

Projet de Fin d'Etudes (PFE) 2019

Caractérisation sédimentaire des annexes fluviales de la Loire aval



***Caractérisation sédimentaire
des annexes fluviales de la Loire aval***

AVERTISSEMENT

Cette recherche a fait appel à des lectures, enquêtes et interviews. Tout emprunt à des contenus d'interviews, des écrits autres que strictement personnel, toute reproduction et citation, font systématiquement l'objet d'un référencement.

L'auteur (les auteurs) de cette recherche a (ont) signé une attestation sur l'honneur de non plagiat.

Formation par la recherche, Projet de Fin d'Etudes en génie de l'aménagement et de l'environnement

La formation au génie de l'aménagement et de l'environnement, assurée par le département aménagement et environnement de l'Ecole Polytechnique de l'Université de Tours, associe dans le champ de l'urbanisme, de l'aménagement des espaces fortement à faiblement anthropisés, l'acquisition de connaissances fondamentales, l'acquisition de techniques et de savoir-faire, la formation à la pratique professionnelle et la formation par la recherche. Cette dernière ne vise pas à former les seuls futurs élèves désireux de prolonger leur formation par les études doctorales, mais tout en ouvrant à cette voie, elle vise tout d'abord à favoriser la capacité des futurs ingénieurs à :

- Accroître leurs compétences en matière de pratique professionnelle par la mobilisation de connaissances et de techniques, dont les fondements et contenus ont été explorés le plus finement possible afin d'en assurer une bonne maîtrise intellectuelle et pratique,
- Accroître la capacité des ingénieurs en génie de l'aménagement et de l'environnement à innover tant en matière de méthodes que d'outils, mobilisables pour affronter et résoudre les problèmes complexes posés par l'organisation et la gestion des espaces.

La formation par la recherche inclut un exercice individuel de recherche, le projet de fin d'études (P.F.E.), situé en dernière année de formation des élèves ingénieurs. Cet exercice correspond à un stage d'une durée minimum de trois mois, en laboratoire de recherche, principalement au sein de l'équipe Dynamiques et Actions Territoriales et Environnementales de l'UMR 7324 CITERES à laquelle appartiennent les enseignants-chercheurs du département aménagement.

Le travail de recherche, dont l'objectif de base est d'acquérir une compétence méthodologique en matière de recherche, doit répondre à l'un des deux grands objectifs :

- Développer toute ou partie d'une méthode ou d'un outil nouveau permettant le traitement innovant d'un problème d'aménagement
- Approfondir les connaissances de base pour mieux affronter une question complexe en matière d'aménagement.

Afin de valoriser ce travail de recherche nous avons décidé de mettre en ligne sur la base du Système Universitaire de Documentation (SUDOC), les mémoires à partir de la mention bien.

REMERCIEMENTS

Je souhaiterais remercier les personnes qui m'ont aidée à réaliser cet exercice universitaire qu'est le projet de fin d'étude.

Tout d'abord j'adresse mes remerciements à Madame GREULICH Sabine, ma tutrice, pour m'avoir aiguillée et guidée tout au long de ce semestre. Également, j'exprime ma gratitude envers Madame GRELLIER Séraphine, Monsieur RODRIGUES Stéphane et Monsieur SERRHINI Kamal, qui m'ont permis d'éclaircir et de mieux cerner certains points non négligeables dans cette étude. De plus, je témoigne ma reconnaissance à KELLER Blandine et PARAHY Lucas qui par leurs études préalablement menées m'ont fourni des informations clés sur de la caractérisation des annexes fluviales de la Loire aval. Enfin, je remercie tout particulièrement GAUDICHET Corentin pour m'avoir aidée dans la réalisation des expériences qui lui permettront par la suite de compléter sa thèse actuelle en lien avec les annexes fluviales de la Loire aval.

Table des figures.....	
Table des tableaux.....	
Table des formules.....	
Liste des sigles.....	
I. Introduction	1
II. Contrat Loire et ses annexes et Projet R-TEMUS.....	3
III. Matériels et méthodes	4
<i>III.a. Prélèvement des sédiments sur le terrain</i>	5
<i>III.b. Protocole de préparation des échantillons après prélèvement sur le terrain</i>	6
<i>III.c. Protocole de détermination du taux de matière organique</i>	6
<i>III.d. Traitement statistique</i>	8
IV. Résultats.....	10
V. Discussion.....	17
VI. Conclusion.....	19
Bibliographie.....	20
ANNEXES	23

Table des figures

Figure 1. Schéma explicatif du relevé des échantillons (vue de haut)	5
Figure 2. Schéma explicatif de relevé des échantillons (vue en coupe)	5
Figure 3. Protocole de préparation des échantillons.....	6
Figure 4. Protocole de Perte au Feu (Etape 1).....	7
Figure 5. Protocole de Perte au Feu (Etape 2).....	7
Figure 6. Différence de coloration avant/après calcination.....	8
Figure 7. Box plots – Pourcentage de MO en surface en fonction du groupe de végétalisation.....	10
Figure 8. Box plots – Pourcentage de MO en profondeur en fonction du groupe de végétalisation.....	10
Figure 9. Résidus normalisés. Rouge (G1), Bleu (G2), Vert (G3).	11
Figure 10. Résidus normalisés en fonction de la moyenne de % de MO. Rouge (G1), Bleu (G2), Vert (G3).	11
Figure 11. Valeurs propres des axes de l'ACP et courbe cumulative des pourcentages de variabilités expliquées.....	13
Figure 12. Projection des variables actives sur l'axe factoriel	14
Figure 13. Projection des annexes sur l'axe factoriel. G1 (bleu), G2 (rouge), G3 (vert).....	14
Figure 14. Cercle de corrélation ACP- Physico-chimie de l'eau et teneur en matière organique.	15
Figure 15. Matrice de corrélation de Pearson.....	15
Figure 16. Cercle de corrélation ACP - Type de sédiments, Degrés de connexion et teneur en matière organique.....	16

Table des tableaux

Tableau 1. Liste des 14 annexes étudiées	4
Tableau 2. Fonctions utilisées sous XLStat pour les analyses statistiques.....	8
Tableau 3. Somme des % de MO par annexes en fonction de la profondeur. Coloration bleu gras correspondante à une valeur supérieure par annexe.	12

Table des formules

Formule 1. Pourcentage de matière organique	8
---	---

Liste des sigles

ACP : Analyse en Composantes Principales
ANOVA : Analyse de la Variance
CEN : Conservatoire des Espaces Naturels
CLN : Contrat Loire Nature
GIPLE : Groupement d'Intérêt Public Loire Estuaire
HSD : Honestly Significantly Different
ISSeP : Institut Scientifique de Service Public
MO : Matière Organique
P : Profondeur
PAF : Perte Au Feu
Pf : Poids final après calcination
Pt : Poids total : creuset + environ 10g de sédiments avant calcination
Pv : Poids creuset à vide
PLGN : Plan Loire Grandeur Nature
R-TEMUS : Restauration du lit et Trajectoires Ecologiques, Morphologiques et d'USages en Basse Loire
S : Surface

I. Introduction

Bien que souvent présentée comme étant « une rivière sauvage » (Courtet et al, 1990), la Loire a été et est affectée par les activités humaines qui ont altéré son fonctionnement. En effet, l'aménagement de la Loire pour la navigation ainsi que les extractions de sable dans le lit mineur à partir de la fin du XIX^{ème} siècle et du XX^{ème} siècle ont peu à peu participé à l'affaiblissement de la ligne d'eau. On constate qu'entre 1900 et 2000 le lit de la Loire s'est incisé jusqu'à plus de 3.10 mètres, entre Nantes et le Pont-de-Cé (Projet R-TEMUS Présentation PowerPoint, 2019), entraînant alors la déconnexion des chenaux secondaires au chenal principal (Moatar & Dupont, 2016). Ces chenaux secondaires à un stade plus ou moins avancé de déconnexion sont appelés « annexes hydrauliques ». Le Plan Loire Grandeur Nature (PLGN) définit une annexe fluviale comme un « sous-ensemble de l'hydrosystème, adjacent au lit principal et connecté avec celui-ci seulement une partie de l'année, pour certaines conditions hydrauliques » (Dupieux, 2004). Ces dépendances de la Loire ne sont liées au chenal principal qu'en période de hautes eaux, cela signifie que durant les périodes de crues l'annexe se comble progressivement par l'apport de sédiments mais également, lors des périodes de déconnexion, par l'accumulation de matière organique issue directement de la végétation implantée (Rodrigues et al, 2006; Rodrigues et al, 2007). La mise en eau est donc un enjeu plus que majeur pour l'ensemble du fonctionnement écologique des annexes fluviales (Loire estuaire cellule des Mesures et de Bilans, 2003).

Les annexes fluviales peuvent jouer plusieurs rôles comme l'écroulement des crues, en tant que réservoir de biodiversité pour l'avifaune, les amphibiens, la flore (Bornette & Puljalon, 2011) et participe également à la régulation des nutriments et de la matière organique. C'est principalement sur ce dernier point que cette étude portera, mais avant d'évoquer le lien entre sédiment/matière organique et végétation il est important de partir de l'origine. En effet, c'est principalement la plaine alluviale qui joue un rôle majeur en tant que source et zone de stockage pour les sédiments (Asselman & Middelkoop, 1995).

Au sein de la plaine alluviale trois directions préférentielles du transport sédimentaire sont à considérer. Au niveau longitudinal, durant les périodes de hautes eaux, le flux est en dominance parallèle à la direction principale du chenal principal (Rodrigues et al, 2007) distribuant ainsi les sédiments fins ou grossiers sur l'ensemble de la plaine d'inondation (Oki et al, 2005). Pendant la décrue, la réorientation du cours d'eau induit des flux de sédiments transversaux, la redistribution du flux se fait à travers les dépressions locales induisant alors un retravail des sédiments à l'intérieur des bancs de végétation (Rodrigues et al, 2007). Egalement, toujours au niveau de la dimension transversale de nombreuses études ont montré que le transport de sédiment décroît du chenal principal jusqu'à la plaine d'inondation (Walling & He, 1998; Pizzuto, 1987). Enfin, au niveau vertical, l'accrétion de sédiment décroît généralement avec la profondeur de l'eau (Corenblit et al, 2009).

A travers ces types de transports, les sédiments vont interagir avec leur environnement, une interaction bidirectionnelle s'établit alors entre les sédiments et la végétation. L'analyse du lien réciproque entre les communautés biologiques et ces processus géomorphiques aussi appelée « biogéomorphologie » permet de mieux aborder la plaine alluviale comme un système global soumis à des perturbations biotiques et abiotiques cassant alors cette dichotomie jusque la présente (Corenblit et al, 2007). Une claire relation existe entre la distribution de la végétation et les conditions environnementales, démontrant alors que la profondeur, la hauteur d'eau, la durée et le temps d'inondation, les propriétés chimiques de l'eau, la quantité et le type de sédiments sont des facteurs importants affectant et influençant la distribution des espèces dans la plaine alluviale (Jurik et al, 1994 ; Schaff et al, 2003 ; Walls et al, 2005 ; Fujimura et al, 2008).

Dans le sens biotique/abiotique, la végétation induit de fortes variations locales dans les taux de sédimentation, elle contrôle l'érosion des sédiments, le transport et les processus de dépôt par sa résistance au flux et la capacité de ses racines à modifier la cohésion du substrat (Corenblit, 2007). Le système racinaire permet d'offrir la protection et la stabilisation durant les périodes de perturbations de l'écoulement dites hautes eaux (Thorne, 1990 ; Abernethy & Rutherford, 2000 ; Rodrigues et al, 2006). Egalement, La morphologie des végétaux et particulièrement leur croissance fait partie des paramètres importants qui ont une influence sur les dépôts de sédiments (Curan & Hession, 2013). Les arbustes et les jeunes arbres induisent une rétention plus importante des sédiments que les herbacées, qui, eux, vont préférentiellement piéger les sédiments fins (Rey et al, 2000). La végétation ligneuse influence la dynamique sédimentaire et la morphologie à différentes échelles. Localement à des hautes hauteurs d'eau, les arbres peuvent déformer le flux et causer des obstacles. À plus grande échelle, la végétation ligneuse va influencer la morphologie du chenal et contribuer à la stabilisation des sédiments et à l'évolution morphologique du lit du cours d'eau (Rygel et al, 2004; Rodrigues et al, 2006 ; Rodrigues et al, 2007). Pour les faibles décharges la distribution de vitesse et la direction sont gouvernées par la topographie (Rodrigues et al, 2006).

La végétation est donc une composante dynamique de la métamorphose fluviale et est impliquée dans la fixation des sédiments à l'intérieur de la plaine alluviale (Rodrigues et al, 2007).

Dans le sens abiotique/biotique, les sédiments sont une composante essentielle des habitats et de la dynamique du relief (Lee & Partridge, 1983 ; Corenblit et al, 2009). Le dépôt de sédiment est une source majeure de nutriments dans les communautés de la plaine alluviale, et ce sont les différentes tailles et textures de sédiments qui vont affecter ces nutriments et avoir un effet sur la survie et la croissance des plantes (Schaff et al, 2003 ; Olde Venterink et al, 2006 ; Fujimura et al, 2008) notamment dans leur plus jeune stade d'évolution, lorsque la sensibilité aux conditions environnementales est maximale (Wang et al, 1994).

Le cycle des nutriments mais également la matière organique sont identifiés comme des éléments écologiques majeurs régissant les dynamiques de la biodiversité et des écosystèmes (Shahid & Wright, 2003). La végétation assimile les nutriments de son environnement par ses racines, ses tiges, ses branches ou bien ses feuilles et les retourne par la décomposition de la matière organique et la minéralisation des feuilles lors de la sénescence des feuilles ou lorsque l'arbre meurt (Agroforesterie et développement durable, 2017). La matière organique issue de la fragmentation par des microorganismes, est divisée en petites particules. La structure de la feuille et sa composition chimique va contrôler le temps nécessaire pour sa dégradation. En général, la décomposition des feuilles des herbacées et des arbustes sont relativement rapides (30-50jours) (Stanley et al, 2018). Les feuilles des arbres avec une concentration forte en nutriments ou qui sont structurellement résistantes demandent 4-6 mois (Stanley et al, 2018). Tout comme la présence de nutriments, les jeunes plantes et les semis dépendent de très près de la matière organique et de sa décomposition (Corenblit, 2007).

Les sédiments vont donc affecter la microtopographie et les propriétés du sol, telles que sa quantité en nutriments et en matière organique, influant par la suite sur la richesse et la dynamique des espèces présentes (Jolley et al, 2010 ; Wang et al, 2014).

La déconnexion des annexes de la Loire a donc des conséquences importantes sur la fermeture du milieu puisque le débit influence les dynamiques d'érosion et les successions végétales ainsi que sur la qualité du milieu, et les propriétés du sol puisqu'il intervient dans l'accumulation des nutriments et de la matière organique. Dans le cadre du projet « Restauration du lit et Trajectoires Ecologiques, Morphologiques et d'USages en Basse Loire » (R-TEMUS) une analyse des dynamiques végétales et de la caractérisation physico-chimique des annexes hydrauliques de la Loire aval a été effectuée (Parahy, 2017 ; Keller, 2017), cependant la partie abiotique et particulièrement la partie sédimentaire n'a été abordée que partiellement. Cette présente étude tâchera donc de renouer le lien intrinsèque des paramètres déjà étudiés telles que la végétation et la physico-chimie de l'eau avec la partie sédimentaire.

Dans cette étude l'objectif premier sera de caractériser du point de vue sédimentaire et notamment au niveau de la teneur en matière organique un ensemble d'échantillons prélevé au sein des annexes hydrauliques. Cette étude permettra de mieux caractériser les annexes fluviales de la Loire aval, améliorant ainsi la compréhension de la dynamique de la matière organique, substrat essentiel pour le bon fonctionnement de l'écosystème.

Trois principales hypothèses de départ ont été émises :

Hypothèse N°1 : Les teneurs en matière organique sont plus élevées en surface qu'en profondeur car le processus de décomposition en profondeur est à un stade plus avancé puisqu'il s'agit d'une matière organique plus ancienne.

Hypothèse N°2 : Le pourcentage de matière organique augmente avec le groupe de végétalisation. En effet, les annexes ont été partagées en trois groupes de végétalisation, déterminées à partir d'une typologie basée sur des critères morphologiques et d'occupation du sol observables à partir d'orthophotographie durant l'année 2002/2004 et 2013. Le groupe de végétalisation 3, groupe au stade de succession le moins avancé, aurait un pourcentage de matière organique plus faible que le groupe 1, stade de succession le plus avancé. Cette hypothèse s'explique par le fait que plus la couverture végétale est importante plus la litière au sol sera dense et donc représentative d'un taux de matière organique plus conséquent.

Hypothèse N°3 : Le taux de matière organique est plus important dans les annexes déconnectées. Moins sujettes aux périodes d'inondation, la matière organique stagne et s'accumule.

II. Contrat Loire et ses annexes et Projet R-TEMUS

Le Contrat pour la Loire et ses annexes (2015-2020) a comme ligne directrice le rééquilibrage morphologique du lit mineur de la Loire et le bon fonctionnement écologique des milieux qui lui sont associés. De manière plus spécifique aux annexes hydrauliques le plan d'action prévoit d'améliorer la connectivité et le fonctionnement actuel de celles-ci (CEN & GIPLE, 2015).

Le projet Restauration du lit et Trajectoires Ecologiques, Morphologique et d'Usages en Basse Loire va dans la continuité du Contrat pour la Loire et ses annexes entre Nantes et Montsoreau. En effet, depuis 2011 est née la stratégie d'intervention sur la Loire avec l'intérêt d'investir sur le transport sédimentaire en « Basse Loire ». Le programme R-TEMUS a lui été érigé en 2015 avec comme objectif « rééquilibrer de manière durable le lit de la Loire et améliorer les fonctionnalités de ses milieux », cette mission ambitieuse passe donc par la restauration des annexes hydrauliques (Projet R-TEMUS Présentation PowerPoint, 2019).

Cependant tout projet de restauration implique nécessairement une étude diagnostique du milieu afin de mieux appréhender la zone. Il est donc important d'étudier les facteurs biotiques et abiotiques susceptibles d'influencer les annexes hydrauliques. Pour cela une étude de l'éco-hydrologie des annexes hydrauliques sur l'axe biotique a déjà été menée. La présente étude tâchera de se focaliser sur l'axe abiotique dans le but de caractériser au niveau sédimentaire les annexes fluviales de la Basse Loire.

III. Matériels et méthodes

Cette étude se situe au niveau du sous bassin de la Loire aval entre la ville de Nantes (Loire-Atlantique) et Montsoreau (Maine et Loire). Cette analyse a été effectuée sur 14 annexes fluviales déterminées à partir d'une typologie basée sur des critères morphologiques et d'occupation du sol observables à partir d'orthophotographie durant l'année 2002/2004 et 2013 (Tab.1). Une division au sein même de ces annexes est possible par le biais du critère des différents stades évolutifs de la végétation (Keller, 2017; Parahy, 2017). En effet, les annexes sélectionnées ont été réparties en trois groupes de cinq répliquats chacune pour les deux premiers et de 4 répliquats pour le dernier.

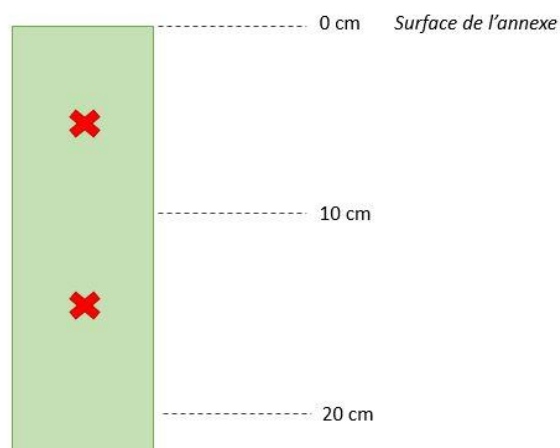
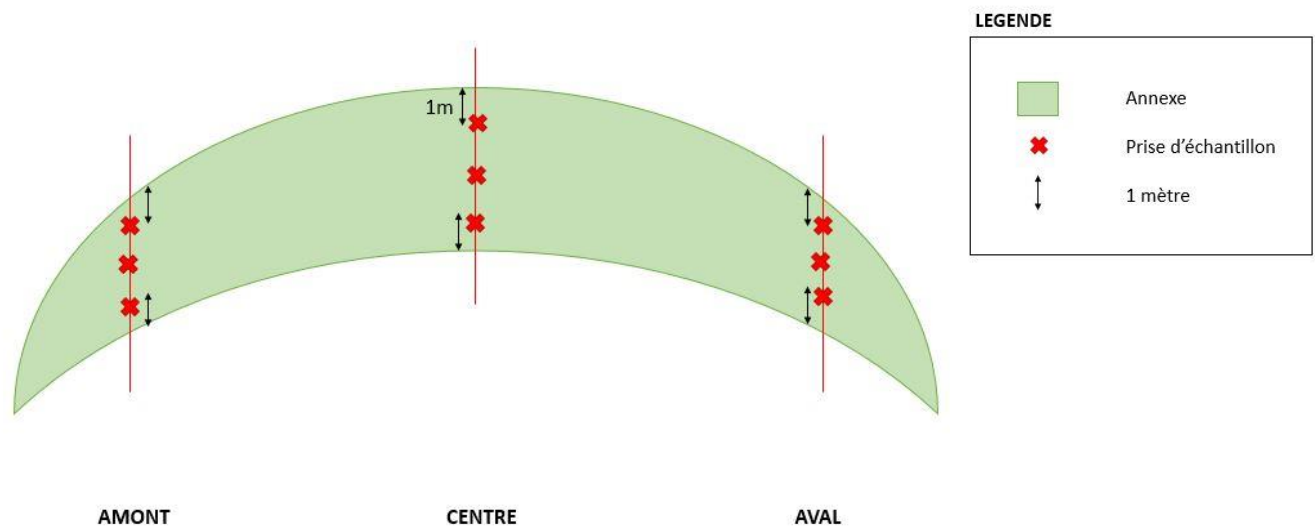
- Le groupe 1 correspond à des annexes avec un fort pourcentage de surface occupée par des ligneux et un taux d'accroissement faible. On peut dire que ce groupe est au stade de succession le plus avancé.
- Le groupe 2, rassemble les annexes avec un faible pourcentage de surface occupée par des ligneux et un taux d'accroissement élevé. Il s'agit ici du stade de succession intermédiaire.
- Enfin, le groupe 3 comprend des annexes avec un faible pourcentage de surface occupée par les ligneux et un faible taux d'accroissement. Ce groupe est à un stade de succession le plus précoce. Les annexes sont très fortement liées à la Loire (Parahy, 2017)

Tableau 1. Liste des 14 annexes étudiées

Groupe de végétalisation	Noms
1	Boire de Gohier
	Boire des Groseillers
	Boire de Besse
	Le Patis
	Boire du Boireau
2	Boire du Cellier
	Boire de la Ciretterie
	Boire Chapon
	Bras de la Pierre de Drain
	Bras du Vieux Port Thibault
3	Le Ragot
	Bras de l'île du Buisson Chauveau
	Bras de la Guesse
	Bras de l'île Clémentine

III.a. Prélèvement des sédiments sur le terrain

Les sédiments ont été prélevés durant l'été 2017. Les relevés ont été réalisés en trois zones de l'annexe (amont, centre et aval). Pour chacune de ces trois zones, trois relevés ont été réalisés : à un mètre de chaque berge et au milieu de l'annexe (Fig.1). Enfin pour chaque relevé, deux profondeurs ont été distinguées (à 0-10cm et 10-20cm de la surface) (Fig.2). Pour une plus grande rapidité d'exécution en laboratoire les trois relevés de surface pour chaque zone ont été rassemblés et il en est de même pour les relevés en profondeur. Au total, ce sont donc six prélèvements qui sont à étudier pour chaque annexe : trois correspondants aux relevés de surface (amont, centre et aval de l'annexe) et trois propres aux relevés de profondeur (amont, centre et aval de l'annexe).



III.b. Protocole de préparation des échantillons après prélèvement sur le terrain

Pour cette étape le matériel utilisé est le suivant :

- Mortier et pilon en céramique
- Tamis *Retsch* 5mm
- Bac de récupération en plastique
- Sachets plastiques hermétiques

Avant l'étape de calcination, les échantillons ont été récupérés, broyés à l'aide du pilon lorsque les morceaux étaient trop compacts (Fig.3a et b), puis tamisés au tamis d'une maille d'ouverture 5mm (Fig.3c). Les éléments passés à travers le tamis ont été récoltés dans le bac en plastique (Fig.3d) et placés dans un sachet hermétique avant d'être réutilisés pour l'étape de calcination.

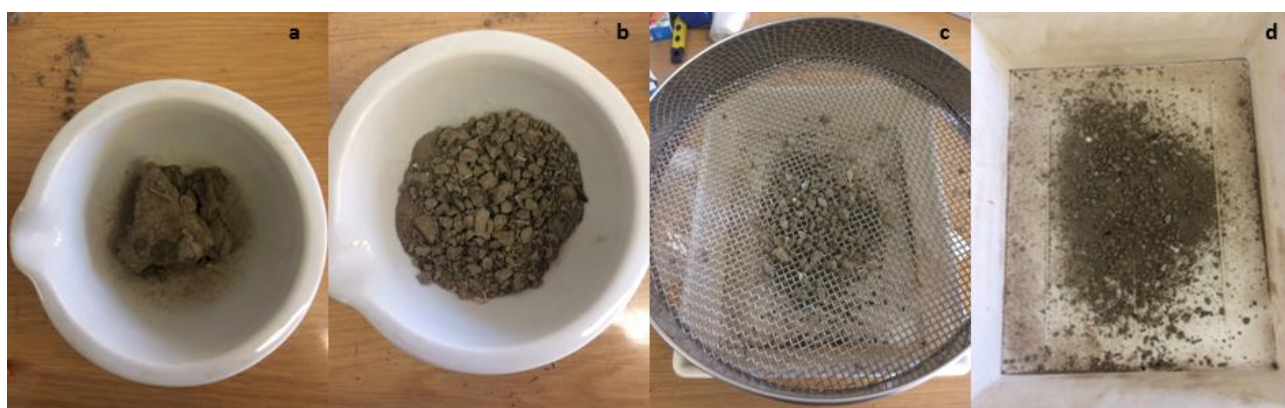


Figure 3. Protocole de préparation des échantillons

III.c. Protocole de détermination du taux de matière organique

Pour cette étape le matériel utilisé est le suivant :

- Creusets de porcelaine à fond plat de contenance 25mL
- Four (*Nabertherm GmbH 30-3000°C*).
Température maximale fixée pour les expériences : 550°C.
- Balance (*TE64-OCE*).
Précision à 10^{-4} , cependant les valeurs seront arrondies à 10^{-3} .
- Dessiccateur contenant un agent déshydratant (silice)
- Plaque métallique
- Pincettes à bras longs

Avant réalisation des expériences les creusets ont été rincés à l'eau claire. Lors du maniement des creusets une pince à bras long a été utilisée. Egalement par mesure de sécurité lors de la mise en place et du retrait des creusets dans le four à moufle, des gants ont été portés pour éviter tout risque de brûlure.

La quantification de la teneur en matière organique des sédiments a été réalisée par perte au feu (PAF) en suivant pour l'essentiel le protocole établi par l'institut scientifique de service Public de Wallonie – (ISSeP). Cette méthode permet d'évaluer la teneur des sédiments en matière organique non volatile.

Cette méthode s'est déroulée en plusieurs phases. Les creusets ont été disposés dans le four en cinq rangées de six (une rangée correspondant à une annexe) à une température de $550^{\circ}\text{C} \pm 25^{\circ}\text{C}$ pendant une durée de 20min (Fig.4a et b). Après une phase intermédiaire de refroidissement sur une plaque métallique (Fig.4c) les creusets ont été transférés au dessiccateur pendant 4h (Fig.4d).



Figure 4. Protocole de Perte au Feu (Etape 1)

Les creusets ont ensuite été pesés à vide (Pv) à l'aide de la balance analytique (Fig.5a). L'étape suivante a consisté à transférer 10 grammes d'échantillon dans le creuset puis de le peser une seconde fois (Pt). Les creusets ont ensuite été disposés dans le four à moufle à une température de $550^{\circ}\text{C} \pm 25^{\circ}\text{C}$ pendant une durée de 1heure et demie. De nouveau, les creusets ont été récupérés et placés sur la place métallique (Fig.5b) puis disposés au dessiccateur durant 4 heures. Une pesée finale a ensuite été effectuée (Pf).

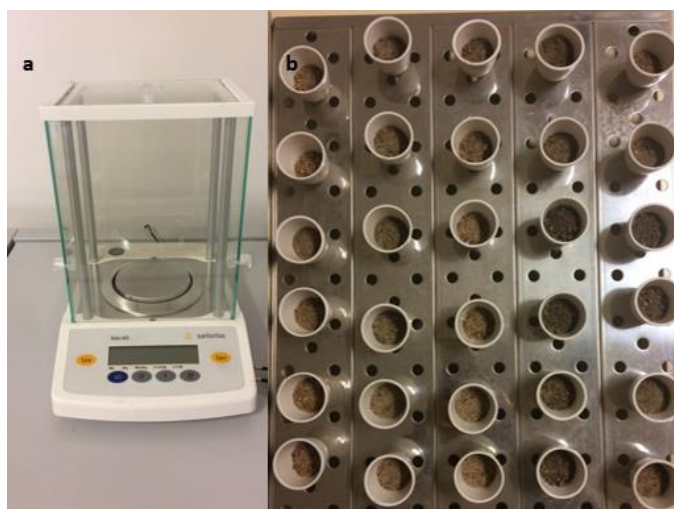


Figure 5. Protocole de Perte au Feu (Etape 2)

La différence de poids entre ces deux mesures correspondra à la quantité de matière organique présente dans l'échantillon. Pour calculer le pourcentage de matière organique (%MO) présent dans l'échantillon, la formule ci-dessous a été utilisée (Formule 1).

$$\frac{Pt (g) - Pf (g)}{Pt (g)} \times 100$$

Pt : Poids total échantillon sec avant calcination

Pf : Poids final échantillon après calcination

Formule 1. Pourcentage de matière organique

Les échantillons ont été calcinés en trois fournées. A chaque reprise l'humidité dans le dessiccateur après calcination atteignait après quatre heures la valeur de 20-25%.

Il est intéressant d'observer la différence de coloration prise par les échantillons après calcination (Fig.6).



Figure 6. Différence de coloration avant/après calcination

III.d. Traitement statistique

Pour analyser plus en profondeur et confirmer ou infirmer les tendances des résultats, plusieurs tests statistiques ont été réalisés. Le traitement statistique a été réalisé avec le logiciel XLStat et les tests statistiques ont été déterminés par la grille de guide de choix de test statistique XLStat.

Tableau 2. Fonctions utilisées sous XLStat pour les analyses statistiques

Question	Variables	Test paramétriques
Comparaison de plusieurs positions observées (échantillons indépendants)	Quantitatives et Qualitatives	ANOVA
Analyse des corrélations entre les N variables	Quantitatives	ACP

Le test ANOVA va permettre de tester si le pourcentage de moyenne de matière organique en surface et en profondeur par groupe de végétalisation est significativement différent. La variable dépendante correspond à la variable expliquée, ici le pourcentage de matière organique dont nous voulons expliquer la variabilité par la variable explicative qualitative à savoir : le groupe de végétalisation. Une fois les données rentrées (Annexe 1), les options « comparaisons par paires », « Test de Tukey », « Méthode REGWQ » et « Test de Dunnett » ont été cochées afin d'explorer de manière plus approfondie les résultats de comparaison. Un des premiers tableaux issus du test ANOVA permet de fournir la valeur du R^2 , coefficient de détermination. Ce dernier, va permettre de donner une idée du pourcentage de variabilité de la variable à modéliser, expliqué par les variables explicatives.

Un second test ANOVA a également été réalisé dans le but de tester si le pourcentage de matière organique en surface et en profondeur est significativement différent. La variable dépendante étant ici le pourcentage de matière organique, expliquée par la variable explicative à savoir : la zone de prélèvement, en surface ou en profondeur.

L'analyse ACP a également été réalisée et il est important de préciser que seulement 13 des 14 annexes ont été prises en compte. En effet, l'annexe : Bras du Vieux Port Thibault dépourvues des données physico-chimiques de l'eau n'entrera pas dans l'analyse. Ce test va permettre d'étudier des données quantitatives présentées sous la forme d'un tableau de 13 observations (13 annexes) et 6 variables (Température, pH, O_2 , pourcentage de surface ligneux en 2013, pourcentage de MO en surface et pourcentage de MO en profondeur) (Annexe 2). Cette analyse va permettre de visualiser l'ensemble des observations décrites par les 6 variables sur un graphique à deux dimensions. Enfin, une seconde ACP sera réalisée pour évaluer les corrélations possibles entre les types de sédiments : fins ou grossiers, le degré de connexion de l'annexe et la teneur en matière organique (Annexe 3).

IV. Résultats

Les résultats seront présentés sous-différentes formes en fonction des paramètres mis en valeur. Le détail de l'ensemble des résultats est présenté dans l'Annexe 4. Les valeurs de pourcentage de matière organique oscillent entre 0.470% et 6.012% en surface et 0.198% et 5.289% en profondeur (Annexe 5).

❖ Groupe de végétalisation

Les box-plots ci-dessous (Fig.7 et Fig.8) permettent d'une façon rapide et efficace de figurer les caractéristiques de position du pourcentage de matière organique étudié (minimum, maximum, moyenne, médiane et quartiles) en fonction des trois groupes de végétalisation.

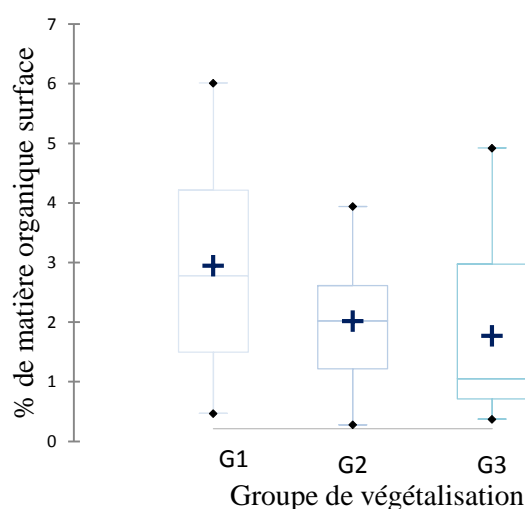


Figure 7. Box plots – Pourcentage de MO en surface en fonction du groupe de végétalisation

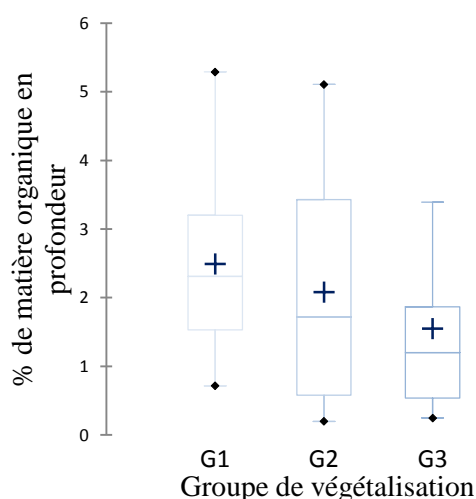


Figure 8. Box plots – Pourcentage de MO en profondeur en fonction du groupe de végétalisation

Ces graphiques mettent en évidence que pour les échantillons en profondeur et en surface, le groupe 1 se distingue en affichant un pourcentage moyen de matière organique supérieur au groupe 2, qui lui se positionne au-dessus du pourcentage de matière organique du groupe de végétalisation 3.

Dans ce cas, le test ANOVA affiche un coefficient de détermination R^2 de 0.14, en d'autres termes, cela signifie que seulement 14% de la variabilité est expliquée par le groupe de végétalisation. Le reste de la variabilité est lui explicable par des paramètres qui ne sont pas mesurés par cette analyse. Etant donné la faible valeur obtenue du R^2 , il est nécessaire d'estimer le pourcentage de risque pris à émettre l'hypothèse que le groupe de végétalisation a une influence sur le pourcentage de matière organique obtenu. Pour cela le test du F de Fisher est utilisé. Dans ce cas, la probabilité associée au F est de 0.151 soit 15.1%. Cela signifie qu'en concluant que le groupe de végétalisation apporte une quantité d'information significative au modèle, un risque est pris de 15.1%, risque non négligeable. La valeur de F est de 2,038 quant à la pvalue celle-ci est de 0,151.

Les hypothèses liées à l'ANOVA sont distribuées selon une loi normale $N(0,1)$ signifiant ainsi que 95% des résidus doivent se trouver dans l'intervalle $[-1.96s ; 1.96s]$. Les deux graphiques (Fig.9 et Fig.10) ci-dessous permettent de se rendre compte que l'ensemble des 28 observations sont comprises dans l'intervalle.

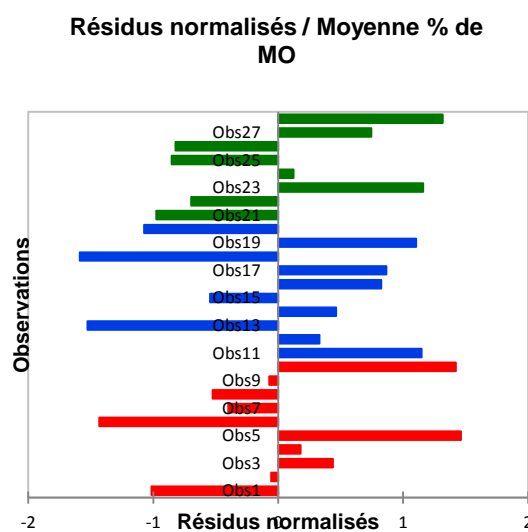


Figure 9. Résidus normalisés. Rouge (G1), Bleu (G2), Vert (G3).

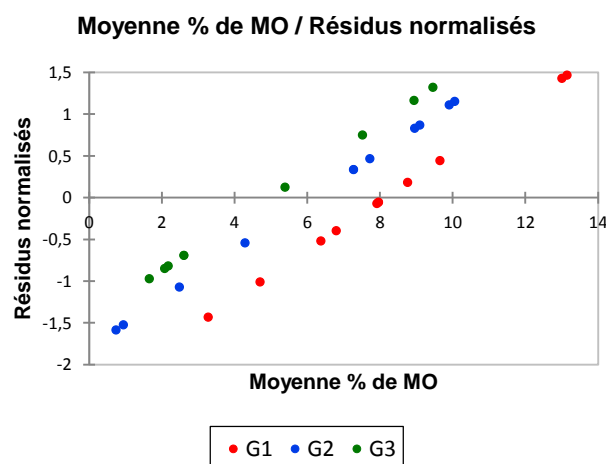


Figure 10. Résidus normalisés en fonction de la moyenne de % de MO. Rouge (G1), Bleu (G2), Vert (G3).

Par ces graphiques on peut donc conclure qu'il n'y a pas de valeur suspecte. Lors du test ANOVA, plusieurs tests ont été choisis afin d'évaluer si il y existe une différence significative entre les groupes de végétalisation.

Trois tests de significativité ont été effectués. Tout d'abord le test de *Tukey Honestly Significantly Different* (HSD) a été appliqué en choisissant un risque de 5%. L'ensemble des couples G1/G2, G2/G3 et G3/G1 ont été testés et aucune paire n'est significativement différente. Il en est de même pour les deux derniers tests, *REQWG* et *Dunnnett* où aucune différence significative n'a été déclarée. Les résultats détaillés de ces tests sont présentés dans l'Annexe 6.

❖ Surface VS Profondeur

En analysant les résultats obtenus pour chaque annexe en surface et en profondeur (Tab.3), il est intéressant de remarquer que pour 10 des 14 annexes étudiées la somme des pourcentages de matière organique de surface est supérieure à celle issue de la couche inférieure.

Tableau 3. Somme des % de MO par annexes en fonction de la profondeur. Coloration bleu gras correspondante à une valeur supérieure par annexe.

	Surface (0-10cm)	Profondeur (10-20cm)
Annexes	Moyenne % MO (amont, centre, aval)	Moyenne % MO (amont, centre, aval)
Boire du Gohier	1.570	1.094
Boire des Groseillers	2.657	2.268
Boire de Besse	3.219	2.127
Le Patis	2.924	2.640
Boire du Boireau	4.384	4.338
Boire du Cellier	3.354	2.989
Boire de la Ciretterie	2.427	3.034
Boire Chapoin	0.315	0.247
Bras de la Pierre de Drain	2.577	3.305
Bras du vieux port de Thibaut	1.430	0.830
Le Ragot	0.694	0.554
Bras de l'île du Buisson Chauveau	0.728	0.871
Bras de la Guesse	2.508	2.981
Bras de l'île Clémentine	3.156	1.800

Un test ANOVA, a également été réalisée dans l'objectif de tester la différence significative entre les résultats en surface et en profondeur. Dans ce cas, le test ANOVA affiche un coefficient de détermination R^2 de 0.093, signifiant ainsi que seul 9.3% de la variabilité est expliquée par la zone de prélèvement. Le reste de la variabilité est lui explicable par des paramètres qui ne sont pas mesurés par cette analyse. Les résultats de ce test démontrent qu'il n'y a pas de différence significative entre les échantillons prélevés en surface et en profondeur. La valeur de F est de 1.389, la pvalue s'élève à 0.290.

❖ Paramètres physico-chimiques de l'eau et surface ligneux

Afin d'évaluer les corrélations qu'il est possible d'établir au niveau quantitatif, entre le pourcentage de matière organique et les autres variables physico-chimiques de l'eau une analyse ACP a été réalisée. Cette dernière a été appliquée à plusieurs variables : la température, le pH, la conductivité, la quantité d'O₂, de NO₂, de PO₄, de NH₄, le pourcentage de surface de ligneux, le pourcentage de matière organique des sédiments en surface et le pourcentage de matière organique des sédiments en profondeur.

A chaque valeur propre correspond un facteur et chaque facteur est une combinaison linéaire des variables de départ. Les valeurs propres et les facteurs sont triés par ordre décroissant de variabilité représentée (Fig.11). De manière générale, le facteur est égal à une dimension de l'ACP qui est égale à un axe de l'ACP. Les axes pris en compte pour l'ACP ont été déterminés par un critère « relatif », c'est-à-dire que seuls les facteurs dont les valeurs propres dominant sur le « scree plot » ont été choisies à savoir F1 et F2.

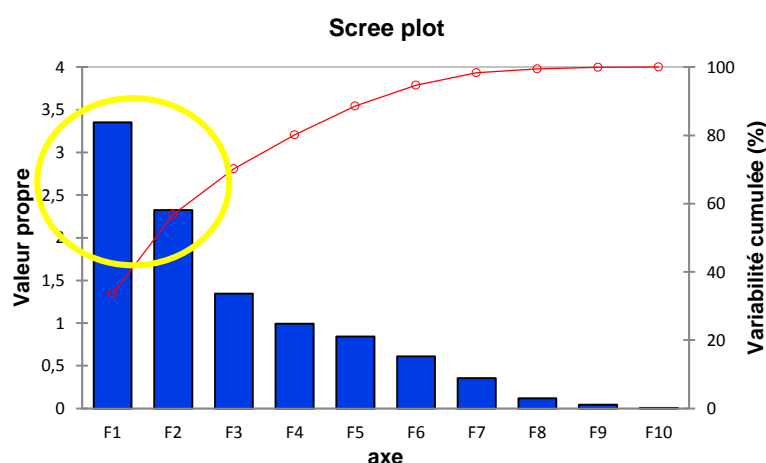


Figure 11. Valeurs propres des axes de l'ACP et courbe cumulative des pourcentages de variabilités expliquées.

En choisissant de se focaliser sur F1 et F2, l'ACP prend en charge 56.79% de la variabilité/hétérogénéité du jeu de données (Fig.12).

L'axe F1, axe horizontal explique 33.53% de la variabilité du jeu de données. Cet axe décrit la physico-chimie de l'eau. Les faibles valeurs sur cet axe correspondent à des eaux oxygénées à pH élevé avec un faible pourcentage de surface ligneuse. En revanche, les valeurs plus élevées sur cet axe sont liées à des eaux eutrophes (riches en phosphates et ammonium) et fortement végétalisées. L'axe vertical, F2, explique 23.26% du jeu de données et représente la teneur en MO des sédiments (Fig.13).

La projection des annexes sur l'axe factoriel (Fig.13) permet de mieux se rendre compte de la répartition des annexes vis-à-vis des variables étudiées. Au niveau de l'axe F1, les valeurs négatives correspondent aux annexes du groupe 1. En revanche, les valeurs positives sur cet axe sont plus représentatives des annexes du groupe 3. Concernant l'axe F2, pour chaque groupe d'annexes, celles-ci sont réparties de part et d'autre de l'axe, on ne peut donc pas dégager une interprétation claire de cette répartition.

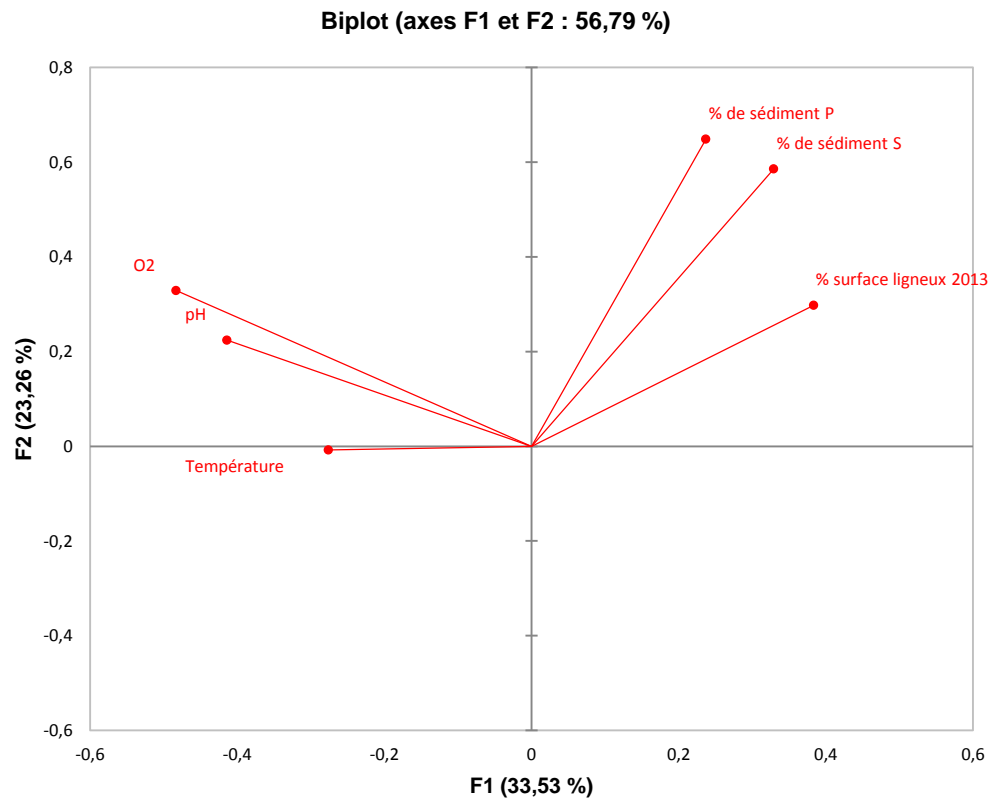


Figure 12. Projection des variables actives sur l'axe factoriel

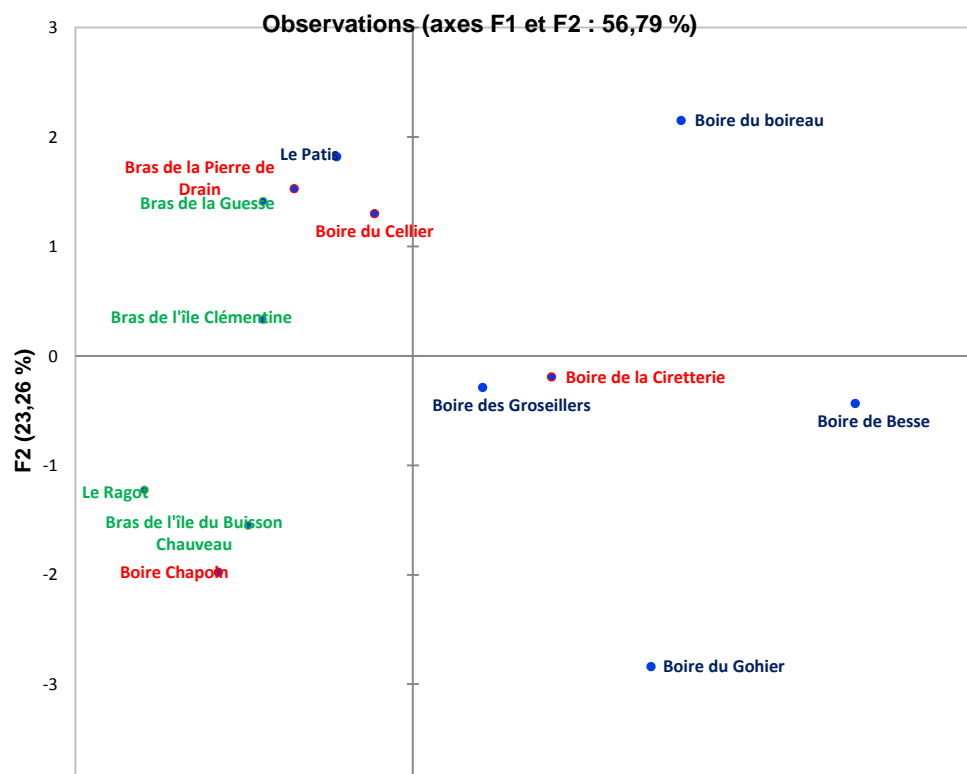


Figure 13. Projection des annexes sur l'axe factoriel. G1 (bleu), G2 (rouge), G3 (vert)

En se fiant au cercle de corrélation (Fig.14), le pourcentage de MO en profondeur, le pourcentage de MO en surface ainsi que le pourcentage de surface ligneuse sont corrélés positivement. En revanche le pourcentage de MO en surface et en profondeur sont indépendants du pH, de la quantité d'O₂, de PO₄ et de NH₄, car les axes sont orthogonaux entres eux. Pour les paramètres : température et conductivité, étant situés proche du centre du cercle aucune hypothèse ne peut être émise car celle-ci serait trop hasardeuse.

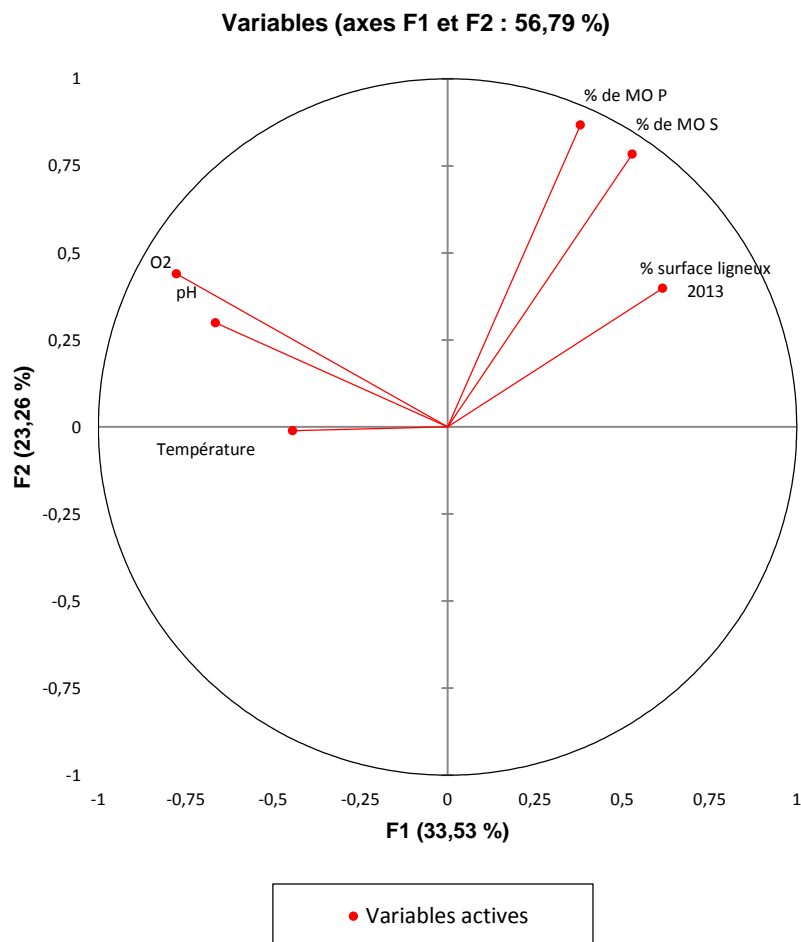


Figure 14. Cercle de corrélation ACP- Physico-chimie de l'eau et teneur en matière organique.

Pour appuyer la corrélation entre le pourcentage de matière organique en surface/profondeur et le pourcentage de surface ligneuse en 2013, il est intéressant de réaliser le test de corrélation de Pearson, test d'association entre deux variables quantitatives, permettant d'obtenir la matrice de corrélation de Pearson ci-dessous (Fig.15). Le pourcentage de surface ligneuse est donc à 60.9% corrélé avec le pourcentage de MO en surface et à 49.7% avec le pourcentage de MO en profondeur.

Variables	% de surface ligneux 2013	% de MO en S	% de MO en P
% surface ligneux	1	0.609	0.497
% de MO en S	0.609	1	0.874
% de MO en P	0.497	0.874	1

Figure 15. Matrice de corrélation de Pearson

❖ Degré de connexion et type de sédiments

Une seconde ACP a permis d'étudier les possibles corrélations entre les types de granularités sédimentaires présentes en majorité dans les échantillons : sable, limon, vase, gravier ainsi que le degré de connexion des annexes étudiées : connexion ou déconnexion avec le pourcentage de matière organique (Fig.16).

Les axes F1 et F2 ont été pris en compte pour cette projection, prenant alors en charge 60,78% de la variabilité/hétérogénéité du jeu de données.

L'axe F1, axe horizontal, explique 43.48% de la variabilité du jeu de données et représente le degré de connexion de l'annexe et la taille des sédiments présents. Des faibles valeurs sur l'axe F1 sont interprétées par des annexes à forte connexion au chenal principal, et des sédiments grossiers. En revanche, des valeurs élevées sur cet axe correspondent à des annexes à fort degré de déconnexion et des sédiments à plus faible granularité. L'axe vertical, F2, explique 17.30% du jeu de données et représente la teneur en MO des sédiments.

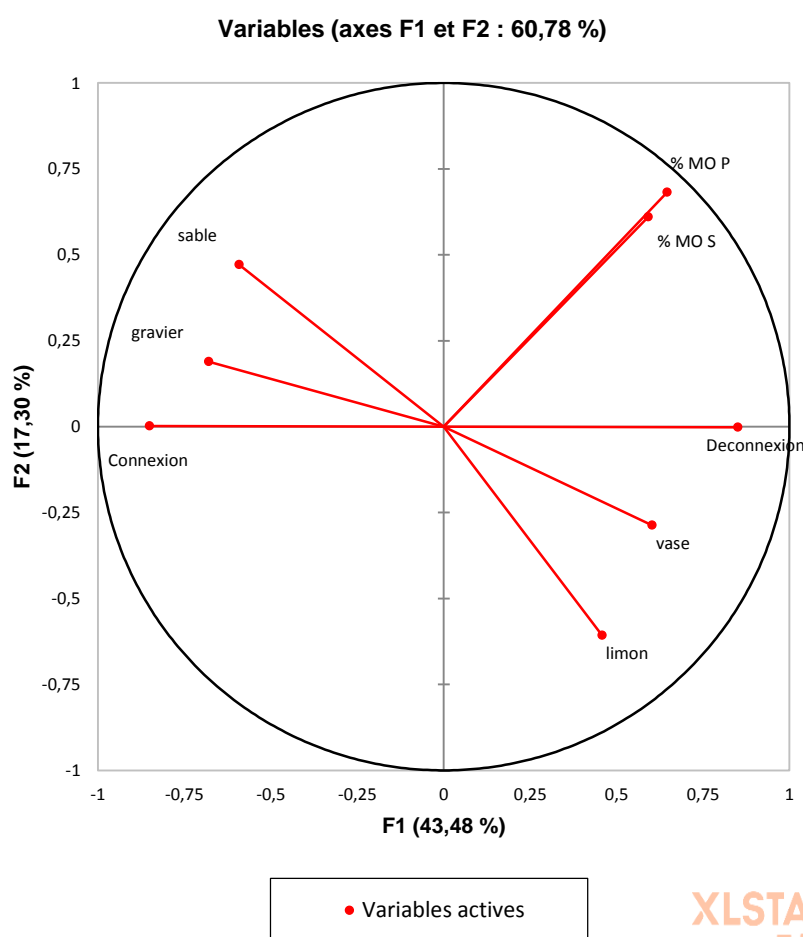


Figure 16. Cercle de corrélation ACP - Type de sédiments, Degrés de connexion et teneur en matière organique.

Ce test ACP permet d'identifier que la variable « déconnexion » et dans une moindre mesure le sédiment fin correspondant à « vase » sont corrélés significativement positivement à la teneur en matière organique en profondeur et en surface. En revanche, les variables « limon », « sable » et « gravier » sont orthogonales au pourcentage de matière organique, signifiant ainsi qu'il n'y a pas de corrélation entre elles.

V. Discussion

Diverses études dont la partie expérimentale consistait à calculer le pourcentage de matière organique présente dans le sol, ont déjà pu être menées. En effet, dans les études de Maurice (1994) et Savi (2017), la fraction solide constituant le sol est composée de 1-10% de matière organique. D'autres études évoquent un pourcentage légèrement inférieur variant de 1 à 5% (Arbre et Paysage, 2015 ; Medsen, 2017). Enfin, une étude a évalué des taux de matière organique variant de 0.5% en profondeur à 5% en surface (Ratsimazafy, 1967). Dans notre cas le pourcentage variait d'un minimum de 0.198% jusqu'à atteindre un maximum de 6.012% en surface, ces valeurs sont donc bien dans le même ordre de grandeur des études précédemment menées.

Egalement, il est intéressant de remarquer notamment dans le groupe 2 et 3, que le pourcentage de teneur en matière peut atteindre des valeurs inférieures à 1% jusqu'à un maximum de 3.654%. Aussi, au sein d'une même annexe les valeurs en surface et en profondeur peuvent largement varier. C'est le cas du bras de l'île Clémentine qui affiche une teneur de matière organique en surface de 3.156% et de 1.8% en profondeur. Cette variation pourrait s'expliquer par la présence du bouchon vaseux présent sur la Loire. En effet, ce dernier affiche une tendance de migration vers l'amont, présent en 2016 jusqu'au niveau de Nantes (Projet R-TEMUS Présentation PowerPoint, 2019), ce dernier pourrait tout à fait être remonté au niveau de cette annexe, expliquant ainsi des valeurs de matière organique supérieures en surface.

Cela nous permet d'aborder l'hypothèse première à savoir : Le pourcentage de matière organique en surface est supérieur au pourcentage de matière organique en profondeur. Bien qu'aucune différence significative n'était avérée, les résultats ont montré que pour plus de trois-quarts des annexes le taux de matière organique était supérieur en surface. Plusieurs études démontrent également cette tendance. L'étude réalisée par Hedin (1972) a permis de constater qu'à deux niveaux de prélèvements une diminution du taux de matière organique avec la profondeur a été observée. Ce résultat est expliqué notamment par les interactions complexes qui ont lieu entre le sol et le système racinaire. Egalement, Qualls (1991) a signalé que dans un écosystème forestier, les augmentations nettes les plus importantes du flux de matière organique a lieu dans la partie supérieure du sol forestier. D'autres études ont montré que la concentration et le flux de matière organique dissoute dans le sol diminue significativement avec la profondeur du sol (Ratsimbazafy, 1967 ; Kalbitz, 2000, Peinemann et al, 2005) et notamment au sein même d'une plaine alluviale (Ratsimazafy, 1967).

La seconde hypothèse consistait à expliquer le pourcentage de matière organique en lien avec le groupe de végétalisation. Or comme il a été possible de voir notamment par l'analyse ANOVA, les groupes de végétalisation n'expliquent pas le pourcentage de matière organique des échantillons étudiés. Les groupes de végétalisation ne se distinguent donc pas significativement par la quantité de matière organique présente. Le test ANOVA écarte donc l'hypothèse que les groupes de végétalisation ont une influence sur le pourcentage de matière organique, et réfute la seconde hypothèse établie.

La teneur en matière organique dans le sol suit une dynamique très complexe (Peinemann et al, 2005) résultant d'un équilibre entre plusieurs composantes. La teneur en matière organique est affectée par de nombreux facteurs: la texture, le climat, le pH, le type pédologique et autres (Kononova, 1966 ; Martel & Laverdiere, 1976, Bot & Benites, 2005).

Une des ACP réalisée dans cette étude a permis de tester l'influence des paramètres physico-chimiques des annexes hydrauliques et la présence de ligneux, en déterminant les corrélations positives/négatives de ces variables avec le pourcentage de matière organique. Une seule corrélation

positive a été distinctive : le pourcentage de surface ligneux et le pourcentage de matière organique. Il est possible d'expliquer cette corrélation par la présence de la lignine, molécule caractéristique du bois que l'on retrouve dans les arbres et arbustes (Arbre et Paysage, 2015). En effet, cette matière organique est très difficile à digérer par les organismes vivants, sa décomposition prend donc du temps et pourrait expliquer les pourcentages élevés des annexes où le taux de surface en ligneux est important. Stanley (1991) évoque également cette dimension temporelle, en rapportant que la décomposition des feuilles issues de la strate arborée prend plus de temps dû à la haute teneur en nutriment que pour la strate herbacée.

Parmi les autres variables prises en compte dans l'ACP, on retrouve la température. Bien que celle-ci ne soit pas significativement positivement corrélée au pourcentage de matière organique, plusieurs études ont démontré que la température était un facteur clé régissant le taux de décomposition de la matière organique (Bot & Benites, 2005). Une étude de Ladd & Amato (1985) démontre que l'augmentation d'une température de 8°C serait à l'origine d'un processus de décomposition doublement plus important. En revanche, les sols au climat plus tempéré sont généralement liés à une couverture de matière organique plus importante à cause du taux lent de minéralisation. Dans cette étude, le fait que la température de l'eau varie peu (maximum de 5°C) entre les annexes pourrait expliquer que ce paramètre n'est pas explicatif.

Egalement, bien que non significatif pour cette étude, le pH peut être cité comme paramètre influençant le pourcentage de matière organique (Balesdent, 1996 ; Bot & Benites, 2005). Le pH influence directement et indirectement le taux de matière organique. Directement, car dans des sols à pH extrême, l'on observera une croissance pauvre des micro-organismes (Bot & Benites, 2005). Indirectement, car le caractère acide ou basique du sol va avoir une influence sur la disponibilité des nutriments présents dans le sol vis-à-vis de la croissance de la végétation (Bot & Benites, 2005). Dans cette étude, le pH varie de 7.523 à 8.398, l'eau affiche donc un caractère neutre expliquant ainsi que ce paramètre n'a peu voire pas d'influence sur le pourcentage de matière organique.

Enfin, l'étude menée par Lucas Parahy (2017) corrélant différentes variables physiques des annexes étudiées témoigne d'une corrélation entre le degré de connexion des annexes et le type de sédiment présent. L'analyse ACP (Annexe 7) montre qu'une annexe avec un degré de déconnexion fort est souvent significative de la présence de sédiments fins : limon et vase. En revanche ; les annexes avec une forte connexion sont à lier avec la présence de sédiments grossiers : graviers fins, moyens, grossiers et sable.

La seconde ACP réalisée a permis de vérifier cette tendance et donc d'affirmer la troisième hypothèse : Le pourcentage de matière organique est significativement positivement corrélé à la déconnexion de l'annexe. Tockner (1999) établit dans une de ses études que la force motrice expliquant les échanges bilatéraux (cours d'eau/plaine inondable et/ou plaine inondable/cours d'eau) est la connectivité hydrologique. Cette composante influence significativement la quantité de matière organique présente (Aspetsberger et al. 2002). La déconnexion des annexes participe au fait que ces dernières sont moins soumises aux périodes de submersions. Etant moins soumise aux phénomènes d'exportation par les crues, la matière organique s'accumule alors. La déconnexion des annexes a donc des conséquences importantes sur la fermeture du milieu puisque le débit va influencer les dynamiques d'érosion, les successions végétales (Parahy, 2017) mais également la qualité du milieu car il intervient dans l'accumulation de la matière organique (Wood et al, 2007).

Le pourcentage de surface ligneuse mais également la déconnexion des annexes ainsi que la présence de vase sont autant de paramètres significatifs qui caractérisent la présence de matière organique.

Deux limites sont à évoquer dans cette étude. En effet, parmi les tests effectués, l'analyse ACP a été réalisée. Cette dernière est une méthode de projection et peut alors entraîner une perte d'informations lors de la projection sur les axes et par conséquent établir des interprétations erronées.

Cependant, sur le logiciel XLStat, l'ACP est le seul test capable d'établir des corrélations entre variables, ce test a donc été réalisé dans cette étude.

Egalement, il est à noter que les prélèvements des échantillons ont été effectués au mois de juin/juillet, période de basses eaux où les annexes hydrauliques ont une tendance plus importante à être déconnectées du chenal principal. Les résultats obtenus pour cette variable sont donc à nuancer car ils pourraient être sur-interprétés.

VI. Conclusion

Les annexes hydrauliques, dépendances de la Loire, sont d'un enjeu fondamental pour l'ensemble du fonctionnement écologique de l'hydrosystème. A travers la méthode de perte au feu, cette étude a permis de caractériser treize annexes hydrauliques de la Loire aval situées entre Nantes et Montsoreau.

De manière générale le taux de matière organique parmi l'ensemble des échantillons varie de 0.198% à 6.012%.

Par un travail préliminaire, ces annexes, ont été classées en trois groupes de végétalisation, correspondant principalement au stade de succession végétale. Cependant, l'analyse ANOVA n'a pas permis de trouver une quelconque significativité entre les groupes de végétalisation et le pourcentage de matière organique.

En revanche, d'autres paramètres ont été étudiés : la physico-chimie de l'eau, le degré de connectivité, le type de sédiments, le pourcentage de surface ligneuse occupé.

Il en ressort que le pourcentage de surface de ligneux explique la présence de matière organique. En effet, par la présence de la lignine, molécule difficile à digérer, cela rend plus long sa décomposition et participe ainsi à son accumulation. Egalement, il a été vérifié dans cette étude que le degré de connexion de l'annexe occupe une place importante dans l'explication de la teneur en matière organique. Les annexes déconnectées sont plus sujettes à être en lien avec des taux élevés de matière organique, car moins soumises à des périodes d'inondations où la matière organique serait mise en mouvement. Pour finir, dans une moindre mesure, car moins significative que les deux autres variables, la vase joue également un rôle. Ce sédiment fin, se mobilise plus facilement et donc se dépose rapidement lors des périodes de reconnexion des annexes.

Cette étude a ainsi permis de mieux caractériser cet échantillon d'annexes fluviales et notamment de mieux comprendre la dynamique de la présence de matière organique, substrat essentiel pour le bon fonctionnement de l'ensemble de l'écosystème.

Bibliographie

- Abernethy, B., Tutherfurd, LD. (2000). The effect of riparian tree roots on the mass-stability of riverbanks. *Earth Surface Processes and Landforms* , Vol. 25, 921-937.
- Agroforesterie et développement durable (2017). Chapitre 3.2 : Le cycle des nutriments en forêt. Récupéré sur : <http://env3114.teluq.ca/module-3/3-2-le-cycle-des-nutriments-en-foret/>
- Arbres et Paysage (2015). Des arbres et des sols - éléments-clés de la fertilité. AFAC - Agroforesterie.
- Aspetsberger, F., Huer, F., Kargl, S., Scharinger, B., Peduzzi, P., Hein., T. (2002). Particulate organic matter dynamics in a river floodplain system: impact of hydrological connectivity. *Archive Fur Hydrobiologie*, 156, 23-42.
- Asselman, N. & Middelkoop, H. (1995). Floodplain sedimentation : quantities, patterns and processes. *Earth Surface processes and landforms*, 20(6), 481-499.
- Balesdent, J. (1996). Un point sur l'évolution des réserves organiques des sols en France. *INRA - Unité de science du sol*.
- Bornette, G. & Puljalon, S. (2011). A model of plant strategies in fluvial hydrosystems. *Freshwater biology* , 1692-1705.
- Bots & Benitien (2005). Food and agriculture organization of the united nations. The importance of organic matter : key to drought-resistant soil and sustained food and production. *Vol.165(4)*, 277-304.
- CEN & GIPLE (s.d.). *Contrat pour la Loire et ses annexes de Nantes à Montsoreau (2015-2021)*. Récupéré sur SAGE Estuaire de la Loire: http://www.sage-estuaire-loire.org/files/tableau_decisions/2015_05_26/contrat-loire-et-annexes-cen-pddl-gip-loire.pdf
- Corenblit, D., Tabacchi, E., Steiger, J., Gurnelle, A.M. (2007). Reciprocal interactions and adjustments between fluvial landforms and vegetation dynamics in river corridors: a review of complementary approaches. *Earth Science Reviews*, 84,56-86.
- Corenblit, D., Steiger, J., Gurnell, A.M., Tabacchi, E., Roques, L. (2009). Control of sediment dynamics by vegetation as a key function driving biogeomorphic succession within fluvial corridors. *Earth Surface processes and landforms*, 35, 1744-1750.
- Courtet, L., Gateau, P., Stefan, B. (1990). La Loire en sursis, croisade pour le dernier fleuve sauvage. *La manufacture*.
- Curran Crowe, J. & Hession, Cully W. (2013). Vegetative impacts on hydraulics and sediment processes across the fluvial system. *Journal of Hydrology*, Vol. 505, 364-376.
- Dupieux, N. (2004). *Une proposition de protocole commun pour la description et le suivi des annexes hydrauliques du bassin de la Loire*. Programme Loire nature, Mission scientifique
- Fujimura, Y., Fujita, H., Kato, K., Yanagiya, S. (2008). Vegetation dynamics related to sediment accumulation in Kushiro Mire, Northeastern Japan. *Plant ecology*, 199, 115-124.
- Heidin, L. (1972). Influence des racines sur la teneur de la matière organique du sol. *Laboratoire de recherches sur les plantes fourragères INRA*.
- Institut Scientifique de Service Public (2017). Détermination de la perte au feu des déchets, boues et des sédiments.

- Jolley, R.L., Lockaby, B.G., Governo, R.M. (2010). Biogeochemical influences associated with sedimentation in riparian forests of the Southeastern Coastal Plain. *Soil Science*, 326-336.
- Jurik, T.W., Wang, S.C., Van der Valk, A.G. (1994). Effects of sediment load on seedling emergence from wetland seed banks. *Wetlands*, 14, 159-165.
- Kalbitz, K., Solinger, S., Park, J.H., Michalzik, B., Matzner, E. (2000). Controls on the dynamics of dissolved organic matter in soils : a review. *Soil science*, 165(4), 277-304.
- Keller, B. (2017). *Dynamiques végétales dans les annexes hydrauliques de la Loire aval*.
- Kononova, M.M. (1966). *Soil organic matter*. Pergamon press London.
- Ladd, J.N & Amato, M. (1985). Nitrogen cycling in legume cereal rotation. *International Institute for Tropical Agriculture*. 105-127.
- Lee, W.G. & Partridge, T.R. (1983). Rates of spread of *Spartina anglica* and sediment accretion in the New river Estuary, Invercargill, New Zealand . *New Zealand Journal of botany*, 231-236.
- Loire estuaire cellule des Mesures et de Bilans. (2003). Mise en eaux des annexes hydrauliques.
- Martel, C. & Laverdiere, M.R. (1976). Facteurs qui influencent la teneur de la matière organique et les propriétés d'échange cationique des horizons - Sols de grande culture du Quebec. *Agriculture Canada*.
- Maurice, L. (1994). Biodégradabilité de la matière organique dans le bouchon vaseux et la crème de vase de l'estuaire de la Loire. *Oceanologica Acta*, Vol.17 -n°5.
- Medesen, C. (2017). *Importance de la matière organique du sol* . Récupéré sur Supagro: <http://www.supagro.fr/ress-pepites/serviceecosystemiques/co/ImportanceMOS.html>
- Moatar, F. & Dupont, N. (2016). *La Loire fluviale et estuarienne - un milieu en évolution*. Quae.
- Oki, K., Oguma, H., Omasa, K. (2005). Spatial assessment of the alder tree in Kushiro mire, Japan using remotely sensed imagery - effects of the surrounding land use on Kushiro mire. . *Environnement Monitoring Assessment* , 95, 243-253.
- Olde Venterink, H., Vermaat, J.E., Pronk, M., Wiegman, F., Van der Lee Gem, Van der Hoorn, M.W., Högler, L.W.G., Verheven, J.T.A. (2006). Importance of sediment deposition and denitrification for nutrient retention in floodplain wetlands. *Application Vegetal Science*, 9(2), 163-174.
- Parahy, L. (2017). *Sélection de quinze annexes hydrauliques de la Loire aval et caractérisation physico-chimique pour la compréhension de leur trajectoire écologiques*.
- Peinemann, N., Guggenberger, G., Zech, W. (2005). Soil organic matter and its lignin component in surface horizons of salt-affected soils of the Argentinian Pampa. *CATENA*, 60(2), 113-128.
- Pizzuto, J.E (1987). Sediment diffusion during overbank flows. *Sedimentology* , 34,301-317.
- Présentation Power-Point projet R-TEMUS. Récupéré sur Université de Tours http://www.centre.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/1_r_temus_universite_de_tours.pdf
- Qualls, R.G., Haines, B.L., Swank, W.T. (1991). Fluxes of dissolved organic nutrients and humic substances in a deciduous forest. *Ecology*, 72, 254-266.
- Ratsimbazafy, C. (1967). *Etude de trois plaines alluviales a Madagascar*. Office de la recherche scientifique et technique outre-mer.

- Rey, F., Chauvin, C., Richard, D., Mathys, N., Rovéra, G., Morel, A. (2000). Le piégeage des sédiments marneux par des barrières végétales (alpes du sud, France). *Sedimentary Geology*, 89-109.
- Rodrigues, S., Bréheret, J-G., Macaire, J-J., Moatar, F., Nistoran, D., Jugé, P. (2006). Flow and sediment dynamic in the vegetated secondary channels of an anabranching river : The Loire River (France). *Sedimentary Geology*, 186(1), 89-109.
- Rodrigues, S., Bréheret, J-G., Macaire, J-J., Greulich, S., Villar, M. (2007). In-channel woody vegetation controls on sedimentary processes and the sedimentary record within alluvial environments: a modern example of an anabranch of the River Loire, France. *Sedimentology*, 223-242.
- Rygel, M., Gibling, M., Calder, J.H. (2004). Vegetation induced sedimentary structures from fossil forests in the Pennsylvanian Joggings Formation, Nova Scotia . *Sedimentology*, Vol.51, 531-552.
- Savi, Agrilogie. (2018). *La fertilité du sol, base d'une agriculture durable : matières organiques dans le sol* . Récupéré sur https://www.vd.ch/fileadmin/user_upload/themes/economie_emploi/agriculture/fichiers_pdf/Manifestations/JGCH_poster/4_16_EXP_00P_MO_dans_sols_vertical.pdf
- Schaff Steven, D., Pezeshki, SR., Shields, FD. (2003). Effects of soil conditions on survival and growth of black willow cuttings. *Environnement Management* , 31, 748-763.
- Shahid, N., & Wright, J. (2003). Disentangling biodiversity effects on ecosystem functioning : deriving solutions to a seemingly insurmountable problem . *Ecology letters*, 6(6), 567-579.
- Stanley, V. G., Frederick, J. S., McKee, A., Keneeth, W. (2018). An ecosystem perspective of riparian zones : focus on links between land and water. *American institue of Biological Sciences*, 41(8), 540-551.
- Thome, C.R (1990). Effects of vegetation on riverbank erosion and stability. *Vegetation and Erosion : Processes and environement*, 125-144.
- Tockner, K., Pennetzdorfer, D., Reiner, N., Schiemer, F., Ward, JV. (1999). Hydrological connectivity and the exchange of organic matter and nutrients in a dynamic river (Danube, Austria). *Freshwater Biology*, 41, 521-535.
- Walling, DE. & He, Q. (1998). The spatial variability of overbank sedimentation on river floodplains. *Geomorphology*, 24, 209-223.
- Walls, RL., Wardrop, DH., Brooks, RP. (2005). The impact of experimental sedimentation and flooding on the growth and germination and flooding on the growth and germination of floodplain trees. *Plant ecology* , Vol.176, Issue 2, 203-213.
- Wang, SC., Jurik, TW., Van der Valk, AG. (1994). Effects of sediment load on various stages in the life and death of cattail . *Wetlands*, Vol.14, Issue 3, 166-173.
- Wang, GD., Wang, Ming., Yuan, Y-X., Lu X-G., Jiang, M. (2014). Effects of sediment load on the seed bank and vegetation of *Calamagrotis angustifolia* wetland community in the National Naural Wetland Reserve of Lake Xingkai, China. *Ecological Engineering*, 27-33.
- Wood, J., Hannah, D.M., Sadler, J. (2007). Hydroecology and ecohydrology : past, present and future. ISBN 978-0-470-01017-4. Hydrology, Groundwater ecology, Ecohydrology.

ANNEXES

Annexe 1 : Données utilisées pour réaliser le test ANOVA

Groupe de végétalisation	Moyenne % de MO	
G1	4,71	Surface
G1	7,971	
G1	9,657	
G1	8,773	
G1	13,153	
G1	3,283	Profondeur
G1	6,803	
G1	6,381	
G1	7,919	
G1	13,014	
G2	10,061	Surface
G2	7,28	
G2	0,946	
G2	7,732	
G2	4,291	
G2	8,966	Profondeur
G2	9,103	
G2	0,742	
G2	9,916	
G2	2,491	
G3	1,661	Surface
G3	2,613	
G3	8,942	
G3	5,399	
G3	2,081	
G3	2,185	Profondeur
G3	7,523	
G3	9,467	

Annexe 2 : Données utilisées pour réaliser le test ACP n°1

Annexes	Température	pH	Conductivité	O2	NO2	PO4	NH4	% surface ligneux 2013	% de MD S	% de MD P
Boire du Gohier	20,78	7,65	374,00	4,65	345,50	0,80	159	0,25	4,71	3,2834
Boire des Groselliers	25,87	7,65	495,33	5,99	0,00	0,32	2,68	0,12	7,971	6,803
Boire de Besse	19,43	7,70	733,17	4,35	63,00	1,23	3,05	0,27	9,6573	6,3809
Le Patis	20,73	8,40	370,50	8,82	0,00	0,18	0,62	0,39	8,7733	7,9186
Boire du boireau	20,68	7,52	366,67	5,05	22,50	0,36	0,16	0,47	13,1532	13,0136
Boire du Cellier	22,68	8,00	411,67	8,69	51,83	0,34	0,34	0,2	10,0611	8,9656
Boire de la Citerne	18,65	7,56	453,33	4,45	10,83	0,33	0,86	0,03	7,2803	9,1029
Boire Chapoin	22,20	7,87	352,83	6,67	43,33	0,11	0,18	0,04	0,946	0,7416
Bras de la Pierre de Drain	21,00	8,13	394,00	10,61	5,25	0,34	0,48	0,12	7,732	9,916
Le Ragot	22,13	8,13	331,33	8,27	38,33	0,06	0,22	0,03	2,0813	1,661
Bras de l'île du Buisson Chauveau	21,57	7,82	364,83	7,07	46,33	0,10	0,23	0,01	2,185	2,613
Bras de la Guesse	22,43	7,92	1345,00	8,88	5,25	0,02	0,34	0,01	7,523	8,942
Bras de l'île Clémentine	23,73	7,95	359,33	9,70	59,50	0,31	0,38	0,01	9,467	5,399

Annexe 3 : Données utilisées pour réaliser le test ACP n°2

Annexes	% de MO	% MO	sable	limon	vase	MO	gravier	Deconnexion	Connexion
15am	0,470	1,027363	0	1	1	0	0	1	0
15c	3,240	1,540624	1	1	1	0	0	1	0
15av	1,001	0,715408	1	1	1	0	0	1	0
17am	4,106	2,950858	0	1	1	1	0	1	0
17c	1,528	1,544638	0	1	1	1	0	1	0
17av	2,338	2,307761	0	1	1	1	0	1	0
22am	2,312	1,405783	1	1	1	0	0	1	0
22c	6,012	3,451234	0	1	1	0	0	1	0
22av	1,333	1,523866	1	0	1	0	0	0	1
89am	2,993	2,5564	0	1	1	1	0	1	0
89c	1,461	1,829681	1	1	0	0	1	1	0
89av	4,319	3,53252	1	0	0	1	1	1	0
124am	2,779	2,67376	0	1	1	1	0	1	0
124c	5,115	5,051161	1	1	0	0	1	1	0
124av	5,259	5,288666	1	0	0	1	1	1	0
0am	3,761	3,458461	1	0	1	0	0	0	1
0c	2,361	2,108107	1	0	1	0	0	1	0
0av	3,940	3,39905	1	0	1	0	0	1	0
59am	3,526	3,835195	1	1	0	0	0	1	0
59c	1,733	4,592134	1	1	1	1	0	1	0
59av	2,022	0,675616	1	1	1	0	0	1	0
70am	0,289	0,259499	1	0	0	0	1	0	1
70c	0,380	0,283601	1	1	0	0	1	0	1
70av	0,277	0,198442	1	0	0	0	1	0	1
73am	2,621	3,092093	0	1	1	0	0	1	0
73c	2,605	5,10795	1	0	1	1	0	1	0
73av	2,506	1,716036	1	0	0	0	1	0	1
74am	1,814	1,163913	1	1	0	0	0	1	0
74c	1,778	0,845462	1	1	0	0	1	1	0
74av	0,700	0,481897	1	1	0	0	1	1	0
14am	1,198	1,018568	1	0	0	0	1	0	1
14c	0,511	0,396126	1	0	0	0	1	0	1
14av	0,373	0,24596	1	1	0	0	1	0	1
52am	0,535	0,385364	1	0	0	0	1	1	0
52c	0,768	0,586549	1	0	0	0	1	0	1
52av	0,882	1,640987	1	0	0	0	0	0	1
53am	0,907	1,765338	1	0	0	1	0	1	0
53c	1,694	2,160619	1	0	1	1	0	1	0
53av	4,922	5,01589	1	0	0	0	0	1	0
63am	2,964	1,382468	1	0	1	0	1	0	1
63c	3,500	3,393717	1	0	1	0	0	1	0
63av	3,002	0,623008	1	0	1	0	0	0	1

Annexe 4 : Synthèse des résultats

Pt Poids total échantillon sec avant calcination
Pf Poids final après calcination
S Surface
P Profondeur
MO Matière Organique

Groupe	Annexe	SURFACE 0-10cm				PROFONDEUR 10-20cm			
		Pt S	Pf S	PtS-PfS	% MO	Pt P	Pf P	PtP-PfP	% MO
1	Boire du Gohier	32,907	32,753	0,155	0,470	31,0601	30,741	0,3191	1,0274
		31,370	30,354	1,016	3,240	32,2272	31,7307	0,4965	1,5406
		31,932	31,612	0,319	1,001	32,261	32,031	0,231	0,715
	Boire des Groseillers	31,414	30,124	1,290	4,106	30,530	29,629	0,901	2,951
		33,709	33,194	0,515	1,528	30,564	30,092	0,472	1,545
		31,342	30,609	0,733	2,338	31,320	30,598	0,723	2,308
	Boire de Besse	33,208	32,441	0,768	2,312	29,983	29,562	0,421	1,406
		31,253	29,374	1,879	6,012	31,009	29,939	1,070	3,451
		33,053	32,612	0,441	1,333	30,547	30,082	0,465	1,524
	Le Patis	30,055	29,155	0,900	2,993	31,490	30,685	0,805	2,556
		33,586	33,095	0,491	1,461	36,241	35,578	0,663	1,830
		32,549	31,143	1,406	4,319	32,173	31,036	1,137	3,533
	Boire du Boireau	31,227	30,359	0,868	2,779	30,526	29,710	0,816	2,674
		29,367	27,865	1,502	5,115	28,811	27,356	1,455	5,051
		33,119	31,377	1,742	5,259	30,558	28,942	1,616	5,289

2	Boire du Cellier	32,071	30,865	1,206	3,761	30,233	29,188	1,046	3,458
		30,718	29,993	0,725	2,361	34,159	33,439	0,720	2,108
		30,064	28,880	1,184	3,940	32,356	31,256	1,100	3,399
	Boire de la Ciretterie	31,340	30,235	1,105	3,526	32,674	31,421	1,253	3,835
		29,576	29,064	0,512	1,733	31,073	29,646	1,427	4,592
		31,598	30,959	0,639	2,022	31,601	31,387	0,214	0,676
	Boire Chapoin	30,181	30,094	0,087	0,289	30,867	30,787	0,080	0,259
		30,569	30,453	0,116	0,380	29,020	28,937	0,082	0,284
		29,458	29,377	0,082	0,277	30,991	30,930	0,061	0,198
	Bras de la Pierre de Drain	31,803	30,970	0,834	2,621	31,936	30,949	0,988	3,092
		30,926	30,120	0,806	2,605	31,737	30,116	1,621	5,108
		32,049	31,246	0,803	2,506	33,496	32,921	0,575	1,716
	Bras du Vieux Port de Thibaut	32,729	32,136	0,594	1,814	30,973	30,613	0,360	1,164
		29,453	28,929	0,524	1,778	31,758	31,489	0,269	0,845
		30,548	30,335	0,214	0,700	31,687	31,535	0,153	0,482

3	Le Ragot	31,712	31,332	0,380	1,198	31,103	30,786	0,317	1,019
		30,899	30,741	0,158	0,511	31,682	31,556	0,125	0,396
		31,129	31,013	0,116	0,373	30,655	30,580	0,075	0,246
	Bras de l'île du Buisson Chauveau	31,513	31,345	0,169	0,535	35,265	35,130	0,136	0,385
		34,920	34,652	0,268	0,768	30,910	30,728	0,181	0,587
		35,389	35,077	0,312	0,882	29,537	29,052	0,485	1,641
	Bras de la Guesse	31,730	31,442	0,288	0,907	31,847	31,284	0,562	1,765
		32,963	32,404	0,558	1,694	34,652	33,903	0,749	2,161
		30,124	28,641	1,483	4,922	30,900	29,350	1,550	5,016
	Bras de l'île Clementine	32,238	31,282	0,956	2,964	33,158	32,700	0,458	1,382
		29,092	28,074	1,018	3,500	29,042	28,056	0,986	3,394
		28,007	27,166	0,841	3,002	33,820	33,609	0,211	0,623

Annexe 5 : Tableau synthétique des résultats

	Numéro du groupe de végétalisation des annexes	% minimum de MO	% maximum de MO	% moyen de MO
Surface (0-10cm)	1 (Gohier, Groseillers, Besse, Patis, Boireau)	0.470	6.012	2.951
	2 (Cellier, Ciretterie, Chapoin, Pierre de Drain, Vieux port de Thiault)	0.277	3.940	2.021
	3 (Ragot, Buisson Cheveau, Guesse, Clementine)	0.373	4.922	1.771
Profondeur (10-20cm)	1	0.715	5.289	2.493
	2	0.198	5.108	2.081
	3	0.246	5.016	1.551

Annexe 6 : Résultats des tests de Tukey (HSD), REGWQ et Dunnett.

Test de Tukey (HSD)

Groupe de végétalisation / Tukey (HSD) / Analyse des différences entre les modalités avec un intervalle de confiance à 95% (Moyenne % de MO) :

Contraste	Différence	Différence standardisée	Valeur critique	Pr > Diff	Significatif
G1 vs G3	3,183	1,969	2,491	0,141	Non
G1 vs G2	2,014	1,321	2,491	0,397	Non
G2 vs G3	1,169	0,723	2,491	0,752	Non
Valeur critique du d de Tukey :			3,523		

Test REGWQ

Groupe de végétalisation / REGWQ / Analyse des différences entre les modalités avec un intervalle de confiance à 95% (Moyenne % de MO) :

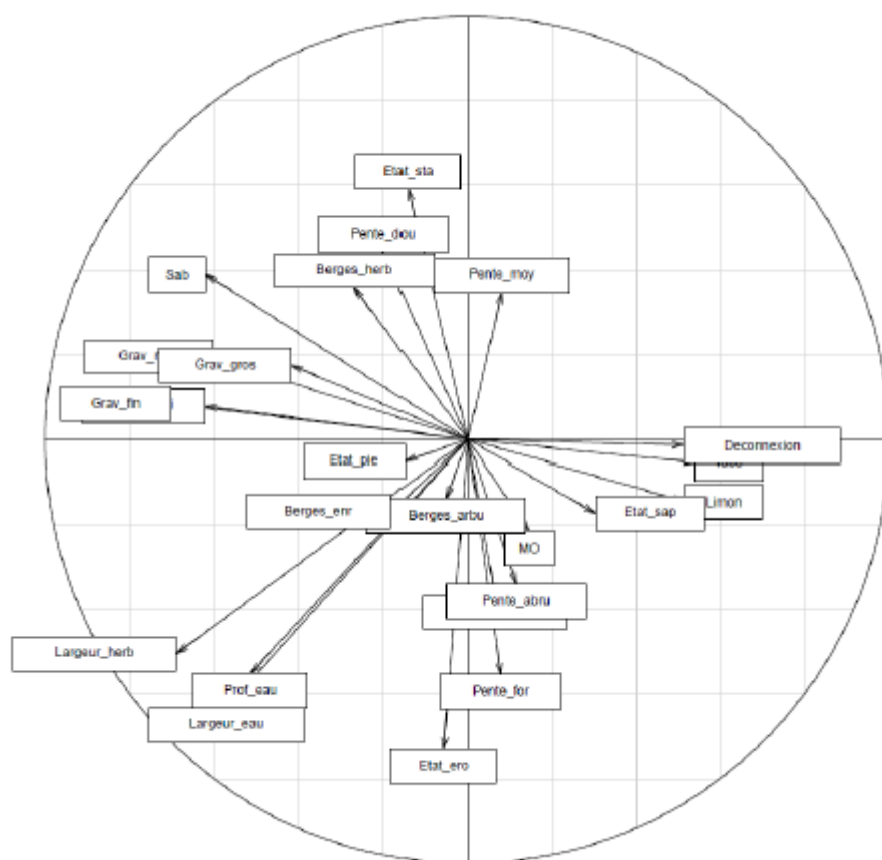
Contraste	Différence	Différence standardisée	Valeur critique	Pr > Diff	alpha (Modifié)	Significatif
G1 vs G3	3,183	1,969	2,491	0,141	0,050	Non
G1 vs G2	2,014	1,321				Non
G2 vs G3	1,169	0,723	2,060	0,476	0,050	Non

Test de Dunnett

Groupe de végétalisation / Dunnett (bilatéral) / Analyse des différences entre la modalité témoin Groupe de végétalisation-G1 et les autres modalités avec un intervalle de confiance à 95% :

Contraste	Différence	Différence standardisée	Valeur critique	Différence criti	Pr > Diff	Significatif
G1 vs G3	3,183	1,969	2,347	3,794	0,103	Non
G1 vs G2	2,014	1,321	2,347	3,577	0,323	Non

Annexe 7 : Cercle de corrélation des variables physiques pour les annexes étudiées
(Parahy, 2017)



Directeur de recherche : GREULICH Sabine

Léa GINON
PFE/DAE5
IMA
2018-2019

Caractérisation sédimentaire des annexes fluviales de la Loire aval.

Résumé :

Les annexes hydrauliques participent à la richesse de la plaine alluviale en termes de diversité d'habitat et de biodiversité et constituent ainsi un enjeu majeur pour la pérennité du cours d'eau. A travers la méthode de perte au feu (PAF) et d'un traitement statistique des données obtenues, cette étude a permis de caractériser treize annexes hydrauliques de la Loire aval, situées entre Nantes et Montsoreau.

Sur l'ensemble des annexes étudiées le pourcentage de matière organique mesuré en surface et en profondeur atteint un maximum de 6% environ.

Plusieurs variables ont pu être mis en avant pour expliquer la teneur en matière organique. Parmi elles, on retrouve le pourcentage de surface ligneuse. En effet, la lignine par sa difficulté à être décomposée par des micro-organismes participe à l'accumulation de matière organique. Egalement, la déconnexion de l'annexe au chenal principal influence la teneur en matière organique, qui stagne et s'accumule. Enfin, la présence de vase, sédiment fin, est à mettre en corrélation positive avec la présence de matière organique. Sa fine granulométrie lui permet une facilité de mouvement et de déposition lors des périodes de reconnexion de l'annexe.

La réalisation de cette étude a permis de caractériser un échantillon d'annexes hydrauliques de la Loire aval et de lier la présence de matière organique avec diverses variables. Cela permet ainsi de mieux connaître le fonctionnement de l'hydrosystème et d'appréhender ainsi les dynamiques intrinsèques de la Loire qui n'ont cessé d'évoluer.

Mots Clés : Annexes hydrauliques, annexes fluviales, matière organique, Loire, perte au feu (PAF), caractérisation sédimentaire.