
Figure 20 : Comparaison des coefficients de sinuosité déterminés sous SIG puis calculés sur le terrain pour un même tronçon .....	21
Figure 21 : Analyse en composante principale sur 13 variables quantitatives descriptives du méandrage (AREA : surface du bassin versant ; Larg_CE : largeur à plein bord ; QAHAUN : débit à plein bord ; Coef_sinuo : coefficient de sinuosité ; Larg_FD : largeur fond de vallée, Rayo_courb : rayon de courbure ; Lin_Simpl : linéaire simplifié de la station échantillonnée ; Amplitude : amplitude du méandre) .....	21
Figure 22 : Représentation graphique des régressions entre variables morphométriques .....	22
Figure 23 : Reméandrage par libre divagation des écoulements .....	23
Figure 24 : Reméandrage par remise dans le talweg.....	23
Figure 25 : Reméandrage par reconnexion d'anciens méandres .....	24

Figure 26 : Reméandrage par la technique des bouchons .....	24
Figure 27 : fractionnement du lit pour le calcul de la sinuosité (Bramard, 2018 com.perso) .....	25
Figure 28 : Profil en long cohérent d'un tronçon de cours d'eau à méandres naturels .....	27
Figure 29 : profil en long incohérent après reméandrage.....	28

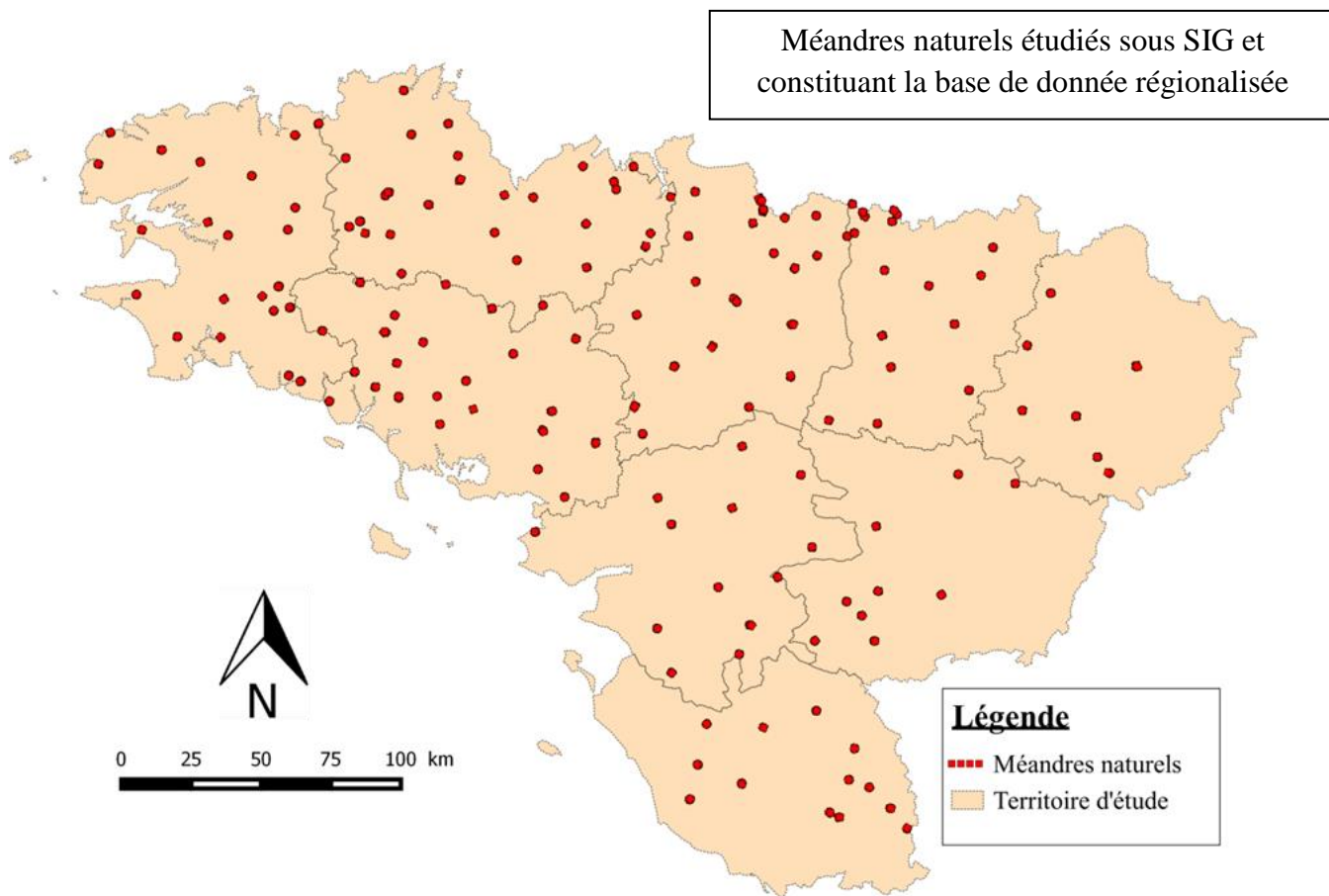
## Liste des tableaux

Tableau 1 : Définition des trois variables de réponse d'un cours d'eau.....	1
Tableau 2 : Classe de sinuosité des cours d'eau.....	5
Tableau 3 : Relations entre variables morphométriques .....	7
Tableau 4 : Synthèse des principaux travaux hydrauliques sur les cours d'eau.....	10
Tableau 5 : Synthèse des conséquences d'un rescindement de méandre .....	10
Tableau 6 : Recensement des critères pour la sélection des tronçons à étudier sous SIG .....	15
Tableau 7 : Méthode de numérisation des variables étudiées sous SIG et sur le terrain .....	17
Tableau 8 : Représentation graphique de la numérisation de certaines variables sous SIG .....	17
Tableau 9 : Principaux résultats des corrélations entres variables morphométriques .....	22
Tableau 10 : Sites reméandrés ayant fait l'objet d'une visite sur le terrain.....	23
Tableau 11 : Rapport entre variables morphométriques et largeur à plein bord de petit cours d'eau .....	26
Tableau 12 : Ordre de grandeur indicatif pour un cours d'eau d'une largeur à plein bord comprise entre 1,7 et 3,3 m .....	27
Tableau 13 : Equation traduisant la valeur des variables morphométriques en fonction de la largeur à plein bord pour un cours d'eau > 5m.....	27

## Liste des annexes

Annexe 1 : carte localisant les méandres naturels numérisés sous SIG .....	I
Annexe 2 : base de données régionalisée des méandres de références étudiés sous SIG.....	II
Annexe 3 : carte localisant les opérations de reméandrage du territoire Bretagne - Pays de la Loire.....	III
Annexe 4 : base de données régionalisée des opérations de reméandrage .....	III
Annexe 5 : carte localisant les méandres naturels et les opérations de reméandrage ayant fait l'objet d'une acquisition de données de terrain .....	III
Annexe 6 : « fiche terrain » pour l'échantillonnage de données des méandres naturels .....	III
Annexe 7 : questionnaire adressé aux maîtres d'ouvrage ayant réalisés un reméandrage sur le territoire .....	III
Annexe 8 : « fiche terrain » pour l'échantillonnage de données concernant les opérations de reméandrage.....	III
Annexe 9 : complément sur certains aspects du protocole de terrain.....	III
Annexe 10 : données issues de la prospection des méandres naturels .....	III
Annexe 11 : données issues de la prospection des opérations de reméandrage .....	III
Annexe 12 : exemple de profils en travers et en long issus de l'opération de reméandrage du ruisseau de la mare Belanton à Liffré (35) .....	III
Annexe 13 : exemple du tracé en plan avant et après l'opération de reméandrage de l'Aber idult à Saint Renan (29).....	III
Annexe 14 : classification ascendante hiérarchique (CAH) sur l'ensemble des variables .....	III
Annexe 15 : ACP réalisée sur l'ensemble du jeu de données en transformant les données en $\ln(x+1)$ .....	III
Annexe 16 : ACP réalisée en éliminant des variables par analyses successives .....	III

## Annexe 1 : carte localisant les méandres naturels numérisés sous SIG



## Annexe 2 : base de données régionalisée des méandres de références étudiés sous SIG

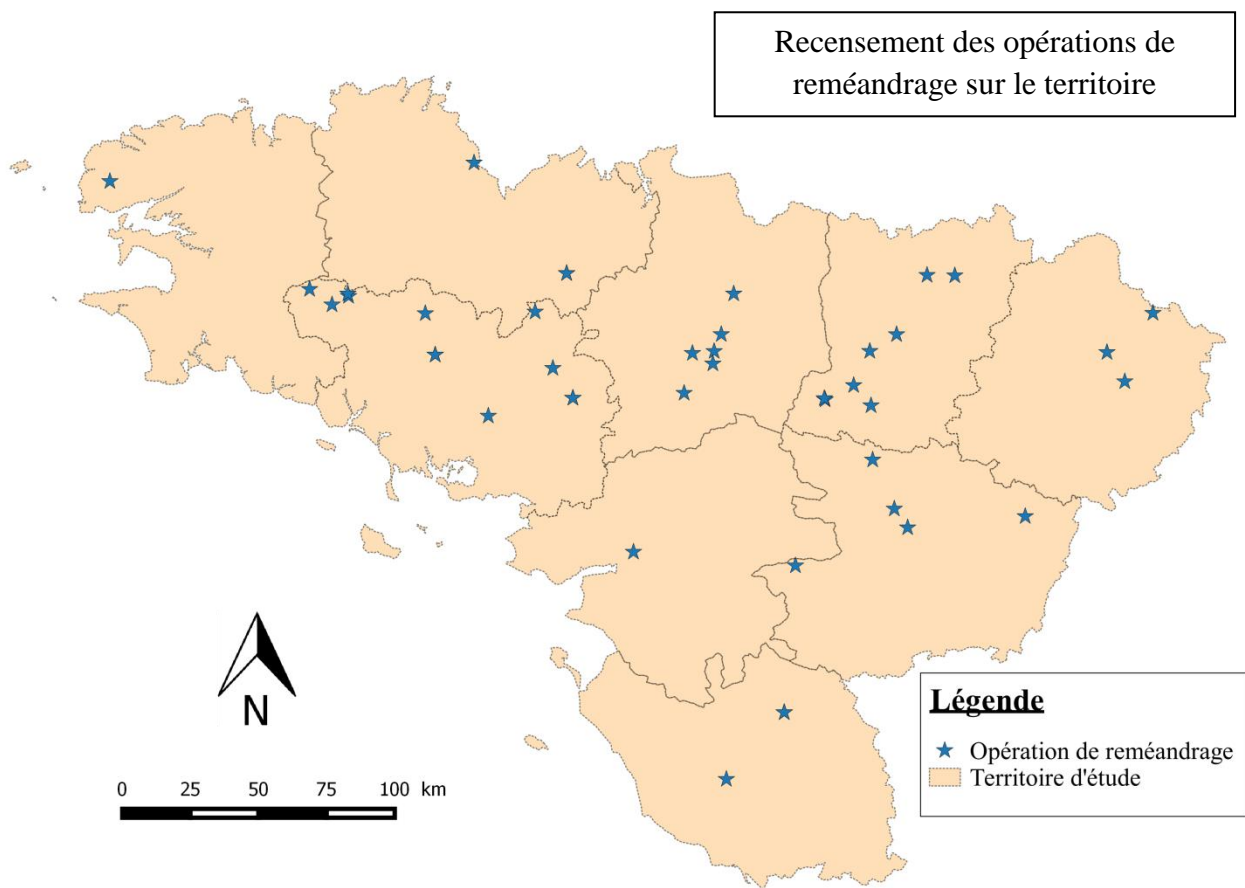
ID	NomHER2	AREA	Coef_sinuo	Pente	QAMOY_MN	Amplitude	Larg_CE	Larg_FDV	Long_onde	Rayo_courb
TRON_EAU0000000011173129	TC-Nord Loire-Perche	174,101563	1,30326269	0,11481456	0,004	17,3203702	3,238653	177,24	50,0954356	18,0718182
TRON_EAU0000000011174429	TC-Nord Loire-Perche	5522,60156	1,13856631	0,05074133	0,215	12,162503	0,94824367	169,53642	49,2805664	12,7475
TRON_EAU0000000011178586	MA-sud interieur	4103,85156	1,43976099	1,51267304	0,251	27,1580112	1,81923033	37,9730073	58,2936696	12,332
TRON_EAU0000000011186032	MA-sud interieur	6484,10156	1,35441223	0,31656682	0,736	27,1907656	5,11534133	157,955943	67,3447384	22,625
TRON_EAU0000000011187523	MA-sud interieur	2252,41406	1,08762013	0,62287382	0,155	9,593083	2,822555	62,448156	43,329165	16,982
TRON_EAU0000000011187904	MA-sud interieur	5782,37997	1,30234533	0,15748837	0,258	23,111005	1,517275	204,853273	58,9621888	19,429
TRON_EAU0000000011188653	MA-sud interieur	2433,28906	1,3311183	0,32644301	0,18	11,7513745	3,085435	100,568611	30,2125358	5,558
TRON_EAU0000000011190032	MA-sud interieur	18506,8326	1,25618573	0,6103759	1,343	24,5547806	2,478203	133,630596	67,2102632	18,1190909
TRON_EAU0000000011192640	MA-sud interieur	4556,04688	1,39933753	0,43402534	0,322	28,8211559	1,9002595	140,43014	69,1776971	10,652
TRON_EAU0000000011192789	MA-sud interieur	893,46875	1,18532037	1,04739442	0,062	15,065939	1,18093467	93,567242	56,4424907	9,79222222
TRON_EAU00000000117305925	MA-sud interieur	5209,78906	1,8341937	0,17663296	0,502	44,757203	3,0171	207,892548	62,046124	15,5275
TRON_EAU0000000017323237	MA-sud interieur	4652,34677	1,53596252	0,14164905	0,451	29,0960562	3,0171	217,494946	39,810646	9,416
TRON_EAU0000000017325652	MA-sud interieur	5154,9943	1,23351495	0,10786969	0,488	35,727797	3,0171	83,9582173	96,5564937	17,946
TRON_EAU0000000017339387	MA-sud interieur	9094,60957	1,22628748	0,52629907	0,973	34,942828	6,496725	68,5439803	92,3697988	17,528
TRON_EAU0000000017338603	MA-sud interieur	5561,03906	1,39669545	0,13766696	0,542	25,0223446	3,0171	96,6682813	49,7701875	12,236
TRON_EAU0000000017345771	MA-sud interieur	8329,47656	1,24598082	0,21532344	0,83	23,3017856	4,437253	104,067575	57,3269938	12,728
TRON_EAU0000000017346524	MA-sud interieur	9771,47656	1,15691283	0,16045812	0,938	21,7158938	3,13412567	131,855646	95,9714804	21,9455556
TRON_EAU0000000017346647	MA-sud interieur	4227,47452	1,45372162	0,6061813	0,42	32,2373802	7,45538033	50,0204447	44,679416	10,378
TRON_EAU0000000017352015	MA-sud interieur	8928,91406	1,420523	0,28958398	0,795	36,3812132	2,883338	117,482283	82,0548764	21,51
TRON_EAU0000000017354615	MA-sud interieur	2063,97656	1,28090334	0,25195806	0,2	32,3694012	1,94672233	135,016685	65,1720275	15,946
TRON_EAU0000000017356303	TC - Charentes Poitou	9821,70652	1,42352848	0,05688444	0,884	51,4519216	3,0171	231,399427	114,309632	23,7366667
TRON_EAU0000000017357110	TC - Charentes Poitou	5636,60156	1,6714741	0,0786182	0,622	42,7762702	3,0171	246,609757	60,1963427	14,123
TRON_EAU0000000017358491	MA-sud interieur	11498,6589	1,32493612	0,12640058	1,21	45,4863508	3,0171	208,818216	98,0062085	21,828
TRON_EAU0000000023236436	MA-ouest	9520,41406	1,21187914	0,27927081	1,453	20,859755	4,67799833	109,645861	81,3025584	30,2881818
TRON_EAU0000000023237132	MA-ouest	4484,66406	1,40232324	0,30176416	0,51	13,1724686	3,2933895	109,881499	33,153097	8,05769231
TRON_EAU0000000023237481	MA-ouest	1425,97656	1,15552457	0,21600594	0,163	10,0563454	1,89220667	330,845586	29,5429276	6,42454546
TRON_EAU0000000023238474	MA-ouest	2752,85156	1,2639992	0,10048696	0,487	18,2861012	2,49640733	193,789636	36,0380258	11,246
TRON_EAU0000000023239610	MA-ouest	485,039063	1,12492219	1,7150801	0,8104	6,8933348	0,820991	39,1061607	35,3295394	9,4725
TRON_EAU0000000023239779	MA-ouest	10670,8156	1,30111282	0,36330905	1,727	19,5119262	2,76960367	94,549277	33,6540038	9,7525
TRON_EAU0000000023240536	MA-ouest	441,164063	1,35185719	1,44375722	0,8104	10,8020562	0,80820467	67,6466737	27,884912	6,31909091
TRON_EAU0000000023245883	MA-ouest	781,226563	1,29438648	0,57770611	0,8104	4,792941	0,95998633	72,235451	16,380563	5,63
TRON_EAU0000000023243866	MA-ouest	1906,91406	1,30943436	0,85551295	0,416	16,353471	2,58546367	206,81697	66,738144	17,5575
TRON_EAU0000000023244058	MA-ouest	918,726563	1,43352295	0,54454924	0,8104	8,428871	1,27575133	69,5554133	16,1615166	5,17214286
TRON_EAU0000000023244609	MA-ouest	1783,58152	1,29880981	0,36794772	0,095	33,1638128	1,71212067	230,825358	66,7572822	15,5911111
TRON_EAU0000000023244804	MA-ouest	1555,53906	1,30648989	0,52327736	0	13,6144296	1,906381	144,271005	34,345881	10,0507143
TRON_EAU0000000023246986	MA-ouest	1755,72656	1,24450005	0,1366502	0,385	8,55849927	2,88152333	114,246266	28,1421275	5,83083333
TRON_EAU0000000023247665	MA-ouest	5744,10156	1,25935462	0,2212014	1,301	28,9133234	2,183814	190,576419	78,9526648	25,32
TRON_EAU0000000023247738	MA-ouest	644,726563	1,27430843	0,50192865	0,8104	15,3970446	2,576795	218,572683	40,52654	10,415
TRON_EAU0000000023247897	MA-ouest	2190,78906	1,40061312	0,13449541	0,255	15,1727134	1,790348	96,899853	36,809406	9,86636364
TRON_EAU0000000023248357	MA-ouest	1211,10156	1,25875527	0,53587607	0,011	9,0638688	1,9714101	217,000262	20,968427	3,94727273
TRON_EAU0000000023248748	MA-ouest	721,414062	1,25435277	0,71166117	0,169	8,92253433	2,509553	159,66408	29,6947405	5,34888889
TRON_EAU0000000023251175	MA-ouest	1449,29688	1,21928099	0,22821027	0,218	10,9999322	2,791233	135,398087	32,1272528	7,35533333
TRON_EAU0000000023251282	MA-ouest	2594,60156	1,29500308	0,24577863	0,39	19,3559424	2,24623833	498,728579	44,4435202	10,2375
TRON_EAU0000000023254930	MA-ouest	1649,97656	1,30753161	0,24538138	0,27	7,933469	0,83308267	73,980545	30,7549956	6,77363636
TRON_EAU0000000023255324	MA-ouest	5007,35382	1,17557587	0,07975345	0,723	25,5606962	7,212142	98,9414123	107,32247	36,8344444
TRON_EAU0000000026254254	MA-nord est	5306,66406	1,26506563	0,1246191	0,588	16,567429	2,55487267	181,459005	43,236877	11,376
TRON_EAU0000000026254475	MA-nord est	3217,91406	1,40689824	0,72423167	0,8104	15,4709244	3,15703075	108,884753	34,9076773	7,195
TRON_EAU0000000026255295	MA-nord est	2282,78906	1,23502768	0,18062131	0,255	10,9767873	2,20056633	70,144589	25,4017877	7,34
TRON_EAU0000000026256706	MA-nord est	5645,91406	1,32958864	0,09938371	0,712	25,1111986	3,05237933	70,788747	38,5143462	13,8516667
TRON_EAU0000000026258385	MA-nord est	5182,91406	1,53463576	0,24253568	0,519	20,177294	3,586721	167,311345	34,5574204	9,986
TRON_EAU0000000026262037	MA-nord est	1344,22656	1,44108977	0,84467407	0,177	14,166291	2,56132167	65,2121333	26,9055262	6,44125
TRON_EAU0000000026262305	MA-nord est	4563,28906	1,30024069	0,20292402	0,451	10,347067	1,185314	171,111669	34,6503534	8,09846154
TRON_EAU0000000026264322	MA-nord est	5470,91406	1,46380514	0,20842587	0,492	9,5648302	1,879023	60,0377467	35,9670244	10,9677778
TRON_EAU0000000026269824	MA-est interieur	15921,8594	1,43811472	0,17072909	1,21	31,0060734	4,30805933	281,779303	68,3651926	15,6209091
TRON_EAU0000000026271674	MA-est interieur	12639,6016	1,16568804	0,13534008	0,989	23,747489	3,77811567	110,831022	84,0240594	25,8161539
TRON_EAU0000000026272637	MA-nord est	9325,1	1,362	0,3389	0,8104	24,177	1,4	15	60,18	16,03
TRON_EAU0000000026273975	MA-est interieur	1579,41406	1,3879385	0,14477658	0,1	15,0034002	3,0171	158,163566	27,4554403	7,80555556
TRON_EAU0000000026275685	MA-est interieur	13581,7344	1,43800042	0,17590027	0,819	42,3422572	3,20594233	143,93309	70,9869692	24,79
TRON_EAU0000000026278267	MA-est interieur	3986,10156	1,33129206	0,19994841	0,243	35,6637962	2,995269	105,041524	110,572934	22,9171429
TRON_EAU0000000026278526	MA-est interieur	10773,6016	1,28601627	0,06914347	0,608	17,7381764	1,55970567	164,842156	61,9203408	21,7218182
TRON_EAU0000000028754181	MA-est interieur	1309,66406	1,34089461	1,33810038	0,077	14,437869	0,986758	191,668114	35,756925	10,0869231
TRON_EAU0000000028755076	MA-est interieur	4557,01563	1,47213008	0,47994648	0,291	21,3175618	1,411932	179,034407	50,9447878	13,279
TRON_EAU0000000028756706	MA-sud interieur	2975,35156	1,07001921	0,07702779	0,24	15,3359854	1,56550967	258,350904	65,0753882	34,4088889
TRON_EAU0000000028758009	MA-sud interieur	5118,66406	1,18421258	0,2291664	0,395	13,7032114	3,310649	192,003575	67,021624	27,19875
TRON_EAU0000000028760467	MA-sud interieur	11082,4766	1,42441684	0,28004753	0,753	52,927304	3,16249033	170,464887	118,736953	25,5988889
TRON_EAU0000000028763391	MA-sud interieur	5361,47656	1,4550109	0,24806167	0,433	22,17363	1,67175533	105,080247	43,2655752	9,28272727
TRON_EAU0000000028765072	MA-sud interieur	5654,42188	1,43545134	0,09708337	0,437	29,6888067	3,29271	388,642634	64,69593	16,7466667
TRON_EAU0000000028780494	MA-sud interieur	799,940237	1,16328148	0,25325726	0,059	10,2353408	1,027341	460,575866	35,0433536	9,9875
TRON_EAU0000000028782858	MA-sud interieur	67495,5701	1,1549953	0,02898395	6,062	43,0235708	13,133277	283,642468	254,482717	63,475
TRON_EAU0000000028783276	MA-sud interieur	8734,97656	1,38875451	0,07225119	0,722	23,6284484	1,00241733	235,845708	66,7092326	17,6288889
TRON_EAU0000000028788731	MA-sud interieur	4875,53906	1,21956277	0,15553356	0,383	11,4926958	1,53026067	189,180326	48,9752964	8,445
TRON_EAU0000000028796043	MA-sud interieur	11920,1016	1,28853628	0,1981777	1,114	25,1505052	1,24882033	352,64457	67,0587304	15,2183333
TRON_EAU0000000046899266	MA-cotes du nord	5473,41406	1,17811077	0,4410707	0,8104	16,1583028	2,01274367	288,704251	50,231803	17,1242857
TRON_EAU0000000046901249	MA-cotes du nord	6726,83594	1,10915793	0,11843008	0,487	12,1367988	1,713695	224,607101	54,797233	19,9218182
TRON_EAU000000004										



TRON_EAU0000000046902704	MA-nord est	9325,1	1,76590909	0,20454546	0,8104	24,177	2,71666667	26	60,18	16,03
TRON_EAU0000000046902819	MA-cotes du nord	9325,1	1,78696742	1,12781955	0,8104	24,177	2,86	26,5	60,18	16,03
TRON_EAU0000000046902826	MA-cotes du nord	1710,47656	1,31747269	0,37125751	0,195	8,4769754	0,9553895	38,8426817	23,5376372	5,46
TRON_EAU0000000046903794	MA-cotes du nord	2703,55469	1,3537287	0,1206598	0,225	13,248342	1,586511	172,673534	45,3937898	17,0575
TRON_EAU0000000046904251	MA-cotes du nord	9325,1	1,62432432	0,17567568	0,8104	24,177	3,95	79,5	60,18	16,03
TRON_EAU0000000046904404	MA-nord est	1213,28906	1,61242669	0,11663579	0,155	9,9793606	1,28395367	70,5891807	20,6528946	3,71428571
TRON_EAU0000000046904855	MA-cotes du nord	1646,33941	1,27127276	0,07035094	0,71	23,4748982	2,26071733	272,200886	73,4700134	19,3188889
TRON_EAU0000000046906551	MA-cotes du nord	6970,57959	1,42602777	0,20361634	0,657	17,8794396	3,21885567	110,04689	50,1287612	16,008
TRON_EAU0000000046906965	MA-nord est	7218,91406	1,40081034	0,174011	0,727	13,3139262	2,022111	179,781599	31,7147468	7,52333333
TRON_EAU0000000046908039	MA-cotes du nord	25345,0391	1,23449739	0,06351981	2,515	24,761011	6,046383	210,691959	83,4836422	24,797
TRON_EAU0000000046910176	MA-est interieur	1192,13804	1,40014093	0,42227537	0,8104	15,5450905	1,072081	175,479428	25,735744	5,3125
TRON_EAU0000000046911514	MA-est interieur	1225,78906	1,36637245	0,63636099	0,068	17,7206941	3,0171	148,681129	42,6590666	10,752
TRON_EAU0000000046912016	MA-est interieur	294,945312	1,53798561	0,27969873	0,8104	9,75234341	3,0171	41,380038	18,5591864	3,84333333
TRON_EAU0000000046913705	MA-est interieur	5888,72656	1,81192304	0,27701963	0,406	35,4105542	1,927368	150,508813	74,7026062	13,6054546
TRON_EAU0000000046914400	MA-est interieur	50198,5313	1,11732467	0,07042248	4,279	56,9905366	10,8729573	459,993937	188,659527	74,982
TRON_EAU0000000046916857	MA-est interieur	78002,2344	1,36722579	0,07298044	4,666	91,0628302	12,666977	947,42043	200,13727	47,89
TRON_EAU0000000046918792	MA-est interieur	10149,2266	1,24971344	0,29727669	0,727	30,6336	3,28583	143,119476	75,200417	19,2591667
TRON_EAU0000000046919390	MA-est interieur	17254,6641	1,19129787	0,21215121	1,16	31,6691728	5,048388	128,344031	84,9063052	27,8733333
TRON_EAU0000000046921963	MA-est interieur	2595,91406	1,2034334	0,2735422	0,19	10,4803634	1,21654	52,2458417	29,5179214	11,832
TRON_EAU0000000046923640	MA-est interieur	6592,0625	1,19987081	0,0618842	0,511	14,177387	2,73630833	147,623804	56,4256906	16,694
TRON_EAU000000004682709	MA-nord est	6730,49113	1,27427047	0,68005338	0,8104	21,9310914	4,668872	83,309067	57,959828	13,55
TRON_EAU0000000046912643	MA-nord est	4423,78906	1,52221035	0,13519715	0,501	19,760428	1,22418367	97,125747	35,758656	8,99458333
TRON_EAU0000000076168582	MA-cotes du nord	12238,1641	1,38808718	0,24882892	1,196	16,3129544	2,50758133	107,39117	49,527148	13,8690909
TRON_EAU0000000076169545	MA-cotes du nord	7160,33594	1,37908711	0,46196879	0,441	17,4369974	2,22526533	81,8298763	48,9562552	10,2208333
TRON_EAU0000000076170210	MA-cotes du nord	2677,66406	1,24827478	0,79635098	0,302	22,7722114	4,73126333	103,534979	55,134352	11,424
TRON_EAU0000000076171035	MA-cotes du nord	10219,6491	1,59332441	0,12089033	1,014	34,7964966	2,25721433	101,853989	65,5315004	14,59625
TRON_EAU0000000076171249	MA-cotes du nord	9325,1	1,71232877	0,63013699	0,8104	24,177	3,88333333	51,5	60,18	16,03
TRON_EAU0000000076171377	MA-ouest	2844,54688	1,39398745	0,17414073	0,492	16,2220644	2,36474667	75,6127883	37,617641	8,91583333
TRON_EAU0000000076171459	MA-cotes du nord	3993,02344	1,32797833	0,24292964	0,216	17,4188476	2,205421	177,24	36,6446504	9,32909091
TRON_EAU0000000076172643	MA-cotes du nord	7827,28906	1,3207185	0,09561964	0,517	49,217996	3,61088633	203,111345	67,4508808	22,2805882
TRON_EAU0000000076172806	MA-cotes du nord	6009,16406	1,38763671	0,14351334	0,738	17,1796402	3,30426775	218,301581	51,1026764	11,19
TRON_EAU0000000076173007	MA-cotes du nord	7059,10156	2,16717304	0,20310262	0,472	23,7080658	1,927975	73,7592807	28,1632752	7,9925
TRON_EAU0000000076173599	MA-ouest	637,476562	1,39835072	0,38225677	0,053	21,7982775	1,85650933	89,0487953	38,981234	11,4263636
TRON_EAU0000000076173635	MA-cotes du nord	3178,42188	1,15014393	0,62216726	0,204	15,7428076	3,0171	87,569734	53,02757	19,0036364
TRON_EAU0000000076173838	MA-cotes du nord	13432,625	1,39377809	0,35268878	1,055	17,0247108	3,32535833	244,307059	69,028388	20,2066667
TRON_EAU0000000076173851	MA-cotes du nord	4835,97656	1,54869129	0,56988474	0,442	14,2979666	2,23172567	67,8284737	21,9140906	6,738
TRON_EAU0000000076174005	MA-ouest	1378,91406	1,42264705	0,22611031	0,255	18,084636	2,63292633	83,743751	34,6434882	9,248
TRON_EAU0000000076174671	MA-ouest	3576,90818	1,39391768	0,32949462	0,504	24,4634282	4,03966567	63,3761754	39,5062346	10,9433333
TRON_EAU0000000076175064	MA-ouest	9325,1	1,56333333	0,53333333	0,8104	24,177	2,656	60	60,18	16,03
TRON_EAU0000000076175968	MA-cotes du nord	10284,0078	1,32360657	0,07011791	0,793	20,8296074	1,924439	125,078101	63,3847752	18,6778571
TRON_EAU0000000076176171	MA-ouest	2466,10156	1,2087931	0,63506971	0,317	8,53657323	4,03085329	64,049287	30,4853762	6,00583333
TRON_EAU0000000076176583	MA-ouest	5693,16406	1,390716	0,34419099	0,927	28,067908	1,7326205	98,3005697	71,3456284	14,51
TRON_EAU0000000076176619	MA-cotes du nord	5469,10156	1,45972284	0,21593333	0,361	17,4171164	1,685065	127,694866	44,8657232	12,1677778
TRON_EAU0000000076176837	MA-ouest	2039,85156	1,18256522	0,23273626	0,212	4,5751786	0,83511333	187,647461	18,4088886	6,16857143
TRON_EAU0000000076176958	MA-ouest	597,601563	1,65133923	0,33108432	0,14	13,9187856	0,580827	60,3645243	23,0497465	4,24
TRON_EAU0000000076176993	MA-ouest	2317,98438	1,67185644	0,29790275	0,391	23,5180472	1,283447	192,653683	39,1120278	8,76444444
TRON_EAU0000000076177560	MA-ouest	9325,1	1,61818182	0,09090909	0,8104	24,177	2,72	48,5	60,18	16,03
TRON_EAU0000000076177700	MA-cotes du nord	953,476563	1,40357467	0,22155683	2,695	56,101511	2,35740967	671,865902	119,906046	27,9
TRON_EAU0000000076178889	MA-ouest	2069,03906	1,52595203	0,27429936	0,8104	5,7281146	0,91171933	83,5244753	15,3816772	3,58647059
TRON_EAU0000000076179128	MA-cotes du nord	8665,72656	1,17712639	0,19667928	0,768	16,2275086	2,18191467	235,675886	66,6016924	14,7311111
TRON_EAU0000000076179139	MA-cotes du nord	9325,1	1,75438597	0,0092	0,8104	24,177	2,68	70	60,18	16,03
TRON_EAU0000000076180181	MA-ouest	1871,60156	1,27356266	0,5313562	0,299	21,701313	1,613721	60,6596147	66,7321736	12,2425
TRON_EAU0000000076180359	MA-ouest	6217,16406	1,16859408	0,11788297	0,863	11,799975	1,9627665	314,662197	58,4768638	18,9966667
TRON_EAU0000000076180908	MA-est interieur	6767,78906	1,13504313	0,48971437	0,616	12,1265132	1,334832	317,613056	47,4222056	17,7081818
TRON_EAU0000000087167475	MA-ouest	9325,1	1,65882353	0,82352941	0,8104	24,177	3,2	35	60,18	16,03
TRON_EAU0000000087167475	MA-ouest	9325,1	1,50666667	0,7	0,8104	24,177	3,7	50	60,18	16,03
TRON_EAU0000000087168710	MA-ouest	5301,97656	1,14885975	0,46486491	0,539	15,8347108	2,00369967	267,991281	38,409573	15,4966667
TRON_EAU0000000087169797	MA-nord est	2756,16406	1,33922029	0,5482204	0,8104	17,659485	3,0171	74,979638	33,0086215	8,778
TRON_EAU0000000087169798	MA-ouest	4855,48438	1,45343413	0,51574008	0,811	20,6533026	2,20782767	150,865237	58,511333	15,715
TRON_EAU0000000087171752	MA-ouest	9325,1	1,525	1,17857143	0,8104	24,177	3,4	20	60,18	16,03
TRON_EAU0000000087171752	MA-ouest	9325,1	1,56153846	0,78846154	0,8104	24,177	3,48333333	25	60,18	16,03
TRON_EAU0000000087172323	MA-ouest	9325,1	2,021875	0,0625	0,8104	24,177	3,5	60	60,18	16,03
TRON_EAU0000000087172343	MA-ouest	11976,125	1,16283524	0,1665062	1,94	51,7289794	3,83755667	112,263077	185,172094	39,3766667
TRON_EAU0000000087172686	MA-est interieur	26134,359	1,53321466	0,28047086	1,82	35,5379966	2,70714067	367,752645	114,545215	31,9477778
TRON_EAU0000000087173415	MA-ouest	2688,72656	1,46097996	0,08527091	0,8104	25,360475	2,14622533	100,738666	44,2186218	11,3216667
TRON_EAU0000000087174245	MA-est interieur	1966,22656	1,55427674	0,46930455	0,204	14,466772	1,788566	83,7888497	25,4536572	6,99533333
TRON_EAU0000000087175381	MA-ouest	1538,35156	1,18254984	1,26112235	0,229	23,8895008	1,95320233	91,2046227	84,0735028	18,3022222
TRON_EAU0000000087176420	MA-ouest	4623,39063	1,19868495	0,53791534	0,735	27,8110638	3,76075267	118,470371	71,5795775	25,4544444
TRON_EAU0000000087177318	MA-ouest	2169,16406	1,3339935	0,43967754	0,266	21,0883224	2,35879267	85,3793357	39,5166393	14,7392857
TRON_EAU0000000087178705	MA-ouest	2350,97656	1,14861618	0,57412238	0,339	15,4006322	1,06379867	305,756185	57,8911256	14,5830769
TRON_EAU0000000087179769	MA-ouest	4100,72656	1,28667821	0,09461225	0,629	25,2656395	4,09208033	178,397674	48,916561	13,9533333

TRON_EAU0000000087180481	MA-ouest	1908,10156	1,2095003	0,36828547	0,201	19,903506	1,519281	118,015759	47,6337162	13,216
TRON_EAU0000000087180557	MA-est interieur	51937,1641	1,21340531	0,11952065	3,987	107,819741	15,0257093	631,945937	237,965127	56,032
TRON_EAU0000000087180801	MA-est interieur	680,851563	1,31470383	0,38178926	0,068	8,2524242	1,133306	80,561413	27,194657	8,00416667
TRON_EAU0000000087181235	MA-est interieur	28400,6953	1,28387172	0,07709522	3,657	51,7066536	4,83749267	238,258911	124,989654	27,45375
TRON_EAU0000000087182691	MA-est interieur	1016,97656	1,16649568	0,13505896	0,8104	9,9458708	1,6053745	103,467665	30,1989106	7,465
TRON_EAU0000000087182933	MA-est interieur	14054,0859	1,25069422	0,07533399	2,146	32,4733395	5,84005333	111,261301	78,9886193	17,8066667
TRON_EAU0000000087184111	MA-est interieur	25288,2266	1,13991694	0,18273647	3,415	41,1281994	2,96900333	447,675575	105,61184	32,989
TRON_EAU0000000087186218	MA-est interieur	5033,60156	1,55174523	0,14590172	0,646	16,8608097	1,18688533	119,517489	34,5082454	8,857
TRON_EAU0000000087187627	MA-sud interieur	1576,53906	1,14785471	0,77523784	0,8104	6,590221	1,200062	70,2673583	27,9873807	9,51888889
TRON_EAU0000000098195924	MA-ouest	1375,35198	1,1990708	0,179457	0,167	12,0482986	3,59166025	79,9323823	47,0443808	10,2191667
TRON_EAU0000000098671060	MA-ouest	2008,36719	1,59436129	0,22631841	0,317	21,869043	1,196713	830,700383	35,4238908	8,62642857
TRON_EAU0000000111936543	MA-nord est	8725,17305	1,63838398	0,29424973	0,785	42,1620372	4,466352	135,069899	73,6980738	16,67
TRON_EAU0000000111940284	MA-nord est	2519,97656	1,18744683	0,39043779	0,194	24,705717	3,9399385	137,351462	52,5008	18,774
TRON_EAU0000000111941486	TC-Nord Loire-Perche	213008,234	1,66585658	0,03719778	0,111	156,920649	20,6813217	910,625691	221,791551	65,086
TRON_EAU0000000111945004	TC-Nord Loire-Perche	6749,60156	1,19015543	0,12033706	0,376	21,722415	2,202809	148,881932	82,9228462	23,113
TRON_EAU0000000111945225	TC-Nord Loire-Perche	3549,78906	1,39087073	0,26661232	0,158	18,3508246	3,0171	413,221264	22,256344	6,3425
TRON_EAU0000000111948014	TC-Nord Loire-Perche	15107,8516	1,27199904	0,10724921	0,001	36,0751918	6,8014164	269,281422	72,7320208	20,442
TRON_EAU0000000111948752	TC-Nord Loire-Perche	2997,97656	1,45130929	0,37872258	0,129	24,088349	2,43599	606,276997	43,370593	8,144
TRON_EAU0000000207138552	MA-est interieur	602,726563	1,61444643	0,30586585	0,092	7,842626	0,8879345	83,241023	11,5308688	3,12461539

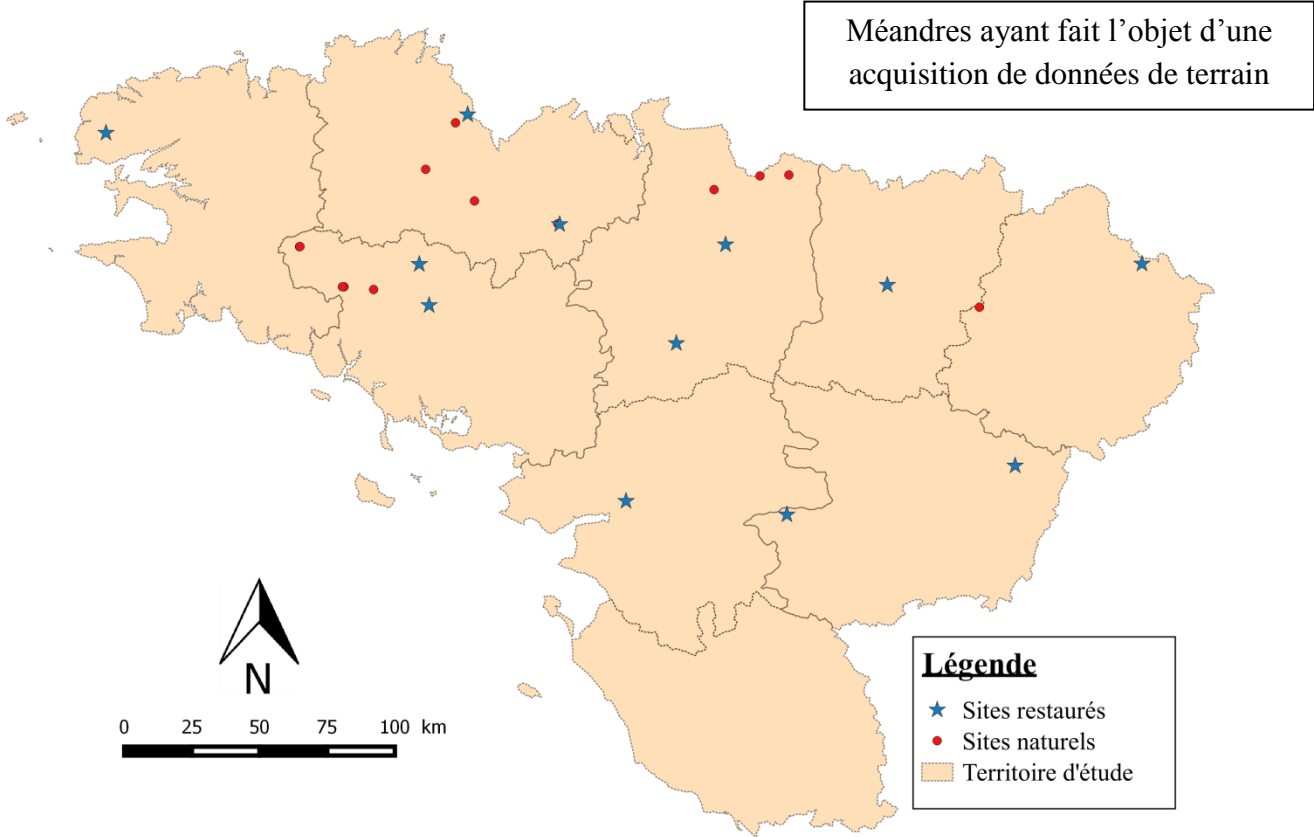
### Annexe 3 : carte localisant les opérations de reméandrage du territoire Bretagne - Pays de la Loire



## Annexe 4 : base de données régionalisée des opérations de reméandrage

ID meandre	DEPARTEMENT	COMMUNE	NOM CE	LIEU DIT	COORD X Lambert 93	COORD Y Lambert 93	LIGNAIRE RESTAURE (m)	MAITRE OUVRAGE	ANNEE
22-001	22	Binic	Riviere Ic	Le Chien Noir	269410	6849654	250	SMEGA	2009
22-002	22	Ereac	ruisseau du Clerge	la Rimbaudais	303370	6809122	710	DINAN Agglo	2014
22-003	22	Pontrieux	ruisseau du Launay					FDPPMA22	2014
29-001	29	Saint Renan	Aber Idult	D27 route de l'Aber	135878	6842848	900	CCPI	2017
35-001	35	Chartres de Bretagne	ruisseau de la mécanique	Ferme des peupliers	349498	6779843	1300	Mairie de Chartres de Bretagne	2013
35-002	35	Vern sur Seiche	Ruisseau du clos Sotin	Gaudon	357459	6780544	500	SIBV Seiche	2015
35-003	35	Cesson-Sevigne	Ruisseau du Blosne	Les rivieres	360081	6786747	500	Dervenn	2016
35-004	35	Bourgbarre	ruisseau de Belardon	La Vayrie	356990	6775995	300	SIBV Seiche	2015
35-005	35	Plechatel	ruisseau de la Farouillais	aval D84	346452	6765227	250	SIBS Semnon	2017
35-006	35	Liffre	ruisseau de la mare Bellanton	route forestiere des faux fuseaux	364639	6801652	600	SM BV Ille et illet	2017
44-001	44	Savenay	ruisseau de l'Oisilliere (ou vallee des sounirs)	L'Aumonerie	327880	6706983	145	CC Loire et sillon (devenu CC Estuaire et sillon)	2014
49-001	49	Lire	ruisseau du Grand bain	L'Orberie	387277	6701961	300	Caumnaute de communes du canton de	2016
49-002	49	Beaucouze	ruisseau de la winiere	Chemin du bois l'abbee	428426	6715919	1000	Angers Loire metropole	2015
49-003	49	Avire	la sazee	le bourg	415596	6740763	100	commune	2012
49-004	49	Pontigne	couasnon	Pont de Singe	471542	6720048	420	Syndicat Mixte du Bassin versant de	2014
49-005	49	Angers	ruisseau du Plessis Mace	chateau du Plessis Mace	423526	6722794	900	departement du Maine et Loire (copie)	2017
53-001	53	Saint berthevin	Le Vicoin	Coupeau	414535	6780595	750	Mairie Saint-Berthevin	2008_2010
53-002	53	Louverne	Ruisseau de la Fontaine	La Fontaine	424360	6786723	730	Ville de Louverne	2015
53-003	53	Ballots	Ruisseau de la Croix Gallier	Ballots	398169	6762805	130	Syndicat de l'Oudon	2015
53-004	53	Aron	Ruisseau de la Villette	Pont de la RD7	435535	6808452	250	Conseil General 53	2012
53-005	53	Cosse-le-Vivien	Le ruisseau de Cosse	Le bourg, amont RN 171	408628	6768069	300	Syndicat de l'Oudon	2012
53-006	53	Peuton	L'Hiere	Amont RD 10	414994	6760663	500	Syndicat de l'Oudon	2018
53-007	53	Ballots	Ruisseau du Bardoul	amont RD 153	397862	6763286	100	Syndicat de l'Oudon	2016
53-008	53	La Chapelle au Riboul	Ruisseau de la Rouairie	Gruau	445716	6808291	470	Syndicat BV Aron	2017
56-001	56	Langonnet	l'Elle	Runellou	223411	6800758	350	FDPPMA56	2015
56-002	56	Langonnet	langonnet	bourg	217340	6797621	380	FDPPMA56	2010
56-003	56	Malguenac	Ruisseau de Stival	Trevenin	251546	6794417	100	Syndicat Blavet	2015
56-004	56	Plaudren	Ruisseau Le Croiseau	Kerbachelier	274654	6756849	450	Grand Bassin de l'Oust	2014
56-005	56	Langonnet	L'Elle	Runellou	223149	6801619	145	Roi Morvan Communautee	2017
56-006	56	Gourin	L'Inam ou ster l'aer	Tronjoly	209116	6803304	275	Roi Morvan Communautee	2017
56-007	56	Ploermel	ruisseau du miny	Hambort et Roblin	298326	6774355	450	Grand Bassin de l'Oust	2015
56-008	56	Meneac	affluent de leverin	le verger	291821	6795004	250	Syndicat Mixte du	2015
56-009	56	Reminiac	affluent du ruisseau de bodel	la pommerais	305665	6763416		Grand Bassin de l'Oust	
56-010	56	Hellean	ruisseau du digoet				250	Syndicat Mixte du	2015
56-011	56	Plumeliau	le Fremeur	Parco le Bourg	255175	6779234	150	Syndicat Blavet	2016
56-012	56	Mauron	Ruisseau du clos des fontaines				265	Grand Bassin de l'Oust	2016
72-001	72	Ardenay sur Merize	Merize	Parc d'Ardenay sur merize	508049	6769460	100	commune	2012
72-002	72	Dehault	Montreteaux	Vaupeyroux	518377	6794545	1200	FDPPMA72	2012_2013
72-003	72	Sille le philippe	Vive parence	La Chappelle	501519	6780171	645	Dervenn	2015
85-001	85	La Roche sur Yon	La Trezanne	A87	361945	6623683	450	ASF	2008_2009
85-002	85	Saint-Fulgent	affluent du vendrenneau	Les Renaudieres	383162	6648147	800	Conseil General 85	2016
85-003	85	Chaille les marais	La Longeves					syndicat mixte vendee sevre autize	2016

**Annexe 5 : carte localisant les méandres naturels et les opérations de reméandrage ayant fait l'objet d'une acquisition de données de terrain**





## Annexe 7 : questionnaire adressé aux maîtres d'ouvrage ayant réalisés un reméandrage sur le territoire

pressions avant restauration	
pression sur le BV	
pression morphologique sur le segment avant restauration	<input type="checkbox"/> chenalisation ( <input type="checkbox"/> rectification, <input type="checkbox"/> endiguement, <input type="checkbox"/> recalibrage, <input type="checkbox"/> enterrement, <input type="checkbox"/> protection de berge,...) <input type="checkbox"/> Drains <input type="checkbox"/> piéniement bétail <input type="checkbox"/> Présence d'étangs sur le cours d'eau <input type="checkbox"/> Suppression de la ripisylve <input type="checkbox"/> talweg perché <input type="checkbox"/> Seuils <input type="checkbox"/> absence de bande enherbée <input type="checkbox"/> autres :
pression chimique sur le segment avant restauration	<input type="checkbox"/> rejets matière organique <input type="checkbox"/> rejets matière minérale <input type="checkbox"/> MES / particules fines <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> apport toxique <input type="checkbox"/> rejet thermique <input type="checkbox"/> rejet d'hydrocarbures <input type="checkbox"/> autres :
impact avant restauration	
impact hydrologique	<input type="checkbox"/> accélération des écoulements <input type="checkbox"/> accentuation des crues <input type="checkbox"/> accentuation étiage <input type="checkbox"/> perte d'étanchéité <input type="checkbox"/> autres :
impact morphologique	<input type="checkbox"/> altération du tracé en plan <input type="checkbox"/> altération du profil en travers <input type="checkbox"/> altération du profil en long (incision) <input type="checkbox"/> homogénéisation des faciès <input type="checkbox"/> déconnexion nappes et/ou annexes hydrauliques <input type="checkbox"/> colmatage <input type="checkbox"/> altération de la continuité écologique (biologique et/ou sédimentaire) <input type="checkbox"/> suppression du matelas alluvial <input type="checkbox"/> homogénéisation des faciès <input type="checkbox"/> autres :
impact sur les berges	<input type="checkbox"/> fragilisation des berges <input type="checkbox"/> disparition de la ripisylve <input type="checkbox"/> blocage de l'érosion naturelle <input type="checkbox"/> autres :
impact biologique	<input type="checkbox"/> altération de la continuité biologique <input type="checkbox"/> altération des habitats <input type="checkbox"/> autres :
état des habitats biologiques	<input type="checkbox"/> négligeable <input type="checkbox"/> faible <input type="checkbox"/> moyen <input type="checkbox"/> important
objectifs de la restauration	
objectifs généraux pour le BV	
objectifs sur le segment restauré	
objectifs hydro-morphologique	<input type="checkbox"/> restaurer le tracé en plan <input type="checkbox"/> favoriser ou accentuer les sinuosités <input type="checkbox"/> rétablir une section naturelle du lit mineur <input type="checkbox"/> favoriser les érosions latérales naturelles <input type="checkbox"/> rétablir un régime hydraulique naturel <input type="checkbox"/> diversifier les faciès d'écoulements <input type="checkbox"/> rehausser la nappe adjacente <input type="checkbox"/> limiter l'incision du lit <input type="checkbox"/> limiter le colmatage <input type="checkbox"/> Améliorer la résilience <input type="checkbox"/> autres :
objectif hydrologique	<input type="checkbox"/> Alimenter la nappe <input type="checkbox"/> Alimenter la zone humide <input type="checkbox"/> Soutenir le débit d'étiage <input type="checkbox"/> Ralentir les écoulements (en crue) <input type="checkbox"/> Limiter les pics de crue <input type="checkbox"/> Permettre le débordement régulier <input type="checkbox"/> Permettre la connexion des bras morts <input type="checkbox"/> autres :
objectifs biologique	<input type="checkbox"/> Créer des frayères <input type="checkbox"/> Soutenir l'alimentation des populations piscicoles <input type="checkbox"/> Retrouver des espèces spécialisées <input type="checkbox"/> Limiter les impacts thermiques <input type="checkbox"/> Préserver la biodiversité remarquable <input type="checkbox"/> Espèce cible, préciser : .....
objectifs physico-chimique	<input type="checkbox"/> Favoriser l'auto-épuration <input type="checkbox"/> Favoriser la rétention de la matière organique naturelle <input type="checkbox"/> éviter l'eutrophisation <input type="checkbox"/> autres :
autres objectifs	

définition des travaux de reméandrage			
caractéristiques de l'opération			
cadre de l'opération	<input type="checkbox"/> CRE/CTMA <input type="checkbox"/> Procédure pénale <input type="checkbox"/> obligation réglementaire <input type="checkbox"/> Autre :		
aspect réglementaire des travaux	<input type="checkbox"/> Dossier loi sur l'eau <input type="checkbox"/> DIG <input type="checkbox"/> DUP <input type="checkbox"/> Autre :		
date de réalisation des travaux et durée			
linéaire de cours d'eau avant travaux (m)		linéaire de CE après travaux (m)	
coeff de sinuosité après travaux			
maitrise foncière	<input type="checkbox"/> commune <input type="checkbox"/> propriété privé <input type="checkbox"/> autres :		
contraintes du projet :	<input type="checkbox"/> arrivée et gestion des drains <input type="checkbox"/> bandes enherbées <input type="checkbox"/> canalisation <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> respecter les cultures adjacentes <input type="checkbox"/> autres :		
description de la méthode de reméandrage utilisé			
technique utilisée	<input type="checkbox"/> technique du bouchon <input type="checkbox"/> reconnexion de méandres coupés <input type="checkbox"/> remise en talweg total <input type="checkbox"/> recouvrement partiel du lit <input type="checkbox"/> laisser divaguer le nouvel écoulement		
choix de la technique	<input type="checkbox"/> reproduction d'une expérience réussie sur un CE similaire <input type="checkbox"/> intuitif <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> après analyse biblio <input type="checkbox"/> sur conseil/avis extérieur <input type="checkbox"/> Autre :		
caractéristiques des engins utilisés	pooids	<input type="checkbox"/> < 6 tonnes (minipelle) <input type="checkbox"/> 6-20 tonnes (moyenne) <input type="checkbox"/> > 20 tonnes (lourde)	
	roulement	<input type="checkbox"/> chenilles <input type="checkbox"/> pneumatique <input type="checkbox"/> portatif	
	utilisation	<input type="checkbox"/> depuis la berge <input type="checkbox"/> dans le lit mineur	
éléments post-opérateur			
imprévus de réalisation			
Imprévu dans la mise en œuvre	<input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non		
Si oui lesquels ?	<input type="checkbox"/> Retard <input type="checkbox"/> désaccord riverain <input type="checkbox"/> climatique (crue) <input type="checkbox"/> autres :		
Ré-intervention post-restauration dû à la morphologie ?	<input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non		
Si oui : raison des travaux d'ajustement morphologique	<input type="checkbox"/> ajustements morphologiques disproportionnés <input type="checkbox"/> incision du lit <input type="checkbox"/> rupture de bouchon de reméandrage <input type="checkbox"/> écoulements infiltrés <input type="checkbox"/> <input type="checkbox"/> crue morphogène après travaux <input type="checkbox"/> erreur de dimensionnement du gabarit ( <input type="checkbox"/> lit sous dimensionné / <input type="checkbox"/> lit sur-dimensionné) <input type="checkbox"/> erreur de dimensionnement de		
détails sur la/les raisons + méthode de réajustement adoptée			

suivi post-opération			
problèmes survenu post-travaux	<input type="checkbox"/> assecs ou étiage sévère <input type="checkbox"/> colmatage <input type="checkbox"/> ré-ouverture d'abreuvoir <input type="checkbox"/> qualité d'eau <input type="checkbox"/> difficulté de reprise de la ripisylve <input type="checkbox"/> autres :		
Des suivis ont-ils été réalisés ?	<input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non		
Si non :			
Pourquoi n'y a-t-il pas eu de suivi ?	<input type="checkbox"/> Manque de moyens financiers <input type="checkbox"/> Manque de moyens humains internes <input type="checkbox"/> Manque de mobilisation interne <input type="checkbox"/> Manque de soutiens externes <input type="checkbox"/> Manque de compétence technique <input type="checkbox"/> Manque de méthodologie <input type="checkbox"/> Manque d'expérience <input type="checkbox"/> Manque de temps <input type="checkbox"/> Manque d'outils (pédagogiques, d'animations, etc.) <input type="checkbox"/> Absence d'antériorité dans les démarches <input type="checkbox"/> Manque d'argumentaires sur l'intérêt de l'évaluation		
Si oui :			
suivi morphologique	<input type="checkbox"/> évolution du tracé en plan <input type="checkbox"/> évolution du profil en travers <input type="checkbox"/> évolution du profil en long <input type="checkbox"/> succession des faciès d'écoulement <input type="checkbox"/> évolution granulométrique <input type="checkbox"/> autres :		
suivi hydrologique	<input type="checkbox"/> station de mesure de débit <input type="checkbox"/> piézomètres (artisansaux ou industriels) <input type="checkbox"/> station pluviométrique <input type="checkbox"/> autres :		
suivi biologique	<input type="checkbox"/> macro-invertébrés <input type="checkbox"/> macrophytes <input type="checkbox"/> poissons <input type="checkbox"/> diatomés <input type="checkbox"/> autres :		
recensement des habitats	<input type="checkbox"/> négligeable <input type="checkbox"/> faible <input type="checkbox"/> moyen <input type="checkbox"/> important		
suivi physico-chimique	<input type="checkbox"/> analyse SEQ eau <input type="checkbox"/> chimie NOE <input type="checkbox"/> autres :		
bilan social			
objectif initiaux atteints ?	<input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non <input type="checkbox"/> Pas encore, mais amélioration nette		
satisfaction des riverains ?	<input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non <input type="checkbox"/> Avis mitigé <input type="checkbox"/> indifférence <input type="checkbox"/> Ne sais pas		
satisfaction des exploitants ?	<input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non <input type="checkbox"/> Avis mitigé <input type="checkbox"/> indifférence <input type="checkbox"/> Ne sais pas		
satisfaction des pêcheurs ?	<input type="checkbox"/> Oui <input type="checkbox"/> Non <input type="checkbox"/> Avis mitigé <input type="checkbox"/> indifférence <input type="checkbox"/> Ne sais pas		
communication autour du projet	<input type="checkbox"/> Articles de presse (papier, bulletins municipaux ou internet) <input type="checkbox"/> Vidéo ou Reportage <input type="checkbox"/> Conférences <input type="checkbox"/> Panneaux d'information <input type="checkbox"/> Journée de sensibilisation <input type="checkbox"/> Sentier pédagogique <input type="checkbox"/> Programme d'animations <input type="checkbox"/> Réunion collective <input type="checkbox"/> autres :		
Bilan financier			
Coût global de l'opération rapporté au mètre linéaire de cours d'eau reméandré rapporté au m <sup>2</sup> de lit mineur reméandré	Est-il possible de fournir le tableau financier de l'opération par mail? merci		
ressenti / satisfaction de l'opérateur	points positifs :	points négatifs :	





## Annexe 9 : complément sur certains aspects du protocole de terrain

Estimation du coefficient de rugosité Manning-Strickler K			
matériaux constitutif de berge			
matériaux	description	n min	n max
limons	taille < 0,625 mm	0,025	0,032
sables	0,625 - 2 mm	0,026	0,035
graviers	2 - 64 mm	0,028	0,035
pierres	64 - 256 mm	0,03	0,05
blocs	> 256 mm	0,04	0,07
degrés d'irrégularité			
paroi lisse	matériaux le plus lisse possible	0	0
irrégularités légères	berges légèrement érodées ou affouillées	0,001	0,005
irrégularités modérés	berges modérément érodées ou dégradées	0,006	0,01
irrégularités importantes	berges éboulées ou sérieusement dégradées, surface irrégulière et non profilée	0,011	0,02
variation de la section en travers			
progressive	changement progressif de la taille et forme de la section	0	0
occasionnellement	les sections réduites alternent parfois	0,001	0,005
irrégularités modérés	les sections réduites alternent souvent	0,01	0,015
présence d'obstacles			
négligeable	quelques obstacles éparses (souches, branchage...)	0	0,004
faible	l'espace entre les obstacles fait que la sphère d'influence autour de l'un d'entre eux ne s'étend pas jusqu'à celle de l'obstacle suivant	0,005	0,015
sensible	espacement réduit qui provoque le cumul des effets dus à différents obstacles, qui peut obstruer une partie du lit	0,02	0,03
très marquée	l'espace entre eux est assez réduit pour provoquer de la turbulence dans la quasi-totalité de la section	0,04	0,05
quantité de végétation			
négligeable	herbes fauchées	0	0
faible	surface dense d'herbes, ou plante aquatique poussant là ou la profondeur de l'eau atteint au moins deux fois la taille de la végétation	0,002	0,01
moyenne	végétation buissonnantes (saules ou hautes herbes à tige souple)	0,025	0,05
importante	végétation aquatique poussant là où la hauteur de l'eau est égale à la hauteur de la végétation, strate arbustive	0,025	0,05
très importante	végétation aquatique dépassant la lame d'eau, strate arborée et arbustive buissonnantes	0,05	0,1
méandrement			
modéré	coeff sinuosité < 1,2	1	
appréciable	1,2 < coeff sinuosité < 1,5	1,15	
important	coeff sinuosité > 1,5	1,3	

érodabilité	
classe d'érodabilité	description
nulle	Il s'agit de berges rocheuses ou dont la granulométrie grossière fait que les particules ne peuvent plus être entraînées par le cours d'eau actuel.
faible	Ce sont les berges argileuses (extrêmement cohésives) ou argilo-limoneuses (très cohésives) sur toute la hauteur de la berge. Malgré ce fort degré de cohésion, ces berges peuvent néanmoins être érodées, notamment après une période sèche qui permet la création de fentes de dessiccation, facilitant l'effondrement gravitaire de la berge
moyenne	Ce sont les berges où le limon est dominant soit dans la texture des alluvions (limon-sableux, voire sable-limoneux), soit dans la stratigraphie (il occupe plus des 4/5e de la hauteur de berges). Une berge peut aussi être rendue moins cohésive par précipitation de carbonate de calcium (phénomène de cimentation)
forte	Les sédiments sableux à caillouteux, dominant sur au moins le 1/4 inférieur de la berge (érodabilité forte), voire sur toute la hauteur (érodabilité très forte)

### quantité d'habitats pour le fonctionnement biologique du cours d'eau (Carhyce, 2015)

négligeable	Habitats quasi-absents sur le segment étudié
faible	Quelques habitats dispersés
moyen	Habitats présents et diversifiés mais absence de certains habitats typiques du cours d'eau étudié (bois en rivière, blocs, sous-berge...)
important	Diversité et abondance importante d'habitats, similaire à celle d'un cours d'eau naturel

indice d'artificialisation de l'état initial			
indice intermédiaire	descriptif	note	
"talweg"	dans le talweg	0	
	en dehors du talweg	1	
"sinuosité"	sinueux - méandrique	0	
	limité par rapport à la sinuosité naturelle rectiligne	0,5	
"classe d'évolution morpho-dynamique"	classe 1	0	
	classe 6 avec évolution naturelle (lit)	0,5	
	classe 2, 3, 4, 5	1	
"rugosité"	coeff de rugosité K < 20 (torrent avec)	0	
	coeff de rugosité 20 < K < 30 (CE méandre + coeff de rugosité K > 30 (CE rectiligne)	0,5	
"protection de berge - enterrement"	absence de protection	0	
	protection de berge de type génie végétale	0,25	
	protection uniquement sur les berges	0,5	
	protection sur berge + fond du lit mineur	0,75	
	100 % d'enterrement (par couverture,	1	
Valeur de l'indice d'artificialisation du segment IA_SEGMI = $(\Sigma (\text{Italweg} + \text{Isinuosité} * 2 + \text{lcm} * 2 + \text{lrugosité} + \text{lprotection}))/7 =$	valeur	description (par rapport au lit mineur)	type d'artificialisation
	IA = 0	modification négligeable	CE de référence
	0 < IA < 0,25	modification faible	CE naturel
	0,25 < IA < 0,5	modification sensible	CE semi-artificiel
	0,5 < IA < 0,75	modification moyenne	CE artificiel
	0,75 < IA < 1	modification importante	CE très artificiel
IA = 1	modification absolue	CE enterré ou artificialisation total	

Echelle granulométrique de WENTWORTH (1922) modifiée, dans MALAVOI et SOUCHON (1998)		
Nom de la classe granulométrique	Classes de taille (diamètre en mm perpendiculaire au plus grand axe)	Code utilisé
Rochers	> 1024	R
Blocs	256-1024	B
Pierres grossières	128-256	PG
Pierres fines	64-128	PF
Cailloux grossiers	32 - 64	CG
Cailloux fins	16 - 32	CF
Graviers grossiers	8 à 16	GG
Graviers fins	2 à 8	GF
Sables grossiers	0,5 - 2	SG
Sables fins	0,0625 - 0,5	SF
Limons	0,0039 - 0,0625	L
Argiles	< 0,0039	A

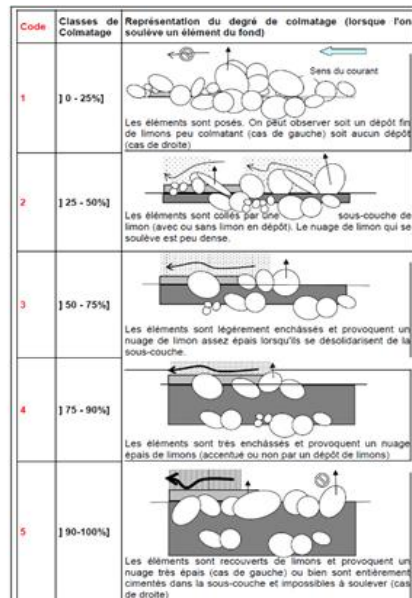


Figure 15 : Méthode d'évaluation du degré de colmatage (Archambaud et al., 2005)

## Annexe 10 : données issues de la prospection des méandres naturels

données générales										coordonnées GPS (WGS84)				température tête de radier			Vallée			mesure de la sinuosité				
code référence	ID tronçon eau ref	Hydroécocoregion niveau 2	date	département	Bassin versant	Toponyme CE	Commune	Lieu dit	Longueur station échantillonnée	X_amont	Y_amont	X_aval	Y_aval	amont station	aval station	Temp moyenne	largeur fond de vallée	pente vallée	occupation du sol *	distance euclidienne (ALLEN)	distance développée segment	sinuosité	pente cours d'eau	coefficient de rugosité
cod_ref	ID_tron_eau	HER2	date	dpt	BV	Nom_CE	com	Lieu_dit	Long_station	X_am	Y_am	X_av	Y_av	T_am	T_av	T_moy	Lfv	pente_v	occ_sol	d_euc	d_dvp	Si	pente_CE	coef_rug
nat_IC	TRON_EAU01MA-cotes du		25-mai-18	22	IC	IC	Plélo	le temple	62,5	48,57327	-2,90314	48,57352	-2,90321	12,6	12,5	12,55	51,5	0,35616438	zone humide	36,5	62,5	1,71232877	0,63013699	11,3960114
nat_Rance	TRON_EAU01MA-cotes du		24-avr-18	22	Haute Rance	ruisseau du	Éréac	amont Rimb.	100	48,26316	-2,35784	48,26309	-2,35729	11,4	11,2	11,3	70	0,87	zone humide	57	100	1,75438596	0,92	9,32400932
nat_Lié	TRON_EAU01MA-ouest		22-juin-18	22	Lié	Duancre	Ploec sur Li		0	35,6	48,31915	-2,77975	48,31904	-2,77957	16,9	16,8	16,85	48,5	0,09090909	Paturage	22	35,6	1,61818182	0,09090909
nat_Trieux	TRON_EAU01MA-ouest		22-juin-18	22	Trieux	ruisseau de	Saint Conan		0	46,9	48,41184	-3,03422	48,41191	-3,03393	16	16,1	16,05	60	0,6	zone humide	30	46,9	1,56333333	0,53333333
nat_Loysanc	TRON_EAU01MA-cotes du		23-mai-18	35	Loysance	Tronçon	Coglès	le bois Grign		71,3	48,46317	-1,3669	48,46284	-1,36735	14,6	14,6	14,6	26,5	1,17794486	Paturage	39,9	71,3	1,78696742	1,12781955
nat_Villamé	TRON_EAU01MA-nord est		23-mai-18	35	Beuvron	Ru de Villam	Villamée	Les chatelets		77,7	48,47142	-1,22295	48,471	-1,22277	16	16	16	26	0,04545455	Paturage	44	77,7	1,76590909	0,20454545
nat_tamoute	TRON_EAU01MA-cotes du		22-mai-18	35	Tamoute	Tamoute	Bazouges	ferme mezar		120,2	48,408987	-1,591527	48,40955	-1,59121	14,3	14,5	14,4	79,5	0,31081081	zone humide	74	120,2	1,62432432	0,17567568
nat_Charnie	TRON_EAU01MA-nord est		05-juil-18	53	Treulon		Etival en Ché	la Muette		0	48,06281	-0,24476	0	0	0	0	0	15	#DIV/0!	Forêt nature	0	0	#DIV/0!	#DIV/0!
nat_Ellé	TRON_EAU01MA-ouest		13-juin-18	56	Ellé	Stang hingar	Berné	la gare		81,2	48,00158	-3,392864	48,001568	-3,393738	15,9	15,9	15,9	25	0,80769231	autres : jardi	52	81,2	1,56153846	0,78846154
nat_Lignol	TRON_EAU01MA-ouest		13-juin-18	56	Scorff	Ru de Saint \	Persquen	Mané Bolan		64,7	48,000408	-3,245923	48,000688	-3,245999	13,9	13,9	13,9	60	0,4375	Forêt nature	32	64,7	2,021875	0,0625
nat_minMad	TRON_EAU01MA-ouest		26-juin-18	56	Inam	Ru du moulii	Gourin	Pont des luti		45,2	48,12223	-3,62879	48,12201	-3,62906	18,7	18,7	18,7	50	1,03333333	Paturage	30	45,2	1,50666667	0,7
nat_Gourin	TRON_EAU01MA-ouest		26-juin-18	56	Inam	Ru du moulii	Gourin	Goazilouet		28,2	48,1227	-3,62671	48,12267	-3,62702	18	18,2	18,1	35	1,11764706	Prairie fauch	17	28,2	1,65882353	0,82352941
nat_Stang Hi	TRON_EAU01MA-ouest		29-juin-18	56	Ellé	Stang Hingar	Berné	(Oues Le pontoir		42,7	48,00106	-3,40095	48,00113	-3,40137	17,6	17,6	17,6	20	0,82142857	Forêt nature	28	42,7	1,525	1,17857143

rive gauche										rive droite													
description ripisylve					érodabilité berges					description ripisylve					érodabilité berges					granulo wolmann			
nature	épaisseur	continuité	bande enherbée	hauteur	pente	stabilité	végétation sur berge	classe d'érodabilité	nature	épaisseur	continuité	bande enherbée	hauteur	pente	stabilité	végétation sur berge	classe d'érodabilité	D16	D50	D84	rapport D16/D84		
rg_nat	rg_ep	rg_c	rg_be	rg_h	rg_p	rg_s	rg_vgt	rg_ero	rd_nat	rd_ep	rd_c	rd_be	rd_h	rd_p	rd_s	rd_vgt	rd_ero	D16	D50	D84	D16/D84		
naturelle	< 2	bosquets ép	>5m	environ 50 cr	0	stable	présence	faible	naturelle	< 2	bosquets ép	>5m	environ 50 cr	0	stable	présence	faible	6,84	27	52,64	0,12993921		
naturelle	> 10	continue	absente	environ 60 cr	0,7	quelques po	présence	faible	naturelle	2_5	semi-contin	absente	environ 80 cr	0,6	quelques po	présence	faible	10,84	32	66	0,16424242		
naturelle	< 2	bosquets ép	>5m	environ 40 cr	0	stable			0	naturelle	> 10	continue	absente	environ 40 cr	0	quelques points d'effond		#NOMBRE!	#NOMBRE!	#NOMBRE!	#NOMBRE!		
naturelle	02_05	espacée régi	>5m	environ 40 cr	0	stable			0	naturelle	< 2	isolée	>5m	environ 40 cr	0	stable		0	2,84	19	32,16	0,08830846	
naturelle	5_10	continue	absente	environ 70 cr	0	quelques po	présence	faible	naturelle	5_10	bosquets ép	>5m	environ 70 cr	0	quelques po	présence	faible	#NOMBRE!	#NOMBRE!	#NOMBRE!	#NOMBRE!		
naturelle	< 2	espacée régi	absente	environ 60 cr	0	stable	présence	faible	naturelle	< 2	isolée	>5m	environ 60 cr	0	stable	présence	faible	3,68	34	73,76	0,04989154		
naturelle	< 2	isolée	>5m	environ 1m	0	quelques po	présence	faible	naturelle	< 2	isolée	>5m	environ 1m	0	quelques po	présence	faible	#NOMBRE!	#NOMBRE!	#NOMBRE!	#NOMBRE!		
naturelle	> 10	continue	absente	environ 40 cr	0	stable	présence	faible	naturelle	> 10	continue	absente	environ 40 cr	0	stable	présence	faible	#NOMBRE!	#NOMBRE!	#NOMBRE!	#NOMBRE!		
naturelle	> 10	continue	absente	environ 50 cr	0	stable	présence	faible	naturelle	< 2	espacée régi	>5m	environ 50 cr	0	stable	présence	faible	5,84	17	33	0,1769697		
naturelle	> 10	continue	absente	environ 70 cr	0	stable	présence	faible	naturelle	> 10	continue	absente	environ 70 cr	0	stable	présence	faible	#NOMBRE!	#NOMBRE!	#NOMBRE!	#NOMBRE!		
naturelle	< 2	bosquets ép	>5m	environ 60 cr	0	stable	présence	faible	naturelle	5_10	semi-contin	absente	environ 60 cr	0	stable	présence	faible	2	14,5	19,16	0,10438413		
naturelle	< 2	isolée	>5m	environ 80 cr	0	stable	présence	faible	0	0	0	>5m	environ 80 cr	0	stable	présence	faible	#NOMBRE!	#NOMBRE!	#NOMBRE!	#NOMBRE!		
naturelle	> 10	continue	absente	environ 40 cr	0	stable	présence	faible	naturelle	> 10	continue	absente	environ 40 cr	0	stable	présence	faible	4,52	24,5	43,8	0,10319635		

alternance faciès								mesure du gabarit aux pts d'inflexions				gabarit radier				gabarit fosse ou mouille de concavité				
% radier sur le segment	% plat courant sur le segment	% plat lent sur le segment	% mouille de concavité sur le segment	substrat prédominant radier	substrat prédominant pc	substrat prédominant pl	substrat prédominant mc	moyenne largeur plein bord	moyenne largeur section mouillée	moyenne hauteur plein bord	moyenne hauteur lame d'eau	moyenne largeur plein bord en radier	moyenne largeur section mouillée en r	moyenne hauteur plein bord en radier	moyenne hauteur lame d'eau en radier	moyenne largeur plein bord en fosse	moyenne largeur section mouillée en f	moyenne hauteur plein bord en fosse	moyenne hauteur lame d'eau en fosse	
%_r	%_pc	%_pl	%_mc	sub_r	sub_pc	sub_pl	sub_mc	lpb	lsm	hpb	hlm	lpp_r	lsm_r	hpb_r	hsm_r	lpp_f	lsm_f	hpb_f	hsm_f	
32,48	34,56	26,24	6,72	CG	cailloux	sable	sable	3,88333333	3,14166667	0,91833333	0,26166667	3,66666667	3,36666667	0,82666667	0,13333333	4,1	2,91666667	1,01	0,39	
20	42	19,5	18,5	CG	cailloux	sable	limon	2,68	1,78	0,948	0,4	2,6	1,8	0,75	0,18	2,73333333	1,76666667	1,08	0,54666667	
9,83146067	28,3707865	42,1348315	14,0449438	CG	sable	limons	limons	2,72	1,88	0,632	0,298	3,1	1,9	0,53	0,2	2,3	1,8	0,75	0,43	
23,6673774	44,3496802	4,90405117	48,4008529	CF	GF	sable	sable	2,656	1,96	0,606	0,352	2,7	2,2	0,35	0,14	2,645	1,9	0,67	0,405	
5,46984572	24,2636746	44,3197756	25,9467041		0	sable	sable	2,86	2,48	0,88	0,476					2,825	2,45	0,95	0,5325	
3,86100386	48,9060489	31,4028314	15,8301158	CG	sable	sable	sable	2,71666667	2,29166667	0,91666667	0,58166667					3,13333333	2,5	1,12333333	0,72333333	
0	71,2978369	10,8153078	17,8868552		0	sable	limons	3,95	2,35	1,78875	0,58125					4,24	2,39	1,948	0,652	
#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!		0	0	0	1,4	#DIV/0!	0,6	#DIV/0!									
27,0935961	22,4137931	13,9162562	36,5763547	Pierre	cailloux		0	cailloux	3,48333333	2,625	0,84833333	0,40166667	3,5	3,01666667	0,63333333	0,22	3,46666667	2,5	1,06333333	0,58333333
19,6290572	39,5672334	21,9474498	18,8562597	GF	sable	sable	sable	3,5	2,5	0,816	0,446	3,3	2,55	0,64	0,24	3,63333333	2,46666667	0,93333333	0,58333333	
37,1681416	25,6637168	18,3628319	18,8053097	GF	GF	sable	sable	3,7	2,08666667	0,84333333	0,16666667	3,7	2,23	0,83	0,105					
27,3049645	18,0851064	19,858156	34,751773		0	0	0	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!					3,2	1,9	1,1	0,71	
33,2552693	20,6088993	7,02576112	39,1100703		0	0	0	3,4	2,625	0,76	0,305	3,3	2,9	0,565	0,115	3,5	2,35	0,955	0,495	

## Annexe 11 : données issues de la prospection des opérations de reméandrage

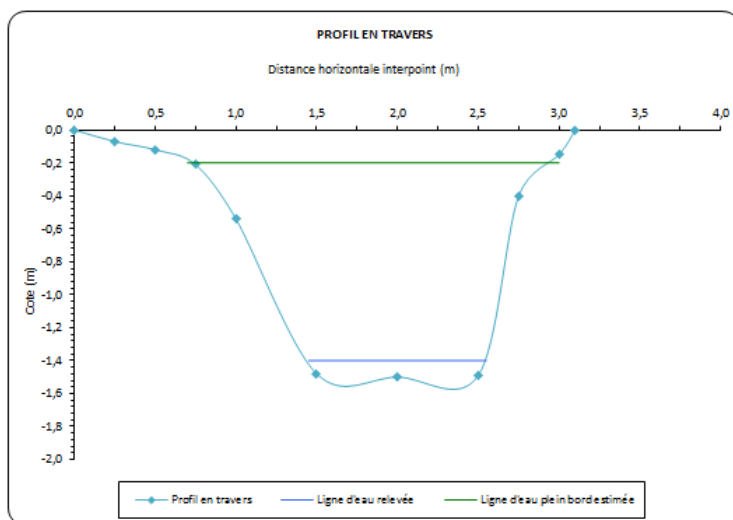
données générales										coordonnées GPS (WGS84)				température tête de radier			Vallée			mesure de la sinuosité				puissance spécifique		
code référence	technique de reméandrage	date	département	Bassin versant	Toponyme CE	Commune	Lieu dit	Longueur du lit mineur restauré (m)	Longueur station échantillonnée (m)	X_amont	Y_amont	X_aval	Y_aval	amont station	aval station	température moyenne	largeur fond de vallée	penne vallée	occupation du sol *	distance euclidienne (ALLEN)	distance développée segment	sinuosité	classe de sinuosité attribuée	penne cours d'eau	débit moyen	puissance spécifique
cod_ref	tech	date	dpt	BV	Nom_CE	com	Lieu_dit	Long_rest	Long_station	X_am	Y_am	X_av	Y_av	T_am	T_av	T_moy	Lfv	penne_v	occ_sol	d_euc	d_dvp	SI	classe_SI	penne_CE	Q_moy	ps
rest_Montretil	libre divagatic	15 juin 2018	72	Huisne	Montretil	Dehault	Les Merizières	200	73,6	48,22535	0,55433	48,22477	0,55453	16	17	16,5	40	1,730769231	Paturage	67,6	71	1,050295858	sinueux	1,982248521		0
rest_grandbr	remise talwé	08 juin 2018	49	des Robinet	ru du Grand	Liré	L'Orberie	280	39,7	47,34386	-1,14292	47,34413	-1,143	16,4	16,6	16,5	75	1,2202381	Paturage	33,6	39,7	1,18154762	sinueux	1,25		0
rest_Couasn	remise talwé	08 juin 2018	49	Couason	Couason	Pontigné	Pont de Sing	424	81,2	47,54139	0,03666	47,54142	0,03735	17,2	17,1	17,15	75	0,0326264	zone humide	61,3	81,2	1,32463295	très sinueux	0,29363785		0
rest_Faroulli	bouchons	01 juin 2018	35	Semnon	Ruisseau de	Piéché	Aval D84	250	45,7	47,89162	-1,73367	47,89346	-1,73301	15,6	15,5	15,55	13	0,61137441	autres : Bois	211	250	1,18483412	sinueux	0,5971564		0
rest_clergé	remise talwé	24 avril 2018	22	Haute Rance	ruisseau du	Ereac	La Rimbauda	920	117	48,26154	-2,35003	48,26165	-2,34889	11,2	10,9	11,05	75	0,25	zone humide	84	117	1,39285714	très sinueux	0,25		0
rest_IC	reconnexion	25 mai 2018	22	IC	IC	Binic	Zi Chien Noi	180	144	48,6034862	-2,846058	48,6035989	-2,8454177	13,9	14	13,95	24	0	autres : bois	58	144	2,48275862	méandriform	0		0
rest_fremeu	remise talwé	28 mai 2018	56	Blavet	Fremeur	Pluméliau	Parco	150	29,9	47,96275	-2,96667	47,9621541	-2,9658245	13,2	13,2	13,2	40	0,67226891	Prairie fauch	119	150	1,2605042	très sinueux	0,43697479		0
rest_Stival	remise talwé	28 mai 2018	56	Blavet	ruisseau de	Malguénac	Trévenin	150	72	48,09704	-3,03312	48,09685	-3,03237	14,6	14,8	14,7	27	0,41	autres : frich	55	72	1,30909091	très sinueux	0,825		0
rest_Oisillièr	remise talwé	04 juillet 201	44	Marais Nord	vallée des	St Savenay	amont route	146	40	47,35885	-1,93302	47,35854	-1,93301	16,2	16,1	16,15	10	0	autres : ronc	34	40	1,17647059	sinueux	supérieur 1%		#VALEUR!
rest_Liffré	remise talwé	03 juillet 201	35	Ille et illet	ruisseau de	Liffré	route forest ?	41	48,22884	-1,51865	48,22895	-1,51883		17,9	17,7	17,8	28	0,96875	Forêt nature	32	41	1,28125	très sinueux	1,125		0

rive gauche										rive droite										rive gauche										rive droite									
granulométrie				érodabilité berges					érodabilité berges					apport sédimentaire					ripsylve					ripsylve															
D16	D50	D84	rapport D16/D84	hauteur	penne	stabilité	végétation sur berge	classe d'érodabilité	hauteur	penne	stabilité	végétation sur berge	classe d'érodabilité	granulo dominante fond	granulo dominante berge	granulo dominante vallée	potentiel d'apport solide	colmatage	nature colmatage	nature de la ripsylve	épaisseur	continuité	bande enherbée	nature de la ripsylve	épaisseur	continuité	bande enherbée												
D16	D50	D84	D16/D84	rg_h	rg_p	rg_s	rg_vgt	rg_ero	rd_h	rd_p	rd_s	rd_vgt	rd_ero	gr_f	gr_b	gr_v	app_s	colm	n_colm	rip_nat	rip_ep	rip_c	rip_be	rip_nat	rip_ep	rip_c	rip_be												
11,84	28,5	56,8	0,208450704	0,3	0,6	0	stable	présence	faible	environ 0,15	0	stable	présence	faible	environ 0,15	0	stable	présence	faible	limon / sable	terre végéta	0	faible	25 - 50 %	minéral	naturelle	< 2	continue	>5m	naturelle	> 10	continue	absente						
#NOMBRE!	#NOMBRE!	#NOMBRE!	#NOMBRE!	environ 0,15	0	stable	présence	faible	environ 0,15	0	stable	présence	faible	limon	sable	terre végéta	0	faible	25 - 50 %	minéral	naturelle	< 2	continue	>5m	naturelle	> 10	continue	absente											
4	16,5	31,16	0,1283697	20 cm en mo	0	quelques po	absence	faible	20 cm	0	quelques po	absence	faible	cailloux fins	terre végéta	terre végéta	0	faible	50 - 75 %	minéral	naturelle	< 2	continue	>5m	naturelle	> 10	continue	absente											
5,68	20,5	49,12	0,11563518	environ 50 cr	0	stable	présence	faible	environ 50 cr	0	stable	présence	faible	cailloux fins	argile	terre végéta	0	faible	0 - 25 %	minéral	naturelle	< 2	espacée régt	>5m	absente	plantée	< 2	espacée régt	>5m	absente									
#NOMBRE!	#NOMBRE!	#NOMBRE!	#NOMBRE!	environ 1m	0	stable	présence	faible	environ 1m5	0	quelques po	présence	faible	0	0	0	0	0	25 - 50 %	organique et naturelle	> 10	continue	absente	naturelle	> 10	continue	absente												
#NOMBRE!	#NOMBRE!	#NOMBRE!	#NOMBRE!	environ 30 cr	0	stable	absence	faible	environ 30 cr	0	stable	absence	faible	argile	argile	terre végéta	0	faible	0 - 25 %	minéral	plantée	< 2	espacée régt	>5m	plantée	< 2	espacée régt	>5m											
8,52	30,5	62,56	0,13618926	hauteur du b	0	stable	absence	faible	hauteur des	0	stable	absence	faible	0	0	0	0	0	0 - 25 %	minéral	plantée	< 2	espacée régt	>5m	naturelle	< 2	espacée régt	>5m											
5	20	46,16	0,10831889	environ 25 cr	0	stable	présence	faible	environ 25 cr	0	stable	présence	faible	gravier	gravier	gravier	0	faible	0 - 25 %	organique	naturelle	< 2	espacée régt	>5m	naturelle	< 2	espacée régt	>5m											
#NOMBRE!	#NOMBRE!	#NOMBRE!	#NOMBRE!	0	0	stable	présence	faible	0	0	stable	présence	faible	0	0	0	0	0	0 - 25 %	organique	naturelle	> 10	continue	absente	naturelle	> 10	continue	absente											

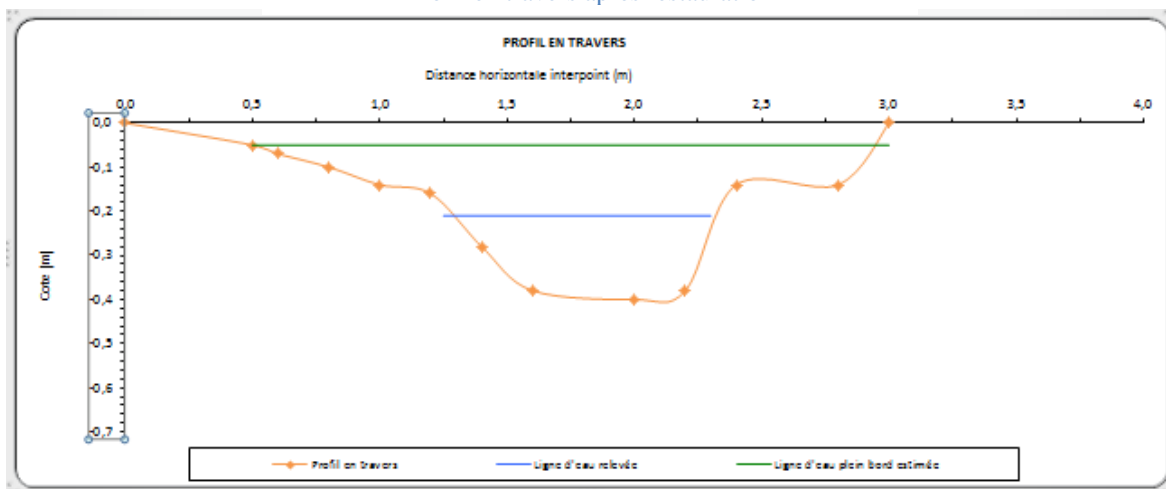
coefficient de rugosité	emprise disponible du CE	méandres restaurés				alternance faciés								mesure du gabarit aux pts d'inflexions (m)				gabarit radier (m)				gabarit fosse ou mouille de concavité (m)								
		longueur d'arc (m)	amplitudes (m)	longueur d'onde (m)	% r	% pc	% pl	% mc	sub_r	sub_pc	sub_pl	sub_mc	sub_r	sub_pc	sub_pl	sub_mc	lpb	lsm	hpb	hsm	lpb_r	lsm_r	hpb_r	hsm_r	lpb_f	lsm_f	hpb_f	hsm_f		
		emp_CE	Larc_moy	amp_moy	Lond_moy	% r	% pc	% pl	% mc	sub_r	sub_pc	sub_pl	sub_mc	lpb	lsm	hpb	hsm	lpb_r	lsm_r	hpb_r	hsm_r	lpb_f	lsm_f	hpb_f	hsm_f	lpb_f	lsm_f	hpb_f	hsm_f	
30,76923077	7,6	#DIV/0!	1,84	7,7	46,61971831	14,78873239	4,929577465	35,91549296	PF	PF	PF	PF/argile	1,533333333	1,036666667	0,526666667	0,236666667														
11,4285714	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	0	54,4080605	38,0352645	5,03778338	0	gravier	limons	limons		1,712	0,64	0,3	0,07														
18,3066362	#DIV/0!	12,2	20,475	11,2068966	40,8866995	18,226601	29,679803	0	gravier	limons	limons		5,766666667	3,633333333	1,576666667	0,723333333														
31,6205534	#DIV/0!	4,45	11,075	27,1334792	54,04814	15,7549234	3,06345733	CG	CF	limon	limon		2,35	1,075	0,505	0,166666667	2,533333333	1	0,48	0,056666667	2,166666667	1,15	0,53	0,276666667						
15,1228733	39,33333333	10,5	26,6666667	17,0940171	31,6239316	40,1709402	8,54700855	cailloux	CG	sable/limon	limon		2,425	1,375	0,7625	0,355	2,35	1,4	0,675	0,285	3	1,7	0,95	0,5						
23,6686391	#DIV/0!	17,73333333	10,6944444	6,25	77,9861111	5,69444444	PF	sable	limon	limon		5,3	4,033333333	2,02	0,56	5	3,4	1,88	0,22	6,4	5	2,5	1,1							
23,1884058	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	31,1036789	47,1571906	21,7391304	0	gravier	gross argile	limon		0	0,69	0,5	0,38	0,065	0,69	0,5	0,38	0,065										
19,1113235	#DIV/0!	9,3	27,4666667	65,2777778	20,8333333	13,8888889	0	pierr	et bl	pierr	et bl		0	1,675	0,725	0,195	1,7	0,74	0,65	0,16										
13,2450331	21,5	22,5	18	40	7,5	30	0	0	0	0	0	0	1,92	0,94	0,446	0,16	2,2	0,9	0,32	0,105	1,6	1,2	0,75	0,35						
16,563147	#DIV/0!	#DIV/0!	#DIV/0!	19,5121951	35,3658537	30,4878049	14,6341463	0	0	0	0	0	1,86	0,57	0,39	0,116	2	0,35	0,18	0,02	2,3	0,75	0,445	0,165						

## Annexe 12 : exemple de profils en travers et en long issus de l'opération de reméandrage du ruisseau de la mare Belanton à Liffré (35)

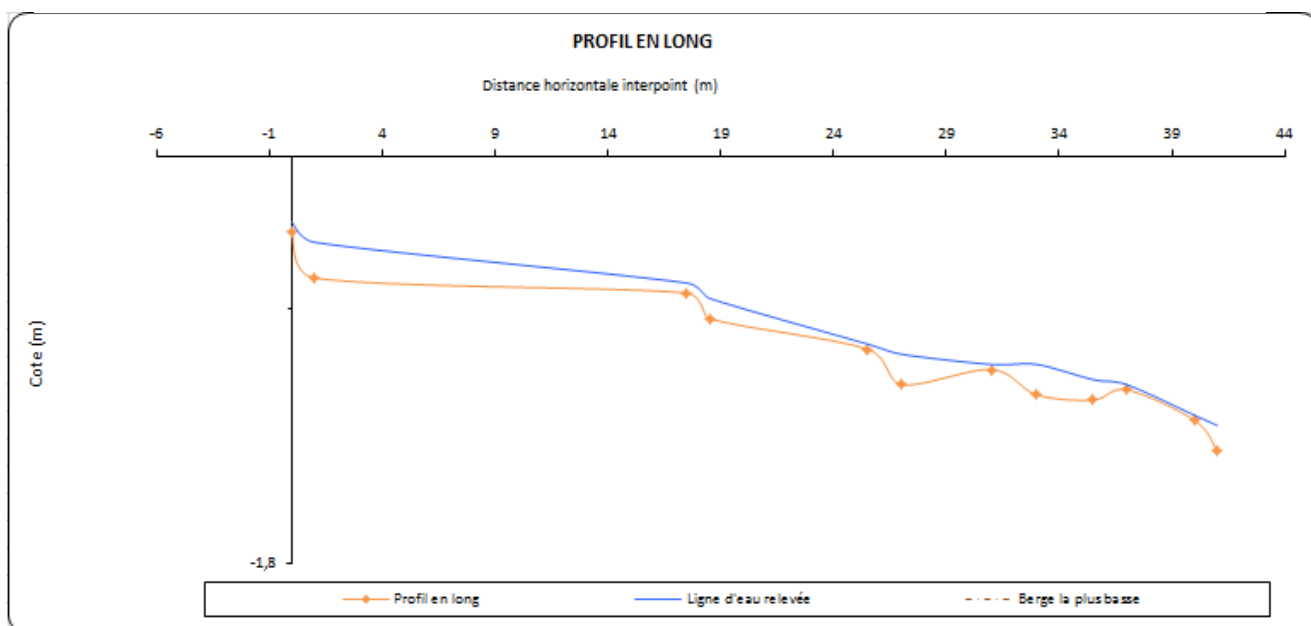
Profil en travers avant restauration



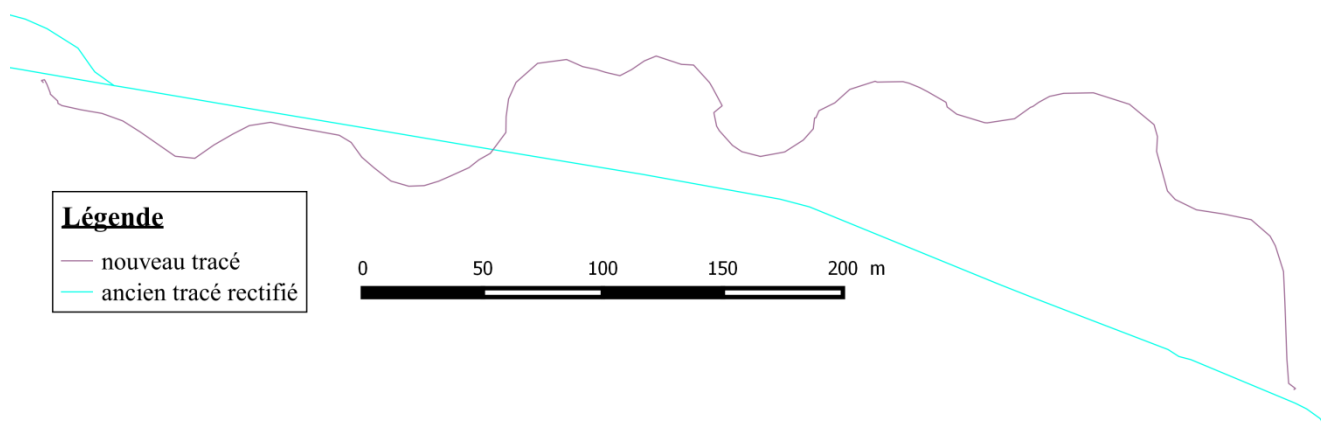
Profil en travers après restauration



Profil en long après restauration (côtes prises en tête et en fin de chaque radier restauré)

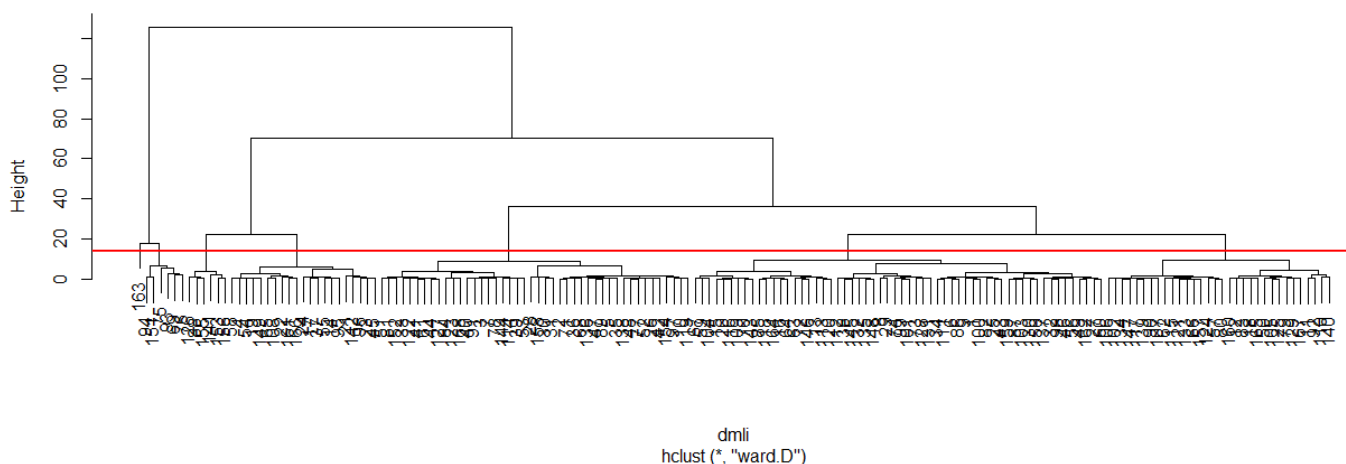


### Annexe 13 : exemple du tracé en plan avant et après l'opération de reméandrage de l'Aber idult à Saint Renan (29)



## Annexe 14 : classification ascendante hiérarchique (CAH) sur l'ensemble des variables

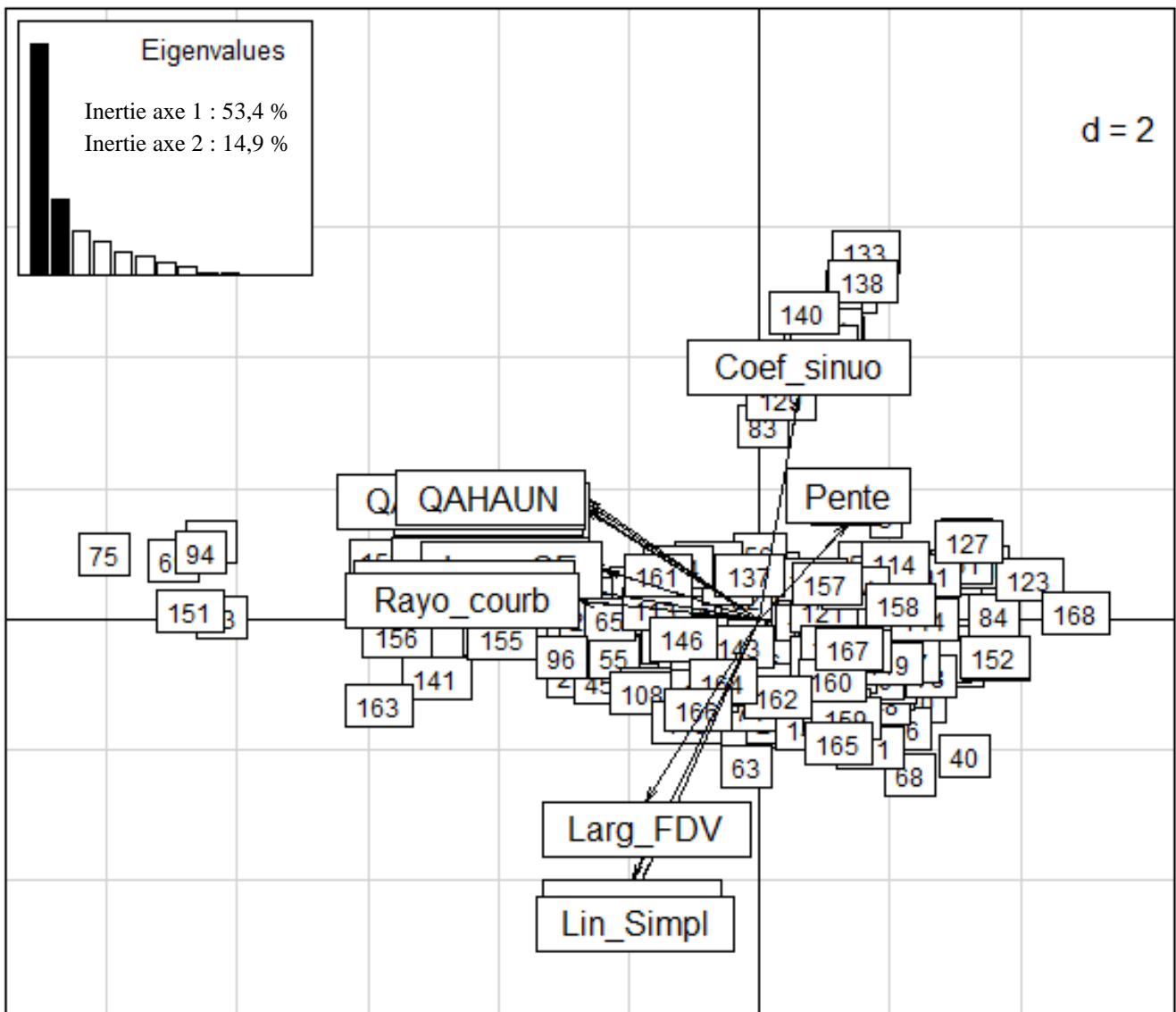
Cluster Dendrogram



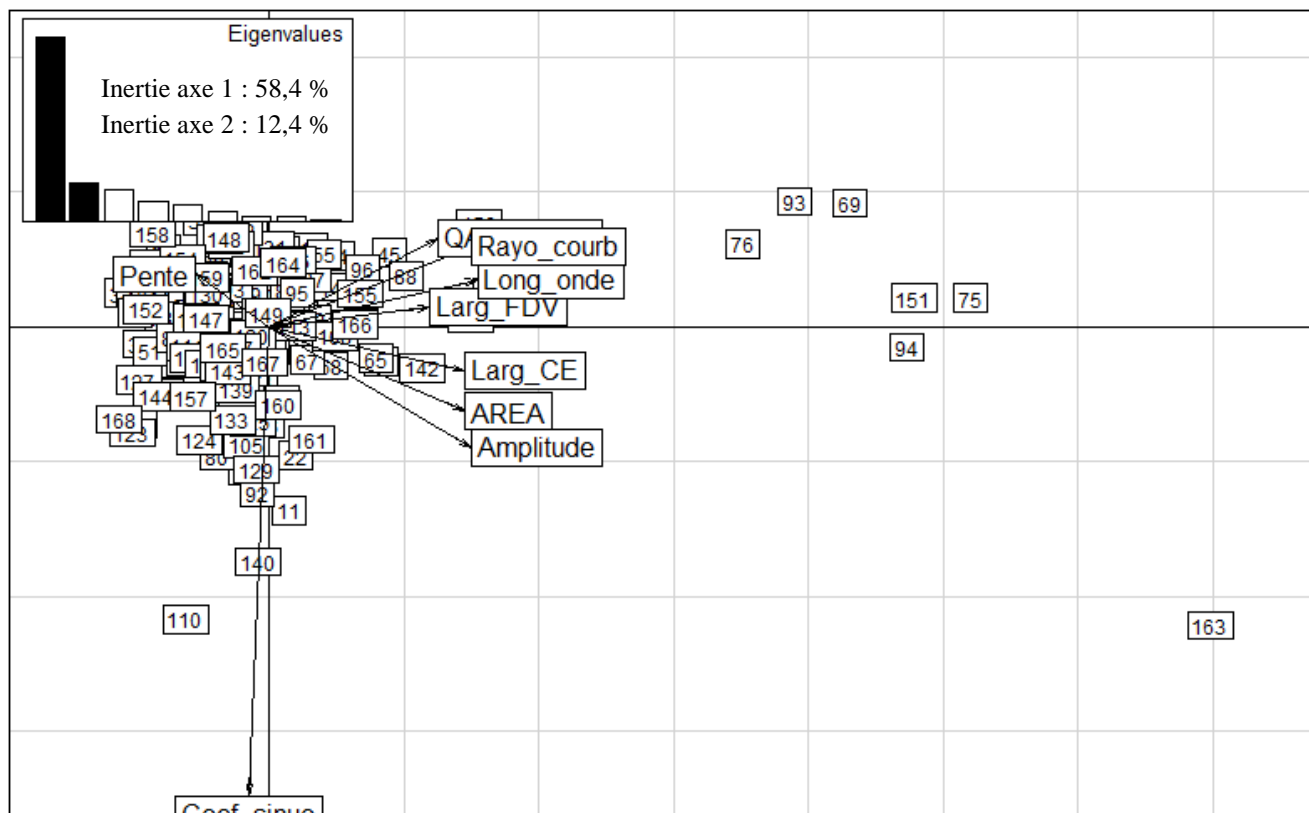
Avec les variables étudiés, une CAH a été réalisée pour tenter d'identifier des sous-groupes de stations à méandres parmi toutes les stations échantillonnées. L'objectif est de trouver des variances intra classes les plus faibles possibles, pour que les sous-groupes soient le plus homogène possible du point de vue des variables préalablement identifiés par l'ACP.

Une répartition très hétérogène du nombre de station par classe est observée. La variance intra classe étant élevée (35%) et les valeurs des variables assez dispersées au sein de même groupes indiquent une faible fiabilité de la classification. L'observation des valeurs au sein des groupes ne permet pas de constituer des groupes distincts en fonction de tels ou tels critères, ni même en fonction d'hydro écorégion.

Annexe 15 : ACP réalisée sur l'ensemble du jeu de données en transformant les données en ln(x+1)



## Annexe 16 : ACP réalisée en éliminant des variables par analyses successives





# Table des matières

<b>INTRODUCTION.....</b>	<b>1</b>
<b>1. ETAT DE L'ART .....</b>	<b>2</b>
<b>1.1 LE STYLE FLUVIAL : UNE VARIABLE DE REPONSE.....</b>	<b>2</b>
1.1.1 LES STYLES FLUVIAUX MAJEURS.....	2
1.1.2 LE STYLE FLUVIAL : UN SYSTEME NON FIGE.....	2
<b>1.2 PROPRIETE PHYSIQUE DES RIVIERES A MEANDRES.....</b>	<b>3</b>
1.2.1 DEFINITION D'UN MEANDRE .....	3
1.2.2 GEOMETRIE EN PLAN D'UN MEANDRE .....	3
1.2.3 FACIES D'ECOULEMENT ET PROFIL LONGITUDINAL .....	3
1.2.4 DIVERSITE DES MEANDRES .....	4
<b>1.3 CARACTERISTIQUES MORPHOMETRIQUES DES MEANDRES .....</b>	<b>4</b>
1.3.1 LE COEFFICIENT DE SINUOSITE : PRINCIPALE VARIABLE DESCRIPTIVE .....	4
1.3.2 LIENS ENTRE VARIABLES DESCRIPTIVES .....	5
<b>1.4 DYNAMIQUE ET MOBILITE DES MEANDRES .....</b>	<b>7</b>
1.4.1 MEANDRES : PREMIER SIGNE D'EVOLUTION DES LITS.....	7
1.4.2 GENESE DES MEANDRES : MODELE DE DEVELOPPEMENT .....	8
1.4.3 MIGRATION DES BOUCLES DE MEANDRES .....	9
1.4.4 RECOUPEMENT DES BOUCLES DE MEANDRES .....	9
<b>1.5 ELEMENTS DE CONNAISSANCES SUR LES OPERATIONS DE RECTIFICATION DES COURS D'EAU .....</b>	<b>9</b>
1.5.1 DEFINITION DES PRINCIPALES INTERVENTIONS ANTHROPIQUES SUR LES COURS D'EAU.....	9
A) NATURE DES TRAVAUX HYDRAULIQUES.....	10
B) LA RECTIFICATION TOTALE : RESPONSABLE DU RESCINDEMENT DE MEANDRES.....	10
1.5.2 VISION SOCIOLOGIQUE DES RIVIERES .....	11
1.5.3 UNE PREFERENCE CULTURELLE POUR LES FORMES SINUEUSES .....	11
<b>1.6 LA RESTAURATION PHYSIQUE DES MEANDRES .....</b>	<b>11</b>
1.6.1 POINT SEMANTIQUE.....	12
1.6.2 LES METHODES DE REMEANDRAGE.....	12
A) RECONNEXION DE MEANDRES COUPES.....	12
B) TECHNIQUE DES BOUCHONS.....	13
C) REMISE DANS LE TALWEG .....	13
D) LIBRE DIVAGATION.....	13
<b>2. METHODOLOGIE.....</b>	<b>14</b>
<b>2.1 PRESENTATION DU TERRITOIRE D'ETUDE.....</b>	<b>14</b>
<b>2.2 DEUX VOLETS DANS LA MEME ETUDE .....</b>	<b>14</b>
<b>2.3 RECENSEMENT DES SITES ET ECHANTILLONNAGE TERRAIN .....</b>	<b>15</b>
2.3.1 SELECTION SOUS SIG DES TRONÇONS DE REFERENCE .....	15
2.3.2 CHOIX DES MEANDRES NATURELS POUR L'ECHANTILLONNAGE TERRAIN.....	15
2.3.3 RECENSEMENT DES OPERATIONS DE REMEANDRAGE ET CHOIX DES SITES A VISITER .....	16
<b>2.4 MESURE DES DIFFERENTES VARIABLES DESCRIPTIVES DU MEANDRAGE .....</b>	<b>16</b>
<b>2.5 TRAITEMENT DES DONNEES .....</b>	<b>18</b>
2.5.1 INTEGRATION ET EXTRACTION DES MESURES SOUS SIG.....	18

2.5.2 ANALYSES DE DONNEES NUMERIQUES .....	19
2.5.3 ANALYSES STATISTIQUES .....	19
<b>3. RESULTATS .....</b>	<b>20</b>
<b>3.1 VARIABILITE ET DISTRIBUTION DES DONNEES .....</b>	<b>20</b>
<b>3.2 COMPARAISON DES COEFFICIENTS DE SINUSITES NUMERISES PUIS CALCULES SUR LE TERRAIN .....</b>	<b>21</b>
<b>3.3 DISCRIMINATION DES VARIABLES MORPHOMETRIQUES .....</b>	<b>21</b>
<b>3.4 CORRELATION ENTRE VARIABLES DESCRIPTIVES .....</b>	<b>21</b>
<b>3.5 RESULTATS DES OPERATIONS DE REMEANDRAGE VISITEES.....</b>	<b>22</b>
<b>4. DISCUSSION.....</b>	<b>24</b>
<b>4.1 DISCUSSION : LIENS ENTRE VARIABLES.....</b>	<b>24</b>
4.1.1 DISTRIBUTION ET DISPERSION DES DONNEES.....	24
A) CONSTAT.....	24
B) EVOLUTION TEMPORELLE DES VALEURS PRISES PAR LES VARIABLES .....	24
B) LIMITES DE PRECISION .....	24
4.1.2 COMPARAISON AVEC LA BIBLIOGRAPHIE .....	25
A) LIENS DEMONTRES .....	25
B) HYPOTHESES AVANCEES .....	25
<b>4.2 DISCUSSION : DIMENSIONNEMENT DES OPERATIONS DE REMEANDRAGE.....</b>	<b>26</b>
4.2.1 TRACE EN PLAN.....	26
4.2.2 PROFIL EN LONG.....	27
4.2.3 GEOMETRIE EN TRAVERS .....	29
<b>5. CONCLUSION ET PERSPECTIVES D'AVENIR.....</b>	<b>29</b>
<b>REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....</b>	<b>.....</b>
<b>LISTE DES FIGURES .....</b>	<b>.....</b>
<b>LISTE DES TABLEAUX.....</b>	<b>.....</b>
<b>LISTE DES ANNEXES .....</b>	<b>.....</b>
<b>ANNEXES .....</b>	<b>.....</b>
<b>TABLE DES MATIERES .....</b>	<b>.....</b>
<b>RESUMES .....</b>	<b>.....</b>

## Résumé

De par leurs caractéristiques hydromorphologiques, les cours d'eau à méandres contribuent fortement au bon état écologique des masses d'eau. Or, les cours d'eau des régions Bretagne et Pays de la Loire ont subi des travaux hydrauliques lourds (rectification, coupure de méandres...) du fait des politiques d'aménagement du territoire, de l'intensification des pratiques agricoles et de l'urbanisation. Les publications scientifiques révèlent que ces altérations physiques impactent fortement leur fonctionnalité écologique. Par conséquent, face au manque de données locales et à l'importance de leurs régionalisations, ce territoire a été retenu pour l'étude des caractéristiques des méandres de cours d'eau. L'objectif de ce travail était d'améliorer les connaissances sur les caractéristiques de méandrage des cours d'eau à l'échelle des régions Bretagne et Pays de la Loire, pour être en capacité d'assurer un encadrement technique sur le dimensionnement des opérations de reméandrage.

Les données relatives aux variables de contrôle et d'ajustement des méandres étudiés à partir d'une méthode SIG, et de relevés terrains, ont mis en évidence une très forte dispersion des valeurs prises par les variables relatives au tracé en plan des méandres, ainsi qu'une difficulté à établir des liens entre variables. Cependant, des corrélations ont pu être mises en évidence entre la largeur à plein bord du cours d'eau et certaines variables morphométriques. Ces analyses, couplées à l'étude de sites reméandrés, ont mené à des réflexions sur les recommandations techniques en matière de dimensionnement des travaux de reméandrage. L'étude des particularités foncières locales et la prise en compte des aspects « tracé en plan », « profil en long » et « profil en travers » sont indispensables pour favoriser la résilience du cours d'eau.

L'ensemble des résultats confirment l'existence d'une thématique, ainsi qu'une potentialité de reméandrage, qu'il apparaît important d'étendre à l'échelle nationale.

**Mots clefs** : cours d'eau ; hydromorphologie ; tracé en plan ; restauration écologique ; reméandrage

## Abstract

Due to their hydromorphological characteristics, meandering stream contributes heavily to the good ecological state of watershed. However, the streams of regions "Bretagne" and "Pays de la Loire" were subject to heavy hydraulic works (channelisation adjustment, cut-off meanders ...) because of the politics of arrangement, the intensification of the agricultural practices and the urbanization. The scientific publications reveal that these physical disturbance impact ecological feature of meandering stream. Therefore, in front of lack of local data and the importance of their regionalization, this territory was chosen for the study of the characteristics of the stream meanders. The aim of this work was to improve knowledge on the characteristics of meandering channel on the scale of regions "Bretagne" and "Pays de la Loire", to be able to provide technical supervision on the sizing of the re-meandering.

The data relative to the variables of controls and adjustment of meanders studied with a SIG method, and field analyses, highlighted a large scattering of the values taken by meanders planform variables, as well as a difficulty to establish links between variables. However, correlations were able to be highlighted between the bankfull width and some morphometric variables. These analyses, coupled with the observation of re-meandering site, led to reflections about technical recommendations of re-meandering sizing. The study of the local field feature and the consideration of "bend planform geometry", "long profil" and "cross section" are necessary to favor the stream resilience.

This result confirms the existence of a theme, as well as one potentiality of re-meandering, that it seems important to expand on a national scale.

**Keys words**: stream; hydromorphology ; bend planform geometry ; river restoration ; re-meandering