

Projet de Fin d'Études (PFE) 2021-2022

Les différentes échelles de discontinuité écologique : le cas de la Loire



Figure 1: La Loire, fleuve sauvage avec ses nombreuses îles, comme ici en Anjou • © Collection Watier/Maxppp

Sous la direction de DI PIETRO Francesca.

DUSSEAUX Nell,
GOUBI Anaëlle.

Les différentes échelles de discontinuité écologique : le cas de la Loire

Directeur de recherche :

PIETRO Francesca.

*Maître de conférences et professeur associée à
l'École Polytechnique de l'Université de Tours
en Géographie de l'environnement et Écologie
du paysage*

Auteurs :

DUSSEAUX Nell,

GOUBI Anaëlle.

*Département Génie de l'Aménagement
et de l'environnement - Filière
Ingénierie des Milieux Aquatiques,
5^{ème} année - Promotion 2020-2022*

20 Janvier 2022

AVERTISSEMENTS

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

Je, soussignée Anaëlle Goubi, déclare être pleinement consciente que le plagiat de documents ou d'une partie d'un document publié sur toutes formes de support, y compris l'internet, constitue une violation des droits d'auteur ainsi qu'une fraude caractérisée. En conséquence, je m'engage à citer toutes les sources que j'ai utilisées pour écrire ce rapport ou mémoire. Signé par l'étudiante le 06/01/2022 :



Je, soussignée Dusseaux Nell, déclare être pleinement consciente que le plagiat de documents ou d'une partie d'un document publié sur toutes formes de support, y compris l'internet, constitue une violation des droits d'auteur ainsi qu'une fraude caractérisée. En conséquence, je m'engage à citer toutes les sources que j'ai utilisées pour écrire ce rapport ou mémoire. Signé par l'étudiante le 06/01/2022 :



Formation par la recherche, Projet de Fin d'Études 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'École 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

Nous tenons à remercier toutes les personnes qui nous ont accompagnées pendant ce Projet de Fin d'Études et aidées à aller le plus loin possible dans cette expérience.

Nous remercions tout d'abord Mme Francesca Di Pietro, Maître de conférences et professeur associée à l'École Polytechnique de l'Université de Tours en Géographie de l'Environnement et Écologie du Paysage, pour nous avoir proposé ce projet et supervisées lors de ce dernier. L'intérêt qu'elle a porté à notre sujet nous a été d'une grande aide, notamment par sa disponibilité et les nombreuses réunions que nous avons pu effectuer ensemble. De plus, elle nous a donné un point de vue extérieur qui nous a permis d'aller plus loin dans l'analyse et dans l'interprétation des résultats de notre étude.

Nous remercions ensuite, M. Kamal Serrhini, enseignant-chercheur associé à l'École Polytechnique de l'Université de Tours en Aménagement de l'Espace et Urbanisme, pour nous avoir guidées dans le choix des tests statistiques et leurs applications. Nous le remercions également pour son aide apportée en géomatique, sans laquelle il nous aurait été difficile d'obtenir des résultats exploitables.

Nous tenons également à remercier M. Sébastien Lehmann, chercheur à l'Institut National de la Recherche Agricole et Environnementale Centre-Val de Loire, et intervenant associé à l'École Polytechnique de l'Université de Tours en Géomatique, pour nous avoir fourni des données nécessaires à notre projet.

Enfin, nous remercions Mme Mathilde Grapois, maître de conférences et professeur associée à l'École Polytechnique de l'Université de Tours en Aménagement-Urbanisme ; M. Hadrien Herrault doctorant et intervenant associé à l'École Polytechnique de l'Université de Tours, pour nous avoir enseigné la méthodologie de la recherche.

SOMMAIRE

AVERTISSEMENTS	1
REMERCIEMENTS	3
SOMMAIRE	4
RÉSUMÉ	5
ABSTRACT	5
GLOSSAIRE.....	6
SIGLE	8
TABLE DES FIGURES	9
TABLE DES TABLEAUX.....	10
1. Contexte de l'étude : Notion de discontinuité écologique au sein des rivières et définition des termes du sujet.....	11
2. La Loire, divergence d'opinions entre un fleuve sauvage et un fleuve anthropisé	12
3. Méthode de collecte et de traitement de données d'occupation du sol et d'obstacles à l'écoulement sur l'ensemble du fleuve de la Loire	13
3.1. Collecte de données : Corine Land Cover et Référentiel des Obstacles à l'Écoulement	13
3.2. Détermination des unités, des échelles et des variables de l'étude	14
3.3. Analyses statistiques des variables d'occupation du sol et des obstacles à l'écoulement	19
3.4. Protocole de prétraitement des données sous logiciel de géomatique ArcMap version 10.5.1.....	22
4. Résultats	28
4.1. Vérification de la distribution de l'occupation du sol sur des tronçons avec ou sans obstacle à l'écoulement.....	28
4.2. L'Analyse Canonique des Correspondances : Détermination d'un éventuel lien entre obstacles à l'écoulement et occupation du sol avec une ACC	31
4.3. Confrontation des variables potentiellement corrélées sous l'ACC avec des tests de Bravais-Pearson	36
5. Discussion	41
5.1. Analyse des résultats de l'étude menée sur les différentes échelles de discontinuité écologique sur la Loire.....	41
5.2. Retour réflexif sur la mise en place et le déroulé de l'étude	43
6. Conclusion.....	45
BIBLIOGRAPHIE	46
ANNEXES	48

RÉSUMÉ

Ce rapport présente notre projet de recherche de fin d'étude sur le sujet "des différentes échelles de discontinuité écologique : le cas de la Loire". De manière plus précise, ce travail vise à chercher un lien entre la présence d'obstacles à l'écoulement et l'occupation du sol environnante. Deux bases de données ont été collectées pour les obstacles à l'écoulement et pour l'occupation du sol à l'échelle de la France puis recentrées à l'échelle de la Loire. Une segmentation du territoire en tronçons et l'identification de 17 variables obstacle et 13 variables occupation du sol ont permis de faire diverses analyses. À l'issue de ces dernières, il a été montré que certains types d'obstacles sont corrélés à certains types d'occupation du sol. C'est notamment le cas pour la présence de pont dans des zones urbanisées ou industrialisées avec des réseaux plus denses ; le cas des épis en rivières avec des espaces plutôt ouverts et dépourvus de végétation ou encore le cas des ouvrages avec une forte hauteur de chute tels que les barrages sur des milieux forestiers. Une analyse plus détaillée est fournie dans cette étude.

Mots-clés : Loire, continuité écologique, obstacles à l'écoulement, occupation du sol

ABSTRACT

This report presents our study research project on the subject of "the different scales of ecological discontinuity: the case of the Loire". More specifically, this work aims to find a link between the presence of obstacles to flow and the occupation of the surrounding land. Two databases were collected for flow barriers and land use at the scale of France and then refocused on the scale of the Loire. The segmentation of the territory into sections and the identification of 17 obstacle variables and 13 land use variables made it possible to carry out various analyses. At the end of the latter, it has been shown that certain types of obstacles are correlated with certain types of land use. This is particularly the case for the presence of bridges in urbanised or industrialised areas with denser networks; the case of river spikes with rather open spaces and devoid of vegetation or the case of structures with a high drop height such as dams in forest environments. A more detailed analysis is provided in this study.

Key words : Loire, ecological continuity, flow barriers, land cover

GLOSSAIRE

Affluent : Cours d'eau qui se jette dans un autre. (Editions Le Robert, 2021)

Bassin hydrographique : Territoire drainé par des eaux souterraines ou superficielles qui se déversent dans un collecteur principal (cours d'eau, lac) et délimité par une ligne de partage des eaux. (Actu-Environnement, 2019)

Charriage : Déplacement des terrains sous l'effet d'une poussée latérale. (CNRTL, 2012)

Charge de fond : Le transport solide des sédiments grossiers par charriage au fond du lit d'un cours d'eau. (Charrais, 2013)

Écrêtement de crue : Action visant à diminuer le débit maximum pendant une période de crue. (Glossaire Eau, 2021)

Hygrophile : Qualifie les espèces, végétales ou animales, qui ont des besoins élevés en eau et en humidité tout au long de leur cycle de vie et qui de ce fait se développent dans les milieux humides. (Actu-Environnement, 2019)

Lit mineur : Plus hautes eaux avant débordement. (Légifrance 2020)

Lit majeur : Fond de vallée exondé lors des périodes de crue. (Légifrance 2020)

Model Builder : langage de programmation visuel permettant d'élaborer des modèles de géotraitement. Les modèles de géotraitement permettent d'automatiser et de documenter les traitements d'analyse spatiale et de gestion des données. Un modèle est représenté par un diagramme enchaînant des séquences de traitement et d'outils de géotraitement. (ArcGIS Pro 2.9, 2022)

Rang de Strahler : Rang d'un cours d'eau déterminé d'après la méthode de Strahler, méthode communément retenue car simple à mettre en oeuvre. Dans cette méthode, les cours d'eau issus d'une source sont notés de rang 1, puis chaque fois que deux tronçons de même ordre confluent, ils forment un tronçon d'ordre supérieur, tandis qu'un cours d'eau qui reçoit un affluent d'ordre inférieur conserve le même ordre. (Glossaire Eau, 2021)

Régime pluvio-nival océanique : régime hydrologique présentant une tendance dominante de régime pluvial complétée par un apport nival une période de hautes eaux en automne hiver, liée aux précipitations, puis un débit qui se renforce au printemps lors de la fonte des neiges. (Academic)

Ripisylve : Formations végétales qui se développent sur les bords des cours d'eau ou des plans d'eau situés dans la zone frontière entre l'eau et la terre. (Actu-Environnement, 2019)

Tête de bassin : Surfaces drainées par les premiers cours d'eau d'un bassin hydrographique. (Glossaire Eau, 2021)

Tissu urbain continu : Espaces structurés par des bâtiments. Les bâtiments, la voirie et les surfaces artificiellement recouvertes occupent la quasi-totalité du sol. La végétation non linéaire et le sol nu

sont exceptionnels. Entre 80 % de la surface est imperméable. (Ministère de la transition écologique, 2012)

Tissu urbain discontinu : Espaces structurés par des bâtiments. Les bâtiments, la voirie et les surfaces artificiellement recouvertes coexistent avec des surfaces végétalisées et du sol nu, qui occupent de manière discontinue des surfaces non négligeables. Entre 30 et 80 % de la surface est imperméable. (Ministère de la transition écologique, 2012)

Zone humide : les terrains, exploités ou non, habituellement inondés ou gorgés d'eau douce, salée ou saumâtre de façon permanente ou temporaire ; la végétation, quand elle existe, y est dominée par des plantes hygrophiles pendant au moins une partie de l'année. (Légifrance, 2010)

ACC : Analyse Canonique des Correspondances
AELB : Agence de l'Eau Loire-Bretagne
ARA : Auvergne-Rhône-Alpes
BD : Base de Données
BFC : Bourgogne-Franche-Comté
CLC : Corine Land Cover
CVL : Centre-Val de Loire
DCE : Directive Cadre sur l'Eau
DOM : Département d'Outre-Mer
DREAL : Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement
LEMA : Loi sur l'Eau et les Milieux Aquatiques
ONEMA : Office National de l'Eau et des Milieux Aquatiques
PDL : Pays de la Loire
PFE : Projet de Fin d'Études
ROE : Référentiel des Obstacles à l'Écoulement
RPG : Registre Parcellaire Graphique
SAGE : Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux
SANDRE : Service d'Administration Nationale des Données et Référentiels sur l'Eau
SDAGE : Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux
SIG : Système d'Information Géographique
SYRAH-CE : SYstème Relationnel d'Audit de l'Hydromorphologie des Cours d'Eau
UNESCO : Organisation des Nations Unies pour l'éducation, la science et la culture

TABLE DES FIGURES

Figure 1: La Loire, fleuve sauvage avec ses nombreuses îles, comme ici en Anjou • © Collection Watier/Maxppp	1
Figure 2: Linéaire de cours d'eau conservé et rangs de Strahler de la Loire.....	22
Figure 3: Anomalie de découpage de tronçons sous logiciel ArcMap, à rectifier manuellement	24
Figure 4: Rendu global des zones tampons sur les tronçons de cours d'eau.....	25
Figure 5: Correction des obstacles à l'écoulement uniquement présents sur le fleuve de la Loire ...	26
Figure 6: Occupation du sol et obstacles à l'écoulement sur le secteur de Nantes	27
Figure 7: Pourcentage de recouvrement des 13 variables d'occupation du sol sur l'ensemble des tronçons comportant au moins 1 obstacle à l'écoulement.....	29
Figure 8: Pourcentage de recouvrement des 13 variables d'occupation du sol sur l'ensemble des tronçons sans obstacle à l'écoulement.....	29
Figure 9: Diagramme d'inertie et valeurs propres de chaque variable d'occupation du sol, extrait de l'ACC.....	32
Figure 10: Représentation graphique de l'Analyse Canonique des Correspondances entre les variables d'occupation du sol et les variables d'obstacle à l'écoulement	33
Figure 11: Représentation graphique de l'Analyse Canonique des Correspondances entre les variables d'occupation du sol et les variables d'obstacle à l'écoulement avec la position simplifiée des tronçons par rapport à la Loire.....	35
Figure 12: État écologique des cours d'eau en 2017 sur le bassin hydrographique de la Loire (source AELB, 2017).....	42

TABLE DES TABLEAUX

Tableau 1: Largeur des Buffers en fonction du rang de Strahler de la Loire (Source : Tormos, 2010)	15
Tableau 2: Détails de la Nomenclature CORINE Land Cover et niveaux retenus pour l'étude et leur justification	17
Tableau 3: Variables retenues pour l'occupation du sol	18
Tableau 4: Variables retenues pour l'étude des obstacles à l'écoulement et leur justification	18
Tableau 5: Illustration du tableau utilisé pour des variables descriptives pour une analyse ACC	19
Tableau 6: Illustration du tableau utilisé pour des variables explicatives pour une analyse ACC	19
Tableau 7: Détermination du nombre de tronçons minimum selon les variables étudiées	23
Tableau 8: Différences du taux de recouvrement des variables d'occupation du sol majoritaires sur les tronçons avec ou sans obstacle à l'écoulement	30
Tableau 9: Tableau synthétique de l'inertie des données, extrait de l'ACC	31
Tableau 10: Inertie et valeurs propres de chaque variable d'occupation du sol, extrait de l'ACC	32
Tableau 11: Synthèses des données d'obstacles à l'écoulement visuellement corrélées à certains types d'occupation du sol, après lectures graphiques de l'ACC	34
Tableau 12: Synthèse des p-value pour les tests de corrélations Bravais-Pearson testées entre variables d'occupation du sol et les variables d'obstacles à l'écoulement	37
Tableau 13: Synthèse des coefficients de Pearson pour les corrélations testées entre variables d'occupation du sol et les variables d'obstacles à l'écoulement	38
Tableau 14: Synthèse des données d'obstacles à l'écoulement corrélées à certains types d'occupation du sol, après réalisation du test de Bravais-Pearson	40

1. Contexte de l'étude : Notion de discontinuité écologique au sein des rivières et définition des termes du sujet

“Les différentes échelles de discontinuité écologique : le cas de la Loire”, tel est le sujet proposé par notre tutrice de Projet de Fin d'Études. Tout d'abord, il est important de définir les termes et le contexte de la recherche.

Ainsi, l'étude porte plus exactement sur les obstacles à l'écoulement en rivière qui provoquent un dérèglement de la continuité, à la fois écologique et sédimentaire dans les cours d'eau. Ces obstacles aux écoulements sont connus pour impacter défavorablement de nombreuses espèces aquatiques et pour avoir un impact négatif plus largement sur la biodiversité. C'est pourquoi il est important de les quantifier et d'avoir une estimation globale de leurs impacts sur l'environnement. Selon différents auteurs et ouvrages, un obstacle à l'écoulement est défini comme :

- *“as any built structure that interrupts or modifies the flow of water, the transport of sediments, or the movement of organisms and can cause longitudinal discontinuity”* (Belletti et al., 2020),
- *“ouvrages liés à l'eau qui sont à l'origine d'une modification de l'écoulement des eaux de surface (talwegs, lits mineurs et majeurs de cours d'eau et zones de submersion marine). Seuls les **obstacles** artificiels (provenant de l'activité humaine) sont pris en compte”* dans le cadre de l'étude de la trame verte et bleue (SANDRE, 2014 – Service d'Administration Nationale des Données et Référentiels sur l'eau),
- *“toute structure portant atteinte à la libre circulation des espèces biologiques et par le bon déroulement du transport naturel des sédiments”* (LegiFrance, 2020).

Par conséquent, nous définirons dans ce présent rapport un obstacle à l'écoulement en tant que structure construite par l'homme portant atteinte à l'écoulement des eaux, au transport sédimentaire ou à la libre circulation des organismes biologiques et pouvant entraîner une discontinuité longitudinale.

Par ailleurs, une étude portant sur cette discontinuité écologique a été réalisée à l'échelle européenne par Belletti et al., 2020. Cette étude a permis de proposer un modèle théorique de corrélation entre les obstacles à l'écoulement et diverses variables, dont l'occupation du sol, variable jouant un rôle majeur dans la distribution de ces obstacles.

En somme, l'occupation des sols actuelle influence tout particulièrement le fonctionnement des cours d'eau. En effet, de nombreuses recherches ont été menées sur le sujet et plus précisément en lien avec les obstacles à l'écoulement comme l'attestent Belletti et al., 2020.

Leur recherche a d'abord consisté à recenser les obstacles à l'écoulement, à une échelle européenne, pour déterminer leur réel impact sur les hydrosystèmes. Suite à cette étude, ils ont conçu un modèle théorique afin de révéler un éventuel lien entre la présence de ces obstacles et de multiples variables anthropiques. Il s'est avéré que l'occupation du sol joue un rôle majeur dans la distribution et le type d'obstacle à l'écoulement présent dans les cours d'eau. Notre étude s'inscrit dans cette continuité afin de préciser le degré d'influence de l'occupation du sol sur la distribution de ces obstacles.

Cette étude portée à large échelle est réduite dans notre cas à l'échelle de la Loire. Ce fleuve, perçu sous plusieurs dimensions en France, est souvent sujet à débat entre sa dimension sauvage et sa dimension plus ou moins domestiquée par les humains.

2. La Loire, divergence d'opinions entre un fleuve sauvage et un fleuve anthropisé

La Loire est souvent considérée comme l'un des derniers fleuves sauvages de France selon de multiples sources : Ministère de la Culture, 2020 ; l'UNESCO (Organisation des Nations Unies pour l'Éducation, la Science et la Culture) ; des guides touristiques ...

Inscrite en 2000 au patrimoine mondial de l'UNESCO pour ses paysages culturels vivants, la Loire a été reconnue comme exceptionnelle, par les "*œuvres conjuguées de l'homme et de la nature*" (Article 1 de la Convention du patrimoine mondial, UNESCO, 1972). En effet, la Loire reste le témoin de l'évolution de la société et de son établissement dans la nature en fonction des contraintes environnementales (crues), économiques (commerce, pêche ...) et culturelles (châteaux de la Loire, petit patrimoine ...).

La Loire est considérée comme le dernier fleuve sauvage d'Europe non pas parce qu'elle est peu anthropisée, mais parce qu'elle possède une richesse faunistique et floristique que les autres fleuves n'ont plus. En effet, la Loire est le refuge de nombreuses espèces animales emblématiques comme la Sterne pierregarin *Sterna hirundo*, la loutre *Lutra lutra*, le castor *Castor fiber*, l'anguille *Anguilla anguilla* ... C'est donc dans ce cadre qu'elle a été inscrite dans des mesures de protection environnementale afin de préserver la biodiversité de ce lieu.

Si a priori la Loire porte une image sauvage, a fortiori elle porte tout de même les traces des humains. Rode, 2010, illustre dans son article "*De l'aménagement au ménagement des cours d'eau : le bassin de la Loire, miroir de l'évolution des rapports entre aménagement fluvial et environnement*", que la Loire est perçue comme sauvage en comparaison des autres fleuves de France plus aménagés et artificialisés. Cependant, il montre que les humains ont toujours voulu se rendre "*comme maîtres et possesseurs de la nature (Descartes, 1637)*". En effet, jusqu'aux années 90, la Loire a été endiguée et reprofilée à des fins économiques (agriculture, navigation ...) et sécuritaires (protection contre les inondations ...). Il en est de même pour les têtes de bassin où de nombreux barrages ont été construits pour le développement industriel, production d'hydroélectricité ou l'écrêtement de crue. Par conséquent, Rode démontre que la vision des écologistes "*La Loire, dernier fleuve sauvage d'Europe (Courtet et alii, 1990)*" est finalement une vision très simpliste. En outre, il stipule dans son ouvrage que depuis le Moyen-âge, les humains ont transformé les cours d'eau afin de pouvoir les exploiter, s'en protéger et de les traverser.

De nos jours, une prise de conscience majeure des environnementalistes a quelque peu fait évoluer la vision des cours d'eau, compte tenu du contexte climatique. Une réelle volonté de préservation et de conservation des milieux aquatiques s'est développée, entraînant avec elle une volonté de restauration de la continuité écologique. En France, à la suite de ce mouvement, un programme de recensement des obstacles à l'écoulement a été lancé par l'Office National de l'Eau et des Milieux Aquatiques (ONEMA) en 2009. Celui-ci avait pour objectif d'identifier les ouvrages prioritaires portant atteinte à la continuité. Ainsi, de multiples campagnes d'arasement d'ouvrages ont suivi cette tendance. Néanmoins, comme le montrent Germaine et Barraud., 2013, cette restauration a été bloquée par la patrimonialisation de certains ouvrages souvent classés comme patrimoine historique.

Ainsi de nombreux auteurs ont prouvé que la Loire est plutôt un fleuve anthropisé. Cependant, une dimension toute autre a été montrée par Di Pietro, et al., 2017. En effet, l'occupation du sol annexée aux cours d'eau a joué un rôle important dans le modelage de ces derniers. Aussi, en 2018, Di Pietro indique dans sa publication "*La Loire un fleuve pas si sauvage*" : qu'outre les digues et les ouvrages de navigation, d'autres effets des activités humaines ont été découverts selon une distribution latérale au cours d'eau. Il a été mis en évidence des surfaces occupées par l'eau et les sables, puis par des formations végétales (forêts de bois tendre, pelouses, friches, prairies ...) et enfin par des espaces artificialisés (cultures, forêts de bois dur, villes, axes de communication ...). Par conséquent, même si le fleuve reste aménagé par la présence de digue et d'obstacles, il est tout de même composé d'un assemblage d'habitats semi-naturels et anthropisés, étroitement imbriqués.

Les travaux précédents ont montré que l'occupation du sol laisse une empreinte majoritairement naturelle autour des cours d'eau en plus d'un caractère anthropique. Cette dimension naturelle de la Loire pourrait souligner son caractère sauvage.

Dans cette optique, notre étude se concentre sur le secteur de la Loire afin d'établir plus précisément une analogie concrète entre ces obstacles et l'occupation du sol. Ce projet a pour principal objectif de mettre en évidence l'impact de l'occupation du sol sur les obstacles à l'écoulement, à différentes échelles. Plus précisément, à une échelle longitudinale (de la source à l'estuaire) et à une échelle transversale (largeur proportionnelle au lit mineur) de la Loire.

Dans une logique d'analyse, la question suivante se pose : **Bien que considérée comme l'un des derniers fleuves sauvages de France, la Loire est parsemée d'obstacles à l'écoulement, quels seraient les liens entre ces obstacles à l'écoulement et l'occupation du sol environnante ?**

Après lecture de nombreux articles, revues, et recherches bibliographiques ... nous posons l'hypothèse qu'il existe une relation entre obstacles à l'écoulement et l'occupation du sol adjacente.

3. Méthode de collecte et de traitement de données d'occupation du sol et d'obstacles à l'écoulement sur l'ensemble du fleuve de la Loire

3.1. Collecte de données : Corine Land Cover et Référentiel des Obstacles à l'Écoulement

Notre étude se base sur la Loire, qui est le plus long fleuve de France. Par conséquent, l'analyse sera réalisée sur ses 1006 km linéaires de cours d'eau, ce qui représente une étude à grande échelle. À titre indicatif, la Loire possède un bassin versant de 11 356 km² et traverse 4 régions que sont : Auvergne-Rhône-Alpes, Bourgogne-Franche-Comté, Centre-Val de Loire et Pays de la Loire. Ce fleuve est caractérisé par un régime pluvio-nival océanique prenant sa source dans le Massif Central, au mont Gerbier de Jonc à Sainte-Eulalie (33397) et se déverse dans l'océan Atlantique à Saint-Nazaire (44184).

Avec les nombreux affluents qui l'alimentent, la Loire possède un rang de Strahler maximal de 8.

Pour limiter l'emprise géographique et une précision trop fine du territoire, des bases de données plus simplistes ont été utilisées pour une application à large échelle.

Ainsi pour recenser les obstacles à l'écoulement, le choix du Référentiel d'Obstacles à l'Écoulement (ROE) s'est imposé puisqu'il présente une liste exhaustive à l'échelle de la France et est fréquemment mis à jour. De plus, cette base de données a été utilisée pour le recensement des obstacles qui ont servi à la conception du modèle théorique élaboré par Belletti et al., 2020. Cette base de données a été récupérée sur le site Sandre.Eaufrance, 2021 et la dernière mise à jour en date a été effectuée le 18 février 2021 lors du traitement des données.

Il en est de même pour caractériser l'occupation du sol. Ainsi, le choix de la base de données de Corine Land Cover (CLC) s'est imposé au lieu du Registre Parcellaire Graphique (RPG), jugé trop précis pour notre étude. En effet, CLC permet de cartographier des unités homogènes d'occupation des sols d'une surface minimale de 25 ha puisque son échelle est au 1/100 000 et est donc bien adapté à notre étude à large échelle. Ainsi. Plus précisément les bases de données CLC de 2012 (dernière version disponible à ce jour) des 4 régions concernées ont été téléchargées : Centre Val de Loire (CVL), Pays De la Loire (PDL), Auvergne-Rhône-Alpe (ARA), Bourgogne-Franche-Comté (BFC). Ces bases de données ont été récupérées sur le site du Ministère de la transition écologique, 2012.

Concernant les données hydrographiques, les linéaires de cours d'eau et le bassin versant Loire-Bretagne sont issus du site Sande.Eaufrance, 2021. Plus précisément pour les cours d'eau, la base de données utilisée est la BD Topage, dont la dernière mise à jour a été effectuée le 24 juillet 2020, à ce jour. Celle-ci recense les cours d'eau de la France métropolitaine en 2019, et est considérée comme le nouveau référentiel hydrographique français. La base de données BD Carthage 2010, disponible sur Sande.Eaufrance, 2013, a été utilisée pour connaître directement les rangs de Strahler le long de la Loire.

3.2. Détermination des unités, des échelles et des variables de l'étude

3.2.1. Délimitation de l'emprise d'occupation du sol autour du linéaire de la Loire

Avant de réaliser un traitement statistique des bases de données, il est important de déterminer une méthode de tri et d'analyse. Afin de simplifier l'emprise d'occupation du sol autour de la Loire, il est important de définir une largeur d'étude. Ainsi 3 méthodes de définition de cette largeur pourraient convenir :

- Largeur fixe d'amont à l'aval de part et d'autre de la Loire, pour avoir une homogénéité de surface pour l'analyse comparée
- Largeur égale au lit majeur de la Loire, pour avoir une proportionnalité avec le lit mineur
- Largeur proportionnelle à l'ordination du cours d'eau, pour avoir proportionnalité simplifiée et une homogénéité de surface avec le lit mineur

À la suite de plusieurs études du même ordre que notre sujet de recherche, telles que celle de Tormos, 2010, il s'est avéré que la troisième méthode serait la plus efficace. En effet, l'objet de la thèse de Tormos "*Analyse à l'échelle régionale de l'impact de l'occupation du sol dans les corridors rivulaires sur l'état écologique des cours d'eau*" s'appuie sur une analyse comparative entre la ripisylve des cours d'eau et l'occupation du sol adjacente. Pour cette analyse la méthode utilisée consiste à délimiter des "Buffer" également appelés zones tampons autour du cours d'eau de manière proportionnelle à son ordination afin d'obtenir une certaine simplification et homogénéité de surface avec le lit mineur.

En effet, il a été montré par Souchon et al., 2000 qu'il est possible d'estimer le lit majeur des cours d'eau à partir des rangs Strahler. Il a été prouvé que l'ordination des cours d'eau en rangs ne nécessite pas de mesures sur le terrain et peut être calculée automatiquement sous logiciel SIG (Système d'Information Géographique).

Concernant la méthode d'ordination, c'est celle de Strahler qui a été retenue parmi celles de Shreve, Sheidegger ou Horton. L'ordination de Strahler a été choisie, car elle permet d'étudier la distribution relative des individus d'un réseau, d'être mise en œuvre facilement et est la plus utilisée par les hydrobiologistes. De plus, elle prend en compte la notion de segmentation du réseau et permet de représenter plus simplement la répartition longitudinale des cours d'eau.

En somme, pour la suite de l'étude les largeurs de zones tampons choisies en fonction du rang de Strahler sont visibles dans le Tableau 1 ci-dessous, et suivent la thèse de Tormos, 2010 :

Tableau 1: Largeur des Buffers en fonction du rang de Strahler de la Loire (Source : Tormos, 2010)

Rangs Strahler	1, 2, 3	4	5	6	7	8
Largeur buffer (m)	100	140	250	600	1200	2400

En ce qui concerne le traitement cartographique et analytique des bases de données, le logiciel SIG utilisé est ArcMap 10.5.1.

3.2.2. Détermination des unités statistiques de l'étude : découpage de l'occupation du sol en tronçons homogènes

Dans notre étude, l'unité statistique retenue est le tronçon. On entend par tronçon “une portion réduite de l'ensemble d'occupation du sol préalablement découpé de façon homogène”. Nous avons vu précédemment que la largeur de cette unité statistique dépendait du rang de Strahler (Tableau 1).

Après avoir déterminé la largeur de l'emprise de l'occupation du sol, il reste à définir sa longueur par une méthode d'unité statistique homogène. Diverses méthodes de découpage en tronçons homogènes peuvent être appliquées :

- Tronçon homogène en longueur (Di Pietro et al, 2017) : découpé en distance égale de cours d'eau, permettant ainsi de simplifier le traitement et l'interprétation statistique
- Tronçon homogène selon les variables étudiées (Souchon et al, 2000) : découpé en distance variable selon le type d'occupation du sol majoritairement présent, permettant une analyse plus précise et locale

Dans notre cas, la première méthode de découpage de tronçon sera choisie. Cette méthode de découpage permettrait d'obtenir des données appropriées et utilisables pour des tests statistiques jugés pertinents pour les résultats que nous voulons produire (0. Tableau 4: Variables retenues pour l'étude des obstacles à l'écoulement et leur justification

Variables		Justification
	Nombre d'obstacle	Représente le taux de discontinuité pour calculer la densité d'obstacle par tronçon
	Densité	Représente le nombre d'obstacles de chaque tronçon rapporté au m ²
Type d'ouvrage	Barrage	Attribut de l'ouvrage ayant des impacts différents sur la continuité écologique et pouvant être induit par l'occupation du sol
	Buse	
	Epis en rivière	
	Obstacle induit par un pont	
	Seuil en rivière	
	Type non déterminé	
Hauteur d'ouvrage	Obs < 0.5m	Reprise des classes de hauteurs existantes dans le ROE afin de simplifier le traitement et pour étudier la franchissabilité des ouvrages
	0.5-1m	
	1-1.5m	
	1.5-2m	
	2-3m	
	3-5m	
	5-10m	
	Obs >10m	
	Hauteur non déterminée	

Analyses statistiques des variables d'occupation du sol et des obstacles à l'écoulement).

3.2.3. Détermination des variables d'occupation du sol et d'obstacles à l'écoulement pour l'étude

Avant tout traitement cartographique, il est nécessaire de déterminer les variables des deux bases de données exploitées. Dans notre étude et selon les tests statistiques appliqués, les variables d'obstacles à l'écoulement sont des variables descriptives et les variables d'occupation du sol sont des variables explicatives.

Concernant l'occupation du sol, 14 variables explicatives ont été retenues parmi les 44 présentes initialement dans la nomenclature standard hiérarchisée en 3 niveaux de CLC (voir Annexe 1 pour la nomenclature CLC complète). Ces niveaux sont cependant dépendants de différents degrés de précision. Pour le niveau le plus large, 5 grands types d'occupations du sol ont été identifiés avec :

1. Territoires artificialisés
2. Territoires agricoles
3. Forêts et milieux semi-naturels
4. Zones humides
5. Surfaces en eau

Pour chacun de ces types, un ou plusieurs niveaux inférieurs lui sont attribués, eux-mêmes pouvant être subdivisés en sous-niveau pour encore plus de précision (Exemple : 1.1. Zones urbanisées avec 1.1.1. Tissu urbain continu et avec 1.1.2. Tissu urbain discontinu ...).

Par conséquent pour notre étude, différents niveaux de cette nomenclature sont employés, voire assemblés afin de répondre au mieux à notre sujet de recherche (Tableau 2). Ce choix permet également de sélectionner les types d'occupation du sol les plus impactant sur les cours d'eau et la

continuité écologique. Ainsi les variables retenues pour l'occupation du sol sont présentées de manière synthétique dans le Tableau 3.

Tableau 2: Détails de la Nomenclature CORINE Land Cover et niveaux retenus pour l'étude et leur justification

Libels Niveau 1		Libels Niveau 2		Libels Niveau 3		Libels regroupés et/ou traités	Justification choix des niveaux traités et/ou regroupés
1	Territoires artificialisés	11	Zones urbanisées	111	Tissu urbain continu	1	Enjeux humains majeurs pouvant demander la mise en place d'ouvrages importants en rivière (protections, assainissement, prélèvement)
				112	Tissu urbain discontinu	2	Enjeux humains pouvant demander la mise en place d'ouvrages en rivière
		12	Zones industrielles ou commerciales et réseaux de communication	121	Zones industrielles ou commerciales et installations publiques	3	Enjeux industriels ou commerciaux pouvant demander la mise en place d'ouvrages en rivière
				122	Réseaux routier et ferroviaire et espaces associés	4	Zones de transport pouvant demander la mise en place d'ouvrages en rivière
				123	Zones portuaires		
				124	Aéroports		
		13	Mines, décharges et chantiers	131	Extraction de matériaux	5	Zones artificialisées et potentiellement exploitées pouvant demander des obstacles en rivières temporaires
				132	Décharges		
				133	Chantiers		
		14	Espaces verts artificialisés, non agricoles	141	Espaces verts urbains	6	Espaces verts urbains pouvant demander des obstacles en rivière
142	Equipements sportifs et de loisirs			7	Zones artificialisées de loisirs pouvant demander des obstacles en rivière		
2	Terres agricoles	21	terres arables	211	Terres arables hors périmètres d'irrigation	8	Autres terres agricoles hétérogènes pouvant être exploitées et pouvant demander des obstacles en rivière
				212	Périmètres irrigués en permanence		
				213	Rizières		
		22	Cultures permanentes	221	Vignobles	9	Terres agricoles exploitées en permanence pouvant demander des obstacles en rivière
				222	Vergers et petits fruits		
				223	Oliveraies		
		23	Prairies	231	Prairies et autres surfaces toujours en herbe à usage agricole	10	Prairies et pelouses, espaces agricoles temporairement exploités ou non pouvant demander des obstacles en rivière
				24	Zones agricoles hétérogènes	241	Cultures annuelles associées à des cultures permanentes
		242	Systèmes culturaux et parcellaires complexes				
		243	Surfaces essentiellement agricoles, interrompues par des espaces naturels importants				
244	Territoires agroforestiers						
3	Forêts et milieux semi-naturels	31	Forêts	311	Forêts de feuillus	11	Espaces naturels (précision non nécessaire pour l'étude centrée sur les pressions urbaines, agricoles et naturelles)
				312	Forêts de conifères		
				313	Forêts mélangées		
		32	Milieux à végétation arbustive et/ou herbacée	321	Pelouses et pâturages naturels	10	Prairie et pelouses, espace agricoles temporairement exploités ou non pouvant demander des obstacles en rivières
				322	Landes et broussailles	11	Espaces naturels (précision non nécessaire pour l'étude centrée sur les pressions urbaines, agricoles et naturelles)
				323	Végétation sclérophylle		
				324	Forêts et végétation arbustive en mutation		
		33	Espaces ouverts, sans ou avec peu de végétation	331	Plages, dunes et sable	12	Espaces ouverts peu ou pas végétalisés (précision non nécessaire pour l'étude centrée sur les pressions urbaines, agricoles et naturelles)
				332	Roches nues		
				333	Végétation clairsemée		
334	Zones incendiées						
335	Glaciers et neiges éternelles						
4	Zones humides	41	Zones humides intérieures	411	Marais intérieurs	13	Espaces humides (précision non nécessaire pour l'étude centré sur les pressions urbaines, agricoles et naturelles)
				412	Tourbières		
		42	Zones humides côtières	421	Marais maritimes		
				422	Marais salants		
				423	Zones intertidales		
5	Surfaces en eau	51	Eaux continentales	511	Cours et voies d'eau	14	Surfaces en eau (système global étudié et impacté par les ouvrages et les pressions urbaines, agricoles et naturelles)
				512	Plans d'eau		
		52	Eaux maritimes	521	Lagunes littorales		
				522	Estuaires		
				523	Mers et océans		

Légende :

 Niveau de libels choisis pour le CLC de l'étude

Seules les 13 premières variables seront retenues pour l'analyse statistique. En effet, la variable 14 représentant la surface en eau, créerait des biais dans l'analyse puisqu'elle serait forcément corrélée à la présence d'obstacle à l'écoulement en rivière.

Tableau 3: Variables retenues pour l'occupation du sol

Libels CLC	Variables CLC	Code Variable
111	Tissu urbain continu	1
112	Tissu urbain discontinu	2
121	Zones industrielles ou commerciales et installations publiques	3
122/123/124	Réseaux routiers et ferroviaires et espaces associés, zones portuaires, aéroports	4
13	Mines, décharges et chantiers	5
141	Espaces verts urbains	6
142	Équipements sportifs et de loisirs	7
21/24	Terres arables, zones agricoles hétérogènes	8
22	Cultures permanentes	9
23/321	Prairies, pelouses et pâturages naturels	10
31/32(sauf 321)	Forêts, milieux à végétation arbustive et/ou herbacée	11
33	Espaces ouverts, sans ou avec peu de végétation	12
4	Zones humides	13
5	Surface en eau	14

D'autre part, en vue de réaliser des analyses statistiques, nous octroyons également des variables aux obstacles à l'écoulement. Ces variables ont été choisies selon leur pertinence avec le sujet et en tant que variable descriptive de la répartition spatiale des obstacles. Les variables retenues pour l'étude sont présentées dans le **Erreur ! Source du renvoi introuvable.** ci-dessous.

Tableau 4: Variables retenues pour l'étude des obstacles à l'écoulement et leur justification

Variables		Justification
	Nombre d'obstacle	Représente le taux de discontinuité pour calculer la densité d'obstacle par tronçon
	Densité	Représente le nombre d'obstacles de chaque tronçon rapporté au m ²
Type d'ouvrage	Barrage	Attribut de l'ouvrage ayant des impacts différents sur la continuité écologique et pouvant être induit par l'occupation du sol
	Buse	
	Epis en rivière	
	Obstacle induit par un pont	
	Seuil en rivière	
	Type non déterminé	
Hauteur d'ouvrage	Obs < 0.5m	Reprise des classes de hauteurs existantes dans le ROE afin de simplifier le traitement et pour étudier la franchissabilité des ouvrages
	0.5-1m	
	1-1.5m	
	1.5-2m	
	2-3m	
	3-5m	
	5-10m	
	Obs >10m	
	Hauteur non déterminée	

3.3. Analyses statistiques des variables d'occupation du sol et des obstacles à l'écoulement

3.3.1. L'Analyse Canonique des Correspondances : Détermination d'un éventuel lien entre obstacles à l'écoulement et occupation du sol

Le traitement des données vise principalement à tester statistiquement les différentes variables d'occupation du sol et d'obstacles à l'écoulement afin de chercher un éventuel lien entre ces variables.

Pour ce faire, une analyse canonique des correspondances (ACC) sera utilisée sur XLStat 2020 pour confronter les variables entre elles. Ce type de test statistique permet de confronter un jeu de données de type "descriptif/dépendant" (les données obstacles dans notre cas) à un autre jeu de données dit "explicatif/indépendant" (les données occupation du sol dans notre cas).

L'ACC est un test statistique qui nécessite des données quantitatives réparties en 2 tableaux avec a minima un champ commun servant de référence (les tronçons dans notre cas, voir Tableau 5 et Tableau 6).

Tableau 5: Illustration du tableau utilisé pour des variables descriptives pour une analyse ACC

			Type d'ouvrage						Hauteur d'ouvrage									
variable OBS	Nombre d'obstacle	Densité	Barrage	Buse	Epis en rivière	obstacle induit par un pont	Seuil en rivière	Type non déterminé	obs < 0.5m	0.5-1m	1-1.5m	1.5-2m	2-3m	3-5m	5-10m	obs >10m	Hauteur non déterminée	
tronçon 1																		
tronçon 2																		
tronçon 3																		
...																		
tronçon n																		

Tableau 6: Illustration du tableau utilisé pour des variables explicatives pour une analyse ACC

variable CLC	surface en % de 1	surface en % de 2	surface en % de 3	surface en % de 4	surface en % de 5	surface en % de 6	surface en % de 7	surface en % de 8	surface en % de 9	surface en % de 10	surface en % de 11	surface en % de 12	surface en % de 13	surface en % de 14
tronçon 1														
tronçon 2														
tronçon 3														
...														
tronçon n														

Il est important de noter que les surfaces d'occupation du sol sont rapportées à la surface du tronçon, afin d'obtenir une unité homogène et pouvoir les comparer entre eux.

D'autre part, l'ACC est une analyse statistique qui doit traiter des variables descriptives (ici, les obstacles) en fonction des variables explicatives (ici, l'occupation du sol). L'ACC ne peut donc pas traiter l'absence de données descriptives. Par conséquent, l'ACC doit être effectuée sur des tronçons présentant au moins un obstacle à l'écoulement.

L'ensemble des données sera récolté via la découpe des tronçons et les tables attributaires fournies sous ArcMap. Cela permettra d'obtenir les différentes données pour les variables d'occupation du sol et d'obstacles à l'écoulement pour chaque tronçon.

Ainsi, l'application de l'ACC sur ces bases de données permettrait de mettre en évidence des liens entre certaines variables d'occupation du sol et certaines variables d'obstacles à l'écoulement.

En ce qui concerne plus précisément le traitement de l'ACC sous XLStat, les "sites/objects data" correspondent aux variables descriptives obstacles ; les "sites/variables data" correspondent aux variables explicatives d'occupation du sol en format quantitatif ; et enfin les "sites/labels" correspondent aux intitulés des tronçons soit à leur numéro en partant de la source de la Loire (de 1 à 140). Le coefficient d'incertitude a été fixé à 0.05, et le traitement demandé a été réalisé selon une "corrélation".

Pour l'aspect visuel et afin de ne pas surcharger le graphique de l'ACC, seules les variables d'occupation du sol et d'obstacle à l'écoulement ont été représentées. Les tronçons n'ont pas été intégrés au graphique par souci de lisibilité, mais assemblés selon leur position vis-à-vis de la Loire. C'est-à-dire en position Loire amont (de sa source située à Sainte-Eulalie jusqu'à la confluence de la Loire avec l'Allier), Loire moyenne (de l'Allier jusqu'à la confluence avec la Vienne) et Loire aval (de la Vienne jusqu'à l'exutoire de la Loire dans l'océan Atlantique) selon la Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement Centre (DREAL Centre, 2012).

3.3.2. Test de Mann et Whitney : Vérification de la distribution de l'occupation du sol sur des tronçons avec ou sans obstacle à l'écoulement

L'analyse ACC étant effectuée uniquement sur les tronçons comportant au moins 1 obstacle à l'écoulement, il est nécessaire de faire un test de comparaison entre l'occupation du sol des tronçons qui ne comportent pas d'obstacles à l'écoulement et l'occupation du sol des tronçons qui comportent des obstacles. Ceci a été fait dans le but de savoir si les surfaces d'occupation du sol de ces deux types de tronçons étaient significativement identiques afin de pouvoir réaliser l'ACC avec uniquement les tronçons comportant au moins un obstacle.

Pour ce faire, le choix du test a été établi selon différents paramètres. Nous voulions effectuer une comparaison de données quantitatives (surface d'occupation du sol) entre deux échantillons indépendants (tronçons avec et sans obstacle) et d'une taille inférieure à 30 individus (13 variables d'occupations du sol testées). Le choix du test de Mann et Whitney s'est donc imposé. Ce test a donc été effectué ultérieurement sur Excel.

Le test de Mann et Whitney réalisé utilise la méthode des rangs.

On émet ici, l'hypothèse H_0 du test : "il n'y a pas de différence significative entre l'occupation du sol des tronçons qui ne comportent pas d'obstacles à l'écoulement et celle des tronçons qui comportent des obstacles à l'écoulement". A contrario, on pose l'hypothèse H_1 : "il y a une différence significative entre l'occupation du sol des tronçons qui ne comportent pas d'obstacles à l'écoulement et celle des tronçons qui comportent des obstacles à l'écoulement".

Après avoir calculé le pourcentage des types d'occupation du sol (Annexe 2), ceux-ci ont été rangés et triés par ordre croissant (le rang 1 a été attribué au pourcentage d'occupation du sol le plus petit et le rang 26 au pourcentage d'occupation du sol le plus grand). Une fois cela fait, nous avons réalisé la somme des rangs des tronçons sans obstacle et la somme des rangs des tronçons qui ne comportent pas d'obstacles. Celles-ci étaient respectivement de 165 (S_a) et 186 (S_b) (Annexe 3).

La taille des échantillons pour les tronçons sans obstacle et avec obstacles était de 13 chacun (N_a et N_b). Ensuite, on retranche à chacune des sommes des rangs, le minimum des rangs (équation 1 et équation 2) pour obtenir la statistique U de chaque série :

$$(1) U_a = S_a - N_a(N_a + 1)/2 \text{ pour les tronçons ne comportant pas d'obstacles}$$

$$(2) U_b = S_b - N_b(N_b + 1)/2 \text{ pour les tronçons comportant des obstacles}$$

Ici, U_a des tronçons qui ne comportent pas d'obstacle était de 74 et U_b des tronçons qui comportent des obstacles était de 95 (voir détails des calculs en Annexe 3). Il ne reste plus qu'à retenir le minimum des deux valeurs calculées ($U_{\min}$) pour pouvoir le comparer à la valeur seuil U_{seuil} figurant dans la table des U de Mann et Whitney. Il existe deux tables des U de Mann et Whitney, une correspondante à un test unilatéral et une correspondante à un test bilatéral. Dans notre cas, nous utiliserons celle du test bilatéral (Annexe 4), car nous voulons prouver que la distribution de l'occupation du sol des tronçons avec obstacles est similaire à la distribution de l'occupation du sol des tronçons sans obstacle. Cette table permet d'obtenir U_{seuil} par croisement des valeurs N_a et N_b au coefficient d'incertitude (α) de 5%.

3.3.3. Test de corrélation Bravais-Pearson : Détermination du degré de relation entre les variables d'occupation du sol et les variables d'obstacle à l'écoulement

Afin de confirmer les éventuels liens visualisés lors de l'ACC et identifier ceux qui auraient pu être négligés entre les variables d'occupation du sol et d'obstacle à l'écoulement, des tests de corrélation additionnels seront effectués.

Le test a été choisi en fonction de ce que nous voulions faire apparaître. Nous voulions identifier le degré de liaison de données quantitatives entre plusieurs prédicteurs (occupation du sol et obstacle à l'écoulement) et pour un échantillon d'une taille supérieure à 50 individus (54 tronçons présentant au moins 1 obstacle à l'écoulement). Le choix du test de corrélation de Bravais-Pearson s'est donc imposé. Ce test a été effectué ultérieurement sur XLStat 2020 afin de savoir si les variables testées sont significativement corrélées et de savoir le degré de liaison avec le coefficient de Pearson (r) pour un coefficient d'incertitude α de 0.05.

On pose l'hypothèse H_0 du test : il n'y a pas de corrélation entre la variable d'occupation du sol et la variable obstacle testée. A contrario, on pose l'hypothèse H_1 : il y a une corrélation entre la variable d'occupation du sol et la variable obstacle testée.

En ce qui concerne le traitement sous XLStat 2020, les "Observations/ Variables quantitatives" utilisées correspondent à l'ensemble de la plage de données des variables descriptives (obstacles à l'écoulement) et des variables explicatives (occupation du sol). Le coefficient d'incertitude est fixé à 0.05 et le traitement a été effectué selon la corrélation de Pearson. Pour l'aspect visuel, les tableaux issus de ce test ont été remaniés, car ils présentaient des résultats redondants.

3.4. Protocole de prétraitement des données sous logiciel de géomatique ArcMap version 10.5.1.

Afin de sélectionner les données d'occupation du sol et d'obstacles à l'écoulement qui concernent uniquement les zones tampons étudiées de la Loire, un prétraitement de ces données sous logiciel cartographique est nécessaire.

Pour ce faire, un prétraitement a été effectué sur la BD Topage 2020, afin de simplifier les traitements ultérieurs. Nous avons donc retenu uniquement le chenal principal de la Loire en ôtant les chenaux secondaires et tout autre cours d'eau qui seraient un biais dans la détermination des zones tampons et du traitement des données. Ensuite, l'ordination par rangs de Strahler a été appliquée au linéaire de la Loire disponible dans la BD Carthage 2010. Ainsi, nous obtenons un rang 8 à son exutoire (Figure 2). Cette ordination servira de base de construction des zones tampons.

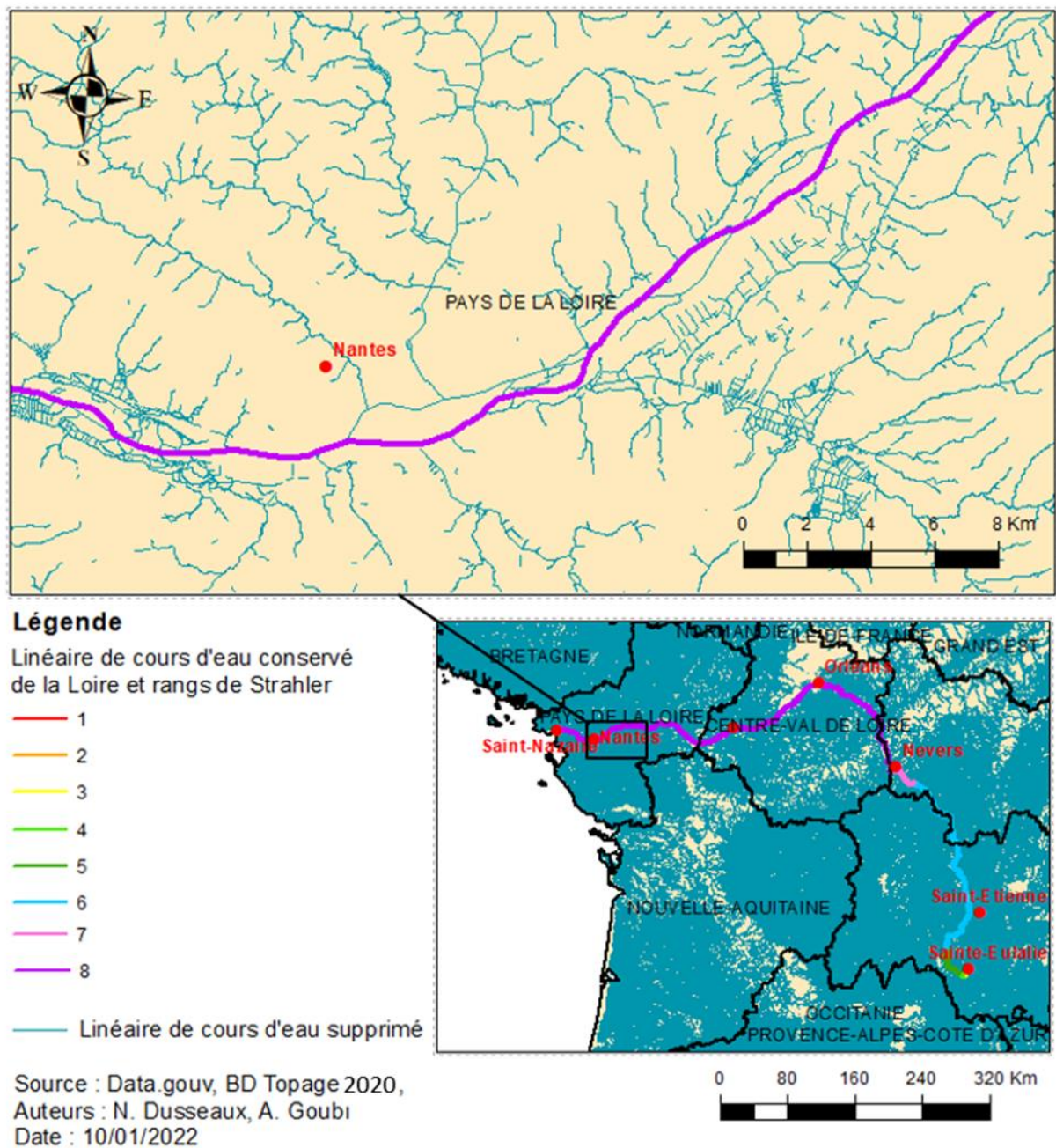


Figure 2: Linéaire de cours d'eau conservé et rangs de Strahler de la Loire

Comme évoqué dans la partie 3.2.2 Détermination des unités statistiques de l'étude : découpage de l'occupation du sol en tronçons homogènes, le traitement des données se fera par tronçons homogènes en longueur. Pour ce faire, il est nécessaire de déterminer le nombre de tronçons à étudier et qui serviront d'unité de découpage de la Loire dans la préparation des données.

D'un point de vue statistique, plus le nombre d'échantillons, donc de tronçons, est important, plus les résultats statistiques sont fiables. Cependant, la quantité de données initiales et leurs traitements impliquent une grande nécessité technique en termes de capacité de traitement et de stockage des données. Par conséquent, il a d'abord été déterminé le nombre de tronçons minimum nécessaire pour que les tests statistiques qui suivront l'analyse soient réalisables.

“En effet, plusieurs éléments entrent en ligne de compte (Jackson, 1993) : le nombre d'observations « n » ; le nombre de variables « p » de l'analyse ; le ratio « n:p » entre le nombre d'observations et

le nombre de variables. Le ratio « n:p » est particulièrement important, il détermine la stabilité des résultats. Certaines références affirment qu'une ACC n'est vraiment viable que s'il est supérieur à 3 (Grossman et al., 1991)” (Rakotomalala, 2012). Pour suivre cette logique, 14 variables explicatives d'occupation du sol composent l'analyse contre 17 variables descriptives d'obstacles à l'écoulement. Ce qui signifie que la variable “p” est soit représentée par 17 ou 14. En appliquant un ratio 3 pour que l'ACC soit viable on peut déterminer le nombre de tronçons “n” minimum pour notre analyse, visible dans le Tableau 7 suivant :

Tableau 7: Détermination du nombre de tronçons minimum selon les variables étudiées

	nombre de variables “p”	ratio n:p appliqué “f”	nombre de tronçons minimal “n = p*f”
Variables occupation du sol	14	3	42
Variables obstacles à l'écoulement	17	3	51

Ainsi le nombre de tronçons minimum pour que l'analyse statistique soit viable est de 51 tronçons au minimum.

Pour déterminer le nombre de tronçons total et donc savoir le linéaire de cours d'eau qui sera homogène à chaque tronçon, une étude similaire a été utilisée. En effet l'étude de Garnier & al., 2014 sur “L'analyse spatiotemporelle de la dynamique fluviale d'un cours d'eau sahélo-soudanien entre 1967 et 2007 - Le cas du Yamé au pays Dogon (Mali, Afrique de l'Ouest)” a développé une méthode de fractionnement du linéaire de cours d'eau pour faire une étude par tronçons homogènes. Dans leur étude de cas du Yamé, la longueur optimale d'étude de tronçons pour un cours d'eau de 120 km était de 500 m. “ Cette taille a été choisie de manière empirique, car elle n'est ni trop grande pour mélanger plusieurs styles fluviaux ni trop petite pour marquer des changements significatifs entre les tronçons” Garnier & al., 2014. Ainsi, 240 tronçons ont été retenus pour leur étude.

Dans notre cas, l'étude de la Loire se fait sur 1006 km de cours d'eau. De ce fait, de manière analogue à l'étude du Yamé, on admet que la répartition des styles fluviaux sur la Loire, ainsi que le repérage des changements significatifs entre tronçons, restent proportionnelles. Ainsi la méthode de découpage des tronçons sur le Yamé sera appliquée à la Loire.

Ainsi, pour 1006 km de cours d'eau la longueur des tronçons optimale serait de 4.19 km en se basant sur le Yamé avec respectivement 0.5 km de tronçon pour 120 km de cours d'eau au total. On obtient donc 240 tronçons d'une longueur de 4.19 km chacun dans l'étude de la Loire. Ce nombre reste supérieur à 51 qui représentait le nombre minimal de tronçons à étudier dans le cadre d'une ACC.

Cependant divers problèmes techniques et de réalisation ont été rencontré lors de ce pré-traitement des données :

- superposition et mauvais découpage des buffers tronçons sous logiciel ArcMap
- rectification manuelle trop importante (voir Figure 3 et Figure 4)

- nombre total de données implémentées sous ArcMap beaucoup trop important pour la capacité de stockage et de réalisation

Afin de limiter ces problèmes techniques, le nombre de tronçons a été réduit de 100 unités. Cette diminution permet d'avoir 140 tronçons, qui représentent un facteur de 10 entre le nombre de tronçons étudiés et les variables d'occupation du sol (14 variables), tout en conservant le nombre de tronçons minimal à respecter pour l'ACC. Ainsi la longueur de chaque tronçon est de 7.19 km.

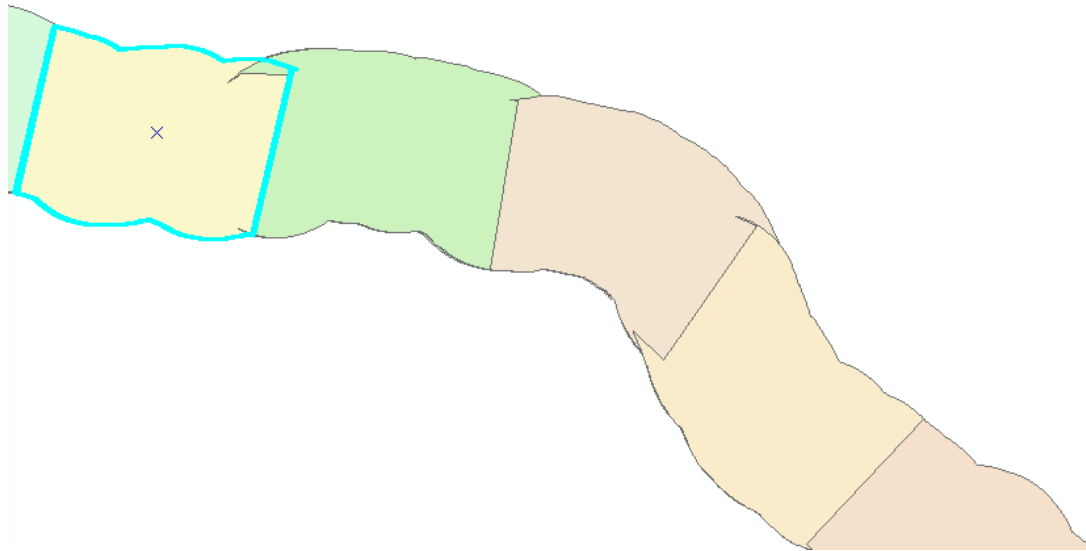


Figure 3: Anomalie de découpage de tronçons sous logiciel ArcMap, à rectifier manuellement

À l'issue de cette manipulation, nous avons pu créer les buffers pour délimiter la largeur d'occupation du sol à analyser, selon le Tableau 1 vu antérieurement.

Pour ce faire, le linéaire de la Loire a d'abord été découpé en 140 parties égales (soit des tronçons de 7.19 km), avec l'outil Fractionner de l'Éditeur d'ArcMap.

Ensuite, à l'aide d'un modèle builder toujours sous ArcMap, une zone tampon a été créée pour chaque tronçon. L'utilisation d'un modèle builder est une méthode de construction automatisée qui permet d'effectuer une même manipulation un grand nombre de fois, ce qui est beaucoup moins chronophage (

Annexe 5). De plus, la largeur des zones tampons a été réalisée de manière à ce qu'elle varie selon le rang de Strahler spécifié à chaque tronçon de cours d'eau. Enfin, les extrémités des zones tampons ont été définies comme planes et non arrondies ni rectangulaire afin de ne pas empiéter sur une zone tampon adjacente (Figure 3). Il n'est pas possible de construire des zones tampons rectangulaires avec des largeurs dépendantes du rang de Strahler et une longueur donnée car le lit du cours d'eau n'est pas linéaire. De ce fait, sur les zones de méandres il y aurait potentiellement une perte de données ou au contraire un duplicat des surfaces d'occupation du sol sur les zones de jonction entre deux tronçons. De même, les surfaces de zones tampons ne seraient pas équitablement réparties de part et d'autre du linéaire de cours d'eau.

Cette étape automatisée a conduit à la création de buffers correspondant à des tronçons de 7.19 km pour des largeurs variables selon le rang de Strahler de la Loire, dont la surface est automatiquement calculée. Cependant, comme visible sur la Figure 3, les buffers implémentés par le logiciel ArcMap

pouvaient présenter des superpositions sur leurs extrémités. Ces erreurs de construction causaient un biais dans notre étude, car l'occupation du sol qui en est extraite pouvait être comptée en double sur des buffers superposés. Pour corriger ces erreurs d'implémentation, chaque tronçon a été méticuleusement corrigé manuellement au niveau des extrémités afin d'éviter toute superposition (Figure 4).

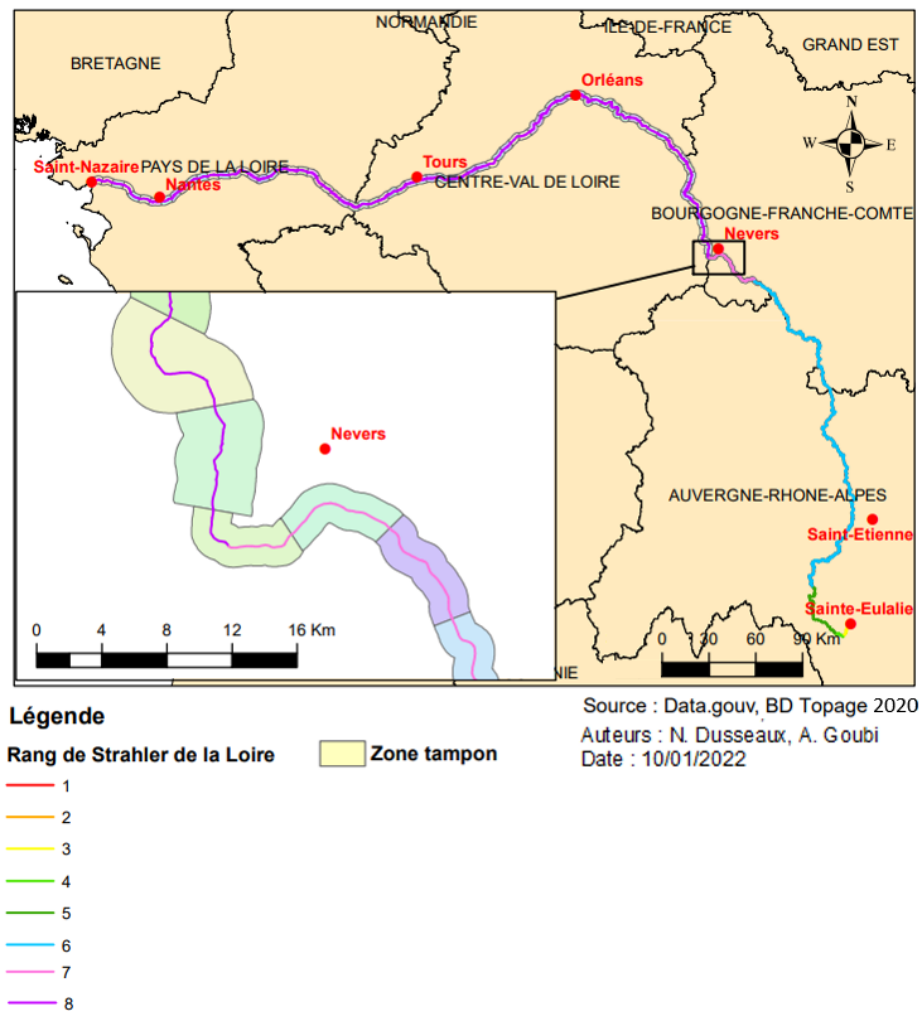


Figure 4: Rendu global des zones tampons sur les tronçons de cours d'eau

Ensuite, les bases de données CLC et ROE ont pu être découpées en fonction des zones tampons préalablement créées (Figure 4). Cette manipulation permet de définir uniquement et de manière plus locale, les obstacles à l'écoulement et l'occupation du sol adjacente.

La préparation des données d'obstacle à l'écoulement a demandé plusieurs étapes sous logiciel SIG ArcMap et sous Excel. Afin de retenir uniquement les obstacles à l'écoulement sur la Loire, une nouvelle base de données extraite du ROE a été construite. Cette base de données reprend tous les obstacles uniquement présents sur le linéaire de la Loire et compris dans les buffers, c'est-à-dire dans le lit mineur et le lit majeur de la Loire, mais en excluant ceux présents sur les affluents. Ainsi sur les 952 obstacles présents dans les buffers seuls 349 obstacles sont retenus pour l'analyse (Figure 5) et 603 obstacles retirés car situés sur des affluents.

Pour obtenir un seul et unique tableau, pour chaque tronçon, chaque caractéristique d'obstacle est rentrée manuellement sous Excel selon les variables étudiées.

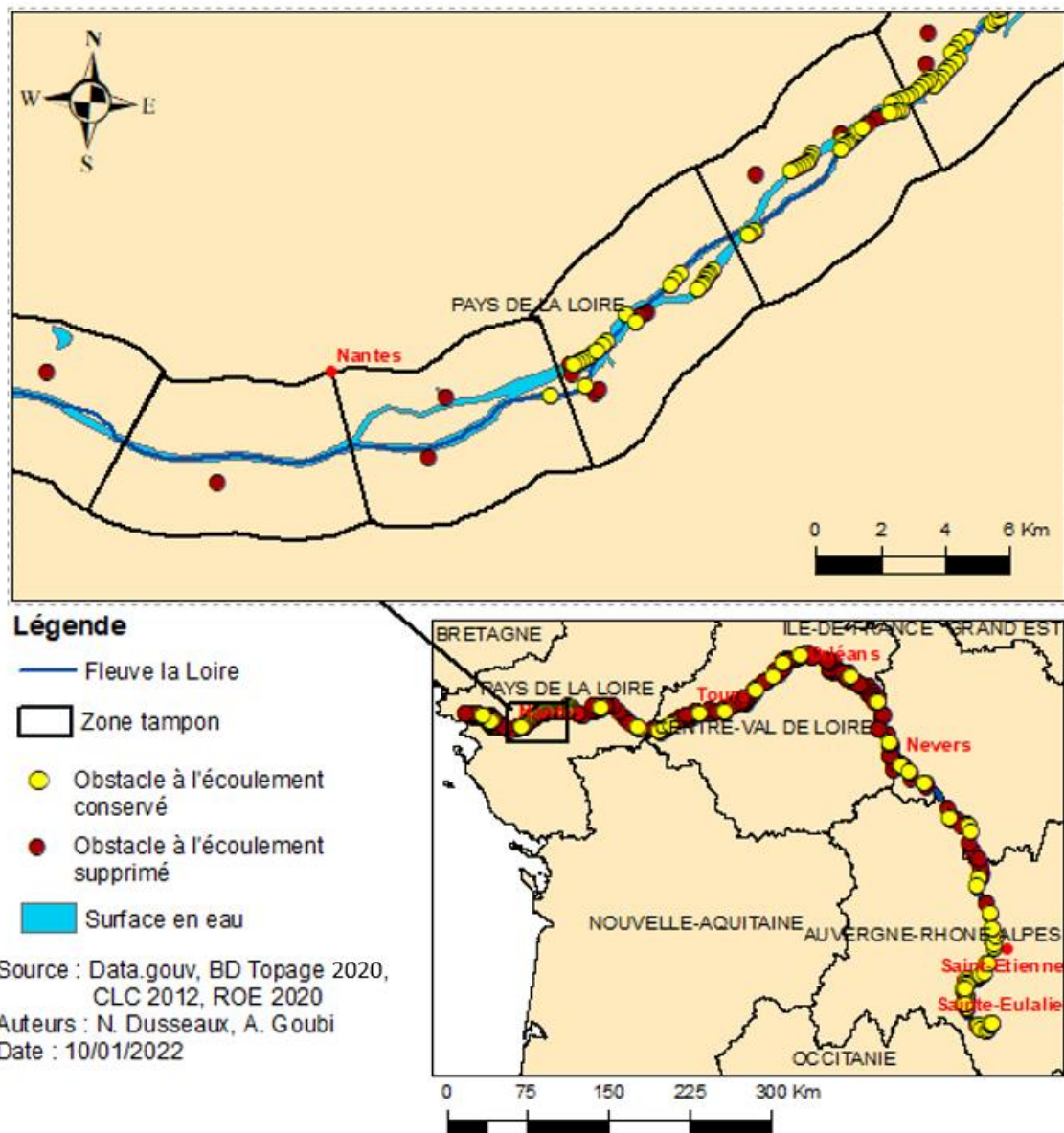


Figure 5: Correction des obstacles à l'écoulement uniquement présents sur le fleuve de la Loire

La préparation des données d'occupation du sol pour le traitement a demandé plusieurs étapes sous logiciel SIG ArcMap (Figure 6). Ces étapes demandent un matériel adapté afin de réduire au maximum les délais d'exécution qui peuvent être lourds, et surtout une capacité de stockage suffisante pour l'implémentation de nombreuses données intermédiaires aux données finales.

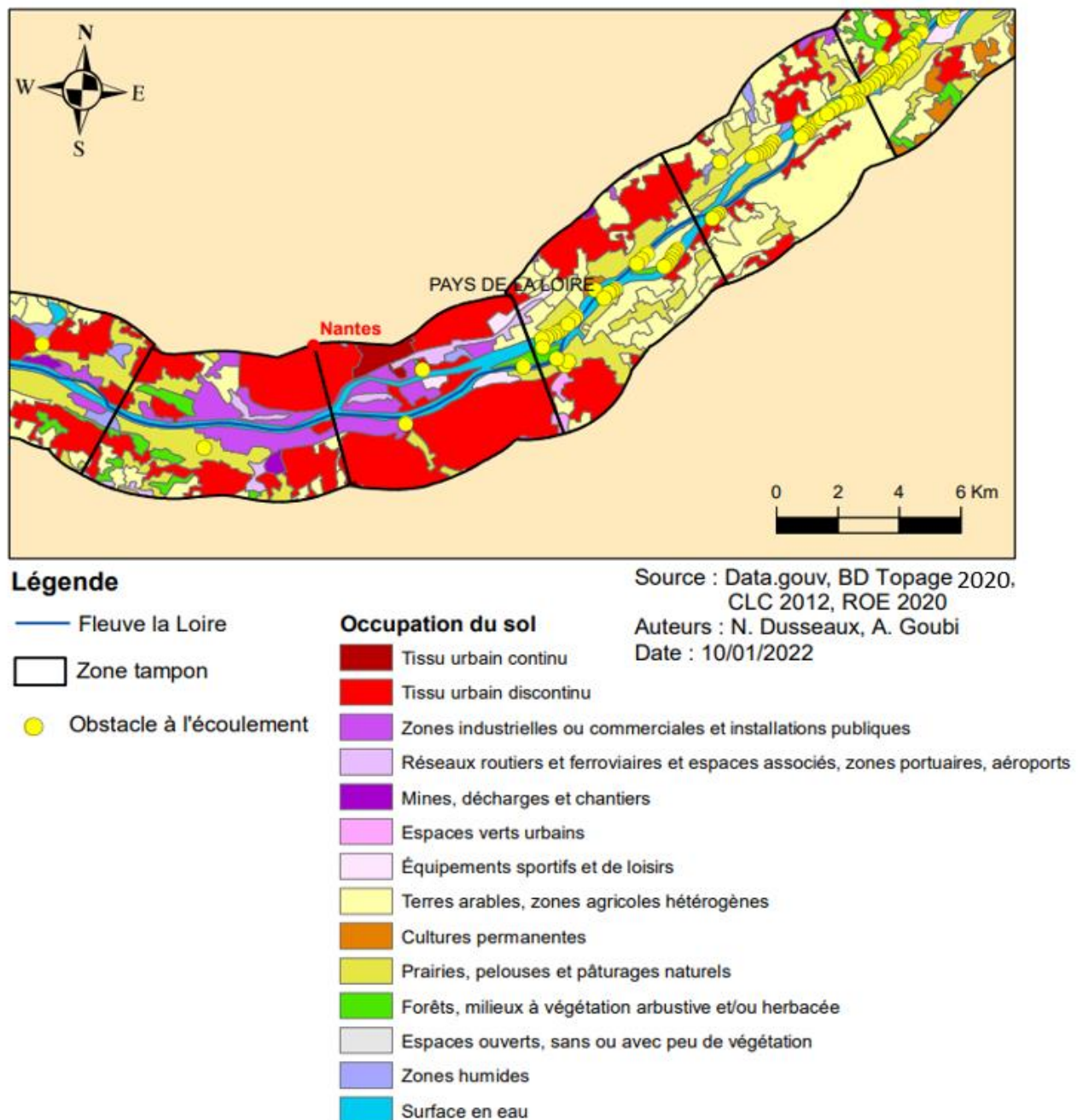


Figure 6: Occupation du sol et obstacles à l'écoulement sur le secteur de Nantes

Tout d'abord, les 44 variables d'occupation du sol ont été indexées selon le tableau 2 afin d'obtenir les 14 variables voulues. Ces 14 variables regroupées dans la même base de données CLC sont ensuite séparées en 14 entités distinctes afin de calculer leurs propres surfaces dans chaque buffer ultérieurement. Afin de produire ces entités en une seule fois et de manière automatisée, un modèle builder a été réalisé (Annexe 6).

Une fois les 14 entités d'occupation du sol créées sur l'ensemble de la Loire, ces dernières peuvent être découpées en fonction de chaque buffer pour obtenir les surfaces propres aux variables. Pour ce faire, 3 modèles builders sont nécessaires :

- découper les 14 entités selon 1 buffer étudié (Annexe 7)
- calculer les surfaces de chaque variable vis-à-vis du buffer étudié et les rapporter au pourcentage de surface de recouvrement afin d'être statistiquement comparable (Annexe 8)

- regrouper les 14 entités d'occupation du sol découpées pour le buffer étudié afin d'obtenir une seule et même entité comprenant les taux de recouvrement de chaque variable du buffer (Annexe 9)

Ces 3 modèles permettent de produire de manière automatisée et en une seule fois les données finales pour chaque buffer sans traiter une par une chaque variable d'occupation du sol. Cependant, pour produire l'ensemble des données finales nécessaires à l'analyse statistique, ces 3 modèles doivent être répétés pour chaque buffer soit 140 fois.

Pour obtenir un seul et unique tableau qui servira pour l'analyse statistique, chaque valeur surfacique en pourcentage d'occupation du sol est retranscrite pour chaque tronçon dans le tableau. Pour rappel seules les 13 premières variables d'occupation sont retranscrites dans le tableau, car la variable « 14 » d'occupation du sol qui concerne les surfaces en eau a seulement servi dans le calcul surfacique, mais constituerait un biais dans l'analyse statistique.

Enfin, les 2 tableaux d'occupation du sol et d'obstacle à l'écoulement sont compilés selon les tronçons en un seul et même tableau sous Excel. Les tronçons ne présentant aucun obstacle à l'écoulement sont supprimés afin de permettre la réalisation de l'ACC. Sur les 140 tronçons initiaux, 86 ont été supprimés, car ne présentant pas d'obstacles à l'écoulement, les 54 tronçons restants ont été analysés dans l'ACC.

4. Résultats

L'analyse a été menée sur 54 tronçons présentant au moins 1 obstacle à l'écoulement, sur 13 variables explicatives d'occupation du sol et 17 variables descriptives d'obstacles à l'écoulement.

4.1. Vérification de la distribution de l'occupation du sol sur des tronçons avec ou sans obstacle à l'écoulement

Avant de réaliser le test de Mann et Whitney, nous avons calculé le pourcentage de surface qu'occupe chaque variable explicative sur l'ensemble de l'occupation du sol. Ceci a été fait séparément sur les tronçons qui ne comportent pas d'obstacles et les tronçons qui comportent au moins un obstacle (Annexe 2).

Comme on peut le voir sur la Figure 7 qui représente le taux de recouvrement de chaque variable d'occupation du sol sur les tronçons comportant au moins 1 ouvrage et la Figure 8 qui représente le taux de recouvrement de ces variables sur les tronçons sans ouvrage, des différences sont notables.

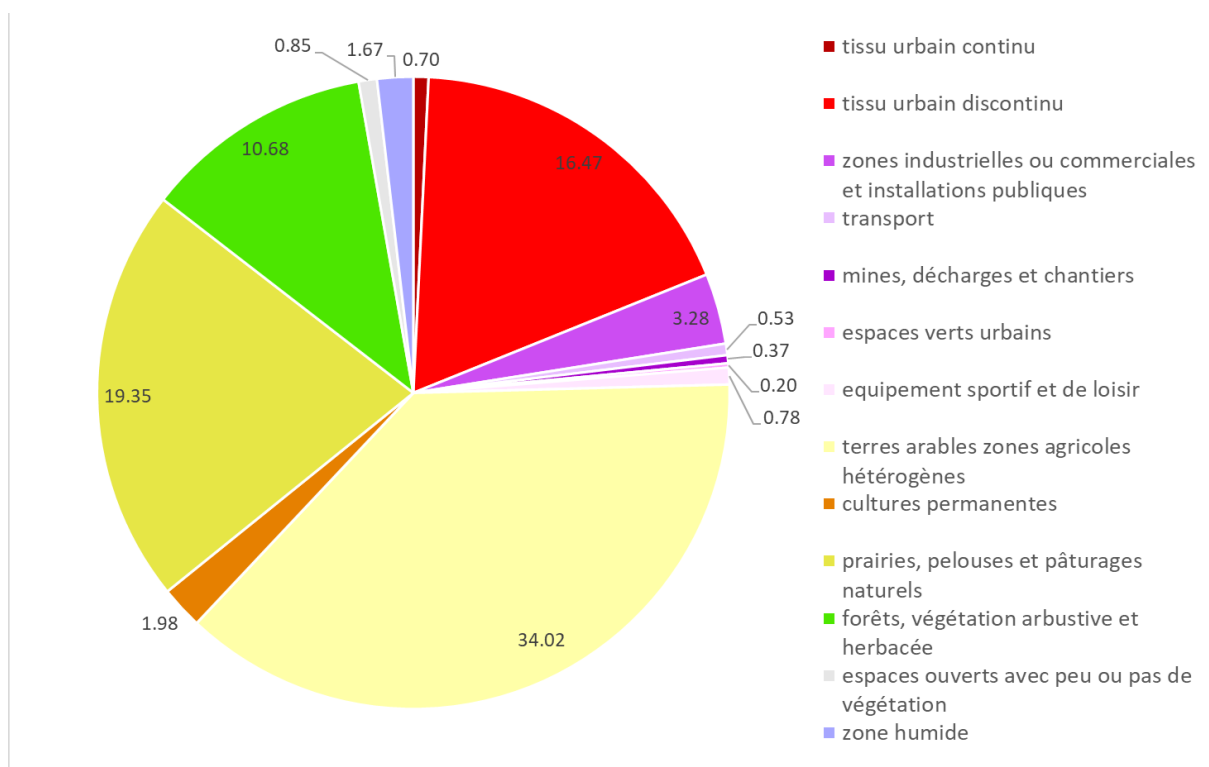


Figure 7: Pourcentage de recouvrement des 13 variables d'occupation du sol sur l'ensemble des tronçons comportant au moins 1 obstacle à l'écoulement

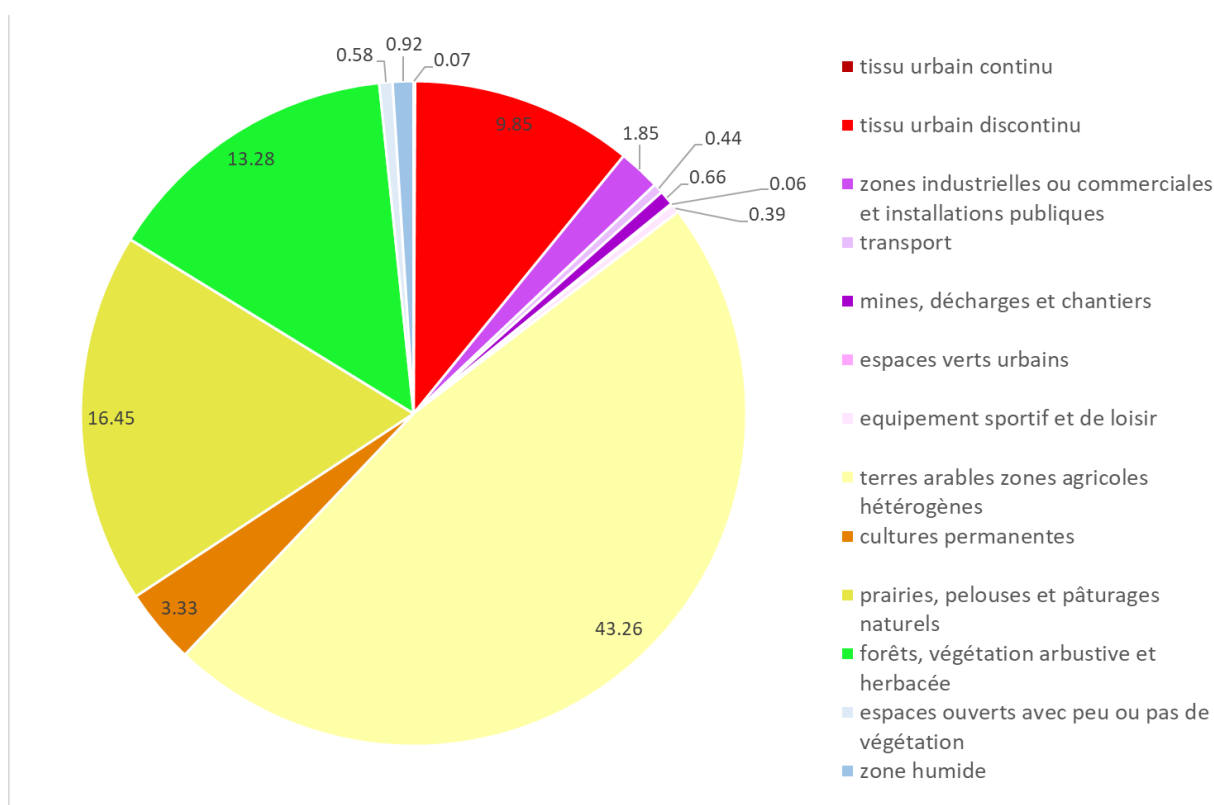


Figure 8: Pourcentage de recouvrement des 13 variables d'occupation du sol sur l'ensemble des tronçons sans obstacle à l'écoulement

En effet, dans les 2 cas, les variables majoritaires sont identiques, mais il est noté toutefois des différences dans leur taux de recouvrement (Tableau 8):

Tableau 8: Différences du taux de recouvrement des variables d'occupation du sol majoritaires sur les tronçons avec ou sans obstacle à l'écoulement

Variables occupation du sol	Pourcentage de recouvrement sur les tronçons avec au moins 1 obstacles à l'écoulement	Pourcentage de recouvrement sur les tronçons sans obstacles à l'écoulement
Terres arables & zones agricoles hétérogènes	34%	43%
Tissu urbain discontinu	16%	10%
Prairies, pelouses et pâturages naturels	19%	16%
Forêts & végétation arbustive et herbacée	11%	13%

Cette différence de taux de recouvrement est également notée sur les variables d'occupation du sol minoritaires, bien que ces variables minoritaires soient identiques entre les deux types de tronçons.

Par conséquent, avant d'appliquer l'ACC qui ne fait intervenir que les tronçons avec obstacle à l'écoulement, il est important de faire une analyse de différence (test de Mann et Whitney) du taux de recouvrement d'occupation du sol sur les tronçons avec et sans obstacle. Cette analyse permettra de prouver qu'il n'y a pas de différence significative entre les deux types de tronçons et donc de prouver que l'ACC est réalisable sur une seule partie des données.

On rappelle que le test de Mann et Whitney a été choisi pour comparer les surfaces d'occupation du sol des tronçons qui ne comportent pas d'obstacles à l'écoulement et les surfaces d'occupation du sol des tronçons qui comportent au moins un obstacle à l'écoulement. Ceci dans le but de pouvoir réaliser l'analyse ACC avec uniquement les tronçons qui comportent au moins un obstacle.

Pour rappel également, l'hypothèse H_0 du test est : "il n'y a pas de différence significative entre l'occupation du sol des tronçons qui ne comportent pas d'obstacles à l'écoulement et celle des tronçons qui comportent des obstacles à l'écoulement". A contrario, l'hypothèse H_1 est : "il y a une différence significative entre l'occupation du sol des tronçons qui ne comportent pas d'obstacles à l'écoulement et celle des tronçons qui comportent des obstacles à l'écoulement".

Après utilisation de la méthode des rangs et calculs (Annexe 3), on trouve $U_{min}=U_a=74$ et $U_{seuil}=45$ (au $\alpha=0.05$).

Comme U_{min} est strictement supérieur à U_{seuil} ($74 > 45$, $\alpha=0.05$), H_0 est acceptée et H_1 est rejetée. Par conséquent, on admet qu'il n'y a pas de différence significative entre l'occupation du sol des tronçons qui ne comportent pas d'obstacles à l'écoulement et celle des tronçons qui comportent des obstacles à l'écoulement au risque de 5 %.

L'analyse ACC peut donc être réalisée uniquement sur une partie des données et plus précisément sur les tronçons comportant au moins 1 obstacle à l'écoulement.

4.2. L'Analyse Canonique des Correspondances : Détermination d'un éventuel lien entre obstacles à l'écoulement et occupation du sol avec une ACC

L'intervalle de confiance choisi dans notre cas est de 95% soit $\alpha = 0.05$. L'ACC calcule une p-value = 0.02. Par conséquent, p-value < α permet de rejeter l'hypothèse H_0 "il n'existe pas de lien entre les variables descriptives et les variables explicatives" et donc d'affirmer qu'il existe un lien entre l'occupation du sol et la présence d'obstacles à l'écoulement. Le risque de rejeter l'hypothèse H_0 alors qu'elle est vraie est inférieur à 2%.

D'après l'ACC le tableau d'inertie permet de voir comment est répartie l'inertie des variables explicatives d'occupation du sol dans l'analyse. Cette inertie représente l'explication totale de la distribution des obstacles selon les variables d'occupation du sol testées (partie contrainte) et toutes les autres variables pouvant exister, mais non testées ici (partie non contrainte). Dans notre cas on peut voir avec la Tableau 9 d'inertie que l'analyse canonique des correspondances contraintes correspond à 32.766% de l'inertie totale. Cela montre que les variables explicatives d'occupation du sol (partie contrainte) expliquent une partie de la variabilité à l'intérieur du tableau de contingence, soit de la présence d'obstacles à l'écoulement dans la Loire.

Cependant, d'autres variables (partie non contrainte) impliquent la présence de ces obstacles à hauteur de 67.234%. Par conséquent, une analyse de la partie non contrainte, non exposée dans cette étude, serait pertinente.

Tableau 9: Tableau synthétique de l'inertie des données, extrait de l'ACC

	Value	%
Total	2.468	100.000
Constrained	0.809	32.766
Unconstrained	1.659	67.234

L'analyse des valeurs propres (Figure 9 et Tableau 10: Eigenvalues and percentages of inertia) aux variables d'occupation du sol de l'ACC permet de voir que la majeure partie de l'inertie est représentée par le 1er axe à 55.886% et par 18.784% avec le 2ème axe. Ainsi le 1er et le 2ème axe utilisé dans cette ACC, expliquent 74.670% de l'inertie pour les variables d'occupation du sol, soit 74.670% des 32.766% pour l'analyse globale. Ce qui signifie que la représentation de l'ACC en deux dimensions est suffisante pour analyser les relations entre les tronçons, les obstacles à l'écoulement et l'occupation du sol.

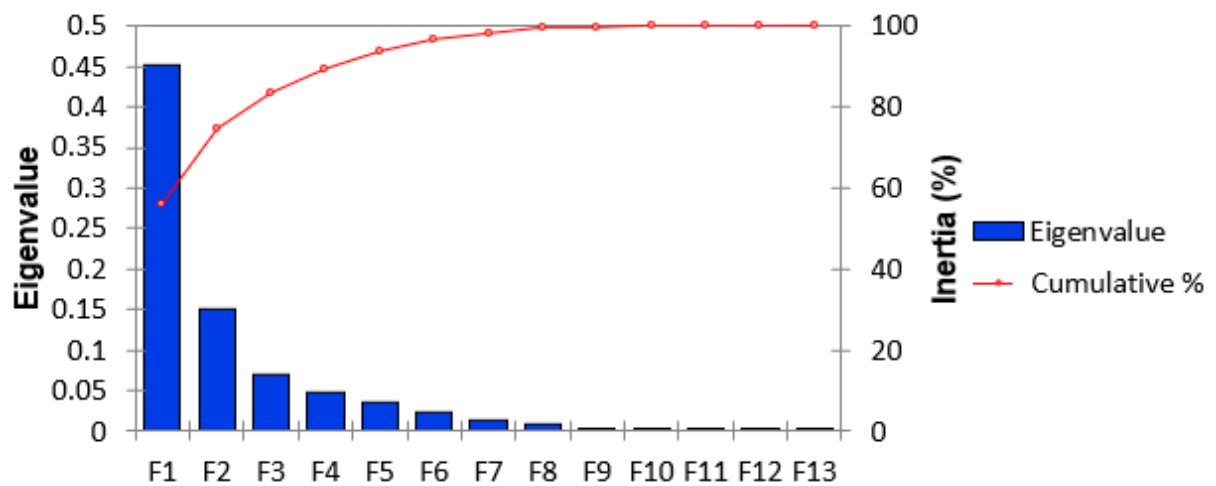


Figure 9: Diagramme d'inertie et valeurs propres de chaque variable d'occupation du sol, extrait de l'ACC

Tableau 10: Inertie et valeurs propres de chaque variable d'occupation du sol, extrait de l'ACC

	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	F9	F10	F11	F12	F13
Eigenvalue	0.452	0.152	0.070	0.048	0.036	0.023	0.013	0.010	0.002	0.002	0.000	0.000	0.000
Constrained inertia	55.886	18.784	8.711	5.973	4.489	2.791	1.607	1.231	0.258	0.186	0.056	0.027	0.001
Cumulative %	55.886	74.670	83.381	89.354	93.843	96.634	98.241	99.472	99.730	99.916	99.972	99.999	100.000
Total inertia	18.312	6.155	2.854	1.957	1.471	0.914	0.527	0.403	0.084	0.061	0.018	0.009	0.000
Cumulative % (%)	18.312	24.466	27.321	29.278	30.749	31.663	32.190	32.593	32.678	32.739	32.757	32.766	32.766

L'ACC permet ainsi d'obtenir une représentation graphique, selon nos variables explicatives (occupation du sol) et nos variables descriptives (obstacles à l'écoulement).

L'analyse de l'ACC permet de distinguer au niveau des variables explicatives, sur le plan canonique (axe 1 * axe 2), des vecteurs qui s'opposent entre-eux :

- les cultures permanentes ; les espaces ouverts, sans ou avec peu de végétation ; les terres arables et zones agricoles hétérogènes,
- les forêts, milieux à végétation arbustive et/ou herbacée ; les mines, décharges et chantiers.

Par ailleurs, on note que la longueur des vecteurs est proportionnelle à leur participation dans la construction des deux axes dimensionnant l'ACC. De plus, afin de rendre un meilleur visuel, la longueur des vecteurs a été multipliée par un facteur 10. Ainsi la représentation graphique de l'ACC est illustrée Figure 10.

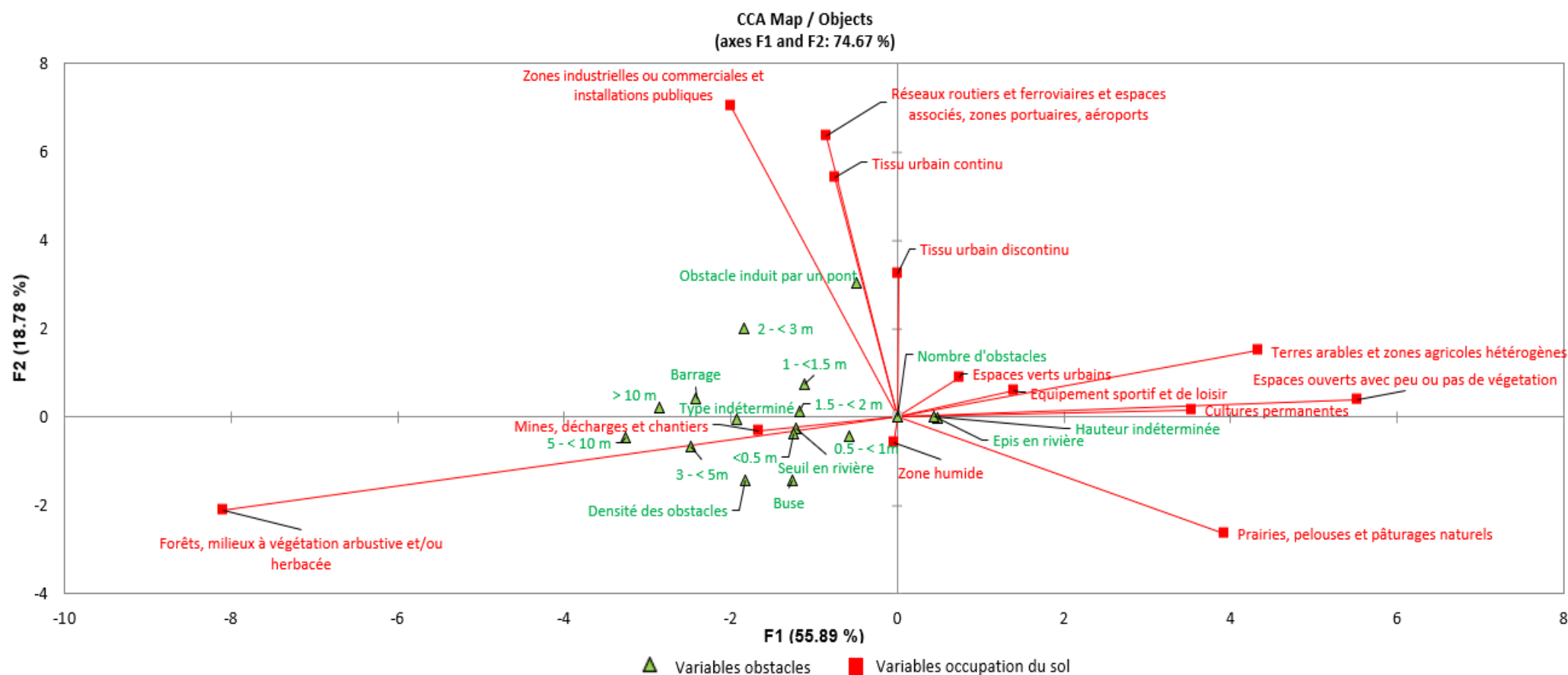


Figure 10: Représentation graphique de l'Analyse Canonique des Correspondances entre les variables d'occupation du sol et les variables d'obstacle à l'écoulement

À la vue de la représentation graphique de l'ACC, plusieurs relations peuvent être mises en évidence. Elles sont résumées dans le Tableau 11 ci-dessous.

Un test de corrélation de Bravais-Pearson peut être appliqué à la suite de ce premier aperçu. Ce test permettra de savoir s'il existe réellement une corrélation entre chaque variable testée d'occupation du sol et d'obstacle à l'écoulement et leur degré de liaison. Pour cela, les variables d'occupation du sol et d'obstacle à l'écoulement potentiellement corrélées dans l'ACC seront testées 2 à 2 par le test de Bravais-Pearson. Les principales variables dont la corrélation est testée sont résumées dans le Tableau 11 ci-dessous.

Tableau 11: Synthèses des données d'obstacles à l'écoulement visuellement corrélées à certains types d'occupation du sol, après lectures graphiques de l'ACC

Variable obstacle	Variable(s) CLC visuellement corrélée(s)
Nombre d'obstacles	Pas de tendance effective
Densité	Forêts, milieux à végétation arbustive et herbacée / Mines, décharges et chantiers
Barrage	Forêts, milieux à végétation arbustive et herbacée / Mines, décharges et chantiers
Buse	Forêts, milieux à végétation arbustive et herbacée / Mines, décharges et chantiers / Zone humide
Epis en rivière	Cultures permanentes / Espaces ouverts, sans ou avec peu de végétation / Terres arables et zones agricoles hétérogènes
Obstacle induit par un pont	Tissu urbain continu/ Réseaux routiers et ferroviaires et espaces associés, zones portuaires, aéroports / Zones industrielles ou commerciales et installations publiques / Tissu urbain discontinu
Seuil en rivière	Forêts, milieux à végétation arbustive et/ou herbacée / Mines, décharges et chantiers
Type non déterminé	Mines, décharges et chantiers / Forêts, milieux à végétation arbustive et/ou herbacée
< 0.5 m	Forêts, milieux à végétation arbustive et/ou herbacée / Mines, décharges et chantiers
0.5 - 1 m	Forêts, milieux à végétation arbustive et/ou herbacée / Mines, décharges et chantiers / Zones humides
1 - 1.5 m	Mines, décharges et chantiers / Forêts, milieux à végétation arbustive et/ou herbacée / Zones industrielles ou commerciales et installations publiques
1.5 - 2 m	Mines, décharges et chantiers / Forêts, milieux à végétation arbustive et/ou herbacée
2 - 3 m	Zones industrielles ou commerciales et installations publiques / Mines, décharges et chantiers / Forêts, milieux à végétation arbustive et/ou herbacée
3 - 5 m	Forêts, milieux à végétation arbustive et/ou herbacée / Mines, décharges et chantiers
5 - 10 m	Mines, décharges et chantiers / Forêts, milieux à végétation arbustive et/ou herbacée
> 10 m	Mines, décharges et chantiers / Forêts, milieux à végétation arbustive et/ou herbacée

On peut également observer un certain regroupement des tronçons sur la représentation graphique de l'ACC vis-à-vis de leur position sur la Loire (Amont, Moyenne ou Aval) visible sur la Figure 11. On peut observer que certaines variables sont visuellement corrélées à leur position sur la Loire :

- Loire amont : Barrage / Forêts, milieux à végétation arbustive et/ou herbacée / Mines, décharges et chantiers / Hauteur > 10m
- Loire moyenne : Zones industrielles ou commerciales et installations publiques / Épis en rivière / Hauteur indéterminée
- Loire aval : Épis en rivière / Hauteur indéterminée

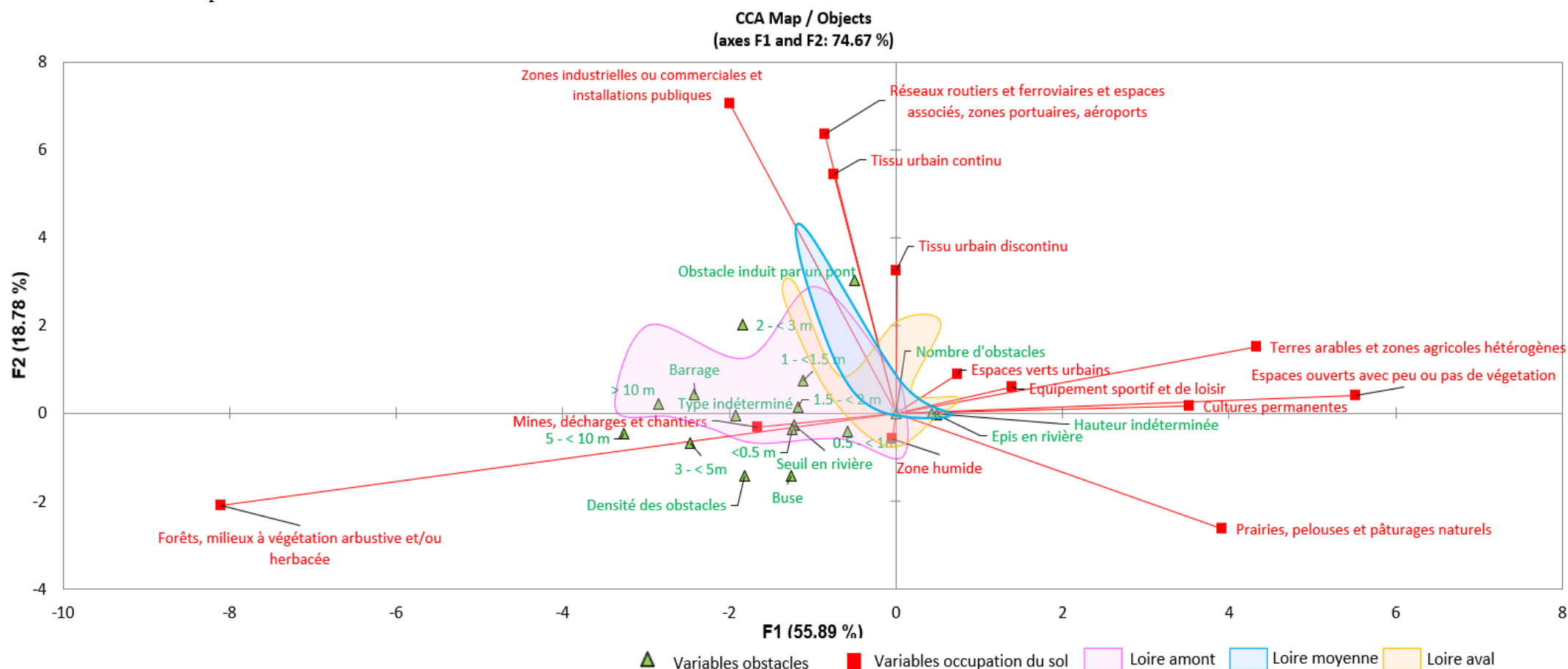


Figure 11: Représentation graphique de l'Analyse Canonique des Correspondances entre les variables d'occupation du sol et les variables d'obstacle à l'écoulement avec la position simplifiée des tronçons par rapport à la Loire

4.3. Confrontation des variables potentiellement corrélées sous l'ACC avec des tests de Bravais-Pearson

Afin de vérifier les potentielles corrélations entre certaines variables d'occupation du sol et d'obstacle à l'écoulement observé dans l'ACC, des tests de Bravais-Pearson sont réalisés. Ainsi il a été testé 2 à 2 toutes les variables d'occupation du sol avec toutes les variables d'obstacles à l'écoulement afin de parer toutes les éventualités. Cela permettra de confirmer ou d'infirmer des corrélations entre certaines variables vues dans l'ACC, mais aussi de ne pas omettre des corrélations existantes, mais non remarquées sur l'ACC.

Pour rappel les hypothèses posées sont les suivantes :

- H0 : « Il n'y a pas de corrélation entre la variable d'occupation du sol et la variable obstacle testée. »
- H1 : « Il y a une corrélation entre la variable d'occupation du sol et la variable obstacle testée. »

Pour chaque test réalisé entre les variables confrontées, une p-value est produite. Le Tableau 12Figure 11, synthétise les p-values obtenues pour chaque test réalisé entre les variables d'occupation du sol et les variables d'obstacle à l'écoulement. Dans ce tableau, les p-values surlignées en rouge illustrent les p-values dont les valeurs sont inférieures au coefficient d'incertitude α (p-value < 0.05). Par conséquent, pour ces valeurs, l'hypothèse H0 est rejetée et H1 est retenue. Il existe donc une corrélation entre les variables testées pour ces valeurs surlignées en rouge.

Tableau 12: Synthèse des p-value pour les tests de corrélations Bravais-Pearson testées entre variables d'occupation du sol et les variables d'obstacles à l'écoulement

Variables	Tissu urbain continu	Tissu urbain discontinu	Zones industrielles ou commerciales et installations publiques	Réseaux routiers et ferroviaires et espaces associés, zones portuaires, aéroports	Mines, décharges et chantiers	Espaces verts urbains	Équipements sportifs et de loisirs	Terres arables, zones agricoles hétérogènes	Cultures permanentes	Prairies, pelouses et pâturages naturels	Forêts, milieux à végétation arbustive et/ou herbacée	Espaces ouverts, sans ou avec peu de végétation	Zones humides
Nombre d'obstacles	0.357	0.696	0.129	0.367	0.588	0.812	0.985	0.303	0.195	0.051	0.105	0.003	0.733
Densité d'obstacles	0.649	0.302	0.449	0.728	0.734	0.751	0.649	0.132	0.732	0.124	0.167	0.607	0.844
Type Indéterminé	0.558	0.525	0.679	0.660	0.403	0.671	0.532	0.708	0.630	0.512	0.251	0.453	0.801
Barrage	0.689	0.333	0.913	0.594	0.596	0.397	0.480	0.081	0.335	0.594	0.006	0.132	0.616
Buse	0.413	0.459	0.171	0.539	0.525	0.553	0.381	0.260	0.500	0.066	0.241	0.294	0.725
Epis en rivière	0.457	0.727	0.205	0.451	0.605	0.858	0.927	0.238	0.141	0.060	0.056	0.001	0.733
Obstacle induit par un pont	0.009	0.008	0.010	0.008	0.375	0.078	0.929	0.191	1.000	0.065	0.136	0.148	0.583
Seuil en rivière	0.093	0.684	0.031	0.143	0.881	0.633	0.705	0.259	0.182	0.808	0.043	0.058	0.527
H Indéterminé	0.450	0.759	0.203	0.483	0.583	0.716	0.891	0.274	0.124	0.055	0.047	0.002	0.870
<0.5 m	0.265	0.818	0.072	0.143	0.953	0.717	0.682	0.600	0.122	0.982	0.040	0.387	0.326
0.5 - < 1m	0.847	0.773	0.273	0.372	0.079	0.484	0.324	0.424	0.371	0.311	0.423	0.120	0.611
1 - <1.5 m	0.714	0.523	0.812	0.641	0.304	0.787	0.765	0.749	0.722	0.620	0.150	0.798	0.533
1.5 - < 2 m	0.398	0.756	0.860	0.526	0.512	0.540	0.648	0.766	0.486	0.697	0.735	0.278	0.717
2 - < 3 m	0.246	0.795	0.048	0.677	0.324	0.468	0.641	0.944	0.409	0.329	0.937	0.198	0.667
3 - < 5m	0.370	0.292	0.131	0.501	0.486	0.516	0.337	0.185	0.460	0.377	0.000	0.250	0.700
5 - < 10 m	0.682	0.325	0.493	0.758	0.750	0.766	0.662	0.216	0.736	0.718	0.009	0.600	0.860
> 10 m	0.517	0.855	0.601	0.586	0.574	0.599	0.869	0.173	0.551	0.140	0.014	0.353	0.756

Le test de Bravais-Pearson permet de produire également un coefficient de corrélation de Pearson qui correspond au degré de liaison que peuvent avoir des variables corrélées. Ainsi, pour chaque test réalisé un coefficient de Pearson r est produit, et l'ensemble de ces résultats sont synthétisés dans le Tableau 13 ci-dessous. Pour rappel, plus ce r est proche de 1 ou -1 plus la relation entre les variables testées est importante. A contrario, plus ce r est proche de 0 moins les variables sont liées. Le signe positif ou négatif de ce r permet de déterminer le type de corrélation existante entre les variables. C'est-à-dire, lorsque le signe est positif, la relation entre les variables est positive (directe et croissante). Vice-versa, si le signe est négatif la relation entre les deux variables est négative (indirecte et décroissante). Les valeurs du coefficient de Pearson surlignées en rouge dans le Tableau 13 représentent les valeurs différentes de 0 dont il existe une relation entre les variables testées qui est significative ($p\text{-value} < 0.05$).

Tableau 13: Synthèse des coefficients de Pearson pour les corrélations testées entre variables d'occupation du sol et les variables d'obstacles à l'écoulement

Variables	Tissu urbain continu	Tissu urbain discontinu	Zones industrielles ou commerciales et installations publiques	Réseaux routiers et ferroviaires et espaces associés, zones portuaires, aéroports	Mines, décharges et chantiers	Espaces verts urbains	Équipements sportifs et de loisirs	Terres arables, zones agricoles hétérogènes	Cultures permanentes	Prairies, pelouses et pâturages naturels	Forêts, milieux à végétation arbustive et/ou herbacée	Espaces ouverts, sans ou avec peu de végétation	Zones humides
Nombre d'obstacles	-0.128	-0.054	-0.209	-0.125	-0.075	0.033	-0.003	0.143	0.179	0.267	-0.223	0.398	-0.047
Densité d'obstacles	-0.063	-0.143	-0.105	-0.048	-0.047	-0.044	-0.063	-0.207	-0.048	0.212	0.191	-0.072	-0.027
Type Indéterminé	-0.081	-0.088	-0.058	-0.061	0.116	-0.059	-0.087	0.052	-0.067	-0.091	0.159	-0.104	-0.035
Barrage	-0.056	-0.134	0.015	-0.074	0.074	-0.118	-0.098	-0.239	-0.134	-0.074	0.370	-0.207	-0.070
Buse	-0.114	-0.103	-0.189	-0.086	-0.088	-0.083	-0.122	-0.156	-0.094	0.252	0.162	-0.146	-0.049
Epis en rivière	-0.103	-0.049	-0.175	-0.105	-0.072	0.025	0.013	0.163	0.203	0.258	-0.262	0.422	-0.047
Obstacle induit par un pont	0.352	0.356	0.348	0.356	-0.123	0.242	0.012	0.181	0.000	-0.253	-0.205	0.199	-0.076
Seuil en rivière	-0.231	-0.057	-0.293	-0.202	0.021	0.066	-0.053	-0.156	-0.184	0.034	0.277	-0.260	0.088
H Indéterminé	-0.105	-0.043	-0.176	-0.097	-0.076	0.051	0.019	0.152	0.212	0.263	-0.272	0.408	-0.023
<0.5 m	-0.154	0.032	-0.246	-0.202	-0.008	-0.051	-0.057	-0.073	-0.213	0.003	0.280	-0.120	-0.136
0.5 - < 1m	-0.027	-0.040	-0.152	-0.124	0.241	-0.097	-0.137	0.111	-0.124	0.140	-0.111	0.214	-0.071
1 - <1.5 m	-0.051	-0.089	-0.033	0.065	-0.143	0.038	-0.042	-0.045	-0.049	0.069	0.198	-0.036	-0.087
1.5 - < 2 m	-0.117	-0.043	-0.025	-0.088	-0.091	-0.085	-0.064	0.041	-0.097	0.054	0.047	-0.150	-0.051
2 - < 3 m	0.161	0.036	0.270	0.058	0.137	-0.101	-0.065	-0.010	-0.115	-0.135	0.011	-0.178	-0.060
3 - < 5m	-0.125	-0.146	-0.208	-0.094	-0.097	-0.090	-0.133	-0.183	-0.103	-0.123	0.533	-0.159	-0.054
5 - < 10 m	-0.057	-0.136	-0.095	-0.043	-0.044	-0.041	-0.061	-0.171	-0.047	-0.050	0.350	-0.073	-0.025
> 10 m	-0.090	-0.025	-0.073	-0.076	-0.078	-0.073	-0.023	-0.188	-0.083	-0.203	0.332	-0.129	-0.043

Le Tableau 14 ci-dessous, résume les résultats vus précédemment dans le Tableau 12 et Tableau 13. Ainsi on peut voir que les coefficients de corrélation de Pearson sont relativement faibles (situés entre -0.293 et -0.272 et entre 0.277 et 0.533). Par conséquent ces variables sont faiblement reliées entre elles, dont certaines sont corrélées positivement et d'autres négativement.

Ce test montre bien que 6 des 17 variables d'obstacles à l'écoulement ne sont pas corrélées significativement à l'occupation du sol. Il s'agit de la "densité" d'obstacles, des types d'obstacles "buse" ou "non déterminé" et des hauteurs de chute situées entre "0.5-1 m", "1-1.5 m" et "1.5-2 m". Cependant des variables d'occupation du sol expliquent une majorité de variables d'obstacles à l'écoulement. Notamment :

- "Forêts, milieux à végétation arbustive et herbacée" pour : "les barrages", "les seuils en rivière" et les hauteurs de chutes entre "<0.5 m", "3-5 m", "5-10 m", ">10 m" et "hauteur indéterminée", soit 7 variables d'obstacles à l'écoulement.
- "Espaces ouverts, sans ou avec peu de végétation" pour : "nombre d'obstacles", "épis en rivière" et "hauteur de chute non déterminée", soit 3 variables d'obstacles à l'écoulement.
- "Zones industrielles ou commerciales et installations publiques" pour : "obstacle induit par un pont", "seuil en rivière" et hauteur de chute entre "2-3 m", soit 3 variables d'obstacles à l'écoulement.

D'autres variables d'occupation du sol telles que "Réseaux routiers et ferroviaires et espaces associés, zones portuaires, aéroports", "Tissu urbain discontinu" et "Tissu urbain continu" expliquent en minorité les variables d'obstacles à l'écoulement qui se résument à "obstacle induit par un pont".

Tableau 14: Synthèse des données d'obstacles à l'écoulement corrélées à certains types d'occupation du sol, après réalisation du test de Bravais-Pearson

Variable obstacle	Variable(s) CLC corrélée(s) avec les variables obstacles	Coefficient de corrélation de Pearson
Nombre d'obstacles	Espaces ouverts, sans ou avec peu de végétation	0.398
Densité	<i>Pas de corrélation significative</i>	-
Barrage	Forêts, milieux à végétation arbustive et herbacée	0.370
Buse	<i>Pas de corrélation significative</i>	-
Epis en rivière	Espaces ouverts, sans ou avec peu de végétation	0.422
Obstacle induit par un pont	Réseaux routiers et ferroviaires et espaces associés, zones portuaires, aéroports	0.356
	Tissu urbain discontinu	0.356
	Tissu urbain continu	0.352
	Zones industrielles ou commerciales et installations publiques	0.348
Seuil en rivière	Zones industrielles ou commerciales et installations publiques	-0.293
	Forêts, milieux à végétation arbustive et herbacée	0.277
Type non déterminé	<i>Pas de corrélation significative</i>	-
< 0.5 m	Forêts, milieux à végétation arbustive et/ou herbacée	0.280
0.5 - 1 m	<i>Pas de corrélation significative</i>	-
1 - 1.5 m	<i>Pas de corrélation significative</i>	-
1.5 - 2 m	<i>Pas de corrélation significative</i>	-
2 - 3 m	Zones industrielles ou commerciales et installations publiques	0.270
3 - 5 m	Forêts, milieux à végétation arbustive et/ou herbacée	0.533
5 - 10 m	Forêts, milieux à végétation arbustive et/ou herbacée	0.350
> 10 m	Forêts, milieux à végétation arbustive et/ou herbacée	0.332

5. Discussion

5.1. Analyse des résultats de l'étude menée sur les différentes échelles de discontinuité écologique sur la Loire

Les résultats vus précédemment montrent que l'occupation du sol joue bien un rôle dans la présence d'obstacles à l'écoulement sur la Loire, mais n'en expliquerait qu'une partie. En effet, l'analyse ACC indique que l'occupation du sol en général, interviendrait à hauteur de 32%.

De manière plus détaillée, les résultats précédents montrent que le “nombre d'obstacles” ne serait pas induit par un type d'occupation du sol particulier. Ce résultat est surprenant, car on pourrait s'attendre à observer plus d'obstacles à l'écoulement dans les zones urbaines ou les zones agricoles étant donné les usages qui en découlent (protection contre les inondations, réseaux, drainage, rétention d'eau, usage récréatif ...).

Ensuite, une autre tendance se dégage en ce qui concerne les obstacles induits par un pont, rattaché principalement aux “tissus urbains continus”, aux “tissus urbains discontinus”, aux “réseaux routiers, ferroviaires, et espaces associés : zones portuaires et aéroports” et aux “zones industrielles ou commerciales et installations publiques”. Ce résultat est plutôt cohérent avec la réalité puisque c'est dans ces principaux secteurs que ce type d'obstacle est majoritairement localisé.

Par ailleurs, certains types d'occupation du sol semblent jouer un rôle majeur dans le type d'obstacle à l'écoulement et les hauteurs de chute. C'est notamment le cas des “Forêts, milieux à végétation arbustive et/ou herbacée” qui expliqueraient des obstacles de type barrage à forte hauteur de chute (“3-5 m”, “5-10 m”, “>10 m”). Cette observation peut s'expliquer du fait de la présence abondante de forêt en zone amont de la Loire propice à l'installation de barrages ou de bassins de rétention destinés à l'écroulement des crues, le soutien d'étiage, ou encore la production d'électricité ... De plus, ce type d'occupation du sol semble jouer un rôle prépondérant dans la présence d'obstacles puisqu'il est corrélé à de nombreuses variables de ces derniers (voir Tableau 14). En effet, la majorité des tronçons présentant au moins un obstacle se situe dans le secteur amont de la Loire (29 tronçons en amont, 11 dans le secteur Loire moyenne et 14 tronçons en aval voir Figure 5).

Cette répartition peut être en partie expliquée par les tendances actuelles de gestion des bassins versants. En effet de nombreux documents ou orientations (Directive Cadre sur l'EAU (DCE), Loi sur l'Eau et les Milieux Aquatiques (LEMA), Schéma Directeur d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SDAGE), Schéma d'Aménagement et de Gestion des Eaux (SAGE) ...) visent à l'atteinte du bon état écologique de nos cours d'eau. D'après les données de l'Agence de l'Eau Loire Bretagne (AELB), la plupart des cours d'eau en mauvais état se situent sur des zones agricoles et/ou urbanisées (Figure 12 et Figure 6). Par conséquent les actions menées pour rétablir l'état écologique sont prioritaires sur ces zones qui se situent en majorité dans le secteur médian ou aval de la Loire. Afin de rétablir le bon état écologique, de nombreuses actions visent le rétablissement de la continuité écologique qui passe en partie par l'arasement de ces ouvrages en rivière. Ainsi depuis la mise en place de cette gestion des cours d'eau, de nombreux ouvrages ont été supprimés et ne figurent plus dans la base de données ROE qui a été exploitée pour cette étude. La majorité des obstacles restants et qui ont servi dans l'étude se situe ainsi sur les zones amont ou en grande partie sur les zones aval

lorsque ces derniers n’obstruent pas la totalité de largeurs du lit (exemple des épis en rivière, toujours utilisé à des fins de navigation).

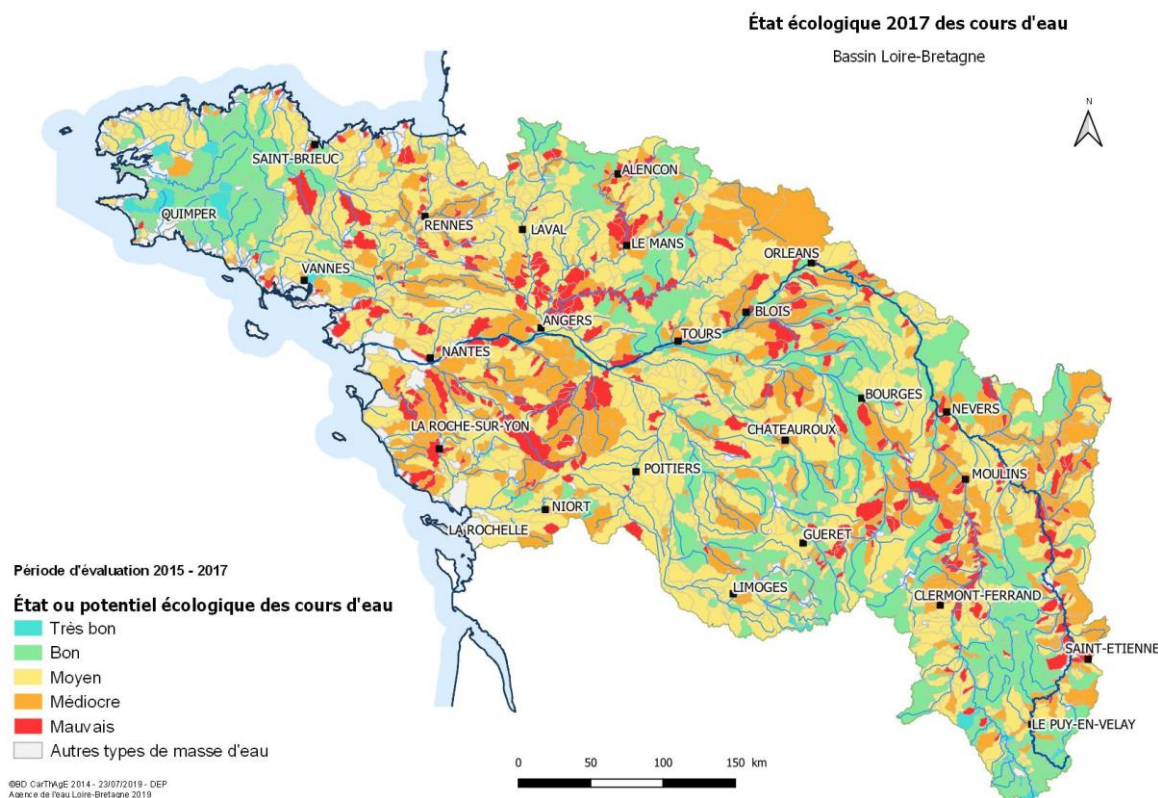


Figure 12: État écologique des cours d'eau en 2017 sur le bassin hydrographique de la Loire (source AELB, 2017)

D’autre part, on remarque que les variables obstacles “hauteur de chute indéterminée” et “épis en rivière” évoluent de la même manière dans l’ACC et sont toutes deux corrélées à “espaces ouverts sans ou avec peu de végétation”. Ceci peut être expliqué par le fait que de nombreux épis en rivière sur la Loire possèdent une hauteur indéterminée, non renseignée ou encore non connue à ce jour (voir base de données ROE).

De plus, contrairement à ce que l’on pourrait penser, des types d’occupation du sol dominants tels que les “terres arables et zones agricoles hétérogènes” et les “prairies, pelouses et pâturages naturels” qui constituent à eux seuls plus de 50 % de l’occupation du sol (respectivement 34.0 % et 19.4 % de la surface) ne sont corrélés à aucune variable d’obstacles à l’écoulement vis-à-vis du test de Bravais-Pearson. Alors que l’ACC indiquait initialement que ces deux types d’occupation du sol étaient corrélés aux variables “épis en rivière et “hauteur indéterminée”. Ce résultat vient corriger l’idée que la présence d’obstacle est induite par l’usage agricole (buses, retenues ...).

Par ailleurs, concernant l’analyse ACC et le choix des vecteurs qui la dimensionnent, quelques remarques sont à prendre en considération. Pour rappel, la longueur des vecteurs des variables d’occupation du sol est proportionnelle à leur part d’inertie dans l’analyse. Ainsi, les “forêts, milieux à végétation arbustive et/ou herbacée”, les “espaces ouverts avec peu ou pas de végétation” et les “zones industrielles ou commerciales et installations publiques” participent grandement à la construction des axes de l’ACC. Alors qu’elles ne représentent respectivement que 10.7 %, 0.9% et 3.3 % de la répartition du territoire. A contrario, les “terres arables et zones agricoles hétérogènes”,

les “prairies, pelouses et pâturages naturels” et le “tissu urbain discontinu” qui constituent la majorité de la surface d’occupation du sol (avec respectivement 34.0%, 19.4% et 16.5% de recouvrement) présentent des longueurs de vecteurs plus faibles sur l’ACC, alors que l’on pourrait s’attendre à ce que ce soient elles qui modulent l’ACC.

De la même manière, l’ACC a corrélié les “forêts, milieux à végétation arbustive et/ou herbacée” et les “mines, décharges et chantiers” à de nombreuses variables d’obstacles à l’écoulement. Cependant, cette corrélation s’est avérée pour les “forêts, milieux à végétation arbustive et/ou herbacée”, mais pas pour les “mines, décharges et chantiers” (4.3. Confrontation des variables potentiellement corrélées sous l’ACC avec des tests de Bravais-Pearson).

5.2. Retour réflexif sur la mise en place et le déroulé de l’étude

L’ensemble des résultats obtenus a montré que l’occupation du sol explique bien la présence d’obstacle à l’écoulement dans la Loire. Cependant, des analyses complémentaires seraient intéressantes sur d’autres bassins versants afin de confirmer, d’affiner ou d’infirmier les résultats obtenus.

Pour cette étude, il est important de rappeler que les résultats obtenus sont directement issus du choix des bases de données utilisées. En effet, les données d’occupation du sol extraites de Corine Land Cover sont relativement simplifiées et peuvent donc représenter un biais dans l’analyse. Une base de données plus précise telle que le Registre Parcellaire Graphique permettrait d’affiner le recouvrement de chaque variable occupation du sol et donc de l’analyse qui s’ensuit. Il reste important de noter que l’utilisation d’une telle base de données à si grande échelle demande un traitement beaucoup plus conséquent. En ce qui concerne les données des obstacles, le Référentiel des Obstacles à l’Écoulement ne tient pas compte des ouvrages longitudinaux tels que les digues. Par conséquent, certaines parties des ouvrages pouvant causer atteinte aux écoulements ne sont pas prises en compte dans cette étude. Il serait donc intéressant de mener des travaux similaires sur ce type d’ouvrage.

Il est important de notifier que l’entièreté de cette étude repose sur le découpage de la Loire en tronçons homogènes. Pour rappel, ces tronçons sont définis par des largeurs proportionnelles au rang de Strahler de la Loire, mais de longueur égale. De ce fait, de nombreux tronçons ne comportent pas d’obstacle (61.4%).

Ce traitement a pour principale incidence l’omission d’une partie des données dans l’analyse afin de pouvoir appliquer correctement l’ACC. En effet, l’analyse ACC ne peut se réaliser avec un manque de données descriptives (soit les tronçons sans obstacle), elle traite donc uniquement les possibles liens entre l’occupation du sol et les obstacles présents. Mais ne traite pas l’occupation du sol avec la non-présence d’obstacles. Dans le cadre de notre étude qui cherche à comprendre le lien entre obstacles à l’écoulement et occupation du sol, l’analyse de ces tronçons sans obstacle reste à approfondir afin de pouvoir réaliser une analyse complète. Pour ce faire, un réajustement de la dimension (nombre, longueur ...) des tronçons peut être réalisé afin d’éviter l’implémentation de tronçons sans obstacle.

Cette observation peut être étendue à l’application du test de Mann et Whitney qui avait pour vocation ici, de comparer l’occupation du sol sur les tronçons avec ou sans ouvrage. En effet, ce test a permis

de montrer qu'il n'y avait pas de différence significative entre ces deux types de tronçons pour que seuls les tronçons comportant au moins 1 ouvrage soient utilisés sous l'ACC. Cependant, comme vu précédemment, cela implique de taire une partie des données dans l'analyse. Alors que ces données non analysées constituent une information importante pour cette dernière. De plus, nous cherchons à expliquer la présence et la répartition des obstacles à l'écoulement en fonction de l'occupation du sol. Or, l'absence de différence entre l'occupation du sol des deux types de tronçons pourrait aller à l'encontre de notre étude. Ainsi, nous aurions pu nous attendre à une différence majeure dans la répartition des types d'occupation du sol. En revanche, malgré le test de Mann et Whitney qui montre que les tronçons sont significativement homogènes, il est à noter des différences quant à leur part de recouvrement entre tronçons avec ou sans obstacle. Ces différences pourraient expliquer la présence ou non d'obstacles par l'occupation du sol, mais une analyse autre que l'ACC doit être appliquée.

Pour continuer sur l'ACC, cette analyse a permis de montrer que les variables d'occupation du sol expliquaient à hauteur de 32% la présence d'obstacles à l'écoulement. Cependant une analyse complémentaire avec d'autres variables explicatives telles que la démographie, la position des obstacles dans le bassin versant, les réseaux, le nombre d'affluents en amont ... permettraient d'affiner l'explication de la présence de ces obstacles à l'écoulement.

D'autre part, il est important de notifier que l'ACC permet d'avoir une vue globale des potentiels liens entre des variables. Cependant, il est essentiel de la compléter avec d'autres tests statistiques afin de connaître l'exactitude des relations entre ces variables. Ainsi, il aurait été intéressant de faire des analyses approfondies sur la base de données obstacles comme nous l'avons fait sur la base de données de l'occupation du sol.

Il en est de même pour les tests de corrélations réalisés sur l'ensemble des variables. Car même si certaines corrélations existent entre des variables d'occupation du sol et d'obstacle à l'écoulement, le degré de relation reste toutefois faible. En effet, le coefficient de corrélation de Pearson est situé entre -0.293 et -0.272 et entre 0.277 et 0.533. Ces faibles corrélations peuvent être en partie expliquées par la part d'explication de l'occupation du sol dans la présence des obstacles (32%).

Concernant les variables d'occupation du sol, celles-ci ont été remaniées de manière à assembler certaines d'entre elles selon leur usage ou similitude. Ceci pourrait constituer un biais puisque selon, les assemblages que nous avons effectués, les résultats pourraient être différents. Il serait donc intéressant d'effectuer une étude similaire en tenant compte de l'ensemble des types d'occupation du sol de Corine Land Cover, pour confirmer ou infirmer ces résultats.

D'autre part, concernant les variables obstacles à l'écoulement, d'autres paramètres auraient pu être intéressants à analyser tels que : leur état (existant, détruit partiellement ...), la présence de passe ou non, la présence ou l'absence d'éléments mobiles (clapets, vannes, ...), les usages (stabilisation du profil en long du lit, lutte contre l'érosion, sécurité des biens et des personnes, agriculture, énergie et hydroélectricité, industries, loisirs et sports aquatiques, alimentation en eau potable ...). Enfin, d'autres perspectives d'études pourraient être engagées sur la continuité piscicole et sédimentaire avec l'étude de la franchissabilité du cours d'eau par les poissons migrateurs ou non. En effet, la franchissabilité des obstacles est variable d'une espèce à l'autre. Il en est de même pour la charge de fond dont le diagnostic pourrait être évalué avec la base de données SYRAH-CE (SYstème Relationnel d'Audit de l'Hydromorphologie des Cours d'Eau) ou encore des analyses bathymétriques.

6. Conclusion

Pour conclure, notre étude basée sur la continuité écologique de la Loire à différentes échelles a permis de montrer qu'il existe bien une corrélation entre l'occupation du sol et la présence d'obstacles à l'écoulement. Ceci a pu être révélé grâce à une segmentation du cours d'eau en plusieurs tronçons homogènes en longueur et adaptés au rang de Strahler de la Loire pour la largeur. Cette méthode a permis d'étudier à la fois le lit mineur de la Loire et la quasi-totalité du lit majeur de cette dernière. Plusieurs analyses statistiques ont montré que l'occupation du sol sur des tronçons ne comportant pas d'obstacles ou comportant au moins un obstacle à l'écoulement étaient significativement identiques. Par la suite, l'Analyse Canonique des Correspondances et les tests de corrélations ont tous deux montré que certaines variables d'occupation du sol étaient corrélées à certaines caractéristiques d'obstacles à l'écoulement. En effet, il a été montré que :

- le nombre d'obstacles, les épis en rivières et les hauteurs d'obstacles indéterminées sont plutôt corrélés aux "espaces ouverts sans ou avec peu de végétation";
- les barrages, certains seuils en rivière et obstacles d'une hauteur de 3 à plus de 10 m sont corrélés aux "forêts, milieux à végétation arbustive et herbacée" ;
- les obstacles induits par un pont sont corrélés au "tissu urbain continu", au "tissu urbain discontinu", aux "zones industrielles et commerciales" et aux "Réseaux routiers et ferroviaires et espaces associés, zones portuaires, aéroports".

Cependant, certaines occupations du sol dominantes comme les "terres arables et zones agricoles hétérogènes" et les "prairies, pelouses et pâturages naturels" ne sont pas corrélés aux obstacles.

Des études complémentaires doivent être menées sur les obstacles spécifiquement, sur l'éventuel lien entre l'occupation du sol et la présence ou l'absence d'obstacle à l'écoulement en rivière, sur d'autres variables ou encore sur d'autres territoires.

BIBLIOGRAPHIE

- ACADEMIC. (2010). *Regime pluvio-nival*. Dictionnaires et Encyclopédies sur « Academic ». <https://fr-academic.com/dic.nsf/frwiki/1419294>
- Actu-Environnement. (2019). *L'actualité de l'Environnement*. Actu-Environnement; Actu-environnement. <https://www.actu-environnement.com/>
- AELB. (2017). *Qualité des eaux en Loire-Bretagne—Agence—Agence de l'eau Loire-bretagne*. <https://agence.eau-loire-bretagne.fr/home/bassin-loire-bretagne/zoom-sur-la-qualite-des-eaux-en-loire-bretagne-2020/qualite-des-eaux-en-loire-bretagne.html>
- ArcGIS Pro 2.9. (2022). *Qu'est-ce que ModelBuilder ?—ArcGIS Pro | Documentation*. <https://pro.arcgis.com/fr/pro-app/latest/help/analysis/geoprocessing/modelbuilder/what-is-modelbuilder-.htm>
- Belletti, B., Garcia de Leaniz, C., Jones, J., Bizzi, S., Börger, L., Segura, G., Castelletti, A., van de Bund, W., Aarestrup, K., Barry, J., Belka, K., Berkhuisen, A., Birnie-Gauvin, K., Bussettini, M., Carolli, M., Consuegra, S., Dopico, E., Feierfeil, T., Fernández, S., ... Zalewski, M. (2020). More than one million barriers fragment Europe's rivers. *Nature*, 588(7838), 436-441. <https://doi.org/10.1038/s41586-020-3005-2>
- Charrais, J. (2013). *Vers la définition du transport solide suffisant en rivière : Utilisation d'indicateurs biologiques Etude bibliographique et propositions d'indices*.
- CNRTL. (2012). *Centre National de Ressources Textuelles et Lexicales*. <https://www.cnrtl.fr/definition/charriage>
- Di Pietro, F. (2018). *La Loire, un fleuve pas si sauvage*. *Revue* 303(153), 23-27p. <https://doi.org/Research Gates 340105607>
- Di Pietro, F., Mehdi, L., Chaudron, C., & Moyon, F. (2017). Le lit endigué de la Loire moyenne : De l'image de fleuve sauvage à la reconnaissance de son caractère anthropisé. *Noroi*, 242, 7-23. <https://doi.org/10.4000/noroi.6030>
- Garnier, A., Dufour, S., Lespez, L., Caillaut, S., & Delahaye, D. (2014). Analyse spatiotemporelle de la dynamique fluviale d'un cours d'eau sahélo-soudanien entre 1967 et 2007. Le cas du Yamé au pays Dogon (Mali, Afrique de l'Ouest). *Revue internationale de géomatique*, 24(3), 279-306. <https://doi.org/10.3166/rig.24.279-306>
- Germaine, M.-A., & Barraud, R. (2013). Restauration écologique et processus de patrimonialisation des rivières dans l'Ouest de la France. *VertigO, Hors-série* 16. <https://doi.org/10.4000/vertigo.13583>
- Glossaire eau. (2021). *Glossaire eau, milieux marins et biodiversité*. <http://www.glossaire-eau.fr/>
- Le Robert. (2021). *Éditions Le Robert : La référence en langues pour définir, traduire, corriger et certifier - Dictionnaire Le Robert*. <https://www.lerobert.com/>

- LegiFrance. (2010). *Article L211-1—Code de l'environnement*. https://www.legifrance.gouv.fr/codes/article_lc/LEGIARTI000006832982/2007-10-16
- LegiFrance. (2020). *Décret n° 2020-828 du 30 juin 2020 modifiant la nomenclature et la procédure en matière de police de l'eau*. <https://www.legifrance.gouv.fr/jorf/id/JORFTEXT000042070963>
- Ministère de la culture. (2021). *Le patrimoine mondial de l'Unesco*. http://www.sdap-37.culture.gouv.fr/index.php?option=com_content&view=article&id=87&Itemid=64#:
- Ministère de la transition écologique. (2012). *Nomenclature standard Corine Land Cover et les spécificités DOM*. <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/corine-land-cover-0>
- Rakotomalala, R. (2012). *Didacticiel—Étude de cas*. http://eric.univ-lyon2.fr/~ricco/tanagra/fichiers/fr_Tanagra_Nb_Components_PCA.pdf
- Rode, S. (2010). De l'aménagement au ménagement des cours d'eau : Le bassin de la Loire, miroir de l'évolution des rapports entre aménagement fluvial et environnement. *Cybergeo: European Journal of Geography*. <https://doi.org/10.4000/cybergeo.23253>
- Sandre. (2013). *La BD CARTHAGE en licence ouverte / open licence* [Text]. <https://www.sandre.eaufrance.fr/actualite/la-bd-carthage-en-licence-ouverte-open-licence>
- Sandre. (2014). *Type d'ouvrage—Referentiels—Nomenclatures*. <https://www.sandre.eaufrance.fr/.https://www.sandre.eaufrance.fr/?urn=urn:sandre:donnees:284:::referentiel:3.1:html>
- Sandre. (2021). *Atlas Catalogue du Sandre*. <https://www.sandre.eaufrance.fr/atlas/srv/fre/catalog.search;jsessionid=node02vnyxpeqnvti1xfyj8oz37azo355044.node0#/metadata/070df464-73d3-4c00-be2f-93f2a97ef8f5>
- Souchon, Y., Andriamahefa, H., Cohen, P., Breil, P., Pella, H., Lamouroux, N., Malavoi, J. R., & Wasson, J. G. (2000). *Régionalisation de l'habitat aquatique dans le bassin de la Loire. Rapport final Agence de l'eau Loire Bretagne* (Cemagref, Belinra, p. 296).
- Tormos, T. (2010). *Analyse à l'échelle régionale de l'impact de l'occupation du sol dans les corridors rivulaires sur l'état écologique des cours d'eau*. Institut des Sciences et Industries du Vivant et de l'Environnement (Agro Paris Tech).
- Tourisme Sancerre. (2021). *La Loire, fleuve sauvage*. <https://www.tourisme-sancerre.com/la-destination/nos-incontournables/loire-fleuve-sauvage/>
- UNESCO. (1972). *Convention concernant la protection du patrimoine mondial, culturel et naturel*. <https://whc.unesco.org/fr/conventiontexte/>

ANNEXES

Annexe 1: Nomenclature Corine Land Cover - standard et les spécificités des DOM	I
Annexe 2: Tableau des pourcentages de surface d'occupation du sol des tronçons avec et sans obstacle pour l'analyse de Mann et Whitney	VI
Annexe 3: Tableau synthétique de la méthode de calcul des rangs de Mann et Whitney	VII
Annexe 4: Table de Mann et Whitney pour un test bilatéral - au seuil $\alpha=0.05$	VIII
Annexe 5: Modèle Builder ayant servi sous ArcMap pour construire les tronçons d'études avec une longueur constante et une largeur dépendant du rang de Strahler	IX
Annexe 6: Modèle Builder ayant servi sous ArcMap pour découper la couche CLC en 14 couches correspondant aux variables occupation du sol étudiée	IX
Annexe 7: Modèle Builder ayant servi sous ArcMap pour découper les 14 couches variables sur 1 tronçon étudié	X
Annexe 8: Modèle Builder ayant servi sous ArcMap pour calculer les surfaces de recouvrement des 14 couches variables sur 1 tronçon étudié	X
Annexe 9: Modèle Builder ayant servi sous ArcMap pour regrouper les données d'occupation du sol des 140 tronçons étudiés sous une seule et même table	XI

Nomenclature standard

Le programme CORINE Land Cover repose sur une nomenclature standard hiérarchisée en 3 niveaux. Elle comprend 44 postes répartis selon 5 grands types d'occupation du territoire :

- territoires artificialisés ;
- territoires agricoles ;
- forêts et milieux semi-naturels ;
- zones humides ;
- surfaces en eau.

1. Territoires artificialisés

11. Zones urbanisées

111. Tissu urbain continu

Espaces structurés par des bâtiments. Les bâtiments, la voirie et les surfaces artificiellement recouvertes occupent la quasi-totalité du sol. Plus de 80 % de la surface est imperméable. La végétation non linéaire et le sol nu sont exceptionnels.

112. Tissu urbain discontinu

Espaces structurés par des bâtiments. Les bâtiments, la voirie et les surfaces artificiellement recouvertes coexistent avec des surfaces végétalisées et du sol nu, qui occupent de manière discontinue des surfaces non négligeables. Entre 30 et 80 %, de la surface est imperméable.

12. Zones industrielles ou commerciales et réseaux de communication

121. Zones industrielles ou commerciales et installations publiques

Zones bâties et recouvertes artificiellement (zones cimentées, goudronnées, asphaltées ou stabilisées : terre battue, par exemple). Ces zones peuvent comprendre aussi de la végétation ou d'autres surfaces non imperméabilisées. Elles servent à une utilisation industrielle ou commerciale, ou bien à des équipements de service public.

122. Réseaux routier et ferroviaire et espaces associés

Autoroutes, voies ferrées, y compris les surfaces annexes (gares, quais, remblais, végétation de moins de 100 m de large). Largeur minimale prise en compte : 100 m.

123. Zones portuaires

Infrastructures des zones portuaires, y compris les quais, les chantiers navals et les ports de plaisance.

124. Aéroports

Infrastructures des aéroports : pistes, bâtiments et surfaces associées. Tous les équipements au sol qui servent au transport aérien.

1.3. Mines, décharges et chantiers

131. Extraction de matériaux

Extraction à ciel ouvert de matériaux de construction (sablères, carrières) ou d'autres matériaux (mines à ciel ouvert). Y compris gravières sous eau, à l'exception toutefois des extractions dans le lit des rivières.

132. Décharges

Décharges et dépôts des mines, des industries ou des collectivités publiques.

133. Chantiers

Espaces en construction, excavations et sols remaniés.

14. Espaces verts artificialisés, non agricoles

141. Espaces verts urbains

Espaces végétalisés inclus dans le tissu urbain, généralement à but récréatif ou ornemental et accessible au public. Y compris parcs urbains et cimetières avec végétation.

142. Équipements sportifs et de loisirs

Infrastructures des terrains de camping, des terrains de sport, des parcs de loisirs, des golfs, des hippodromes, etc. Y compris les parcs aménagés non inclus dans le tissu urbain.

2. Territoires agricoles

21. Terres arables

211. Terres arables hors périmètres d'irrigation

Cultures annuelles pluviales, y compris les jachères, incluses dans un système de rotation. Y compris les cultures irriguées occasionnellement par aspersion, sans équipement permanent.

212. Périmètres irrigués en permanence

Cultures irriguées en permanence ou périodiquement, grâce à une infrastructure permanente (canal d'irrigation, réseau de drainage et autres installations). Une grande partie de ces cultures ne pourrait pas être cultivée sans l'apport artificiel d'eau. Non compris les surfaces irriguées occasionnellement.

213. Rizières

Surfaces aménagées pour la culture du riz. Terrains plats avec canaux d'irrigation. Surfaces régulièrement recouvertes d'eau.

22. Cultures permanentes

221. Vignobles

Surfaces plantées de vignes.

222. Vergers et petits fruits

Parcelles plantées d'arbres fruitiers ou d'arbustes fruitiers : cultures pures ou mélanges d'espèces fruitières, arbres fruitiers en association avec des surfaces toujours en herbe. Y compris les châtaigneraies et les noiseraies.

223. Oliveraies

Surfaces plantées d'oliviers, y compris oliviers et vignes sur la même parcelle.

23. Prairies

231. Prairies et autres surfaces toujours en herbe à usage agricole

Surfaces enherbées denses de composition floristique constituée principalement de graminées, non incluses dans un assolement. Principalement pâturées, mais dont le fourrage peut être récolté mécaniquement. Y compris des zones avec haies (bocages).

24. Zones agricoles hétérogènes

241. Cultures annuelles associées à des cultures permanentes

Cultures temporaires en association avec des cultures permanentes sur les mêmes parcelles.

242. Systèmes cultureux et parcellaires complexes

Mosaïque de petites parcelles de cultures annuelles diversifiées, de prairies et/ou de cultures permanentes complexes, avec éventuellement des maisons et jardins épars.

243. Surfaces essentiellement agricoles, interrompues par des espaces naturels importants

Surfaces essentiellement agricoles, interrompues par des zones naturelles ou semi-naturelles (y compris des zones humides, des plans d'eau ou des affleurements rocheux).

244. Territoires agroforestiers

Cultures annuelles ou pâturages sous couvert arboré composé d'espèces forestières.

3. Forêts et milieux semi-naturels

31. Forêts

311. Forêts de feuillus

Formations végétales principalement constituées par des arbres, mais aussi par des buissons et arbustes en sous-étage, où dominent les espèces forestières feuillues.

312. Forêts de conifères

Formations végétales principalement constituées par des arbres, mais aussi par des buissons et arbustes en sous-étage, où dominent les espèces forestières de conifères.

313. Forêts mélangées

Formations végétales principalement constituées par des arbres, mais aussi par des buissons et arbustes en sous-étage, où ni les feuillus ni les conifères ne dominent.

32. Milieux à végétation arbustive et/ou herbacée

321. Pelouses et pâturages naturels

Herbages de faible productivité, non soumis ou peu soumis à l'influence de l'homme. Souvent situés dans des zones accidentées. Comportent fréquemment des surfaces rocheuses ou des zones d'autre végétation (semi-) naturelle.

322. Landes et broussailles

Formations végétales basses et fermées, composées principalement de buissons, d'arbustes et de plantes herbacées (bruyères, ronces, genêts, ajoncs, cytises, etc.).

323. Végétation sclérophylle

Végétation arbustive persistante. Y compris maquis, matorrals et garrigues.

324. Forêt et végétation arbustive en mutation

Végétation arbustive et herbacée avec arbres épars. Formations pouvant résulter de la dégradation de la forêt ou d'une recolonisation/régénération de la forêt.

33. Espaces ouverts, sans ou avec peu de végétation

331. Plages, dunes et sable

Étendues de sable, de galets et de graviers, du milieu littoral et continental, naturellement sans végétation, comme les plages, les dunes et les lits de graviers. Y compris les lits des rivières à régime torrentiel.

332. Roches nues

Éboulis, falaises, affleurements rocheux, y compris des zones d'érosion active, rochers et récifs situés au-dessus du niveau des hautes eaux, zones salées intérieures.

333. Végétation clairsemée

Zones à végétation clairsemée, couvrant de 10 à 50 % de la surface. Comprends les steppes, les toundras, les « badlands », les zones karstiques et la végétation éparse de haute altitude.

334. Zones incendiées

Zones affectées par des incendies récents, les matériaux carbonisés étant encore présents.

335. Glaciers et neiges éternelles

Surfaces couvertes par des glaciers ou des neiges éternelles.

4. Zones humides

41. Zones humides intérieures

411. Marais intérieurs

Terres basses généralement inondées en hiver et plus ou moins saturées d'eau en toutes saisons.

412. Tourbières

Terrains spongieux humides dont le sol est constitué principalement de mousses et de matières végétales décomposées (principalement des sphaignes). Tourbières exploitées ou non.

42. Zones humides côtières

421. Marais maritimes

Terres basses avec végétation, situées au-dessus du niveau de marée haute, susceptibles d'être inondées par les eaux de mer. Souvent en voie de colmatage par des sédiments, colonisés petit à petit par des plantes halophiles (vivant en milieu salé).

422. Marais salants

Salines actives ou en voie d'abandon. Parties des marais maritimes mises en exploitation pour la production de sel par évaporation. Les marais salants se distinguent nettement du reste des marais par leurs parcelles d'exploitation et leur système de digues.

423. Zones intertidales

Zones côtières sous l'influence de la marée, régulièrement inondées par l'eau de mer 2 fois par jour. Étendues de vase, de sable ou de rochers, généralement sans végétation, comprises entre le niveau des hautes et des basses eaux.

5. Surfaces en eau

51. Eaux continentales

511. Cours et voies d'eau

Cours d'eau naturels ou artificiels qui servent de chenal d'écoulement des eaux. Y compris les canaux. Largeur minimale de prise en compte : 100 m.

512. Plans d'eau

Étendues d'eau, naturelle ou artificielle, de plus de 25 hectares, couvertes d'eau stagnante la plus grande partie de l'année.

52. Eaux maritimes

521. Lagunes littorales

Étendues d'eau salée ou saumâtre sans végétation, séparées de la mer par des avancées de terre ou autres topographies similaires. Ces surfaces en eau peuvent être connectées à la mer à certains endroits ponctuels, soit de façon permanente, soit de façon périodique à certains moments de l'année.

522. Estuaires

Parties terminales à l'embouchure des fleuves, subissant l'influence du flux et reflux des marées.

523. Mers et océans

Zones au-delà de la limite des plus basses marées.

Spécificités de la nomenclature DOM

Pour prendre en compte les spécificités des DOM, 6 postes supplémentaires ont été créés dans un 4^{ème} niveau de la nomenclature standard. Ces 6 postes sont : canne à sucre, bananeraies, palmeraies, cafiers, mangroves et cours et voies d'eau temporaires.

Le poste 211 est subdivisé en 2 postes de niveau 4 :

2111. Terres arables hors périmètres d'irrigation

Cultures annuelles pluviales, y compris les jachères, incluses dans un système de rotation. Y compris les cultures irriguées occasionnellement par aspersion, sans équipement permanent.

2112. Canne à sucre

Espaces occupés par des plantations de canne à sucre, quel que soit le stade végétatif atteint.

Le poste 222 est subdivisé en 4 postes de niveau 4 :

2221. Vergers et petits fruits

Parcelles plantées d'arbres fruitiers ou d'arbustes fruitiers : cultures pures ou mélanges d'espèces fruitières, arbres fruitiers en association avec des surfaces toujours en herbe. Y compris les châtaigneraies, les noiseraies, les plantations d'agrumes (oranges, citrons, etc.), de manguiers, de goyaviers, d'avocats, etc.

2222. Bananeraies

Espaces occupés par des plantations de bananiers.

2223. Palmeraies

Espaces occupés par divers palmiers de production, dont les espèces oléifères et/ou fruitières, les cocotiers, les dattiers.

2224. Cafésiers

Surfaces plantées de cafésiers soit en plantation unique soit en association avec des espèces arborées (cafésiers sous ombrage).

Le poste 311 est subdivisé en 2 postes de niveau 4 :

3111. Forêts de feuillus

Formations végétales principalement constituées par des arbres, mais aussi par des buissons et arbustes en sous-étage, où dominent les espèces forestières feuillues. Y compris les forêts sempervirentes.

3112. Mangroves

Forêts humides tropicales se développant dans les vasières sur les côtes basses.

Le poste 511 est subdivisé en 2 postes de niveau 4 :

5111. Cours et voies d'eau

Cours d'eau naturels ou artificiels qui servent de chenal d'écoulement des eaux. Y compris les canaux. Largeur minimale de prise en compte : 50 m.

5112. Cours et voies d'eau temporaires

Cours d'eau ou parties de cours d'eau dont l'écoulement dépend directement des précipitations et dont le lit est complètement à sec à certaines périodes. Largeur minimale prise en compte : 50 m.

Annexe 2: Tableau des pourcentages de surface d'occupation du sol des tronçons avec et sans obstacle pour l'analyse de Mann et Whitney

Occupation du sol (variable explicative)	% occupation du sol CLC	
	tronçons sans obstacles	tronçons avec obstacles
1	0.068783575	0.701361252
2	9.845625814	16.4700645
3	1.854884663	3.28261241
4	0.437611802	0.534944974
5	0.659700055	0.374010052
6	0.064501377	0.196480871
7	0.392961479	0.780991552
8	43.25675649	34.0193756
9	3.334970897	1.977918328
10	16.45000325	19.34870105
11	13.28099555	10.67926655
12	0.584271799	0.847755944
13	0.922399407	1.673139209

Annexe 3: Tableau synthétique de la méthode de calcul des rangs de Mann et Whitney

Valeur mesurée	Origine	Méthode des rangs	
		tronçons sans obstacles	tronçons avec obstacles
0.064501377	tronçons sans obstacles	1	
0.068783575	tronçons sans obstacles	2	
0.196480871	tronçons avec obstacles		3
0.374010052	tronçons avec obstacles		4
0.392961479	tronçons sans obstacles	5	
0.437611802	tronçons sans obstacles	6	
0.534944974	tronçons avec obstacles		7
0.584271799	tronçons sans obstacles	8	
0.659700055	tronçons sans obstacles	9	
0.701361252	tronçons avec obstacles		10
0.780991552	tronçons avec obstacles		11
0.847755944	tronçons avec obstacles		12
0.922399407	tronçons sans obstacles	13	
1.673139209	tronçons avec obstacles		14
1.854884663	tronçons sans obstacles	15	
1.977918328	tronçons avec obstacles		16
3.28261241	tronçons avec obstacles		17
3.334970897	tronçons sans obstacles	18	
9.845625814	tronçons sans obstacles	19	
10.67926655	tronçons avec obstacles		20
13.28099555	tronçons sans obstacles	21	
16.45000325	tronçons sans obstacles	22	
16.4700645	tronçons avec obstacles		23
19.34870105	tronçons avec obstacles		24
34.0193756	tronçons avec obstacles		25
43.25675649	tronçons sans obstacles	26	
Somme		165	186
N		13	13
$N(N+1)/2$		91	91
$U (=Somme-N(N+1)/2)$		74	95
Umin		74	
Useuil (table des U de Mann-Whitney)		45	

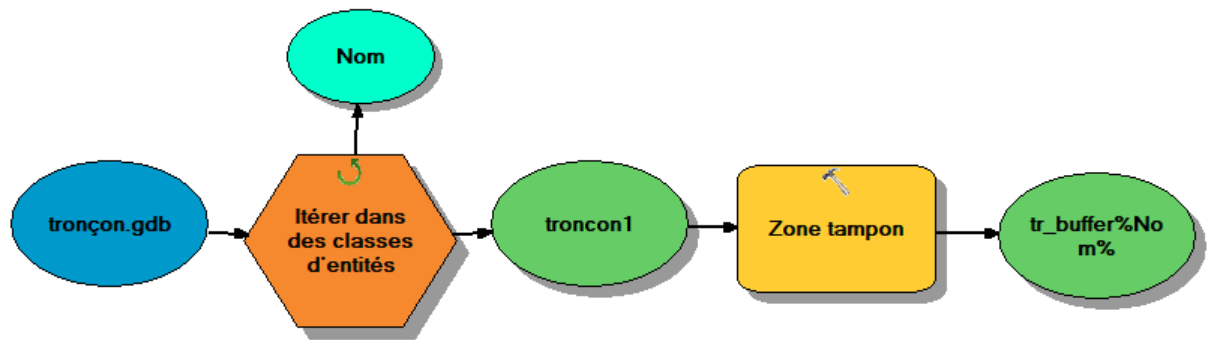
TABLE DE MANN-WHITNEY

Valeurs critiques (U_{crit}) à comparer avec la valeur observée (U_{obs}) à partir de vos 2 échantillons pour un test **bilatéral** au seuil $\alpha = 0.05$ ou **0.01**.

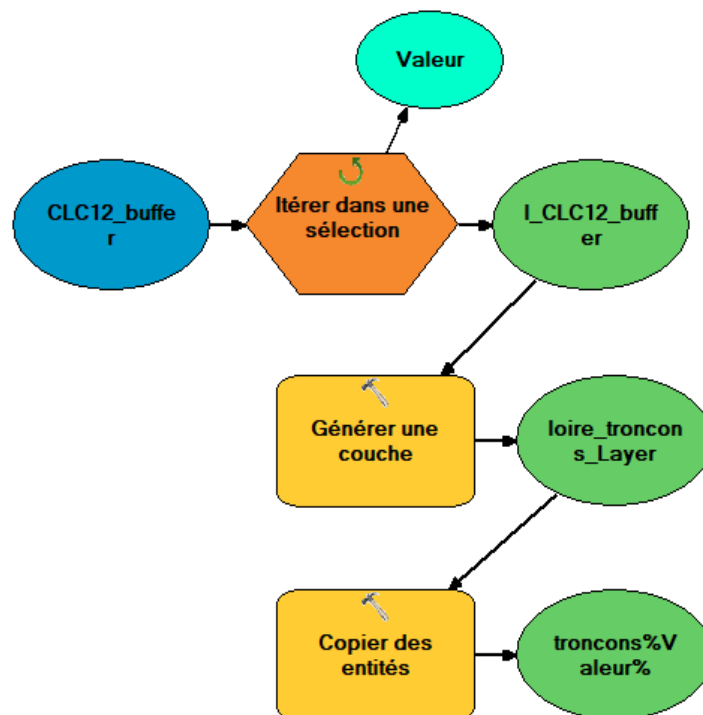
NB : n_1 et n_2 représentent le nombre d'observations dans chaque échantillon.

n ₂	α	n ₁																		
		3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	
3	.05	--	0	0	1	1	2	2	3	3	4	4	5	5	6	6	7	7	8	
	.01	--	0	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	2	2	2	3	3	3	
4	.05	--	0	1	2	3	4	4	5	6	7	8	9	10	11	11	12	13	14	
	.01	--	--	0	0	0	1	1	2	2	3	3	4	5	5	6	6	7	8	
5	.05	0	1	2	3	5	6	7	8	9	11	12	13	14	15	17	18	19	20	
	.01	--	--	0	1	1	2	3	4	5	6	7	7	8	9	10	11	12	13	
6	.05	1	2	3	5	6	8	10	11	13	14	16	17	19	21	22	24	25	27	
	.01	--	0	1	2	3	4	5	6	7	9	10	11	12	13	15	16	17	18	
7	.05	1	3	5	6	8	10	12	14	16	18	20	22	24	26	28	30	32	34	
	.01	--	0	1	3	4	6	7	9	10	12	13	15	16	18	19	21	22	24	
8	.05	2	4	6	8	10	13	15	17	19	22	24	26	29	31	34	36	38	41	
	.01	--	1	2	4	6	7	9	11	13	15	17	18	20	22	24	26	28	30	
9	.05	2	4	7	10	12	15	17	20	23	26	28	31	34	37	39	42	45	48	
	.01	0	1	3	5	7	9	11	13	16	18	20	22	24	27	29	31	33	36	
10	.05	3	5	8	11	14	17	20	23	26	29	33	36	39	42	45	48	52	55	
	.01	0	2	4	6	9	11	13	16	18	21	24	26	29	31	34	37	39	42	
11	.05	3	6	9	13	16	19	23	26	30	33	37	40	44	47	51	55	58	62	
	.01	0	2	5	7	10	13	16	18	21	24	27	30	33	36	39	42	45	48	
12	.05	4	7	11	14	18	22	26	29	33	37	41	45	49	53	57	61	65	69	
	.01	1	3	6	9	12	15	18	21	24	27	31	34	37	41	44	47	51	54	
13	.05	4	8	12	16	20	24	28	33	37	41	45	50	54	59	63	67	72	76	
	.01	1	3	7	10	13	17	20	24	27	31	34	38	42	45	49	53	56	60	
14	.05	5	9	13	17	22	26	31	36	40	45	50	55	59	64	67	74	78	83	
	.01	1	4	7	11	15	18	22	26	30	34	38	42	46	50	54	58	63	67	
15	.05	5	10	14	19	24	29	34	39	44	49	54	59	64	70	75	80	85	90	
	.01	2	5	8	12	16	20	24	29	33	37	42	46	51	55	60	64	69	73	
16	.05	6	11	15	21	26	31	37	42	47	53	59	64	70	75	81	86	92	98	
	.01	2	5	9	13	18	22	27	31	36	41	45	50	55	60	65	70	74	79	
17	.05	6	11	17	22	28	34	39	45	51	57	63	67	75	81	87	93	99	105	
	.01	2	6	10	15	19	24	29	34	39	44	49	54	60	65	70	75	81	86	
18	.05	7	12	18	24	30	36	42	48	55	61	67	74	80	86	93	99	106	112	
	.01	2	6	11	16	21	26	31	37	42	47	53	58	64	70	75	81	87	92	
19	.05	7	13	19	25	32	38	45	52	58	65	72	78	85	92	99	106	113	119	
	.01	3	7	12	17	22	28	33	39	45	51	56	63	69	74	81	87	93	99	
20	.05	8	14	20	27	34	41	48	55	62	69	76	83	90	98	105	112	119	127	
	.01	3	8	13	18	24	30	36	42	48	54	60	67	73	79	86	92	99	105	

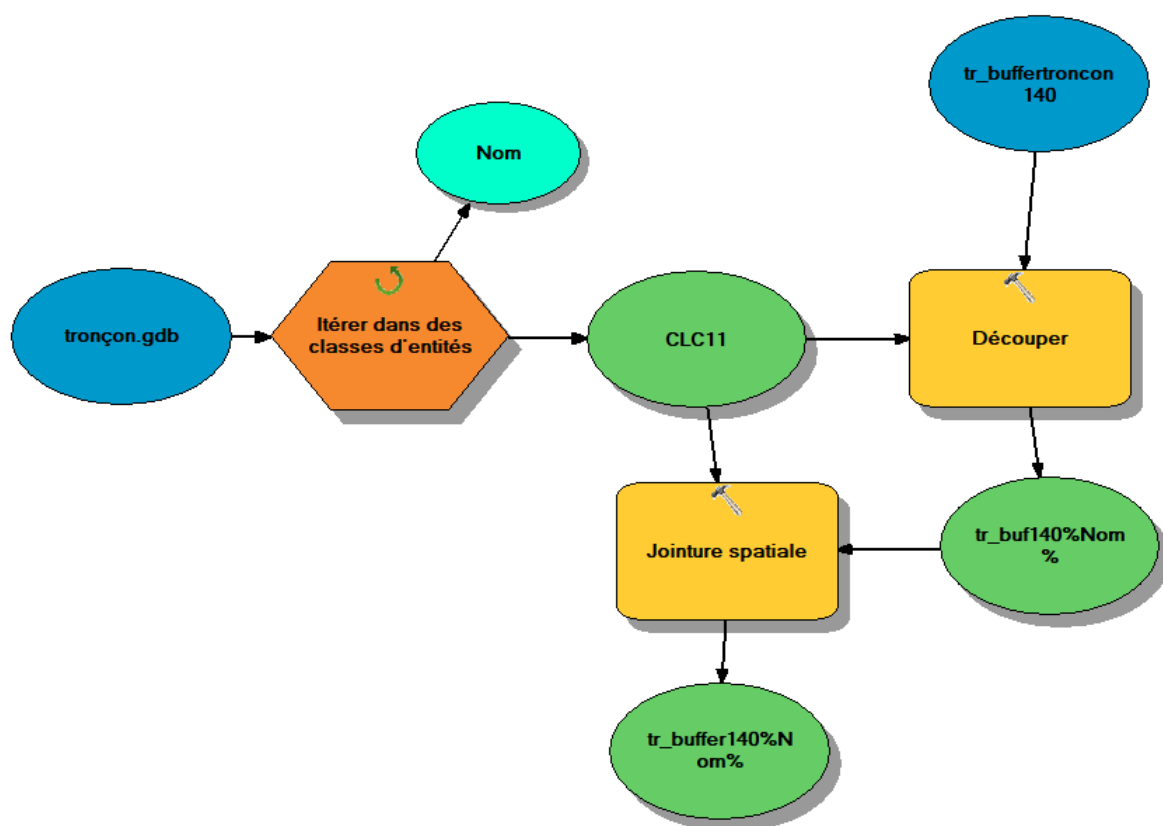
Annexe 5: Modèle Builder ayant servi sous ArcMap pour construire les tronçons d'études avec une longueur constante et une largeur dépendant du rang de Strahler



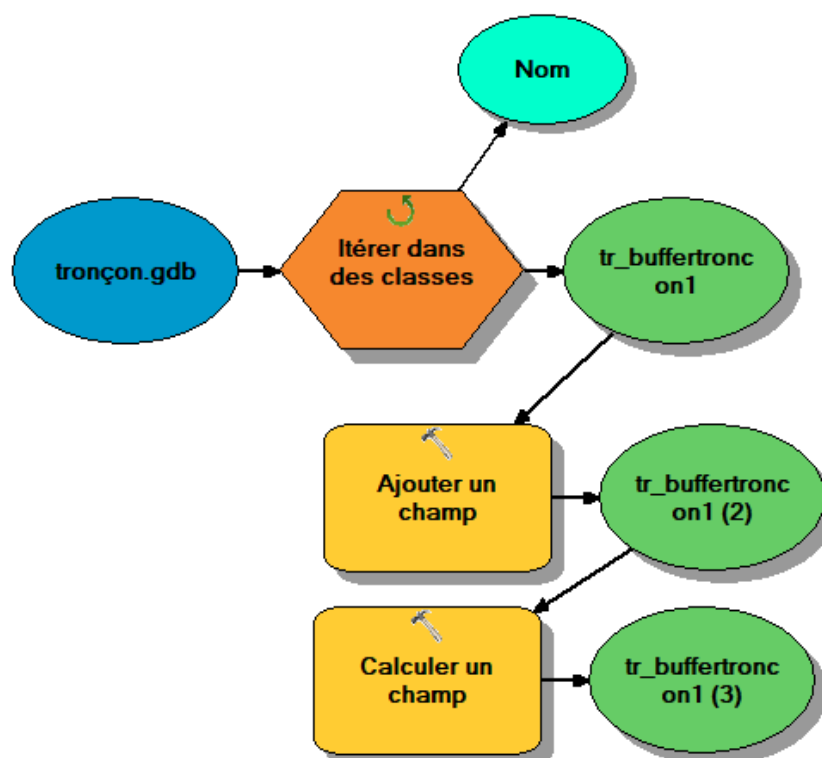
Annexe 6: Modèle Builder ayant servi sous ArcMap pour découper la couche CLC en 14 couches correspondant aux variables occupation du sol étudiée



Annexe 7: Modèle Builder ayant servi sous ArcMap pour découper les 14 couches variables sur 1 tronçon étudié



Annexe 8: Modèle Builder ayant servi sous ArcMap pour calculer les surfaces de recouvrement des 14 couches variables sur 1 tronçon étudié



Annexe 9: Modèle Builder ayant servi sous ArcMap pour regrouper les données d'occupation du sol des 140 tronçons étudiés sous une seule et même table

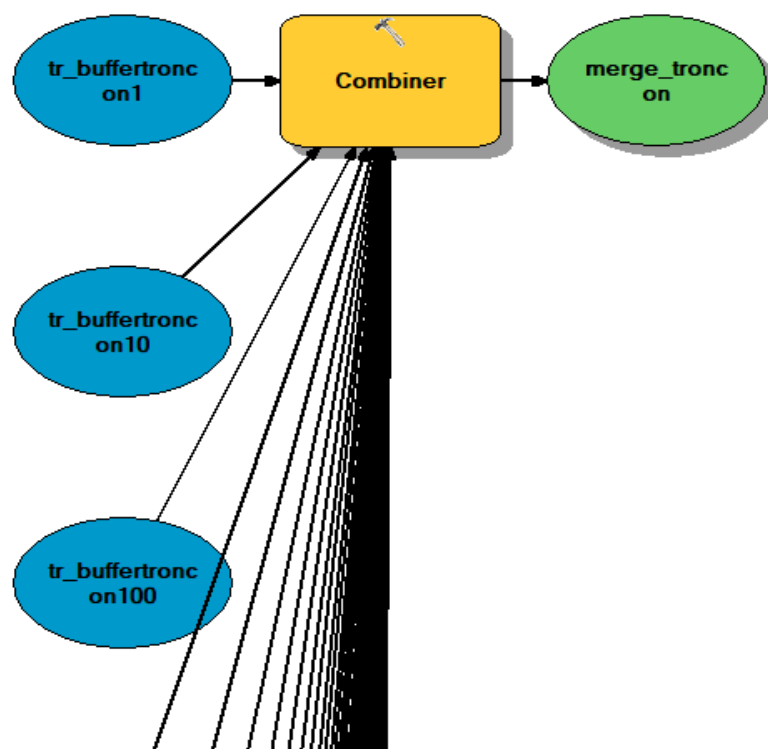


TABLE DES MATIÈRES

AVERTISSEMENTS	1
REMERCIEMENTS	3
SOMMAIRE	4
RÉSUMÉ	5
ABSTRACT	5
GLOSSAIRE	6
SIGLE	8
TABLE DES FIGURES	9
TABLE DES TABLEAUX	10
1. Contexte de l'étude : Notion de discontinuité écologique au sein des rivières et définition des termes du sujet	11
2. La Loire, divergence d'opinions entre un fleuve sauvage et un fleuve anthropisé	12
3. Méthode de collecte et de traitement de données d'occupation du sol et d'obstacles à l'écoulement sur l'ensemble du fleuve de la Loire	13
3.1. Collecte de données : Corine Land Cover et Référentiel des Obstacles à l'Écoulement	13
3.2. Détermination des unités, des échelles et des variables de l'étude	14
3.2.1. Délimitation de l'emprise d'occupation du sol autour du linéaire de la Loire	14
3.2.2. Détermination des unités statistiques de l'étude : découpage de l'occupation du sol en tronçons homogènes	15
3.2.3. Détermination des variables d'occupation du sol et d'obstacles à l'écoulement pour l'étude	16
3.3. Analyses statistiques des variables d'occupation du sol et des obstacles à l'écoulement	19
3.3.1. L'Analyse Canonique des Correspondances : Détermination d'un éventuel lien entre obstacles à l'écoulement et occupation du sol	19
3.3.2. Test de Mann et Whitney : Vérification de la distribution de l'occupation du sol sur des tronçons avec ou sans obstacle à l'écoulement	20

3.3.3. Test de corrélation Bravais-Pearson : Détermination du degré de relation entre les variables d'occupation du sol et les variables d'obstacle à l'écoulement.....	21
3.4. Protocole de prétraitement des données sous logiciel de géomatique ArcMap version 10.5.1.....	22
4. Résultats	28
4.1. Vérification de la distribution de l'occupation du sol sur des tronçons avec ou sans obstacle à l'écoulement.....	28
4.2. L'Analyse Canonique des Correspondances : Détermination d'un éventuel lien entre obstacles à l'écoulement et occupation du sol avec une ACC	31
4.3. Confrontation des variables potentiellement corrélées sous l'ACC avec des tests de Bravais-Pearson	36
5. Discussion	41
5.1. Analyse des résultats de l'étude menée sur les différentes échelles de discontinuité écologique sur la Loire.....	41
5.2. Retour réflexif sur la mise en place et le déroulé de l'étude	43
6. Conclusion.....	45
BIBLIOGRAPHIE	46
ANNEXES.....	48

Directeur de recherche :

Francesca DI PIETRO

DUSSEAUX Nell

GOUBI Anaëlle

PFE/DAE5

2021-2022

**Département Génie de l'Aménagement et de l'environnement - Filière Ingénierie des Milieux
Aquatiques, 5^{ème} année - Promotion 2020-2022**

Les différentes échelles de discontinuité écologiques : le cas de la Loire

RÉSUMÉ

Ce rapport présente notre projet de recherche de fin d'étude sur le sujet "des différentes échelles de discontinuité écologique : le cas de la Loire". De manière plus précise, ce travail vise à chercher un lien entre la présence d'obstacles à l'écoulement et l'occupation du sol environnante. Deux bases de données ont été collectées pour les obstacles à l'écoulement et pour l'occupation du sol à l'échelle de la France puis recentrées à l'échelle de la Loire. Une segmentation du territoire en tronçons et l'identification de 17 variables obstacle et 13 variables occupation du sol ont permis de faire diverses analyses. À l'issue de ces dernières, il a été montré que certains types d'obstacles sont corrélés à certains types d'occupation du sol. C'est notamment le cas pour la présence de pont dans des zones urbanisées ou industrialisées avec des réseaux plus denses ; le cas des épis en rivières avec des espaces plutôt ouverts et dépourvus de végétation ou encore le cas des ouvrages avec une forte hauteur de chute tels que les barrages sur des milieux forestiers. Une analyse plus détaillée est fournie dans cette étude.

Mots-clés : Loire, continuité écologique, obstacles à l'écoulement, occupation du sol