



HAL
open science

Étude des interactions entre les renouées asiatiques et les processus hydrogéomorphologiques

Mathieu Brun

► **To cite this version:**

Mathieu Brun. Étude des interactions entre les renouées asiatiques et les processus hydrogéomorphologiques. Géographie. 2023. dumas-04222362

HAL Id: dumas-04222362

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-04222362v1>

Submitted on 29 Sep 2023

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.



MASTER 2 en **Sciences Humaines et Sociales (SHS)**

Mention **Géographie, Aménagement, Environnement, Développement (GAED)**

Parcours **GÉOSPHERES**

GÉOgraphie, **e**SPaces, **H**omme / **E**nvironnement, **R**essources, **S**ystèmes

***ETUDE DES INTERACTIONS ENTRE LES RENOUVEES
ASIATIQUES ET LES PROCESSUS
HYDROGEOMORPHOLOGIQUES***

Stage réalisé au **Laboratoire EcoSystèmes et Sociétés En Montagne (LESSEM)**
de **INRAE Grenoble**.

Mémoire soutenu le **5 juillet 2023**.

Par **Mathieu BRUN**
M2 GAED-GÉOSPHERES
PROMOTION 2022-2023

Devant un jury composé de :

Directeur de mémoire : **Mme. Pauline DUSSEUX**
Maîtresse de conférences, UGA/UMR Pacte

Examineur : **M. Pierre-Alain AYRAL**
Ingénieur de recherche, UMR ESPACE

Examineur : **M. Laurent BORGNIET**
Ingénieur de recherche, INRAE LESSEM

Etablissements partenaires



RÉSUMÉ

Considérées comme l'une des cinq principales menaces pour la biodiversité dans le monde entier, les Espèces Exotiques Envahissantes menacent l'ensemble des milieux naturels et en particulier les écosystèmes riverains. Sur l'ensemble des Espèces Exotiques Envahissantes d'Europe, le complexe d'espèces connu sous le nom de renouées (*Reynoutria spp*, *Polygonaceae*) est particulièrement préoccupant pour les gestionnaires des milieux naturels. L'étude des interactions entre les processus hydrogéomorphologiques et les renouées asiatiques, encore mal comprises aujourd'hui, ambitionne de prédire la propagation, anticiper les conséquences et réfléchir à des solutions concrètes.

L'objet de ce travail de recherche est de mettre en place un modèle prédictif permettant d'identifier les zones des cours d'eau les plus susceptibles d'être colonisées par les renouées asiatique. En complément d'une première étude réalisée il y a deux ans et à partir de données récoltées lors d'une campagne de terrain poussée, une analyse statistique des caractéristiques biotiques et abiotiques des systèmes fluviaux a permis de mettre en avant les facteurs influençant la présence des renouées asiatiques sur les bancs sédimentaires.

Le modèle statistique mis en place a pour objectif d'informer les acteurs des territoires sur les caractéristiques bio physiques des cours d'eau favorisant l'installation et le maintien des renouées asiatiques et ainsi aider les gestionnaires des rivières à anticiper et protéger les zones les plus sensibles à une colonisation.

ABSTRACT

Considered as one of the five main threats to biodiversity in the world, Invasive Alien Species threaten all natural environments and in particular riparian ecosystems. Of all the Invasive Alien Species in Europe, the complex of species known as knotweeds (*Reynoutria spp*, *Polygonaceae*) is of particular concern for managers of natural environments. The study of the interactions between hydrogeomorphological processes and Asian knotweeds, still poorly understood today, aims to predict the spread, anticipate the consequences and reflect on concrete solutions.

The purpose of this research work is to set up a predictive model to identify the areas of waterways most likely to be colonized by Asian knotweeds. In addition to a first study carried out two years ago and based on data determined during an extensive field campaign, a statistical analysis of the biotic and abiotic characteristics of river systems has made it possible to highlight the factors influencing the presence Asian knotweeds on sedimentary banks.

The purpose of the statistical model put in place is to inform the actors of the territories about the biophysical characteristics of the rivers favoring the establishment and maintenance of Asian knotweeds and thus help the managers of the rivers to anticipate and protect areas most susceptible to colonization.

MOTS CLES

Renouées asiatiques ; Espèces Exotiques Envahissantes ; Hydrogéomorphologie ; Biogéomorphologie ; Systèmes fluviaux ; Modèle de distribution d'espèces ; Modèle statistique ; GLMM

KEY WORDS

Asian knotweeds ; Invasive Alien Species ; Hydrogeomorphology ; Biogeomorphology ; River systems ; Species Distribution Model ; Statistical model ; GLMM

REMERCIEMENTS

La rédaction de ce mémoire et la soutenance qui va suivre marquent la fin de ces deux années de formation passées à Grenoble et le début de nouvelles perspectives encore mystérieuses.

Toutes les personnes rencontrées ces deux années méritent mes remerciements puisque chacune des discussions que j'ai pu avoir avec elles m'auront fait grandir aussi bien humainement que professionnellement.

Je tiens toutefois à remercier plus spécialement les responsables du Master GAED – GEOIDES, Sandra Rome et Sylvain Bigot et les responsables du master GAED – GEOSPHERES, Nathalie Dubus et Jean-Jacques Delannoy. Sans eux, les deux masters n'existeraient pas et l'intérêt que j'ai acquis pour la Géographie n'aurait pas vu le jour. Je remercie également toute l'équipe pédagogique de ces deux formations pour la qualité des enseignements dispensés et la richesse des échanges.

Je remercie plus particulièrement Pauline Dusseux et Simon Meynier, respectivement maitresse de conférences et enseignant à l'Institut d'Urbanisme et de Géographie Alpine et au laboratoire Pacte. Pauline Dusseux a accepté de m'encadrer lors de ce stage et a fait preuve de beaucoup de professionnalisme, de patience et de réactivité. Simon Meynier, quant à lui, a organisé des séances de préparations au mémoire qui m'auront été bien utiles.

Je tiens sincèrement à remercier Fanny Dommanget, Marie Didier et Laurent Borgniet, du Laboratoire Ecosystèmes et Sociétés En Montagne de INRAE Grenoble, de m'avoir fait confiance en acceptant de me recruter dans le cadre de ce stage. Leur encadrement accompagné de précieux conseils et d'échanges enrichissants ont été d'une grande richesse et me suivront, certainement, dans mon parcours personnel et professionnel.

Je remercie également André Evette, du Laboratoire Ecosystèmes et Sociétés En Montagne de INRAE Grenoble et Caroline Le Bouteiller, de l'Institut des Géosciences de l'Environnement, d'avoir participé à mon encadrement et de m'avoir donné des avis bien éclairés.

Enfin, je remercie toutes les personnes du centre INRAE de Grenoble, permanents, CDD, doctorants et stagiaires de m'avoir prodigué de nombreux conseils tant sur le stage, que sur mes perspectives de carrières ou que sur un plan plus personnel.

L'ensemble de ces rencontres m'ont permis de me rendre compte des exigences du métier de chercheur et ont conforté ma motivation de rester dans le domaine de la recherche scientifique en poursuivant en thèse dans les prochaines années.

SIGLES ET ACRONYMES

ACP = Analyse en Composante Principale

AIC = Critère d'Information d'Akaike

BIC = Critère d'Information de Bayésien

dGPS = GPS différentiel

EEE = Espèces Exotiques Envahissantes

GAED = Géographie, Aménagement, Environnement, Développement

GEOSPHERES = Géographie, eSPaces, Homme / Environnement, REssources, Systèmes

GLM = Generalized Linear Model

GLMM = Generalized Linear Mixed Model

GPS = Global Positioning System

IGE = Institut des Géosciences de l'Environnement

IGN = Institut National de l'Information Géographique et Forestière

INPN = Institut National du Patrimoine Naturel

INRAE = Institut National de Recherche pour l'Agriculture, l'Alimentation et l'Environnement

IUGA = Institut d'Urbanisme et de Géographie Alpine

IPBES = Intergovernmental Science-Policy Platform on Biodiversity and Ecosystem Services

IRC = Infra Rouge Couleur

LESSEM = Laboratoire EcoSystèmes et Sociétés En Montagne

LiDAR HD = Light Detection And Ranging Haute Définition

MNT = Modèle Numérique de Terrain

ONB = Observatoire National de la Biodiversité

RGB = Red-Green-Blue

RVB = Rouge-Vert-Bleu

UGA = Université Grenoble Alpes

UICN = Union International pour la Conservation de la Nature

VIF = Variance Inflation Factor

AVANTS PROPOS

Le Master 2 « Géographie, Aménagement, Environnement Développement parcours GÉOgraphie, eSPaces, Homme / Environnement, REssources, Systèmes » (GAED-GÉOSPHERES) proposé par l'Institut d'Urbanisme et de Géographie Alpine (IUGA) de l'Université Grenoble Alpes (UGA) est organisé en réseau avec l'Université Savoie Mont-Blanc et les Ecoles des Mines de Saint-Etienne et d'Alès. Ce Master offre une formation à et par la recherche et a la volonté de former ses étudiants aux enjeux environnementaux et favoriser l'interdisciplinarité.

Ce présent document correspond au mémoire de recherche réalisé dans le cadre d'un stage effectué au Laboratoire EcoSystèmes et Sociétés En Montagne (LESSEM) de l'Institut National de la Recherche pour l'Agriculture, l'Alimentation et l'Environnement (INRAE – Grenoble). Ce stage, porté par une équipe scientifique pluridisciplinaire avec Fanny Dommanget (écologie des invasions), Marie Didier (écologie et hydrogéomorphologie), Laurent Borgniet (télédétection et géomatique), André Evette (écologie des berges et génie végétal) et Caroline Le Bouteiller (hydrogéomorphologie), cherche à étudier les interactions entre les renouées asiatiques et les processus hydrogéomorphologiques. En 2021, lors de son stage de M2, Marie Didier avait déjà étudié cette thématique. Ce stage se veut donc complémentaire, additionnel et innovant.

Cette thématique de recherche s'inscrit dans les objectifs de formation du Master puisqu'elle étudie une problématique environnementale et offre une approche interdisciplinaire entre recherche (connaissances en écologie, en hydrogéomorphologie ou en biogéomorphologie) et ingénierie environnementale (mobilisation d'outils de télédétection, de cartographie et d'analyses statistiques).

Enfin, il est nécessaire d'indiquer que le stage, support de ce mémoire de recherche, se déroule du 16 janvier au 31 juillet (6 mois avec une interruption pédagogique de 2 semaines). Par conséquent, au moment de rendre ce document, le stage n'est pas fini et les analyses statistiques ne sont pas toutes réalisées. Le choix de légèrement centrer le mémoire sur la méthodologie mise en place a donc été privilégié.

SOMMAIRE

INTRODUCTION	1
A. CONTEXTE GENERAL.....	1
B. OBJECTIFS	2
C. PROBLEMATIQUE	3
D. PRESENTATION DU PLAN.....	4
I. ÉTAT DE L'ART :	6
A. LES INTERACTIONS DES ESPECES EXOTIQUES ENVAHISSANTES AVEC LES MILIEUX NATURELS	6
B. L'INFLUENCE DES PROCESSUS HYDROGEOMORPHOLOGIQUES	9
C. L'INFLUENCE SUR LES PROCESSUS HYDROGEOMORPHOLOGIQUES	10
II. REFLEXIONS PRELIMINAIRES	12
A. HYPOTHESES.....	12
B. CHOIX DU TERRAIN D'ETUDE.....	14
C. CHOIX DES VARIABLES EXPLICATIVES.....	15
D. GRAPHIQUE GENERAL DE SYNTHESE	17
III. MÉTHODOLOGIE	20
A. OUTILS A DISPOSITION	20
B. METHODOLOGIE APPLIQUEE	23
IV. PREMIERS RÉSULTATS ET DISCUSSION	30
A. TESTS STATISTIQUES	30
B. GENERALIZED LINEAR MODEL MIXED (GLMM)	39
C. DISCUSSIONS	43
CONCLUSION ET PERSPECTIVES	46
A. APPORTS.....	46
B. LIMITES.....	46
C. PERSPECTIVES	47

INTRODUCTION

A. CONTEXTE GENERAL

Les Espèces Exotiques sont des espèces végétales ou animales introduites par l'Homme, volontairement ou non, en dehors de leur aire de répartition naturelle. Ces espèces sont considérées comme des Espèces Exotiques Envahissantes (EEE ou espèces invasives) dès lors que leur implantation et leur propagation dans un nouveau biome menacent les écosystèmes, les habitats ou les espèces indigènes avec des conséquences écologiques, économiques et/ou sanitaires négatives (UICN France, 2014). Bien que sous-estimés, 523 espèces invasives continentales et marines en France métropolitaine et en Outre-Mer ont été recensées en 2019 par l'Inventaire National du Patrimoine Naturel recense (INPN et ONB, 2019). Un nouvel indicateur développé récemment pour l'Observatoire National de la Biodiversité, indique qu'un département français voit s'installer en moyenne tous les dix ans 12 nouvelles Espèces Exotiques Envahissantes (ONB, 2021).

La prolifération des Espèces Exotiques Envahissantes représente alors une importante problématique pour le devenir de nombreux écosystèmes et pour les différents usages anthropiques. Il s'agirait même de la seconde menace pesant sur la biodiversité, devant le changement climatique (Bellard, Cassey, et Blackburn, 2016). 1 million d'espèces animales et végétales sont aujourd'hui menacées d'extinction, notamment au cours des prochaines décennies, particulièrement en raison du développement rapide des espèces invasives (IPBES 2019; UICN France 2019). À l'échelle de l'Europe continentale, on estime que les coûts générés par la lutte et la réparation des dégâts causés par les Espèces Exotiques Envahissantes atteignent 12 milliards d'euros par an (Kettunen et al., 2009 ; Renault et al., 2021). Les impacts économiques peuvent concerner la dépréciation des rendements agricoles, les coûts sanitaires, les coûts de contrôle et de gestion de ces espèces sur le terrain, les coûts de restauration des milieux naturels envahis et, de manière plus difficilement quantifiable, les impacts sur les services rendus par les écosystèmes. Enfin, ces espèces peuvent être allergènes, pathogènes ou sources de toxicité et constituer une menace certaine sur le plan sanitaire (UICN France, 2014).

Les renouées asiatiques correspondent à un complexe d'espèces parmi les plus envahissantes au monde (Lowe et al., 2000). Elles colonisent en particulier les abords des cours d'eau où elles se répandent à la faveur des crues et forment rapidement des massifs très denses. Les enjeux humains (protection des inondations, ressources en eau...) et écologiques (écotone abritant une très forte biodiversité, qualité de l'eau...) associés aux cours d'eau sont importants. L'invasion des berges par des espèces végétales compétitives comme les renouées asiatiques peut représenter un enjeu supplémentaire si ces espèces viennent modifier les équilibres érosion-dépôt en interagissant de manière directe ou indirecte avec les processus hydrogéomorphologiques.

Comprendre les mécanismes expliquant le succès des renouées asiatiques dans l'invasion des systèmes fluviaux permet de prédire leurs proliférations, d'appréhender les conséquences induites et de réfléchir à des solutions concrètes. Une solution clé permettant d'expliquer et de prédire la colonisation des milieux naturels concerne l'identification des caractéristiques biotiques et abiotiques favorisant le développement de cette végétation invasive.

Le projet de recherche actuel s'interroge sur les nouvelles trajectoires des milieux naturels et leurs interactions avec les Espèces Exotiques Envahissantes en se concentrant principalement sur les relations existantes entre les renouées asiatiques et les systèmes fluviaux.

Cette recherche s'articule autour de deux axes :

- Axe 1 : Les effets des processus hydrogéomorphologiques sur les préférences d'établissement et de maintien des renouées asiatiques le long des cours d'eau.
- Axe 2 : Les effets de la présence des renouées asiatiques sur la stabilité et l'érosion des berges.

Ce présent document s'intéresse essentiellement aux effets des processus hydrogéomorphologiques sur les préférences d'installation et de maintien des renouées asiatiques sur les bancs sédimentaires.

En effet, il convient de différencier, ici, deux étapes distinctes dans l'envahissement des systèmes fluviaux par les renouées asiatiques. Une première étape d'installation consisterait au simple dépôt de la plantule facilement remobilisable tandis qu'une seconde étape de maintien suivrait dès lors que le massif de renouées asiatiques atteindrait un développement suffisamment conséquent pour être ancré dans le sol (Didier, 2021).

B. OBJECTIFS

Ce projet de recherche a pour objectif principal la mise en place, à terme, d'une cartographie prédictive de la colonisation des renouées asiatiques sur l'ensemble des cours d'eau du territoire français. Cette carte a pour objectif d'aider les gestionnaires des cours d'eau à connaître les zones dont la probabilité d'établissement des renouées asiatiques est forte et ainsi permettre, à ces mêmes gestionnaires, de prioriser les actions de prévention.

Afin de réaliser cette cartographie de prédiction il est nécessaire d'identifier les caractéristiques biotiques et abiotiques des cours d'eau favorables à l'implantation et au maintien des renouées asiatiques dans les systèmes fluviaux.

Enfin, pour identifier correctement les facteurs influençant la colonisation des renouées asiatiques le long des cours d'eau et connaître leur impact positif ou négatif, la réalisation d'un modèle statistique et prédictif est essentielle.

Ainsi, cette présente étude s'intéresse, à l'aide des outils d'analyses statistiques, aux caractéristiques biotiques et abiotiques favorables à l'installation et au maintien des renouées asiatiques sur les bancs sédimentaires.

C. PROBLEMATIQUE

Le rythme des changements globaux survenus dans la nature à large ou petite échelle au cours des 50 dernières années est inédit dans l'histoire de l'humanité et est fortement lié à l'évolution de nos sociétés. Les facteurs directs de l'évolution des milieux naturels présentant des conséquences néfastes à l'échelle mondiale sont, par ordre croissant : les Espèces Exotiques Envahissantes, la pollution, les changements climatiques, l'exploitation directe des organismes et la modification de l'utilisation des terres et des mers (IPBES, 2019).

Le projet de recherche actuel se questionne alors sur les nouvelles trajectoires des milieux naturels résultants du caractère compétitif des Espèces Exotiques Envahissantes.

Pour comprendre les interactions entre milieux naturels et Espèces Exotiques Envahissantes, cette recherche se concentre sur les systèmes fluviaux. Ces milieux naturels (ou semi-naturels) se situent sur l'ensemble des territoires, à des gradients altitudinaux différents et présentent des continuités écologiques sur d'importants linéaires.

Les renouées asiatiques ont, quant à elles, été choisies pour comprendre les interactions des Espèces Exotiques Envahissantes avec les cours d'eau puisqu'elles correspondent, par leur fonctionnement biologique, à des espèces invasives très problématiques ayant colonisé l'ensemble du territoire français (Figure 1).

Ainsi, l'étude se questionne, ici, sur les préférences d'établissement et de maintien des renouées asiatiques le long des cours d'eau.

Afin d'affiner cette réflexion sur les déterminants biophysiques de la présence des renouées asiatiques dans les systèmes fluviaux, le choix d'étudier plusieurs variables, à la fois biotiques et abiotiques, pouvant influencer la prolifération de ces plantes invasives a été retenu.

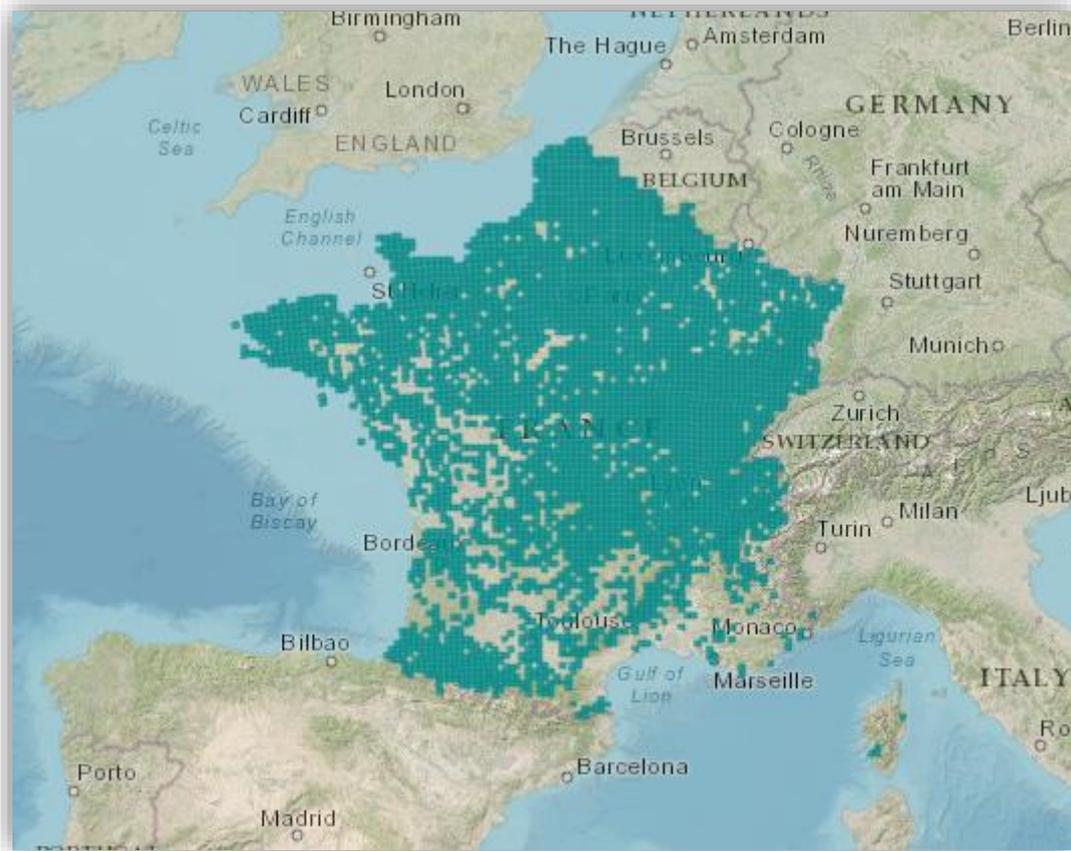


Figure 1 : Carte de répartition des renouées du Japon en France (Source : INPN 2023)

Aussi, le choix de concentrer l'étude sur une zone réduite et dont les processus hydrogéomorphologiques sont importants a conduit la réflexion jusqu'aux bancs sédimentaires des cours d'eau ; des milieux très instables et rapidement mobilisables lors d'éventuelles montées des eaux.

Plus précisément, cette étude s'interroge donc sur les caractéristiques bio physiques favorables à la présence des renouées asiatiques sur les bancs sédimentaires.

D. PRESENTATION DU PLAN

Ce document présente la réflexion mise en place autour du modèle statistique et de l'identification des facteurs influençant la prolifération des renouées asiatiques sur les bancs sédimentaires et discute des résultats obtenus.

Dans un premier temps, un état de l'art exposant les interactions entre renouées asiatiques et processus hydrogéomorphologiques sera présenté. Seront alors exprimés, ici,

l'influence des renouées asiatiques sur les processus hydrogéomorphologiques puis l'impact de ces derniers sur l'établissement des renouées asiatiques le long des cours d'eau.

Ensuite, l'ensemble des réflexions préliminaires nécessaire au bon déroulé de ce stage seront détaillées dans une seconde partie. Les hypothèses autour du cycle naturel de propagation des renouées asiatiques, le choix du terrain d'étude ou celui des variables à étudier sont le résultat de ces réflexions préliminaires.

Dans une troisième partie, le matériel utilisé et la méthodologie appliquée à l'axe de recherche choisi lors de la réflexion préliminaire de la partie précédente seront exposés.

Enfin, dans une quatrième et dernière partie, les premiers résultats de cette étude seront analysés et discutés. Les différents tests et modèles statistiques permettront de mettre en avant les facteurs influençant l'installation des renouées asiatiques sur les bancs sédimentaires.

I. ÉTAT DE L'ART :

A. LES INTERACTIONS DES ESPECES EXOTIQUES ENVAHISSANTES AVEC LES MILIEUX NATURELS

1. Généralités sur les Espèces Exotiques Envahissantes

Les invasions biologiques, autrement dit la colonisation des Espèces Exotiques Envahissantes dans des milieux dont elles ne sont pas originaires, constituent un enjeu majeur dans la préservation de la biodiversité à cause, notamment, du caractère compétitif de ces espèces (Bellard, Cassey, et Blackburn, 2016).

Leur présence touche également la santé des humains et impacte les activités anthropiques comme l'agriculture, le tourisme, l'immobilier, la foresterie, la pêche... (Courchamp, 2021). Les couts économiques causés par les invasions biologiques ont été estimées, en France, à plus de 10 milliards d'euros en seulement 25 ans et les tendances sont à l'augmentation du nombre d'Espèces Exotiques Envahissantes, favorisées par la mondialisation et par le changement climatique, entraînant par conséquent une augmentation du coût des réparations (Courchamp, 2021).

La règle des « TEN's Rule » indique que pour 1000 espèces introduites dans une nouvelle aire biogéographique, seulement 100 survivent. De l'établissement de ces 100 espèces, seulement 10 se maintiennent et se reproduisent. Celles-ci vont ensuite se disperser plus ou moins bien et seulement 1 espèce va avoir des impacts négatifs sur le milieu qui l'accueille (Williamson et Fitter, 1996). Cette règle convient bien aux plantes terrestres telles que les renouées asiatiques et est contrôlée par la présence de barrières biogéographiques, de pression en propagules et de facteurs biotiques ou abiotiques (Figure 2).

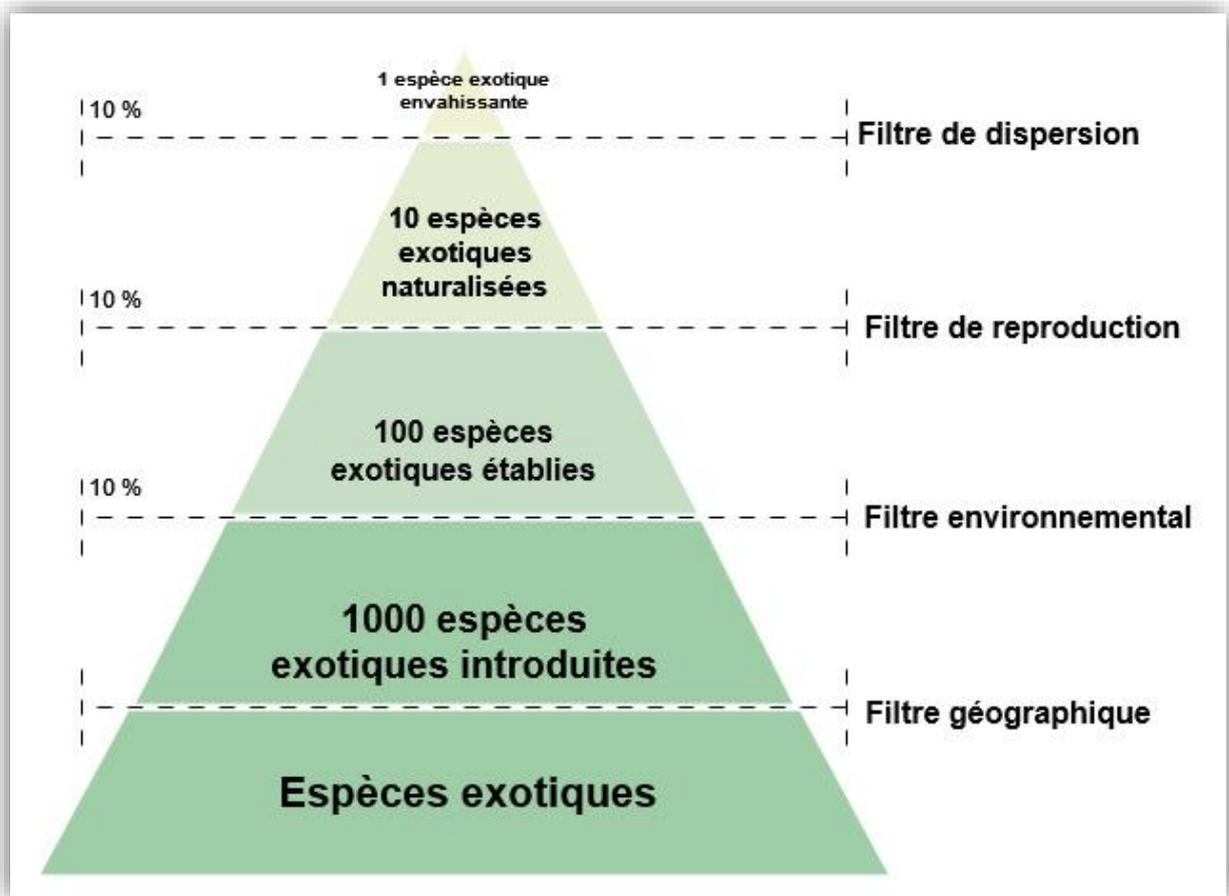


Figure 2 : Schéma synthétique représentant les principales barrières limitant le processus d'invasion, d'après la règle des « Ten's Rule » (Williamson et Fitter, 1996)

2. Ecologie des renouées asiatiques

Introduites en France à la fin du XIX siècle, les renouées asiatiques font parties des Espèces Exotiques Envahissantes les plus menaçantes pour la biodiversité (Dommanget et al., 2019). Celles-ci appartiennent à la famille des Polygonacées qui comprend près de 800 espèces comme par exemple la rhubarbe ou l'oseille (INPN, 2023). Il existe trois espèces de renouées asiatiques : la renouée du Japon (*Reynoutria japonica* Houtt., 1777 ou *Fallopia japonica*), la renouée de Sakhaline (*Reynoutria sachalinensis* Nakai, 1922 ou *Fallopia sachalinensis*) et leur hybride, la renouée de Bohème (*Reynoutria x. bohémica* Chrtek & Chrtekova, 1983 ou *Fallopia x. bohémica*) (Figure 3) L'ensemble du complexe d'espèce est désigné par l'expression « renouées asiatiques » qui sert pour l'ensemble du document.

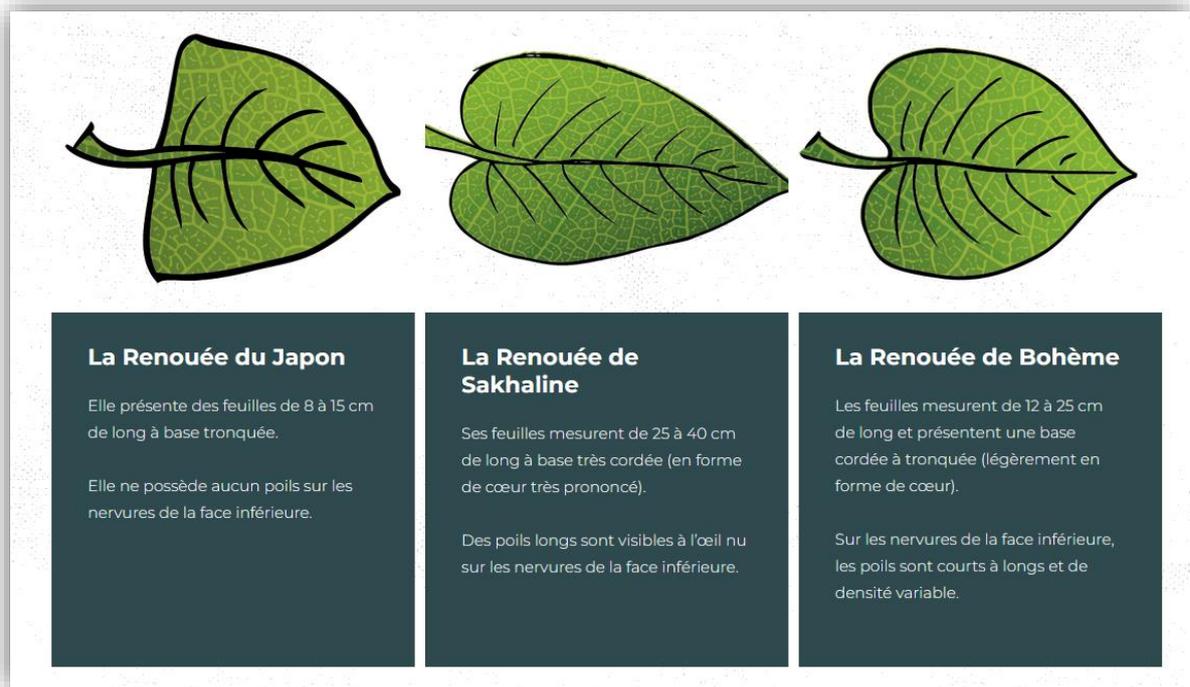


Figure 3 : Différence des feuilles des trois espèces des renouées asiatiques. Source : Rhizomex

Les renouées asiatiques sont des plantes géophytes à rhizomes formant des massifs denses pouvant mesurer plus de 4 m de haut (Dommanget et al. 2019). Elles ont une croissance rapide et une importante production de biomasse au printemps avec un accroissement de près de 15 cm par jour (Dommanget et al. 2019). En hiver, la partie aérienne de la plante dépérit laissant sur place des tiges sèches et cassantes. Près des deux tiers de la biomasse d'un massif de renouées asiatiques se trouve dans le sol dans un important réseau de rhizomes, qui s'étend de 1 à 3 m en profondeur et à près de 2 m latéralement (Centre de ressources Espèces Exotiques Envahissantes, 2023). Ainsi, l'ensemble des individus de renouées asiatiques situées à moins de 2 m d'un autre peut être connectés par leur rhizome et former un seul et même massif (Martin et al. 2019).

Bien que la reproduction sexuée soit possible chez les espèces femelles de *Reynoutria japonica*, les renouées asiatiques pratiquent essentiellement la reproduction végétative. La plante peut ainsi se propager par les fragments de rhizomes ou de tiges. Un fragment de rhizome d'un centimètre (environ 7 g) peut former un nouvel individu (Conseil Régional de l'environnement de l'Estrie, 2023).

Les renouées asiatiques colonisent principalement les milieux ouverts comme les écosystèmes urbains ou les linéaires tels que les cours d'eau, les routes ou les voies ferrées (Child et Wade, 2000). Une invasion par les renouées asiatiques peut avoir d'importantes

conséquences sur la biodiversité et sur le fonctionnement du milieu dans lequel elles s'établissent. En formant des massifs denses, en modifiant la structure physico-chimique du sol ou en monopolisant les ressources, les renouées asiatiques concurrencent les espèces indigènes et contribuent à la réduction de la diversité végétale et animale (Matte et al., 2022).

B. L'INFLUENCE DES PROCESSUS HYDROGÉOMORPHOLOGIQUES ...

1. ... Sur l'établissement de la végétation riveraine

Les systèmes riverains sont particulièrement propices à la colonisation par des espèces végétales puisqu'ils représentent des corridors ouverts facilitant l'invasion et la propagation des espèces vers l'aval (Arnold et Toran, 2018). La dynamique des crues, avec la hausse du niveau d'eau et la variation des débits, favorise le transport et la dissémination rapide des graines, des spores ou des boutures (Matte, 2020).

L'établissement de la végétation sur les berges des cours d'eau dépend de l'équilibre entre facteurs biotiques (stratégie de reproduction du végétal, croissance, résistance aux perturbations...) et facteurs abiotiques (perturbations du cours d'eau, dynamique morphogène, reliefs fluviaux, granulométrie du banc...) (Gurnell et Bertoldi, 2020; Hortobágyi et al., 2018).

La pérennisation de la végétation dépend, quant à elle, de deux formes de résilience. La résilience écologique pouvant être définie comme l'ampleur de la perturbation que le système peut tolérer et la résilience technique correspondant au temps que met le système à revenir à l'équilibre suite à une perturbation (Carpenter et al., 2001).

2. ... Sur l'établissement des renouées asiatiques

Sur un cours d'eau, la variation de la hauteur d'eau et du débit liquide et solide nécessite une stratégie de reproduction végétative afin de survivre aux perturbations physiques. Les renouées asiatiques utilisant cette stratégie de reproduction sont alors propices à s'établir sur les berges des cours d'eau (Colleran, et al., 2020; Gurnell et Bertoldi, 2020).

Le maintien de la plante le long du cours d'eau dépend, d'une part, de la dynamique morphogène du cours d'eau mais surtout de la résistance du végétal aux contraintes physiques du milieu. En ayant une croissance rapide et en formant très vite des massifs

denses, les renouées asiatiques ont une résilience forte face aux perturbations physiques élevées.

Les travaux exploratoires de Marie Didier ont montré que les renouées asiatiques s'établissent davantage, à l'échelle des tronçons de rivière, sur les zones convexes des méandres où les processus hydrogéomorphologiques sont faibles. A l'échelle des bancs sédimentaires, la séparation des bancs en neuf zones distinctes sur un axe longitudinal et sur un axe latéral a permis de mettre en avant une préférence d'établissement des renouées asiatiques sur la zone centrale (Didier, 2021).

C. L'INFLUENCE SUR LES PROCESSUS HYDROGÉOMORPHOLOGIQUES ...

1. ... De la végétation riveraine

La végétation, en interagissant activement avec les processus hydrogéomorphologiques, est un élément clé dans la dynamique morphogène et fluviale des cours d'eau (Gurnell et al., 2014). En résistant aux contraintes hydrogéomorphologiques, elle peut générer des rétroactions avec le milieu en modulant le débit d'eau, le débit sédimentaire, la géomorphologie du relief ou la topographie (Corenblit et al., 2007; Hortobágyi et al., 2018).

La biomasse aérienne peut affecter le champ d'écoulement et le transport des sédiments et donc l'évolution morphologique des rivières, alors que la biomasse souterraine, quant à elle, modifie les propriétés hydrauliques et mécaniques du substrat et par conséquent le régime d'humidité et d'érodabilité du sol (Gurnell et al., 2014).

La façon dans laquelle la végétation affecte la dynamique des écoulements et stabilise les berges durant les crues dépend du type de végétation présente ainsi que la densité et la profondeur de ses racines (Arnold et Toran, 2018; Colleran et al., 2020). Ces dernières s'ajoutent aux forces de cohésion des sols par les forces d'adhérence et de frottement qui existent entre les racines et les particules du sol (Stover et al., 2018). La stabilité due à la végétation dépend donc fortement de facteurs spécifiques au site tels que la position de la plante sur la berge, la pente, la surface de cisaillement ou l'angle de frottement du sol (Solari et al., 2016).

2. ... Des renouées asiatiques

Le caractère compétitif des renouées asiatiques, conduisant à des massifs monospécifiques peut contribuer à trois types d'érosion : l'érosion superficielle suite au

dépérissement hivernal laissant les berges exposées aux crues ; l'érosion souterraine suite à la perte du complexe racinaire désolidarisant les sols ; l'érosion intermédiaire où les rhizomes des renouées asiatiques ayant une écorce externe dépourvu de poils absorbants ne lient pas correctement le sol et la plante (Colleran et al., 2020).

Les études récentes, au sujet de l'érosion des berges causée par la présence de renouées asiatiques, montrent que la charge sédimentaire des cours d'eau augmente en aval des renouées asiatiques après des épisodes de précipitation intense. Ces mêmes études montrent que la turbidité après ces mêmes épisodes est plus élevée dans les tronçons de cours d'eau incisés avec la présence de renouées asiatiques (Arnold et Toran, 2018; Mummigatti, 2008).

La saisonnalité, corrélé avec le fonctionnement biologique des renouées asiatiques, met en évidence l'influence de ces dernières sur l'érosion des berges, car une augmentation de l'érosion peut être observée après décembre (Arnold et Toran, 2018).

Cependant, il reste difficile de mesurer précisément l'effet des renouées asiatiques sur l'érosion en raison du caractère multifactoriel des processus hydrogéomorphologiques et biogéomorphologiques. Différents facteurs biotiques (durée de vie des végétaux, système racinaire, résistance aux perturbations...) et abiotiques (incision du cours d'eau, dynamique morphogène, précipitations...) participent également à l'érosion des berges. Les méthodes actuelles utilisées pour étudier l'érosion des berges (tige graduée, turbidité de l'eau, utilisation de GPS...) ne permettent pas de différencier l'impact des renouées asiatiques sur l'érosion par rapport aux autres facteurs (Arnold et Toran, 2018; Matte, 2020; Mummigatti, 2008).

II. REFLEXIONS PRELIMINAIRES

A. HYPOTHESES

Le cycle naturel de propagation des renouées asiatiques le long des cours d'eau s'organise en cinq étapes distinctes.

Il est important de préciser que ce cycle est applicable à l'échelle du tronçon de rivière et que les hypothèses qui suivent correspondent principalement à ce degré de précision. Un changement d'échelle (échelle du banc sédimentaire) est réalisé à l'étape du développement des renouées asiatiques (étape 4) puisque celle-ci nécessite des informations très localisées et un degré de précision plus important. Cette étape correspond davantage à notre projet qui étudie le développement des renouées asiatiques sur les bancs sédimentaires.

1. La source

Le point de départ du cycle de propagation des renouées asiatiques constitue la source. Si un déchet vert jeté dans la nature par l'Homme, un déplacement de terre d'un point A à un point B, d'une laisse de crue... incluent la présence de renouées asiatiques, le cycle naturel de propagation des renouées asiatiques peut alors commencer. Celui-ci s'active, dès lors qu'une petite plantule instable ou un fragment de rhizome sont sujets à des perturbations naturelles telles que le vent ou très couramment, les crues.

Dans cette étude, nous faisons l'hypothèse que les renouées asiatiques situées dans les zones des cours d'eau les plus susceptibles d'être érodées sont les individus les plus susceptibles de se propager.

2. Le transport

Une fois la perturbation agissante, la source de renouées asiatiques n'est plus figée mais se déplace dans le sens de la perturbation. Il s'agit ici de la deuxième étape du cycle de propagation des renouées asiatiques ; le transport. Dans les systèmes fluviaux, la plantule ou le fragment de rhizome suit l'écoulement du cours d'eau en se faisant transportée vers l'aval.

Nous pensons, ici, que la distance de propagation de la propagule dans les systèmes fluviaux dépend, bien évidemment des caractéristiques physiques du cours d'eau telles que le débit, mais également de la densité de la particule de renouées. Dans le même principe que le déplacement des sédiments dans les cours d'eau, plus la densité de la propagule est élevée, moins celle-ci se propagera loin vers l'aval. A l'inverse, moins la propagule sera dense, plus elle se déplacera vers l'aval.

3. Le dépôt

Après avoir été transporté, le fragment de renouée asiatique va se déposer sur un sol un peu plus bas en aval. Il s'agit ici du dépôt. Pour se déposer le long des cours d'eau, la plantule doit rencontrer une zone où la vitesse d'écoulement du cours d'eau n'est plus assez forte pour être déplacée.

Ainsi, nous faisons deux hypothèses quant au dépôt des propagules de renouées asiatiques le long des cours d'eau.

La première hypothèse serait que les zones de dépôt sédimentaire seraient favorables au dépôt des propagules. Les renouées asiatiques devraient se trouver davantage sur les bancs sédimentaires que sur les zones sans dépôts de sédiments.

La deuxième hypothèse concerne l'éloignement et la hauteur des propagules de renouées asiatiques par rapport au cours d'eau. Nous pensons que cet éloignement et cette hauteur sont liés aux limites externes atteintes par le cours d'eau lors des dernières crues. Cette hypothèse est à la fois valable pour l'échelle du tronçon de rivière que pour l'échelle du banc sédimentaire.

4. Le développement

A la suite de son dépôt, la renouée n'a pas encore colonisé le milieu ; il lui faut se développer. Sa croissance dépend alors des conditions initiales d'habitat et de concurrence végétale telles que la compétition à la lumière, l'accès à l'eau et aux nutriments.

Nous pensons alors que les conditions de développement des renouées asiatiques dépendent d'une taille granulométrique préférentielle lui permettant d'avoir accès aux nutriments et à l'eau.

Aussi, nous faisons l'hypothèse que la présence d'une végétation herbacée, arbustive et arborée influence négativement le développement des renouées asiatiques sur les zones où elles se sont déposées.

5. Le maintien

À tout moment des étapes précédentes, les renouées asiatiques peuvent être remobilisées et déplacées vers l'aval suivant les régimes de crue. Lorsqu'elles passent l'étape du maintien, leur rhizome est alors bien développé latéralement et en profondeur et il devient difficile, pour quelque force physique, de l'arracher. Les massifs de renouées alors bien développés deviennent résistants aux submersions ou aux enfouissements répétés. Cette dernière étape constitue le point d'orgue de la colonisation des renouées asiatiques sur les abords des cours d'eau.

Nous supposons ici que pour se maintenir, la renouée asiatique ne doit pas subir de perturbations répétées ou extrêmes. Les temps de retours de crues étant plus élevées pour

les gros phénomènes, nous faisons ici l'hypothèse que les gros massifs se situent à des distances plus éloignées par rapport au cours d'eau que les plus petits massifs.

B. CHOIX DU TERRAIN D'ETUDE

Le choix du terrain d'étude s'est porté sur un tronçon amont de 33 km de long du fleuve Hérault entre Saint-André-de-Majencoules et Brissac (Figure 4).

Avant de retenir ce cours d'eau, une réflexion avec deux autres rivières, le Gardon et l'Éyrieux, a été nécessaire. INRAE possédait, avec des exhaustivités différentes, des données de localisation des renouées asiatiques réalisées par (ou pour) les différents gestionnaires des rivières. Ces trois cours d'eau présentaient chacun des avantages et des inconvénients quant aux données d'imagerie déjà existantes ou à acquérir via des vols drone. La disponibilité de ces données accompagnées de l'étude des régimes hydrologiques de ces dernières années a été prise en compte dans la réflexion du choix du terrain d'étude.

La réflexion a davantage été approfondie entre l'Hérault et le Gardon. La nécessité de réaliser notre propre inventaire afin d'acquérir les données les plus exhaustives possible a retenue l'Hérault sur lequel un premier travail d'analyse de données de 2007 et de 2015 avait été réalisé par Marie Didier lors de son stage de M2 en 2021.

Un inventaire de terrain des localisations des renouées asiatiques sur les bancs de l'Hérault en 2023 permettait alors de posséder des données exhaustives en 2007, 2015 et 2023 ; soit tous les 8 ans. Ces données pourraient permettre, par la suite, de constituer un « laboratoire à ciel ouvert » de la propagation des renouées asiatiques le long des cours d'eau.

Le terrain d'étude alors choisi, correspond à un tronçon de 33 km du fleuve Hérault situé entre les communes de Saint-André-de-Majencoules et Brissac. L'Hérault, située dans le Sud de la France, prend sa source dans le massif du Mont Aigoual, traverse les départements du Gard et de l'Hérault sur une longueur totale de 147,6 km et sur un bassin versant d'une superficie de 2 550 km² et se jette dans la mer Méditerranée au niveau du Grau d'Agde (Hydroportail 2023).

Le fleuve Hérault possède un régime fluvial de type méditerranéen, caractérisée par des crues brèves et intenses faisant suite à d'importants épisodes orageux stationnaires. Ces 25 dernières années, alors que le débit moyen est de près de 20 m³/s, l'Hérault a connu d'importantes crues comme en 1997 avec un débit de 999 m³/s, ou plus récemment en septembre 2020 avec un débit de 1070 m³/s à Ganges (Hydroportail 2023).

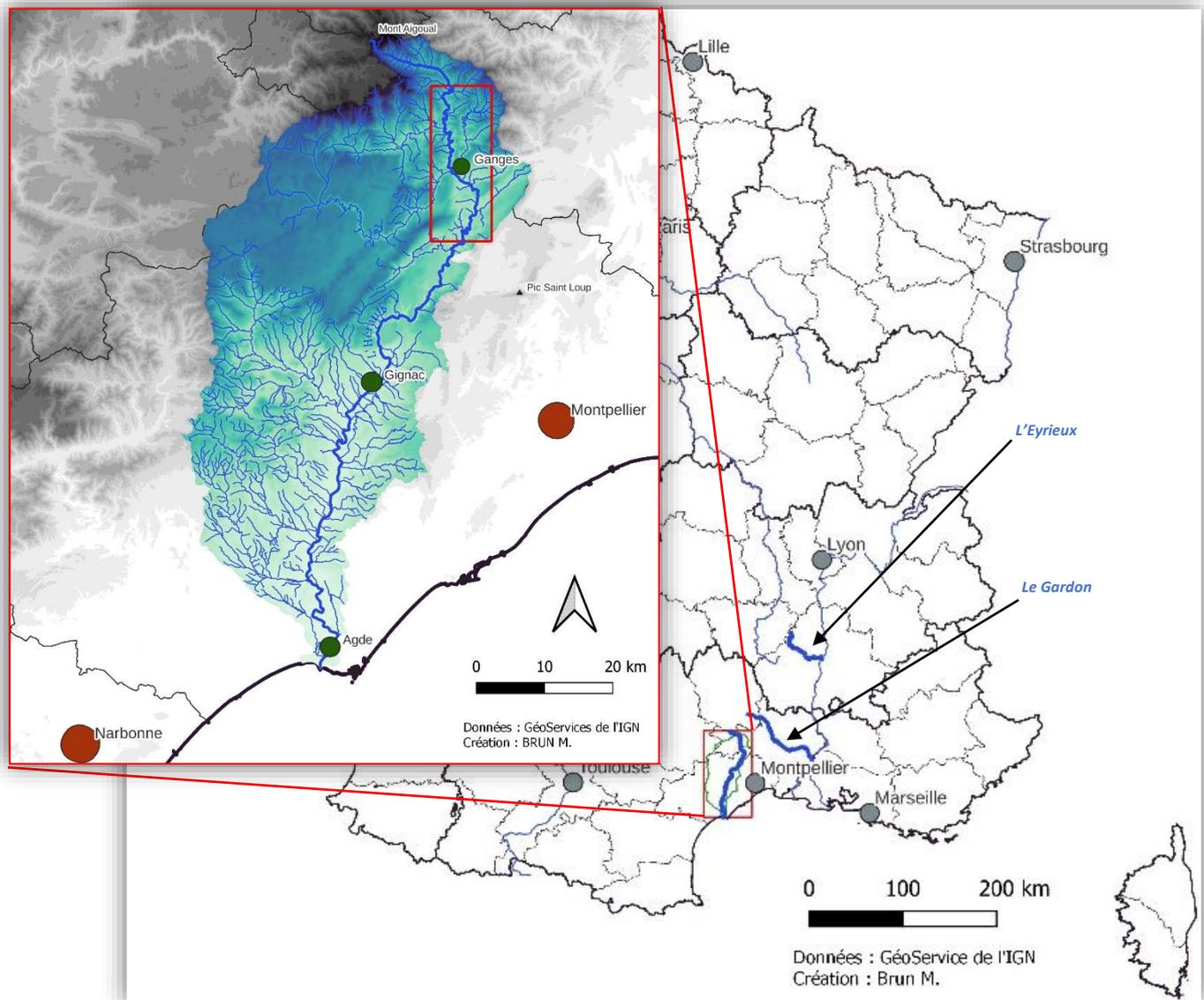


Figure 4 : Cartographie du bassin versant de l'Hérault

C. CHOIX DES VARIABLES EXPLICATIVES

Les bio statistiques sont de plus en plus utilisées en écologie. Elles permettent de confirmer ou de rejeter une hypothèse et/ou prédire un évènement futur à l'aide d'outils mathématiques. Il existe deux types de statistiques : les statistiques descriptives et les statistiques inférentielles. Ces dernières nous intéressent davantage puisqu'elles permettent de comprendre les caractéristiques d'un groupe général à partir de celles d'un groupe particulier.

Les régressions linéaires simples ou multiples font partie de ces statistiques. On étudie en régression linéaire simple deux variables, dont l'une, appelée variable réponse, est considérée comme dépendante de l'autre, appelée variable explicative ou indépendante. On note habituellement la variable expliquée Y, et la variable explicative X.

$$Y \approx a + bX + \varepsilon$$

Y = Variable réponse / dépendante

X = Variable explicative / indépendante

a = Ordonnées à l'origine / intercept

b = Pente

ε = Erreur / Résidus

En science de l'environnement, il est rare que le recours à une seule variable explicative permette de comprendre comment les événements, les processus et les comportements conduisent à des résultats spécifiques. La régression linéaire multiple permet ainsi de prédire et d'expliquer une variable réponse en fonction de plusieurs variables explicatives. Les variables réponses ne sont rien d'autre que des facteurs qui mesurent le résultat causé par les variables explicatives. Ces dernières aident, quant à elles, à comprendre pourquoi quelque chose se produit.

La variable réponse (Y) de notre étude prend deux valeurs possibles : Présence (1) ou Absence (0) des renouées asiatiques sur le banc sédimentaire. Il s'agit ici d'un modèle binaire. Afin d'expliquer la présence ou l'absence des renouées asiatiques le long des cours d'eau, nous avons choisi différentes variables explicatives (X) (Table 1).

Certaines variables explicatives présentent des caractéristiques biotiques tels que le pourcentage de recouvrement de la végétation. Celui-ci est étudié au niveau des strates herbacées, arbustives et arborées et permet de rendre compte de la compétition végétale qui se joue entre renouées asiatiques et autres espèces végétales. Cette compétition végétale se manifeste par un accès réduit à la lumière, à l'eau et aux nutriments.

D'autres variables explicatives présentent, quant à elles, des caractéristiques abiotiques. Comme pour le recouvrement de la végétation, il s'agit, ici, de comprendre les conditions d'accueil des renouées asiatiques sur les bancs sédimentaires et l'accès à la ressource. Ainsi, ces variables explicatives concernent la classe granulométrique la plus grosse située en surface, la classe granulométrique de surface avec le pourcentage de recouvrement le plus élevé et la classe granulométrique de subsurface avec le pourcentage d'abondance le plus élevé.

Enfin, un dernier regroupement de variables explicatives peut concerner la localisation des renouées asiatiques sur les bancs sédimentaires. Celle-ci est décrite par la distance du massif de renouées par rapport au point situé à l'amont du banc et par la distance la plus proche de l'eau. La hauteur de la localisation du massif par rapport à l'eau est également étudiée. Nous avons fait le choix, ici, de distinguer les distances et hauteurs minimales, représentant les processus d'installation des massifs de renouées asiatiques, des distances et hauteurs maximales représentant, quant à elles, les processus de maintien.

Pour davantage de clarté dans les explications, la suite du document se concentre sur les distances et hauteurs minimales et donc seulement sur les installations des renouées asiatiques sur les bancs sédimentaires.

Une toute dernière variable ajoutée suite à la campagne de terrain concerne la localisation d'un obstacle pouvant influencer la présence des renouées asiatiques. En effet, nous avons rapidement remarqué que les renouées asiatiques pouvaient être bloquées par des obstacles lors du processus de dépôt et nous avons souhaité étudier ce paramètre plus en détail.

Tableau 1 : Tableau de synthèse des variables étudiées

Variable réponse	Renouées	Présence / Absence
Variables explicatives	Distance minimale / maximale au point amont	Num. De 0 à ∞
	Distance minimale / maximale à l'eau	Num. De 0 à ∞
	Hauteur minimale / maximale à l'eau	Num. De 0 à ∞
	Obstacle	Chr Amont / Milieu / Aval / N
	% Strate herbacée	Num. De 0 à 100
	% Strate arbustive	Num. De 0 à 100
	% Strate arborée	Num. De 0 à 100
	Classe maximale de granulométrie	Num. De 0 à 2040
	Classe granulométrique recouvrant le plus la surface	Num. De 0 à 2040
Classe granulométrique recouvrant le plus la sub-surface	Num. De 0 à 2040	

D. GRAPHIQUE GENERAL DE SYNTHESE

Le graphique ci-après constitue une synthèse de cette réflexion préliminaire et permet de mettre en avant, la problématique, les hypothèses, les variables explicatives et les outils à mobiliser (Figure 5).

Comme expliqué précédemment, et afin d'être bien compris dans la suite de nos propos, nous souhaitons rappeler que l'étude présentée dans ce document concerne l'identification des caractéristiques bio physiques influençant la présence des renouées asiatiques sur les bancs sédimentaires. Toute la méthodologie et les résultats qui s'en suivent correspondent à cet approfondissement.

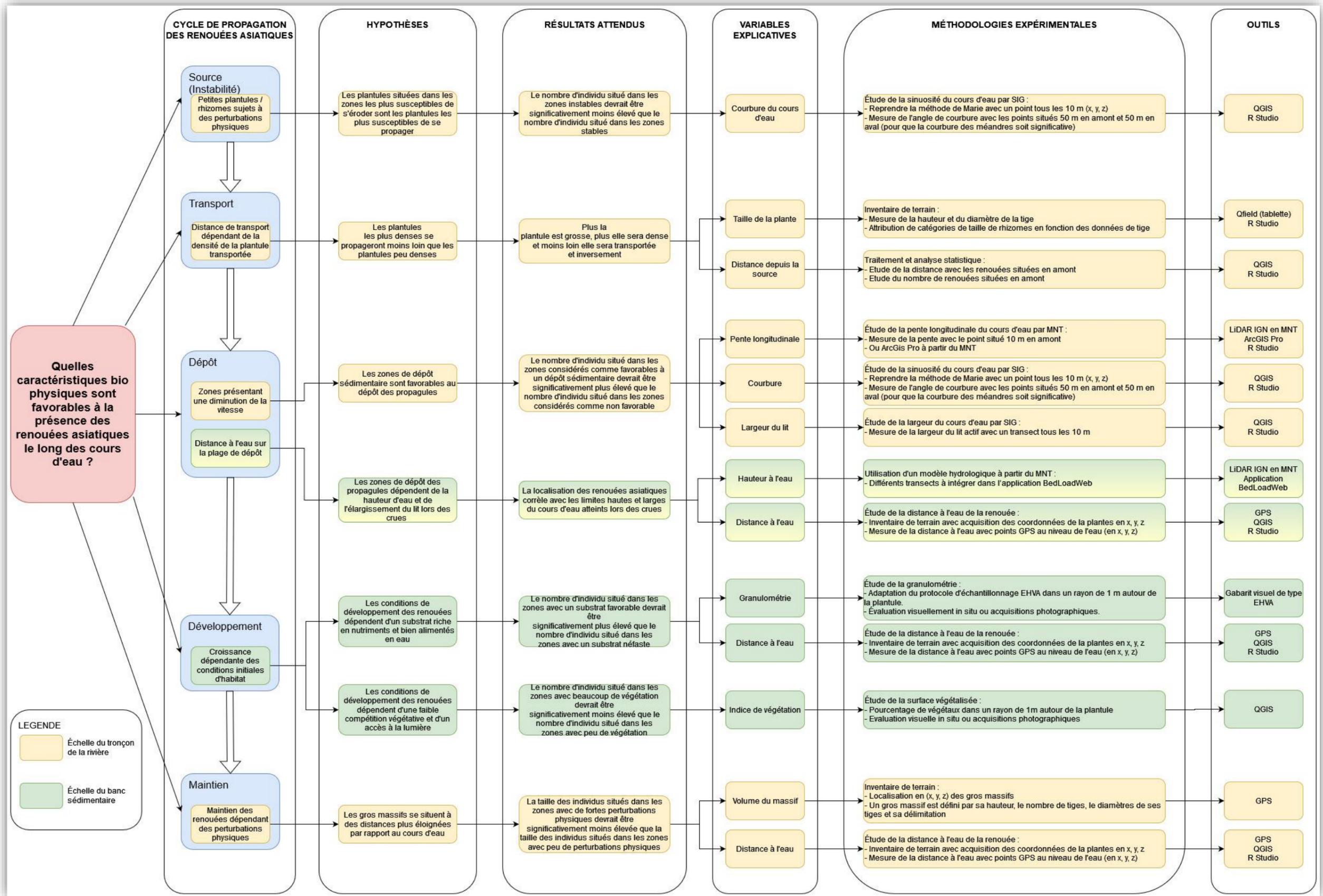


Figure 5 : Graphique synthétisant la réflexion préliminaire

III. MÉTHODOLOGIE

A. OUTILS A DISPOSITION

1. Données brutes

Un recensement des données brutes mises à disposition dans la base de données INRAE, en téléchargement ou consultable en ligne a permis de choisir, comme nous l'avons vu plus haut, le terrain d'étude. Ces différentes données ont également permis de l'analyser à distance via les outils numériques.

Les premières données de localisation des renouées asiatiques sur l'Hérault remontaient à 2007 et ont été réalisés par le Bureau d'Etudes Concept Cours d'EAU. S'en est suivi un inventaire exhaustif en 2015, utilisé par Marie Didier, dans son analyse des préférences de localisation des renouées asiatiques le long des cours d'eau. En 2018, 2020 et 2021 de nouveaux inventaires ont été réalisés, à chaque fois sur des secteurs différents des inventaires précédents. En 2023, la réalisation de nouveaux inventaires sont prévus par le Bureau d'Etudes Concept Cours d'EAU sur des affluents de l'Hérault.

Les images aériennes sont nombreuses sur le terrain d'étude. L'Institut national de l'information géographique et forestière (IGN) propose des orthophotographies téléchargeables en RGB (ou RVB pour Rouge-Vert-Bleu) ou en IRC (InfraRouge Couleur) acquises à des dates et avec des résolutions différentes : du 50 cm de résolution en 2015 et du 20 cm de résolution en 2018 et en 2021. Ces images permettent une première analyse diachronique de l'évolution des bancs sédimentaires et de la couverture végétale.

Le régime hydrologique de l'Hérault ainsi que le développement de la végétation varient énormément au cours de l'année et entre les années et un pas de temps de 3 ans entre les images n'est pas suffisant pour une analyse diachronique précise (Figure 6). Il est donc nécessaire de posséder une image aérienne réalisée à la même période que l'inventaire (à défaut, sans crues morphogènes entre les deux dates) afin d'analyser correctement la localisation des renouées asiatiques en fonction de la forme du cours d'eau ou de la végétation présente. Ainsi, les images acquises par les deux satellites français Pléiades offrent de nouvelles images de résolution 50 cm en mode panchromatique et de 2 m en mode multispectral. Plusieurs images couvrant entièrement ou en partie notre terrain d'étude, plus ou moins nuageuses, sont disponibles entre 2015 et 2022. Google Earth Pro offre également la possibilité de visionner des images passées. Celle-ci, une fois téléchargées et géoréférencées peuvent offrir des résolutions de près de 30 cm.

L'image aérienne la plus récente à notre disposition est donc une image de mai 2022 issue de Google Earth Pro, géoréférencée et avec une résolution de 30 cm. Cette dernière souligne une modification de la forme du cours d'eau par rapport à l'orthophotographie de 2021 de l'IGN. Ce constat, mis en relation avec les données hydrologiques de la base de données Hydroportail met en évidence une crue morphogène en mars 2022 ; la dernière jusqu'à aujourd'hui. Celle-ci a atteint, au niveau de la station de Ganges, un débit de 391 m³/s. Le site Hydroportail recensant les débits maximums mensuels des dernières années au niveau des stations hydrologiques comme à Saint-André-de-Majencoules, à Ganges ou bien à Laroque donne des indications précisent des différents retours de crue. Ces données permettent également de connaître le débit morphogène de l'Hérault au niveau de la station de Ganges, centrée sur le tronçon étudié et donc choisie pour référence. Le débit morphogène d'un cours d'eau correspond au débit à plein bord. Celui-ci possède une période de retour de 1 à 3 ans (Eaufrance, 2023). Le site Hydroportail indique un débit minimal de 319 m³/s en période biennale à la station de Ganges ; nous prenons donc cette donnée comme référence pour une crue morphogène.

L'IGN propose également des données LiDAR Haute Définition téléchargeables à l'état de nuage de points bruts et dont les acquisitions datent d'avril 2021 pour l'Hérault. Ces données ont une résolution de plus ou moins 10 points par m² et sont réalisées en même temps que l'orthophotographie de l'IGN acquise la même année. Il est donc possible d'attribuer une colorimétrie au nuage de points grâce à l'outil Lastool applicable sur QGIS (Isenburg, 2021). Il est également possible, et c'est ce qui nous intéresse ici, de créer un Modèle Numérique de Terrain, à partir de ce nuage de points et de quelques outils informatiques (Isenburg, 2021).

L'évolution de la morphologie du lit de l'Hérault rend incertaine l'utilisation du LiDAR HD de l'IGN pour exploiter les données altimétriques. La réalisation de vols drone au-dessus des bancs sédimentaires est donc primordiale pour posséder des nuages de points récents permettant de générer des Modèles Numériques de Terrain.

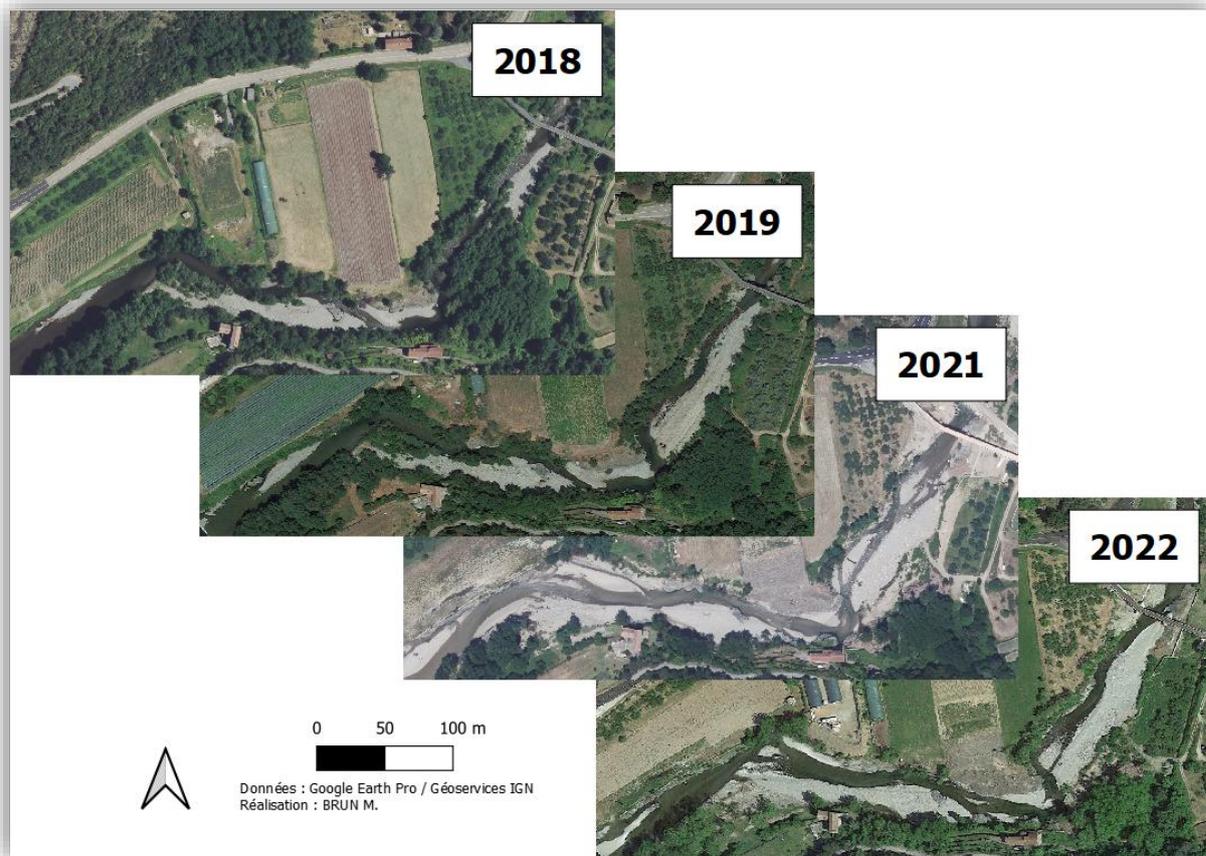


Figure 6 : Evolution de la morphologie et de la végétation d'un banc sédimentaire de l'Hérault entre 2018 et 2022.

2. Matériel

Plusieurs outils techniques et numériques ont été utilisés tout au long de ce projet de recherche.

Des outils de terrain comme un cadre de 1 m², un décamètre, un mètre de chantier, une grille de granulométrie et un carnet de terrain ont été utilisés lors de la campagne de terrain. Deux GPS différentiels (dGPS) distincts ont permis d'acquérir les données de localisation avec des précisions de l'ordre du centimètre en x, y et en z ; un GPS Trimble® R2 et un GPS Emlid Reach® RS2. Un drone DJI® Phantom 4 RTK équipé d'une caméra haute-résolution et d'un GPS embarqué, programmé pour réaliser une acquisition photographique dense à partir de l'application GSPRO, a été utilisé pour acquérir des images aériennes et des nuages de points. Ainsi, chaque banc sédimentaire a, en moyenne, été couvert par 250 images. Ces images sont ensuite traitées dans Agisoft Metashape, une application de restitution photogrammétrique libre de droit permettant d'obtenir une Orthoimage haute-résolution et un nuage de points 3D de haute densité (Annexe 1). Ce dernier permet ainsi de générer un Modèle Numérique de Terrain (MNT) équivalent aux données LiDAR aéroportées.

L'utilisation de logiciels libres de droit tels Qgis 3.28 ou CloudCompare ont permis de traiter et de générer de nouvelles données géoréférencées et l'utilisation du logiciel R-Studio (Version 3.1) a permis, quant à lui, de réaliser des analyses statistiques poussées.

B. METHODOLOGIE APPLIQUEE

1. Acquisition des données de terrain

Une campagne de terrain de deux semaines s'est déroulée du 11 avril 2023 au 21 avril 2023 (Annexe 2). La période de terrain a été choisie en fonction de la végétation. En effet, il était nécessaire d'attendre au moins le mois d'avril pour observer et localiser la totalité des renouées asiatiques sur les bancs sédimentaires mais il ne fallait pas attendre trop longtemps pour éviter d'être contraint par le couvert végétal lors des vols drone. Cette période était le parfait compromis entre ces paramètres précédemment cités et les disponibilités de tout le monde. En tout, huit personnes, stagiaires et chercheurs de INRAE Grenoble ont participé à cette campagne de terrain.

La campagne de terrain s'est concentrée sur les bancs sédimentaires présents sur le tronçon d'étude de l'Hérault. En amont de cette mission de terrain, les bancs ont été sélectionnés à partir des images aériennes récentes et nommés en fonction de leur rive et de leur position par rapport à l'amont du cours d'eau. Ainsi, le banc le plus en amont de notre tronçon d'étude situé en rive gauche se nomme « G1 », le suivant « G2 » et ainsi de suite. Pour la rive droite et pour les bancs en ilots, c'est respectivement le même principe : « D1 », « D2 », ... et « I1 », « I2 », ... Un travail complémentaire pour éliminer les bancs inaccessibles et hiérarchiser les priorités de prospection des bancs a également été réalisé. Des 122 bancs recensés, seulement 41 avaient une accessibilité facile et 38 restaient en suspens. Enfin, lors de la campagne de terrain, 17 bancs ont été prospectés (Annexe 3).

Lors de la prospection des bancs pour localiser les renouées asiatiques et relever les différentes variables explicatives, deux équipes se sont séparées (Figure 7).

Un premier binôme, équipée du dGPS Trimble et d'un cadre de 1m², localisait les massifs de renouées et indiquait, sur un carnet de terrain, les caractéristiques biotiques et abiotiques présentes aux abords du point. Celui-ci était nommé « R1 » pour le premier massif de renouées puis « R2 » et ainsi de suite. Les données de présence de renouées ont été acquises en fonction de la taille du massif. En effet, lorsqu'il s'agissait d'une petite plantule, un seul point de localisation était enregistré. En revanche, lorsqu'il s'agissait d'un gros massif ou d'un massif étendu, plusieurs points étaient enregistrés afin de générer un polygone représentant l'étendu du massif de renouées. Toutes les tiges séparées de moins de 2 m de distance étaient considérées comme appartenant au même massif (Martin, 2018). Les caractéristiques biotiques relevées correspondaient au pourcentage de recouvrement

herbacé, arbustif et arboré présent dans le cadre d'1 m². Lorsqu'un pied de renouée asiatique était présent dans ce cadre, celui-ci n'était pas comptabilisé. Dans ce quadra de 1 m², étaient également relevées la classe granulométrique la plus grande, la classe granulométrique recouvrant le plus d'espace et la classe granulométrique dominante en subsurface. Aussi, la localisation d'un obstacle à proximité directe du massif de renouées était inscrite dans le carnet de terrain. Enfin, ce premier binôme mesurait le diamètre des 5 plus grosses tiges de renouées asiatiques et comptait le nombre de tiges présentes dans le mètre carré.

Le second binôme se concentrait, quant à lui, aux données d'absence. Les données de localisation des absences étaient acquises semi-aléatoirement en suivant des transects transversaux séparés entre 10 et 30 m. Cette distance dépendait de la taille du banc et de l'irrégularité topographique de la limite avec l'eau. La longueur du transect et le nombre de points enregistrés étaient dépendants de la longueur et de la variation morphologique du banc. Dès que la topographie, la végétation ou la granulométrie du sol variaient significativement, un point GPS était enregistré. L'ensemble des transects réalisés démarraient du point en limite à l'eau et cheminaient linéairement en direction de la berge. La délimitation de la berge, relativement complexe et différente entre les bancs, était systématiquement discutée par les membres de l'équipe. Les critères permettant la bonne délimitation du banc étaient une rupture de pente évidente, la limite des gros arbres ou la présence d'un chenal secondaire.

Enfin, Laurent Borgniet, pilote professionnel de drone, réalisait, lui, des vols drone au-dessus des bancs sédimentaires prospectés. Le géoréférencement du drone à l'aide d'une base RTK et la création d'un plan de vol propre à chaque banc étaient nécessaires avant de lancer le vol. Le drone DJI Phantom 4, une fois en l'air, captait des images très haute résolution de l'ordre du centimètre à la fois en RGB et en IRC grâce à sa caméra Multispectrale. Les photos acquises lors de cette campagne de terrain ont ensuite été traitées sur le logiciel Agisoft Métashape et ont, grâce à quelques points de localisation complémentaire, permis de générer une orthophotographie de 2 cm de résolution et un Modèle Numérique de Terrain de 6 cm de précision. Aussi, et en complément des vols drone, des photographies plus résolues ont été effectuées sur des quadras de 1m² présentant des classes granulométriques homogènes. Les vols drone, accompagnés de ces quadras, sont utilisés dans le nouveau protocole de caractérisation de la granulométrie des lits en tresse intégrant des vols drone (Liébault et al. 2023). Il est prévu de mettre en place ce protocole un peu plus tard afin de caractériser la granulométrie de la surface sur l'ensemble des bancs prospectés.

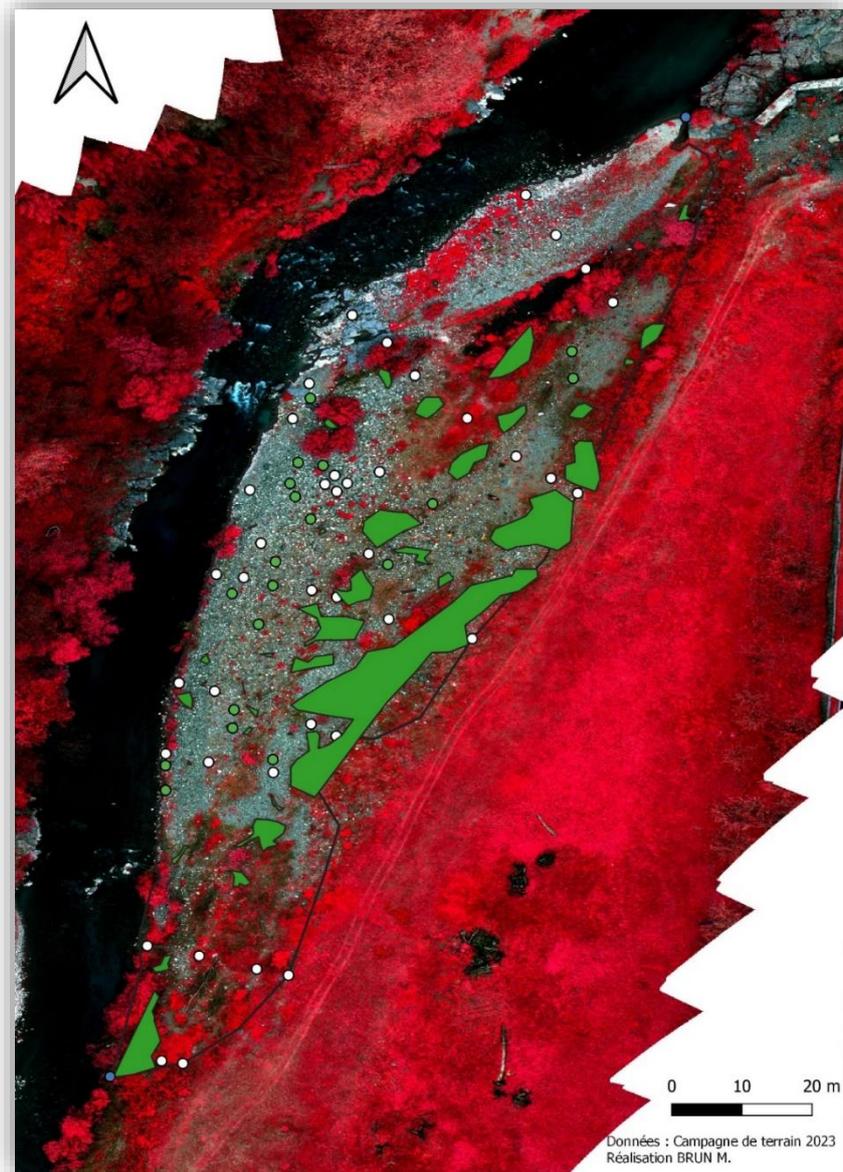


Figure 7 : Cartographie des données acquises sur un banc sédimentaire de l'Hérault lors de la campagne de terrain
(Légende : Vert = Présence de renouées ; Blanc = Absence de renouées ; Bleu = Limites amont et aval du banc)

2. Création de nouvelles données à partir des SIG

La campagne de terrain a permis d'acquérir un nombre conséquent de données de présence et d'absence ainsi que les caractéristiques bio physiques associées. Quelques post-traitements ont été nécessaires afin d'homogénéiser correctement l'ensemble des données (homogénéisation des noms, suppression des doublons...). Une couche de polygones représentant les étendues des massifs de renouées asiatiques et une couche de points regroupant, à la fois, les absences, les présences des individus seuls et les contours des massifs ont dû être traités séparément. En tout, 830 observations ont été conservées dont 461 concernent les absences et les 369 autres correspondent aux présences.

Les données relatives aux caractéristiques biotiques et abiotiques du milieu sont directement exploitables. En revanche, l'ensemble des données de localisation des renouées asiatiques acquises aux GPS différentiels doivent être traitées afin de créer les variables de distance et de hauteur que nous souhaitons exploiter et analyser. Ces données concernent la distance à l'amont du banc, la distance à l'eau et la hauteur à l'eau.

a) *Distance à l'amont du banc*

La distance du point de localisation des différentes observations (présence ou absence des renouées asiatiques) avec l'amont du banc peut expliquer l'établissement des renouées asiatiques sur les bancs sédimentaires.

A partir des outils de cartographie QGIS, nous avons mesuré la distance maximale et la distance minimale du massif de renouées avec le point situé à l'amont du banc (Figure 8).

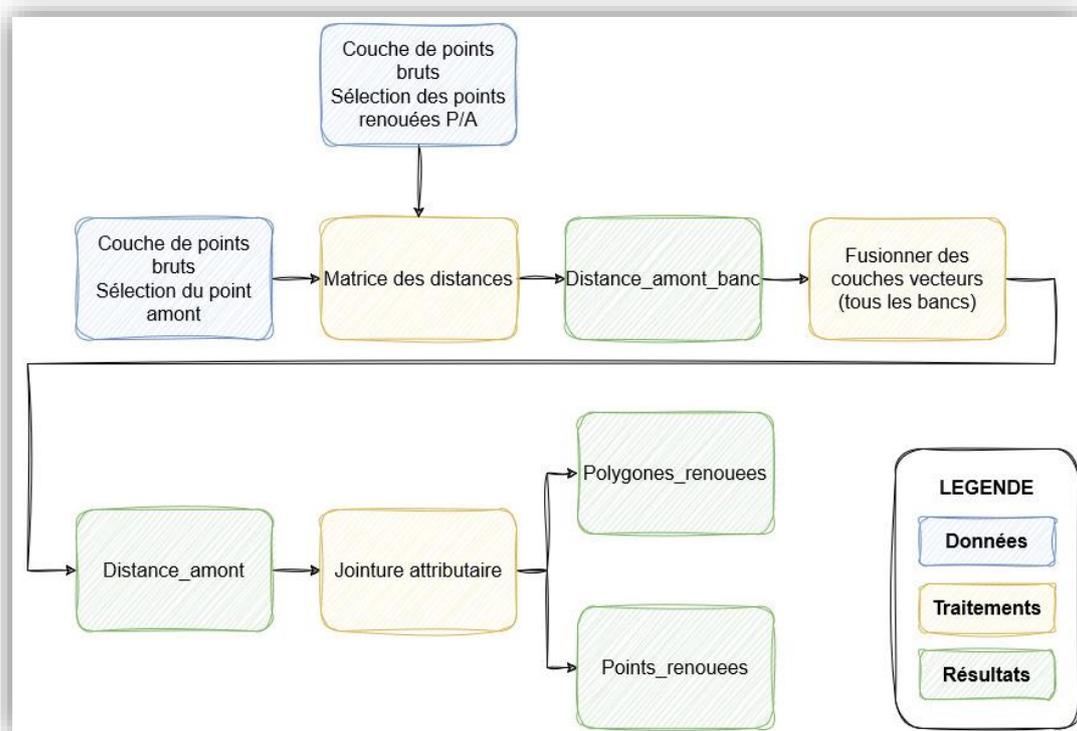


Figure 8 : Chaîne de traitements présentant la création des données de distance à l'amont du banc

b) *Distance à l'eau*

La distance à l'eau est également un paramètre pouvant expliquer la localisation des renouées asiatiques sur les bancs sédimentaires. La mesure de cette variable a nécessité une digitalisation du contour du banc sédimentaire à partir des ortho images acquises grâce aux vols drones. Ensuite, à partir des outils qu'offrent QGIS, nous avons pu obtenir les distances minimales et maximales qui séparent les points de présence et d'absence des renouées avec la limite de la rivière (Figure 9).

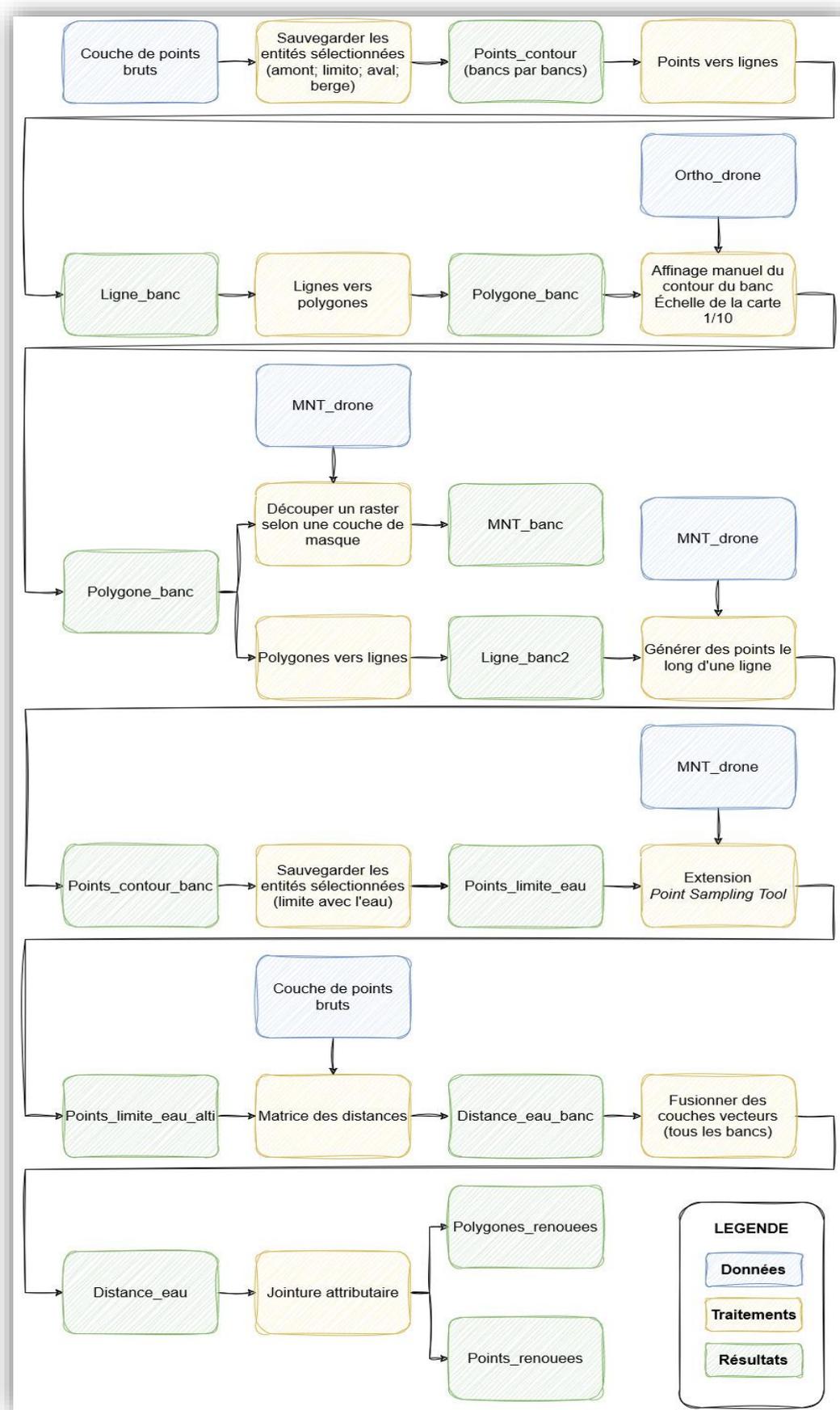


Figure 9 : Chaîne de traitements présentant la création des données de distance à l'eau

c) Hauteur à l'eau

La hauteur du massif de renouées par rapport à l'eau est une caractéristique supplémentaire pouvant expliquer les raisons de l'installation et du maintien des renouées asiatiques sur les bancs sédimentaires. Cette variable a également été générée à partir des outils spatiaux de QGIS et des altitudes acquises grâce aux GPS différentiels et aux vols drones (Figure 10).

Par faute de temps, des vols drones n'ont pas pu être réalisés sur certains bancs sédimentaires. Ces derniers concernent essentiellement des bancs situés à l'aval de Ganges qui n'ont été que très peu modifiés par la crue de mai 2022. Les données LiDAR ont donc été utilisées pour ces bancs afin de générer la hauteur des points de présence et d'absence

Pour être certain de l'homogénéité des données d'altitude, une comparaison entre les données LiDAR HD de l'IGN et les MNTs générés à partir des images acquises lors des vols drone a été réalisé. Cette comparaison met en évidence une altitude moyenne inférieure de près de 50 cm pour le LiDAR HD de l'IGN (Annexe 4). Nous avons donc fait le choix de modifier cette différence avant de réaliser la chaîne de traitements en rajoutant aux données LiDAR HD utilisé 50 cm.

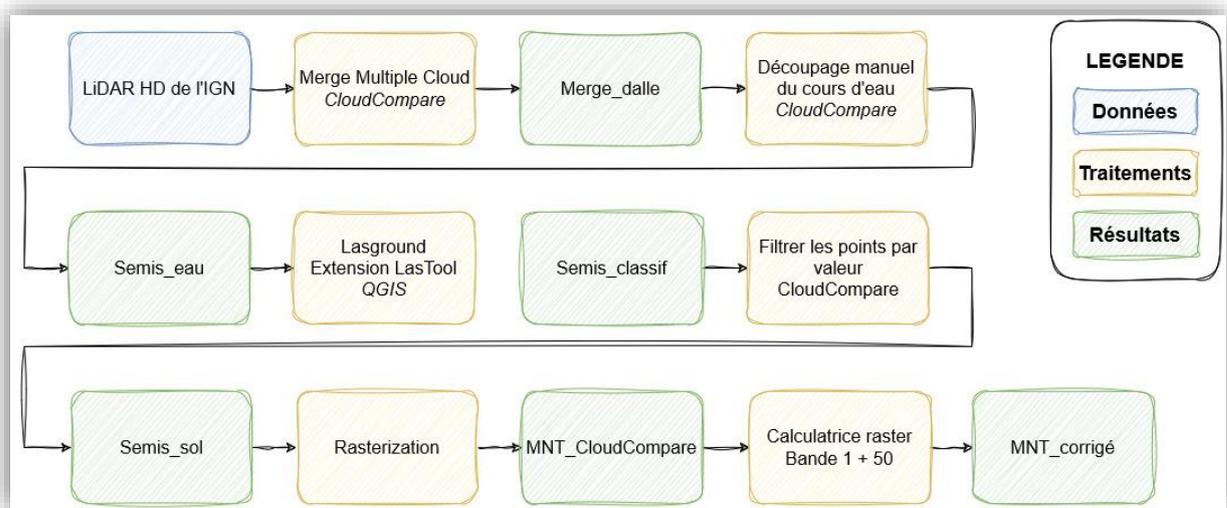


Figure 10 : Chaîne de traitements présentant la création des données de hauteur à l'eau

3. Choix des analyses statistiques

Dans la continuité de notre réflexion préliminaire avec la mise en place d'une variable réponse et des variables explicatives, le choix des analyses statistiques s'est essentiellement porté sur les Generalized Linear Model (GLM). En effet, ces outils statistiques sont une généralisation de la régression linéaire en permettant au modèle d'être relié à la variable réponse via une fonction lien. Notre variable réponse étant une variable binaire – puisqu'elle prend la valeur « 1 » quand un individu de renouées asiatiques est présent et « 0 » quand il

n'y a pas d'individu – le choix d'utiliser un GLM en tant que test statistique et lui attribuer une fonction lien « binomial » était évident.

Néanmoins, il est important de souligner la non-indépendance sur le plan spatial de nos variables explicatives. En effet, la taille des bancs sédimentaires et leur localisation sur le tronçon de rivière étudié varient systématiquement d'un banc à l'autre. Ainsi, chaque banc influence, plus ou moins, les différentes variables explicatives de notre jeu de données.

C'est cette dépendance aux bancs, qui nous dirige vers l'utilisation d'un Generalized Linear Mixed Model (GLMM ou modèle linéaire généralisé mixte). Pour faire simple un GLMM est un GLM avec une fonctionnalité supplémentaire qui lui permet de prendre en considération la non-indépendance des données.

Ici, on va donc utiliser un GLMM avec un lien logit, un effet aléatoire qui est le banc et une distribution binomiale des erreurs.

Pour compléter l'interprétation des résultats générés par les GLMMs, des tests de corrélations entre variables explicatives et des Analyses en Composante Principale (ACP) ont été réalisés. Ces différents tests permettent, eux aussi, d'étudier les relations et les interactions entre les différentes variables explicatives de notre jeu de données et ainsi mettre en avant certains des facteurs bio physiques influençant l'établissement des renouées asiatiques sur les bancs sédimentaires.

L'ensemble des analyses statistiques a été réalisé grâce au logiciel libre de droit R Studio (version R.3.1) et ses différents packages.

IV. PREMIERS RÉSULTATS ET DISCUSSION

A. TESTS STATISTIQUES

1. Relations entre les variables explicatives

a) Tests de corrélation

Des tests de corrélation ont été réalisés sur l'ensemble des variables explicatives continue afin de comprendre et d'analyser les relations qu'elles présentent (Figure 11).

Dans l'ensemble, les coefficients de corrélation entre les différentes variables explicatives sont proches de 0. Cela signifie qu'il n'existe pas de grosse corrélation entre chacune des variables et qu'elles sont donc toutes indépendante les unes des autres.

Il est néanmoins intéressant de noter que les variables concernant les granulométries ont les coefficients de corrélation les plus important. Entre la variable correspondant aux classes granulométriques de surface les plus grossières et la variable correspondant aux classes dominantes en surface, le coefficient de corrélation est proche de 0,5.

Cette valeur peut s'expliquer par l'organisation exponentielle de la classification de la granulométrie. En effet, plus la taille des grains augmente, plus l'écartement entre les classes augmentent. Cet effet entraine une augmentation des valeurs des classes de granulométrie proches de 0 par rapport à celles proches de la classe maximale qui est 2040 mm.

Toutefois, cette corrélation a été observée lors de la campagne de terrain et les résultats de ce test statistique ne viennent que confirmer nos ressentis.

Cette étude des corrélations entre les variables permet également de préparer les données du modèle linéaire mixte généralisé puisque ce dernier nécessite des données non indépendantes. Nous savons grâce à ce graphique, qu'il faudra choisir entre la variable correspondant aux classes granulométriques de surface les plus grossières de celle correspondant aux classes dominantes en surface.

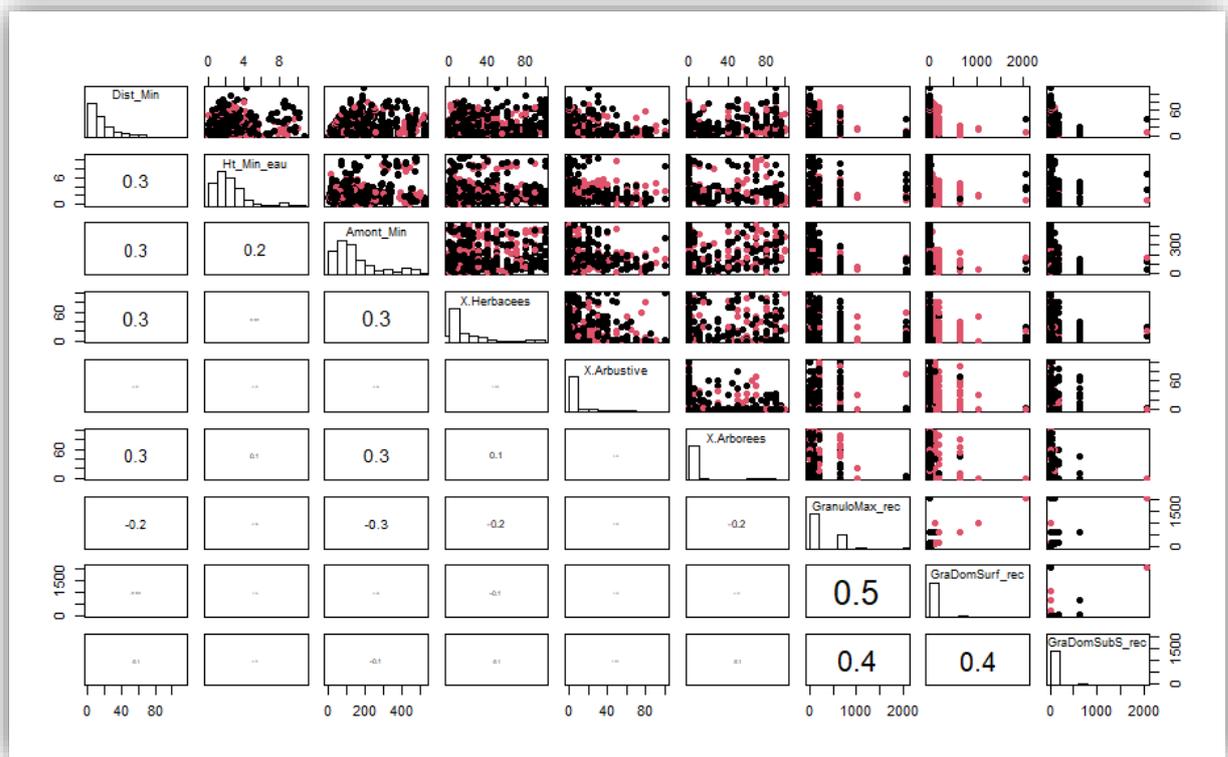


Figure 11 : Scatterplot de corrélation des variables explicatives

b) L'Analyse en Composantes Principales (ACP)

Pour entrer un peu plus dans les détails de l'analyse de la corrélation, l'utilisation d'une Analyse en Composante Principale (ACP) semble évidente. Celle-ci permet de synthétiser les relations entre les différentes variables quantitatives et offre un visuel assez intéressant permettant d'interpréter d'éventuelles influences de ces dernières sur notre variable réponse. Plusieurs ACP ont donc été réalisées afin de comparer les variables en fonction de leur caractéristique (de localisation, biotiques ou abiotiques).

L'analyse de l'ACP correspondant aux variables de localisation (Figure 12) semble indiquer une moins grande répartition de la localisation des observations de présence par rapport à la localisation des observations d'absence. L'orientation des axes des trois variables correspondant aux localisations sur le banc sédimentaire indique une faible corrélation positive entre la distance à l'eau et les deux autres variables.

Ainsi, cette ACP semble mettre en évidence la faible influence des caractéristiques de localisation sur la présence des renouées asiatiques.

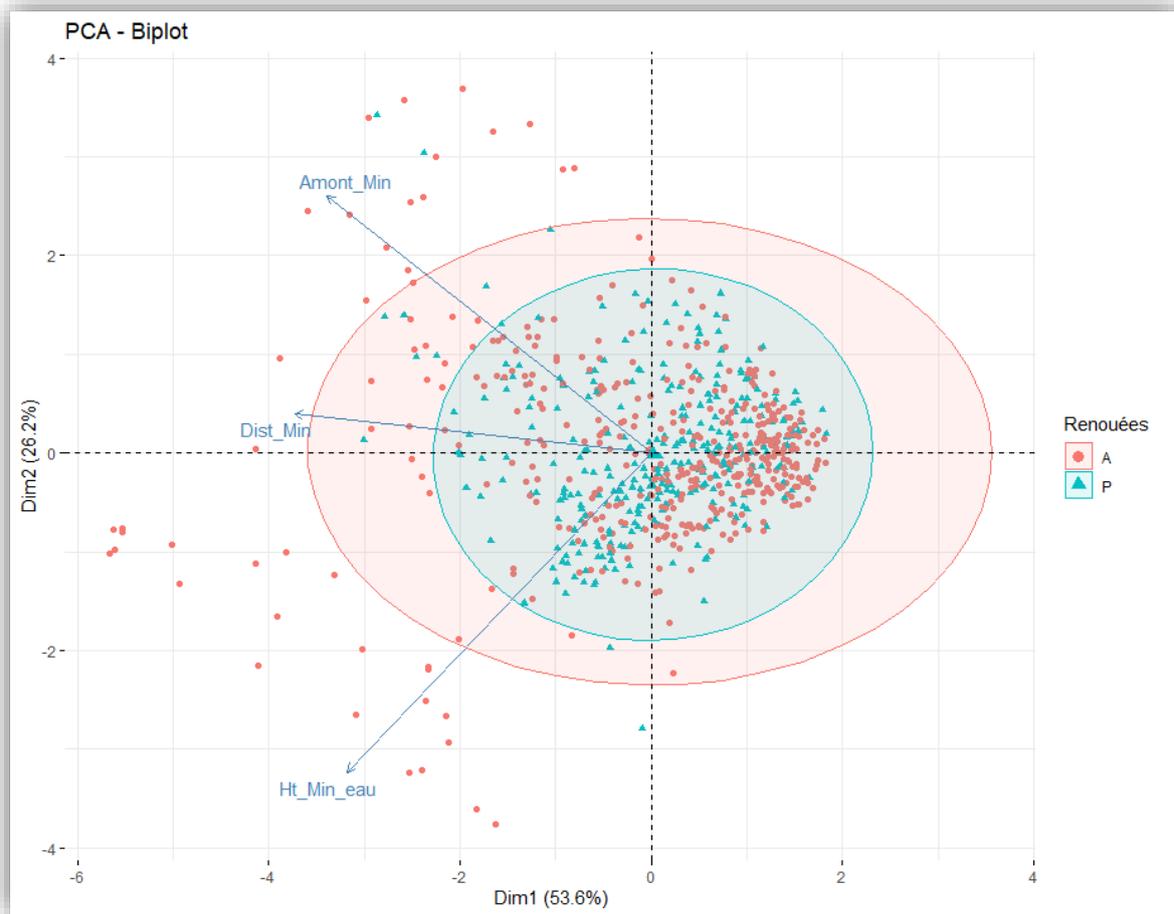


Figure 12 : ACP des variables caractérisant la localisation

L'ACP analysant les variables liées aux caractéristiques biotiques des observations (Figure 13) met en évidence une influence négative du recouvrement de la strate herbacée et arborée sur la présence des renouées asiatiques. En effet, l'ellipse rouge, représentant les absences de renouées sur les bancs sédimentaires tend vers la même direction que les axes représentant le pourcentage de recouvrement de la strate herbacée et de la strate arborées. Ces derniers semblent même corrélés entre eux positivement.

A l'inverse, l'axe correspondant à la variable indiquant la strate arbustive a une direction à 90° différente des deux autres axes. Cela indique une absence de corrélation et donc une indépendance avec les deux autres variables. Aussi, l'axe représentant la strate arbustive tend dans la même direction que l'ellipse bleue représentant les présences de renouées asiatiques sur les bancs sédimentaires et semble alors indiquer un effet.

La strate herbacée semble tout de même participer davantage à l'installation et au développement des renouées asiatiques sur les bancs sédimentaires que les strates herbacées et arborées.

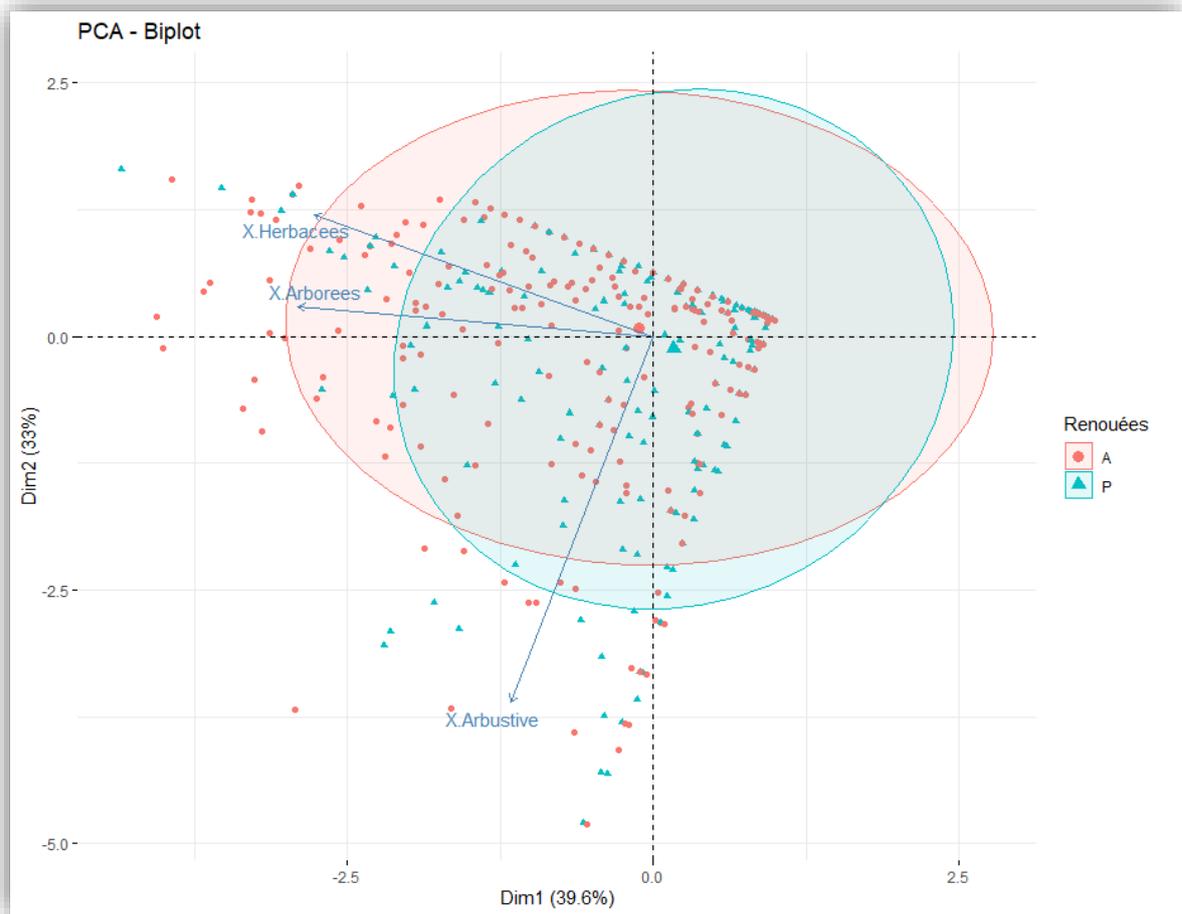


Figure 13 : ACP des variables correspondant aux recouvrements de la végétation

Dans le même principe que pour l'ACP présentant les pourcentages de recouvrement de la végétation et avec davantage d'évidence, l'ACP correspondant aux variables de granulométrie met en évidence une importante distinction entre les observations (Figure 14).

Une première influence concerne la variable représentant la classe granulométrique dominante en subsurface qui semble être néfaste à la présence des renouées asiatiques sur les bancs sédimentaires. A l'inverse, les variables représentant les classes granulométriques maximales et dominante en surface, participent positivement à la présence des renouées asiatiques sur les bancs sédimentaires. Nous pouvons également retrouver sur ce graphique, la corrélation et la non-indépendantes de ces deux variables.

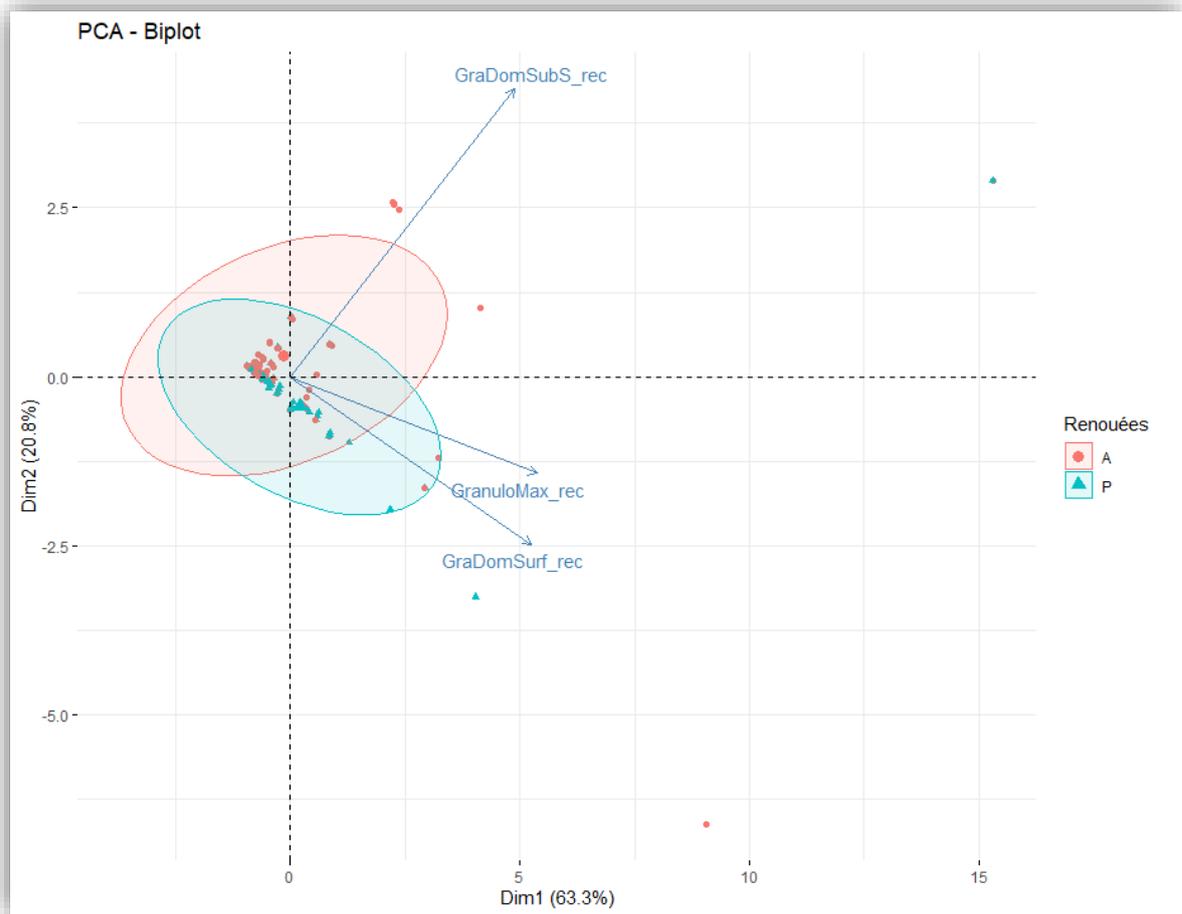


Figure 14 : ACP des variables correspondant à l'étude de la granulométrie

Lorsque l'on rassemble toutes les variables quantitatives dans une même ACP (Figure 15), nous pouvons distinguer les variables qui influencent les absences de celles influençant les présences des renouées asiatiques sur les bancs sédimentaires.

Nous pouvons alors observer que les variables explicatives correspondant à la hauteur à l'eau, à la distance à l'eau, à la distance par rapport au point amont, au pourcentage de recouvrement de la strate herbacée et au pourcentage de recouvrement de la strate arborée influencent la répartition des absences. A l'inverse, les trois variables correspondant aux granulométries tendent vers une influence de présences des renouées asiatiques sur les bancs sédimentaires.

Il est intéressant de noter que le recouvrement de la strate arbustive, se trouve dans une autre dimension de l'ACP et qu'elle n'a que très peu d'influence sur la présence ou l'absence des renouées asiatiques sur les bancs sédimentaires.

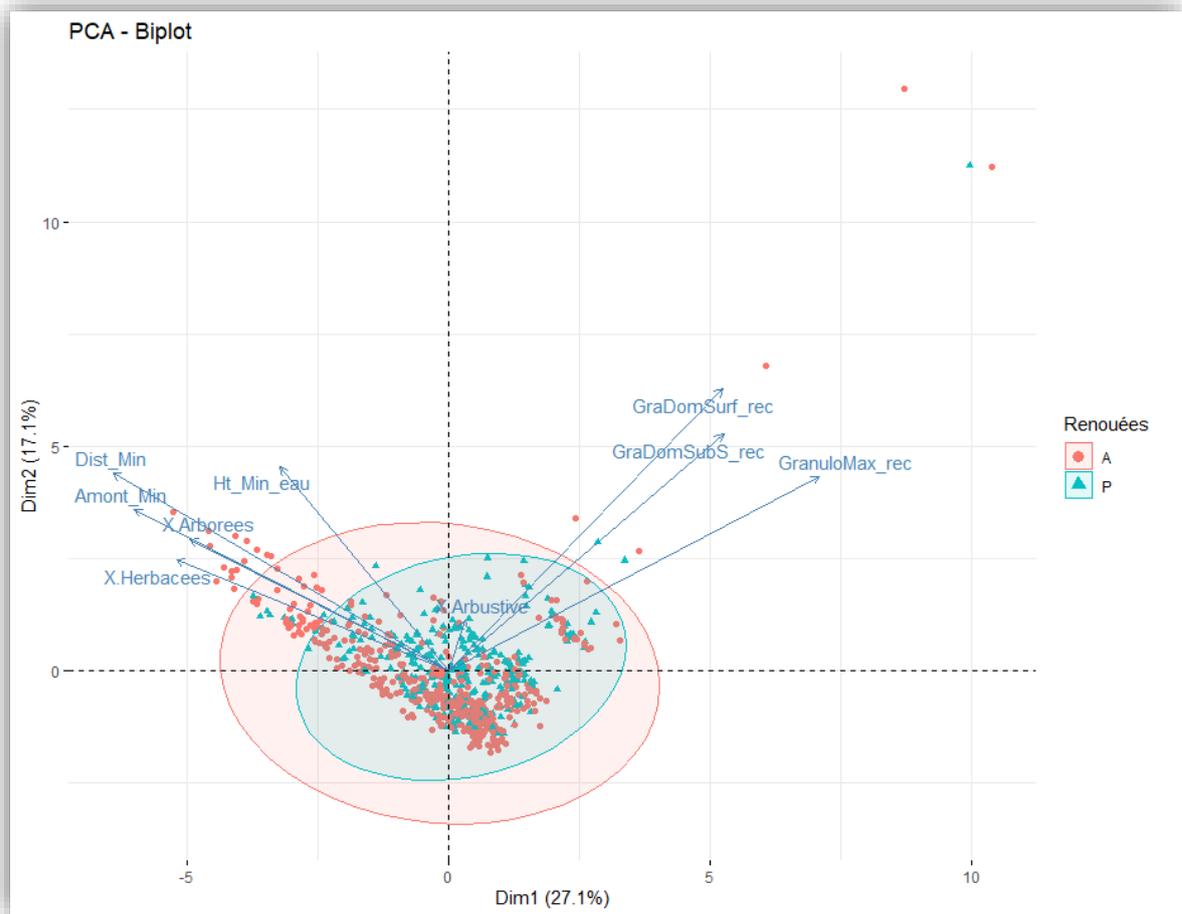


Figure 15 : ACP regroupant l'ensemble des variables explicatives

2. Relations avec les variables réponse

a) Barplots

La variable réponse étant une variable qualitative, il convient d'adapter les tests statistiques. Les barplots sont un outil permettant de visualiser l'intensité des observations d'une variable qualitative par rapport à une autre variable qualitative. C'est ce que nous avons fait dans la Figure 16 en comparant la variable explicative des obstacles avec notre variable réponse.

Le barplot met en évidence l'influence d'un obstacle situé à l'amont ou au milieu d'un massif de renouées. Autrement dit, les renouées asiatiques semblent préférer s'établir à l'aval ou au milieu des obstacles.

Cette interprétation a pu être observée sur le terrain où beaucoup de renouées se trouvaient au milieu de souches.

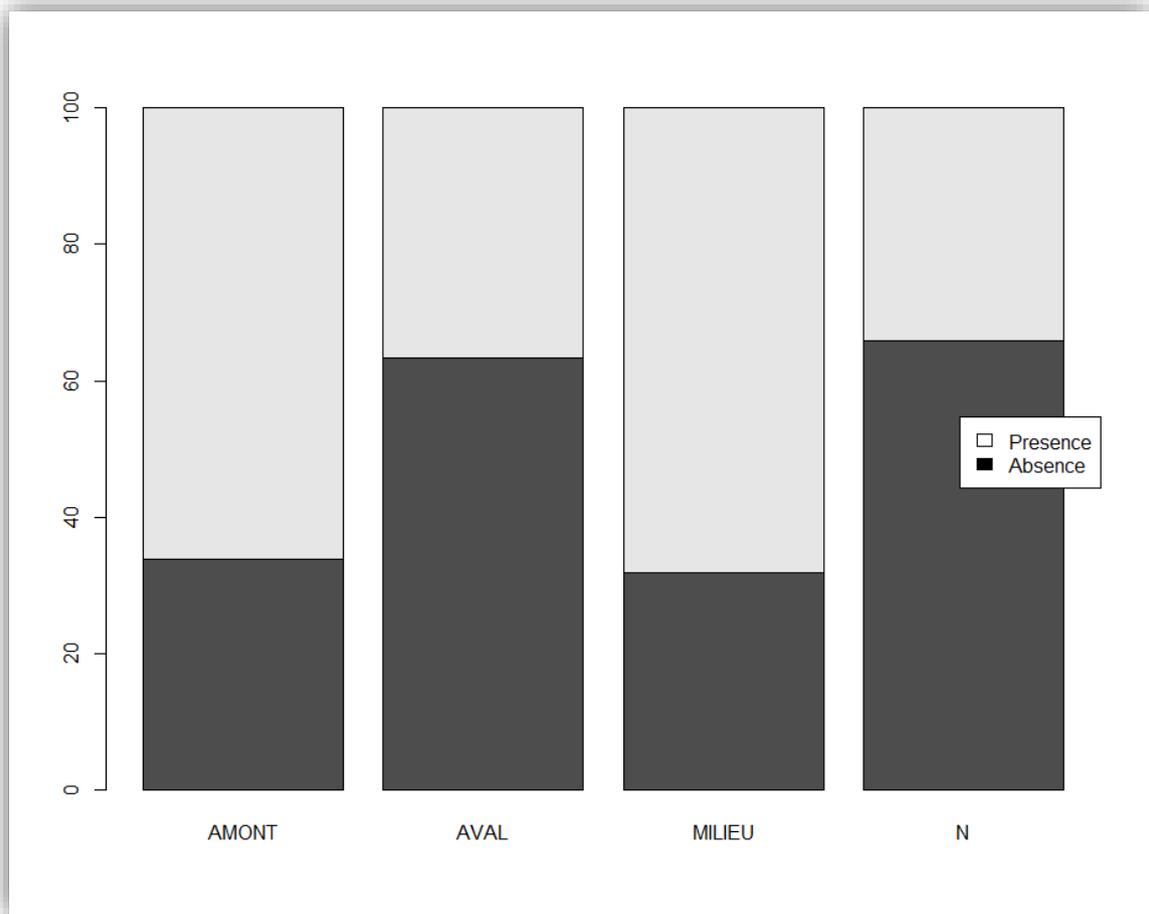


Figure 16 : Barplot de l'influence de l'obstacle sur l'établissement des renouées asiatiques

b) Boxplots

Les boxplots permettent de visualiser les répartitions de nos variables quantitatives par rapport à notre variable réponse qualitative.

L'alignement de ces boxplots deux à deux permet de visualiser les différences dans la répartition en fonction que les observations concernent les absences ou les présences.

Le graphique présentant les trois boxplots correspondant aux variables de localisation (Figure 17) met en évidence une différence certaine entre les observations d'absences et celles de présences pour les variables correspondant à la hauteur à l'eau et à la distance à l'amont du banc. Ainsi, nous pouvons penser que pour se maintenir, les renouées asiatiques ont besoin d'être à une certaine hauteur de l'eau et à une certaine distance de l'amont. Ce constat est également observable sur le terrain où l'on peut voir une majorité des renouées asiatiques (mais également la végétation) présente au centre du banc ; zone avec peu de perturbations physiques.

En revanche, ce boxplot semble mettre en évidence une faible influence de la distance à l'eau sur l'absence ou la présence des renouées asiatiques sur les bancs sédimentaires puisque ces deux graphiques sont relativement similaires.

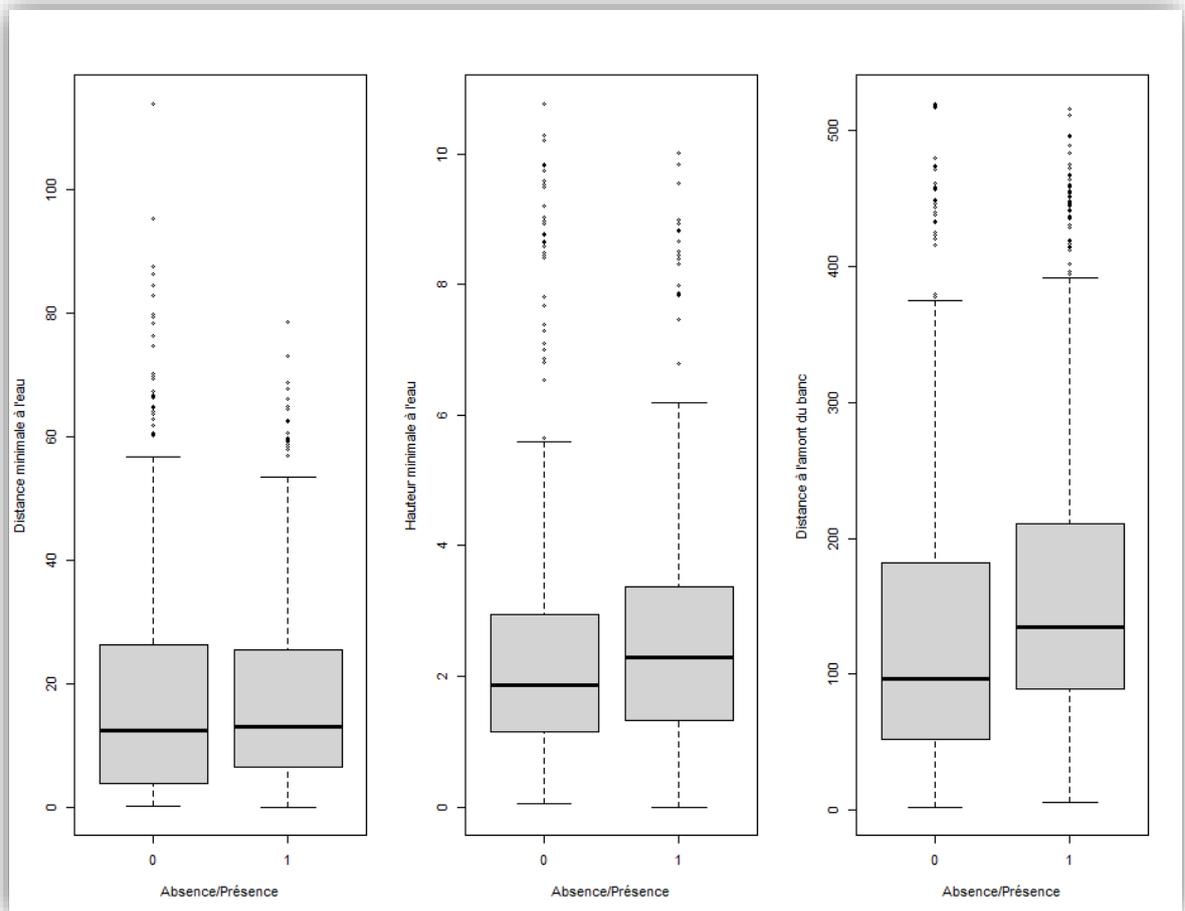


Figure 17 : Boxplot des variables caractérisant la localisation

Le boxplot suivant met en vis-à-vis les répartitions des différentes strates végétales par rapport aux différentes observations (Figure 18). Les moyennes des trois variables sont respectivement identiques pour chacune des strates que l'observation indique une présence ou non. En revanche, lorsque nous regardons de plus près la répartition du recouvrement de la strate herbacée, nous pouvons observer que ce dernier est plus important pour les absences de renouées que pour les présences. Ainsi, nous pouvons penser que la présence d'une strate herbacée est un frein à l'établissement des renouées asiatiques sur les bancs sédimentaires.

Ces résultats peuvent s'expliquer dans les deux sens ; une première idée serait que les massifs de renouées ont du mal à s'implanter lorsque le recouvrement de la strate herbacée est important tandis qu'une seconde idée pourrait correspondre à la difficulté qu'a la strate herbacée à survivre après l'établissement d'un massif de renouées qui sécrète des

substances biochimiques et qui produit une importante litière. Les observations faites sur le terrain semblent indiquer cette deuxième hypothèse.

Pour les deux autres variables, les boxplots ne semblent pas significatifs (car différences très faibles), bien que le recouvrement de la strate arbustive semble légèrement favoriser la présence des renouées asiatiques.

Les données concernant le pourcentage de recouvrement de la strate arborée peuvent s'expliquer par le nombre important dont la valeurs des observations est nulle.

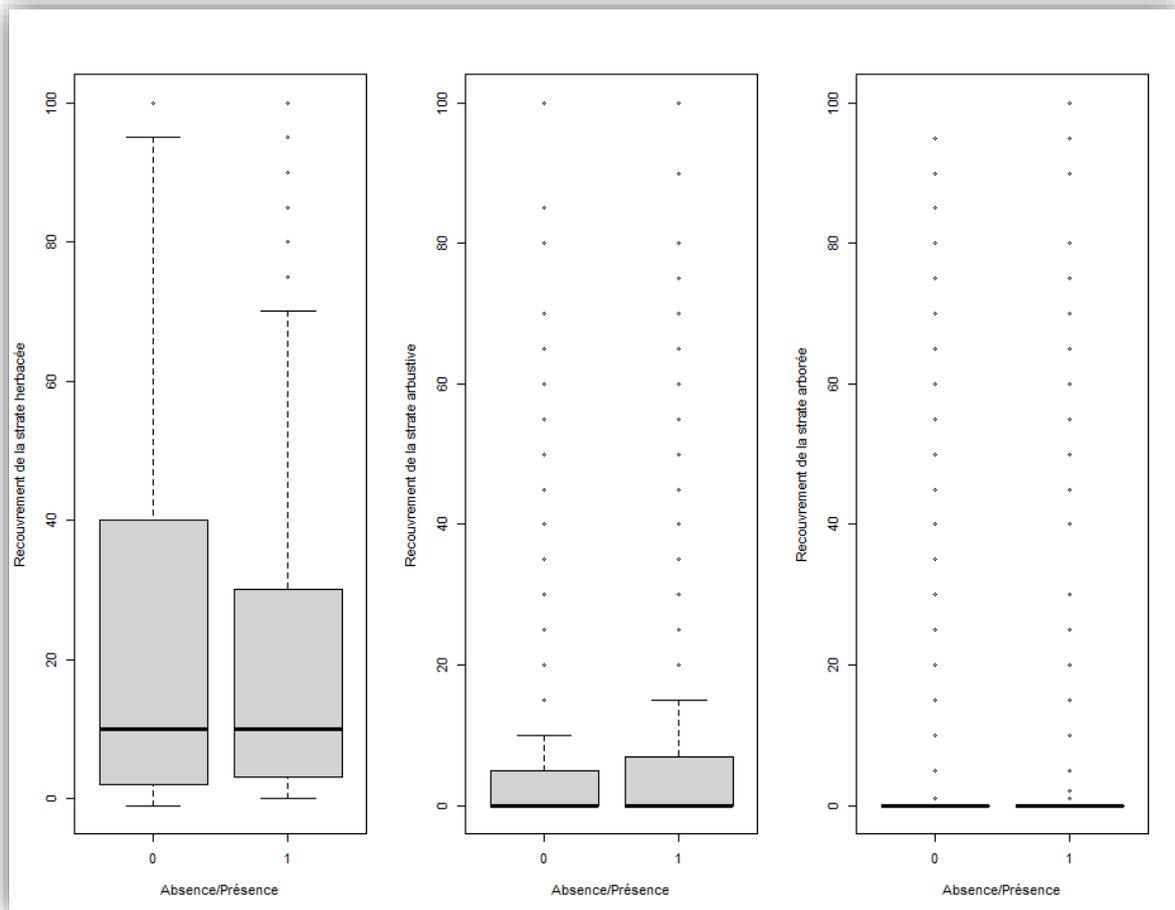


Figure 18 : Boxplot des variables correspondant aux recouvrements de la végétation

Les boxplots présentant les représentations des variables concernant la granulométrie mettent en évidence une grande disparité entre les présences et les absences des renouées asiatiques (Figure 19). En effet, la classe granulométrique maximale de surface ne doit, semble-t-il, pas être trop grosse ni trop petite pour que les renouées asiatiques s'établissent sur les bancs sédimentaires. Aussi, la classe granulométrique dominante en surface semble indiquer une souplesse des renouées par rapport à la taille des grains. A l'inverse, le dernier boxplot semble mettre en avant la nécessité présenter une classe de granulométrie en subsurface proche de 0 pour que les renouées puissent s'établir.

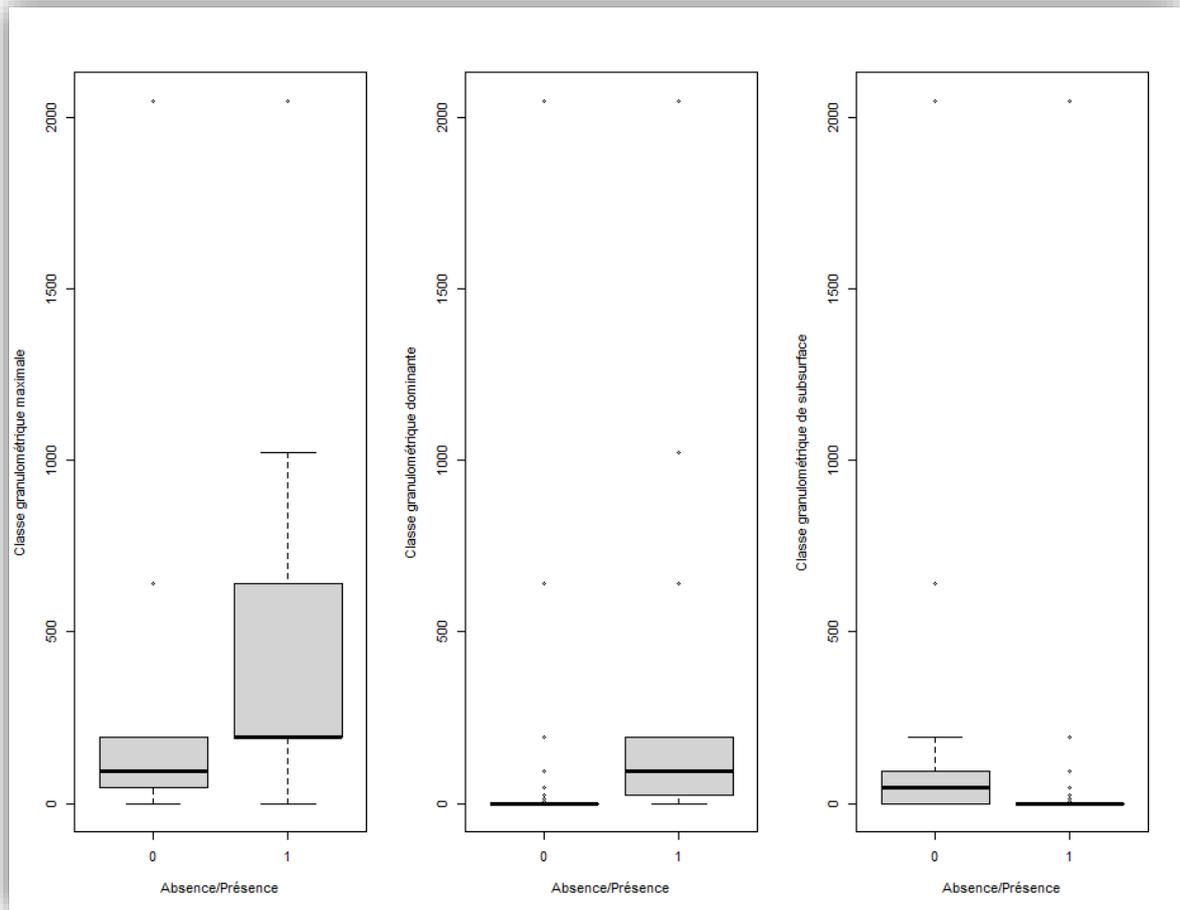


Figure 19 : Boxplot des variables correspondant à l'étude de la granulométrie

B. GENERALIZED LINEAR MODEL MIXED (GLMM)

1. Choix du modèle

Pour sélectionner les variables étudiées dans le GLMM, une cinquantaine de combinaisons candidates, a priori écologiquement plausibles, plus un modèle nul ont été réalisés. La sélection du modèle le plus parcimonieux a été appliquée à l'aide du Critère d'Information d'Akaike (AIC), du Critère d'Information de Bayésien (BIC) et le R^2 marginal (R^2m) (Annexe 5).

L'AIC et le BIC représentent un compromis entre le biais (diminuant avec le nombre de variables) et la parcimonie (volonté d'étudier le plus petit nombre de variables). Plus ces deux critères ont des valeurs faibles, plus le modèle est parcimonieux.

Le R^2 marginal permet, quant à lui, de déterminer la qualité du modèle et sert, ici, de complètement à la sélection des variables. Plus celui-ci est élevé, plus la qualité du modèle est forte

Pour améliorer le modèle, nous avons pris la décision de simplifier notre variable « Obstacle » en une variable numérique binaire. Ainsi, il n'est désormais plus question de la localisation de l'obstacle mais bien de la présence (1) ou de l'absence (0) d'un obstacle à proximité directe de l'observation.

Ainsi, les variables explicatives retenues pour la réalisation du modèle linéaire généralisé mixte sont la distance à l'eau, la hauteur à l'eau, le pourcentage de recouvrement de la strate herbacée, la granulométrie maximale de surface, la granulométrie dominante de sub surface et la présence ou non d'un obstacle. Le banc est lui pris en compte en tant qu'effet aléatoire. L'AIC de ce modèle vaut 689.6 et correspond à la plus petite valeur obtenue sur l'ensemble des combinaisons testées. Le BIC vaut 726.6 est correspond à la deuxième valeur la plus faible. Enfin, le R²m est deux 58,7 % et équivaut à la deuxième valeur la plus élevée sur l'ensemble des combinaisons candidates (Table 2).

Tableau 2 : Tableau présentant le choix du modèle statistique

	Variables choisies	AIC	BIC	R ² m
Model	Distance à l'eau Hauteur à l'eau % de recouvrement de la strate herbacée Granulométrie maximale de surface Granulométrie dominante en sub surface Présence d'un obstacle	689.6	726.6	58.7 %

2. Conditions d'application

a) Significativité des effets aléatoires

La détermination de la significativité d'un effet aléatoire dans un modèle peut être effectuée en comparant les valeurs des AIC, BIC et R² d'un modèle avec l'effet aléatoire avec un modèle sans l'effet aléatoire. Dans notre cas, l'analyse des différences entre ces valeurs montrent que l'effet aléatoire est primordial dans le modèle.

Une autre façon d'étudier l'effet de la variable aléatoires sur le modèle, plus visuelle cette fois, et de réaliser un box plot (Figure 20). Celui-ci permet de déterminer si les constantes sont significativement différentes de 0 et significativement différentes les unes des autres en mettant en évidence une distribution très hétérogène des bancs et justifiant, par cette même occasion, la dépendance des variables à effets fixes avec la variable à effets aléatoires.

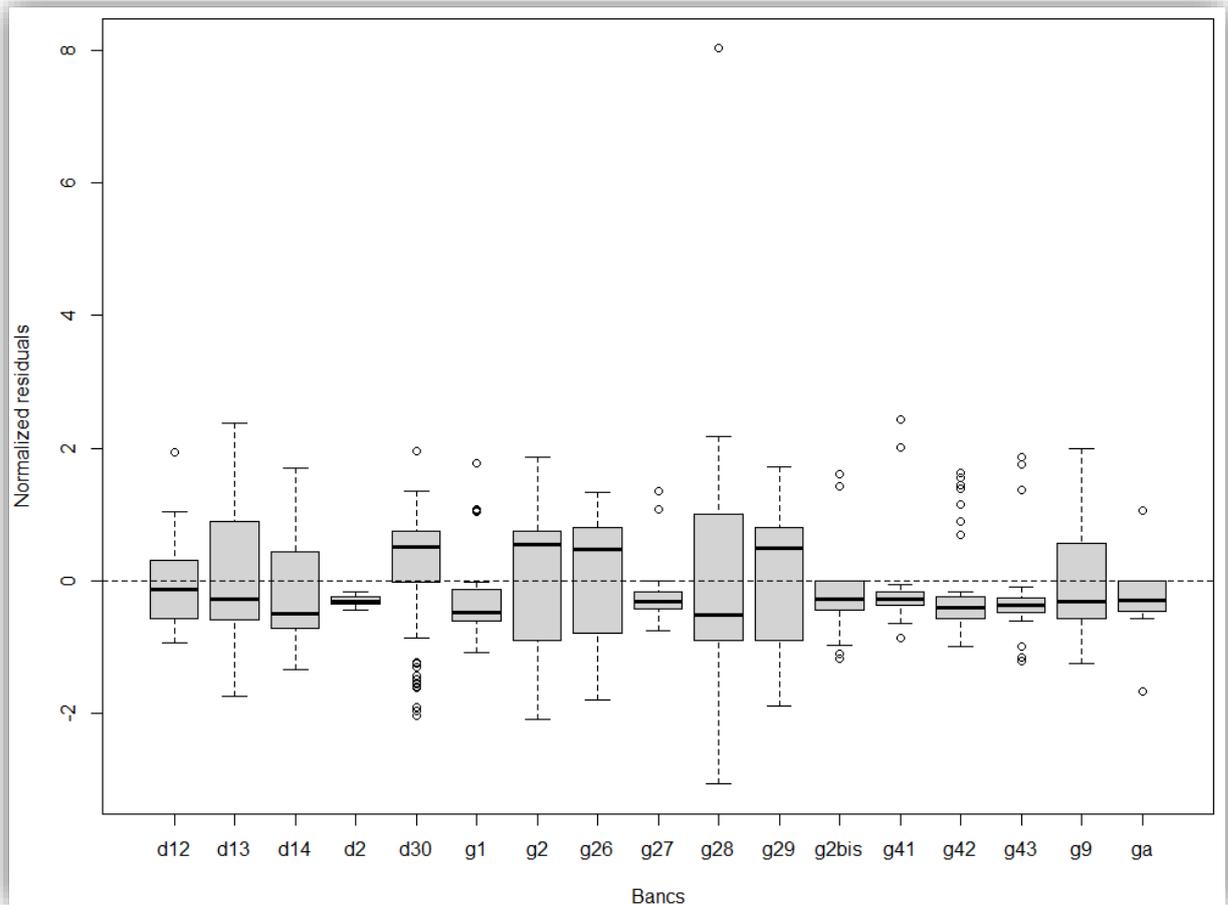


Figure 20 : Boxplot des bancs sédimentaires

b) Facteur d'inflation de variance (VIF)

Le calcul des valeurs du facteur d'inflation de variance (VIF) permet de s'assurer de l'absence de multicolinéarité trop forte entre les variables indépendantes (Table 3). L'ensemble des valeurs de VIF sont inférieures à 5, indiquant l'absence de multicolinéarité excessive dans le modèle.

Tableau 3 : Tableau présentant les résultats du VIF

Variable	VIF
Dist_Min	1.2343
Ht_Min_eau	1.0853
%_Herbacée	1.2044
GranuloMax	1.0566
GranuloDomSurf	1.0711
Obstacle	1.0545

c) Pseudo R^2

L'étude du Pseudo R^2 de notre modèle permet de connaître la qualité de celui-ci est sa capacité à être prédictif. Pour être intéressant, le pseudo R^2 nécessite des étapes complémentaires. Toutefois, le calcul du pseudo R^2 de notre modèle indique une qualité de

58.7%. 40% reste alors à découvrir, à savoir de nouvelles variables explicatives ou une augmentation du nombre d'observation pour obtenir un modèle robuste.

3. Mesure de l'influence des variables explicatives

Les résultats obtenus précédemment, concernant, entre autres, la significativité de l'effet aléatoire et le facteur d'inflation de variance permettent d'analyser le modèle sélectionné.

La mesure de l'influence des caractéristiques bio physiques étudiées sur l'établissement des renouées asiatiques sur les bancs sédimentaires se fait grâce à l'analyse des coefficients et à la significativité des variables du modèle (Table 4).

Les « p-value » de l'ensemble des variables étudiées dans le modèle sont tous supérieurs à 0.05 à l'exception de la variable « Ht_Min_eau » qui s'en rapproche tout de même fortement. Nous pouvons donc dire que l'ensemble des coefficients obtenus dans ce modèle statistique sont significatifs.

Les variables « % Herbacée » et « GranuloDomSubS » influencent négativement notre variable réponse. La variable « GranuloDomSubS » influence même très fortement le modèle. Cela signifie que plus le pourcentage de recouvrement de la strate herbacée est élevé ou que la granulométrie de subsurface est grossière, moins les renouées asiatiques arrivent à se s'installer.

Toutes les autres variables influencent positivement la variable réponse et donc la présence des renouées asiatiques sur les bancs sédimentaires. Ainsi, un éloignement en long et en hauteur à l'eau, une petite granulométrie de subsurface et la présence d'un obstacle semblent favoriser l'établissement des renouées asiatiques.

Tableau 4 : Tableau de mesure de l'influence des variables explicatives

Variable	Coefficient	Std.error	Statistique	P-value	Significativité
Intercept	-1.5176	0.4261	-3.562	0.0004	***
Dist_Min	1.7384	0.7800	2.229	0.0258	*
Ht_Min_eau	1.4717	0.8289	1.775	0.0758	.
%_Herbacée	-2.2114	0.4433	-4.988	6.10e-07	***
GranuloMax	3.6230	0.8073	4.488	7.20e-06	***
GranuloDomSubS	-34.7386	5.0109	-6.933	4.13e-12	***
Obstacle	1.5526	0.2543	6.105	1.03e-09	***

C. DISCUSSIONS

1. Distance à l'eau :

L'ensemble des tests statistiques mettent en évidence une légère influence positive de la distance à l'eau sur la présence des renouées asiatiques sur les bancs sédimentaires. Autrement dit, sur un banc colonisé par des renouées asiatiques, plus nous nous éloignons de l'eau, plus nous avons de chance de trouver des taches de renouées.

2. Hauteur à l'eau :

Sur le même principe que pour la distance à l'eau, la hauteur à l'eau semble avoir une légère influence sur la présence des renouées asiatiques sur les bancs sédimentaires. Ainsi, plus nous nous éloignons de l'eau verticalement, plus nous avons de chance de trouver des individus.

3. Distance à l'amont du banc :

La variable étudiant la distance à l'amont du banc n'a pas été prise en compte dans le modèle linéaire généralisé mixte puisque son ajout n'offrait pas une meilleure parcimonie. Cela veut déjà dire que son influence sur la présence des renouées asiatiques est faible.

L'ACP n'offre pas non plus d'information significatives quant à l'influence de l'éloignement avec l'amont du banc sur l'établissement des renouées asiatiques. En revanche, le box-plot met en évidence une légère nécessité d'éloignement des tâches de renouées asiatiques par rapport à l'amont du banc.

Au vu de ces comparaisons, il reste difficile d'avérer une quelconque influence de la distance à l'amont du banc sur l'établissement des renouées asiatiques.

Les travaux de Marie Didier avaient quant à eux permis de conclure sur une forte influence de cet éloignement sur la présence des renouées asiatiques.

4. Pourcentage de recouvrement de la strate herbacée

Le pourcentage de recouvrement de la strate herbacée semble exercer une influence négative sur la présence des renouées. Ainsi, plus la strate de végétation herbacée est dense, moins les renouées asiatiques arrivent à s'installer.

Une autre lecture de ce résultat statistique peut correspondre à un effet de causalité. Les renouées asiatiques une fois installées produisent énormément de biomasse qui se transforme rapidement en humus recouvrant le sol. Cette hypothèse vient conforter les observations faites sur le terrain.

5. Pourcentage de recouvrement de la strate arbustive

La variable étudiant le pourcentage de recouvrement de la strate arbustive n'a pas été prise en compte dans le modèle linéaire généralisé mixte puisque son ajout n'offrait pas une meilleure parcimonie. Cela veut déjà dire que son influence sur la présence des renouées asiatiques est faible.

Les boxplots ne permettent pas de mettre en évidence une influence positive ou négative de la présence d'une strate arbustive sur l'établissement des renouées asiatiques.

En revanche, l'ACP offre, quant à elle, la visualisation d'une influence positive de cette végétation sur la présence des renouées asiatiques sur les bancs sédimentaires.

Ces résultats statistiques peuvent être biaisés par la présence d'une végétation arbustive très nombreuse (saule, ailente, robinier...) de par sa faculté à faire face aux perturbations hydrogéomorphologiques des bancs sédimentaires. Ainsi, les probabilités de trouver un massif de renouées asiatiques au milieu d'un massif de saules peuvent être élevées sans pour autant avérer la préférence des renouées asiatiques à s'établir au milieu d'une strate arbustive.

Aussi, la préférence d'installation que semblent avoir les renouées asiatiques avec le pourcentage de recouvrement de la strate arbustive peut s'expliquer par la fonction d'obstacle que peut jouer cette dernière auprès des plantules de renouées.

6. Pourcentage de recouvrement de la strate arborée

La variable étudiant le pourcentage de recouvrement de la strate arborée n'a pas été prise en compte dans le modèle linéaire généralisé mixte puisque son ajout n'offrait pas une meilleure parcimonie. Cela veut déjà dire que son influence sur la présence des renouées asiatiques est faible.

Le faible nombre d'observations présentant une valeur non nulle pour cette variable entraîne une difficulté d'analyse. Le box plot met bien en évidence cette faible distribution.

7. Classe granulométrique de surface la plus grossière

La variable correspondant à la classe granulométrique de surface la plus grossière semble Influencer positivement la présence des renouées asiatiques. Ainsi, plus la granulométrie de surface est grossière, plus les chances d'installation des renouées asiatiques sont élevées.

8. Classe granulométrique dominante en surface

La variable étudiant cette caractéristique n'a pas été prise en compte dans le modèle linéaire généralisé mixte car elle présente une colinéarité avec la classe granulométrique la

plus grossière en surface. Son ajout, comparé à celui de la classe granulométrique de surface n'améliorait pas le modèle.

Le box plot met, tout de même, en évidence une assez grande souplesse des renouées asiatiques avec la granulométrie et l'ACP illustre l'influence positive de cette granulométrie sur l'établissement des renouées asiatiques.

9. Classe granulométrique dominante en subsurface

La classe granulométrique dominante en subsurface présente un énorme effet sur l'installation des renouées asiatiques sur les bancs sédimentaires. Plus cette classe est fine, plus les renouées asiatiques s'installeront facilement.

Le boxplot semble même mettre en évidence une sorte de nécessité pour les renouées asiatiques à présenter une subsurface fine comme du sable ou de gravier fin.

10. Présence d'un obstacle à proximité

Enfin, la dernière variable étudiée lorsque nous l'étudions en tant que variable binaire, il semblerait qu'elle ait une influence positive sur la présence des renouées asiatiques.

Lorsque l'on regarde plus en détail la localisation de l'obstacle, il semblerait que les renouées asiatiques soient influencées par les obstacles situés à l'amont ou autour.

CONCLUSION ET PERSPECTIVES

A. APPORTS

Les résultats obtenus lors de ces différents tests statistiques sont intéressants et permettent d'avoir une première idée sur les caractéristiques qui influencent l'établissement des renouées asiatiques sur les bancs sédimentaires. La présence d'une granulométrie de subsurface assez fine, un faible recouvrement de la végétation, un obstacle ou un éloignement en longueur et en hauteur suffisant participent à l'installation des renouées asiatiques sur les bancs sédimentaires.

B. LIMITES

Néanmoins, il est important de souligner la présence de quelques limites à ce travail de recherche.

Une première limite concerne l'acquisition des variables explicatives au modèle. Les valeurs des pourcentages de recouvrement des trois strates de végétation ou les classes granulométriques ont été relevées à vue par des opérateurs différents. Ces valeurs sont donc assez subjectives et peuvent fortement varier d'un opérateur à un autre. Pour diminuer au maximum ce biais, nous avons utilisé des grilles visuelles et essayé, dans la limite du possible, de travailler en binôme afin de systématiquement se questionner sur les valeurs à attribuer.

Une autre limite à l'acquisition des données concerne le nombre total d'observations. Près de 800 observations dans un modèle statistique en écologie semble correcte mais certains paramètres des variables, à l'exemple du pourcentage de recouvrement de la strate arborée, ne présentent pas assez de valeurs différentes de 0. Cela peut entraîner une sous- ou sur-estimation des valeurs.

Une dernière limite à cette étude concerne la pertinence d'un modèle statistique du type GLMM. En effet, ce dernier ne prend pas en compte toutes les variables explicatives - alors que certaines semblent exercer une influence sur la variable réponse - et permet seulement d'informer sur les influences négatives ou positives des variables explicatives sur notre variable réponse. Dans notre étude, il serait plus intéressant de connaître les limites des préférences de présence des renouées asiatiques sur les bancs sédimentaires. Autrement dit, il serait intéressant de pouvoir visualiser des seuils de préférences d'établissement.

C. PERSPECTIVES

Les perspectives de ce projet exploratoire restent nombreuses, modifiables et peuvent s'organiser en court, moyen et long terme.

A court terme, il sera question d'étudier le pouvoir prédictif du modèle statistique. Pour cela, nous segmenterons les données utilisées pour le GLMM en deux jeux de données distincts. Une première partie des données servira à créer le modèle prédictif tandis que la seconde partie servira, quant à elle, à valider le pouvoir prédictif.

A moyen terme, il sera intéressant d'ajouter au modèle prédictif de nouvelles variables explicatives comme l'humidité du sol ou les interactions avec les autres communautés végétales... L'objectif étant de se rapprocher d'un modèle prédictif présentant un R^2 proche de 100, indiquant alors une bonne qualité de prédiction de l'établissement des renouées asiatiques sur les bancs sédimentaires.

Toujours à moyen termes, il sera possible d'étudier, à l'échelle du tronçon de rivière cette fois, l'établissement des renouées asiatiques sur les abords des cours d'eau. L'ajout de nouvelles variables comme la pente longitudinale du tronçon ou la distance latérale à l'eau pourront être ajoutés au modèle statistique réalisé par Marie Didier lors de son stage de M2.

A long terme, et une fois que ces deux modèles sur l'Hérault présenteront des résultats prédictifs suffisamment intéressants, ils pourront être testés sur d'autres cours d'eau. Le Gardon qui présente des propriétés physiques relativement similaires à l'Hérault (hydrologie, météorologie, taille du bassin versant) peut constituer une première exportation du modèle.

Enfin, la dernière étape de cette étude sera la réalisation d'une carte de probabilités de présence des renouées asiatiques le long des cours d'eau. Cette carte doit être opérationnelle et permettre aux gestionnaires des rivières de connaître les zones d'actions principales. Pour ce faire, cette carte prédictive devra connaître la granulométrie ou le pourcentage de recouvrement des strates végétales en tout point du banc. Les protocoles de caractérisation de la granulométrie (Liébault et al., 2023) ou de la végétation à partir de vols drone doivent permettre d'obtenir ces informations.

Aussi, il sera question en parallèle de cette étude, de mesurer l'impact érosif des renouées asiatiques sur les berges des cours d'eau.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Arnold, Emily, et Laura Toran. 2018. « Effects of Bank Vegetation and Incision on Erosion Rates in an Urban Stream ». *Water* 10(4):482.
- Bellard, Céline, Phillip Cassey, et Tim M. Blackburn. 2016. « Alien species as a driver of recent extinctions ». *Biology Letters* 12(2):20150623.
- Carpenter, Steve, Brian Walker, J. Marty Anderies, et Nick Abel. 2001. « From Metaphor to Measurement: Resilience of What to What? » *Ecosystems* 4(8):765-81.
- Centre de ressources Espèces Exotiques Envahissantes. 2023. « Reynoutria japonica ». *Centre de ressources*. Consulté 28 juin 2023 (<http://especies-exotiques-envahissantes.fr/espece/reynoutria-japonica/>).
- Child, L., et M. Wade. 2000. *The Japanese Knotweed Manual: The Management and Control of an Invasive Alien Weed*. Packard Publishing Ltd.
- Colleran, Brian, Shaw Nozaki Lacy, et Maria Rafaela Retamal. 2020. « Invasive Japanese Knotweed (*Reynoutria Japonica* Houtt.) and Related Knotweeds as Catalysts for Streambank Erosion ». *River Research and Applications* 36(9):1962-69.
- Conseil Régional de l'environnement de l'Estrie. 2023. « La Renouée du Japon ». *Conseil régional de l'environnement de l'Estrie*. Consulté 28 juin 2023 (<https://www.environnementestrie.ca/renouee-du-japon/>).
- Corenblit, Dov, Eric Tabacchi, Johannes Steiger, et Angela M. Gurnell. 2007. « Reciprocal Interactions and Adjustments between Fluvial Landforms and Vegetation Dynamics in River Corridors: A Review of Complementary Approaches ». *Earth-Science Reviews* 84(1-2):56-86.
- Courchamp, Franck. 2021. « Les Invasions Biologiques, Un Fardeau Économique Pour La France ». *The Conversation*, septembre 7.
- Didier, Marie. 2021. *Hydrogeomorphological processes of rivers and plant invasions. What interactions in the case of Asian knotweeds?* Université Grenoble Alpes.
- Dommanget, Fanny, André Evette, François-Marie Martin, Florence Piola, Mélanie Thiébaud, Soraya Rouifed, Claude Lavoie, et Mireille Boyer. 2019. « Les renouées asiatiques, espèces exotiques envahissantes ». *Sciences Eaux & Territoires* (27):8-13.
- Eaufrance. 2023. « Débit morphogène ». *Eaufrance*. Consulté 28 juin 2023 (<https://www.eaufrance.fr/glossaire/debit-morphogene>).
- Gurnell, A. M., M. Gonzalez Del Tanago, M. T. O'Hare, M. Van Oorschot, B. Belletti, T. Buijse, D. Garcia De Jalon, R. Grabowski, D. Hendriks, O. Mountford, M. Rinaldi, L. Solari, M. Szewczyk, et A. Vargas-Luna. 2014. *Influence of Natural Hydromorphological Dynamics on Biota and Ecosystem Function. Part 1 (Chapters 1 to 3 of 6). Deliverable 2.2 Part 1 of REFORM (REstoring Rivers FOR Effective Catchment Management), a Collaborative Project (Large-Scale Integrating Project) Funded by the European Commission within the 7th Framework Programme under Grant Agreement 282656. Publication - Report*. European Commission.

- Gurnell, Angela M., et Walter Bertoldi. 2020. « Extending the Conceptual Model of River Island Development to Incorporate Different Tree Species and Environmental Conditions ». *River Research and Applications* 36(8):1730-47.
- Hortobágyi, Borbála, Dov Corenblit, Johannes Steiger, et Jean-Luc Peiry. 2018. « Niche Construction within Riparian Corridors. Part I: Exploring Biogeomorphic Feedback Windows of Three Pioneer Riparian Species (Allier River, France) ». *Geomorphology* 305:94-111.
- Hydroportail. 2023. « Carte comparative des données aux statistiques en toutes eaux | SCHAPI - HydroPortail ». Consulté 28 juin 2023
- INPN. 2023. « Reynoutria japonica Houtt., 1777 - Renouée du Japon, Reynoutrie du Japon ». *Inventaire National du Patrimoine Naturel*. Consulté 28 juin 2023 (https://inpn.mnhn.fr/espece/cd_nom/117503).
- INPN, et ONB. 2019. *Les chiffres clés de la diversité des espèces référencées dans l'INPN*.
- IPBES. 2019. *Le rapport de l'évaluation mondiale de la biodiversité et des services écosystémiques*.
- IGN. 2023. « Accueil | Géoservices ». Consulté 28 juin 2023 (<https://geoservices.ign.fr/>).
- Isenburg, Martin. 2021. « LAStools - efficient LiDAR processing software ».
- Kettunen, Marianne, Piero Genovesi, Stephan Gollasch, Shyama Pagad, et Uwe Starfinger. 2009. « Assessment of the Impacts of IAS in Europe and the EU ».
- Liébault, Frédéric, Michaël Deschâtres, Laurent Borgniet, et Gabriel Melun. 2023. « Granulométrie de surface des lits en tresses à partir d'images drone ». *Sciences Eaux & Territoires* (42):25-29.
- Lowe S, Daniel, M. Browne, S. Boudjelas, et M. De Poorter. 2000. « 100 of the World's Worst Invasive Alien Species: A Selection From The Global Invasive Species Database ». P. 715-16 in *Encyclopedia of Biological Invasions*. University of California Press.
- Martin, François-Marie, Fanny Dommanget, Philippe Janssen, Thomas Spiegelberger, Clément Viguier, et André Evette. 2019. « Could Knotweeds Invade Mountains in Their Introduced Range? An Analysis of Patches Dynamics along an Elevational Gradient ». *Alpine Botany* 129(1):33-42.
- Matte, Rebecca. 2020. « Crues, dissémination et impact de la renouée du Japon en milieux riverains ».
- Matte, Rébecca, Maxime Boivin, et Claude Lavoie. 2022. « Japanese Knotweed Increases Soil Erosion on Riverbanks ». *River Research and Applications* 38(3):561-72.
- Mummigatti, Karan. 2008. « The Effects of Japanese Knotweed (*Reynoutria Japonica*) on Riparian Lands in Otsego County, New York ».
- ONB. 2021. *Biodiversité en crise : il est urgent d'amplifier les actions*.
- Renault, D., Elena Manfrini, Boris Leroy, Christophe Diagne, Liliana Ballesteros-Mejia, Elena Angulo, et Franck Courchamp. 2021. « Biological Invasions in France: Alarming Costs and Even More Alarming Knowledge Gaps ». *NeoBiota* 67:191.

- Solari, L., M. Van Oorschot, B. Belletti, D. Hendriks, M. Rinaldi, et A. Vargas-Luna. 2016. « Advances on Modelling Riparian Vegetation—Hydromorphology Interactions ». *River Research and Applications* 32(2):164-78.
- Stover, Jiana E., Edward A. Keller, Tom L. Dudley, et Eddy J. Langendoen. 2018. « Fluvial Geomorphology, Root Distribution, and Tensile Strength of the Invasive Giant Reed, *Arundo Donax* and Its Role on Stream Bank Stability in the Santa Clara River, Southern California ». *Geosciences* 8(8):304.
- UICN France. 2014. « Assises nationales « espèces exotiques envahissantes : vers un renforcement des stratégies d'action » ». Consulté 28 juin 2023 (<https://uicn.fr/assises-nationales-eee-2014/>).
- UICN France. 2019. « Le rapport mondial de l'IPBES confirme le déclin alarmant de la nature ». *UICN France*. Consulté 28 juin 2023 (<https://uicn.fr/le-rapport-mondial-de-ipbes-confirme-le-declin-alarmant-de-la-nature/>).
- Williamson, Mark H., et Alastair Fitter. 1996. « The Characters of Successful Invaders ». *Biological Conservation* 78(1):163-70.

LISTE DES FIGURES

FIGURE 1 : CARTE DE REPARTITION DES RENOUÉES DU JAPON EN FRANCE (SOURCE : INPN 2023).....	4
FIGURE 2 : SCHEMA SYNTHETIQUE REPRESENTANT LES PRINCIPALES BARRIERES LIMITANT LE PROCESSUS D'INVASION, D'APRES LA REGLE DES « TEN'S RULE » ((WILLIAMSON ET FITTER, 1996).....	7
FIGURE 3 : DIFFERENCE DES FEUILLES DES TROIS ESPECES DES RENOUÉES ASIATIQUES. SOURCE : RHIZOMEX.....	8
FIGURE 4 : CARTOGRAPHIE DU BASSIN VERSANT DE L'HERAULT	15
FIGURE 5 : GRAPHIQUE SYNTHETISANT LA REFLEXION PRELIMINAIRE.....	18
FIGURE 6 : EVOLUTION DE LA MORPHOLOGIE ET DE LA VEGETATION D'UN BANC SEDIMENTAIRE DE L'HERAULT ENTRE 2018 ET 2022.....	22
FIGURE 7 : CARTOGRAPHIE DES DONNEES ACQUISES SUR UN BANC SEDIMENTAIRE DE L'HERAULT LORS DE LA CAMPAGNE DE TERRAIN	25
FIGURE 8 : CHAINE DE TRAITEMENTS PRESENTANT LA CREATION DES DONNEES DE DISTANCE A L'AMONT DU BANC	26
FIGURE 9 : CHAINE DE TRAITEMENTS PRESENTANT LA CREATION DES DONNEES DE DISTANCE A L'EAU	27
FIGURE 10 : CHAINE DE TRAITEMENTS PRESENTANT LA CREATION DES DONNEES DE HAUTEUR A L'EAU	28
FIGURE 11 : SCATTERPLOT DE CORRELATION DES VARIABLES EXPLICATIVES	31
FIGURE 12 : ACP DES VARIABLES CARACTERISANT LA LOCALISATION	32
FIGURE 13 : ACP DES VARIABLES CORRESPONDANT AUX RECOUVREMENTS DE LA VEGETATION	33
FIGURE 14 : ACP DES VARIABLES CORRESPONDANT A L'ETUDE DE LA GRANULOMETRIE	34
FIGURE 15 : ACP REGROUPANT L'ENSEMBLE DES VARIABLES EXPLICATIVES.....	35
FIGURE 16 : BARPLOT DE L'INFLUENCE DE L'OBSTACLE SUR L'ETABLISSEMENT DES RENOUÉES ASIATIQUES	36
FIGURE 17 : BOXPLOT DES VARIABLES CARACTERISANT LA LOCALISATION	37
FIGURE 18 : BOXPLOT DES VARIABLES CORRESPONDANT AUX RECOUVREMENTS DE LA VEGETATION.....	38
FIGURE 19 : BOXPLOT DES VARIABLES CORRESPONDANT A L'ETUDE DE LA GRANULOMETRIE	39
FIGURE 20 : BOXPLOT DES BANCs SEDIMENTAIRES	41

LISTE DES TABLES

TABLEAU 1 : TABLEAU DE SYNTHESE DES VARIABLES ETUDIEES.....	17
TABLEAU 2 : TABLEAU PRESENTANT LE CHOIX DU MODELE STATISTIQUE	40
TABLEAU 3 : TABLEAU PRESENTANT LES RESULTATS DU VIF.....	41
TABLEAU 4 : TABLEAU DE MESURE DE L'INFLUENCE DES VARIABLES EXPLICATIVES.....	42

TABLE DES MATIERES

RÉSUMÉ	II
ABSTRACT	II
MOTS CLES	III
KEY WORDS	III
REMERCIEMENTS	IV
SIGLES ET ACRONYMES	V
AVANTS PROPOS	VI
SOMMAIRE	VII
INTRODUCTION	1
A. CONTEXTE GENERAL.....	1
B. OBJECTIFS	2
C. PROBLEMATIQUE	3
D. PRESENTATION DU PLAN.....	4
I. ÉTAT DE L'ART :	6
A. LES INTERACTIONS DES ESPECES EXOTIQUES ENVAHISSANTES AVEC LES MILIEUX NATURELS	6
1. <i>Généralités sur les Espèces Exotiques Envahissantes</i>	6
2. <i>Ecologie des renouées asiatiques</i>	7
B. L'INFLUENCE DES PROCESSUS HYDROGÉOMORPHOLOGIQUES	9
1. <i>... Sur l'établissement de la végétation riveraine</i>	9
2. <i>... Sur l'établissement des renouées asiatiques</i>	9
C. L'INFLUENCE SUR LES PROCESSUS HYDROGÉOMORPHOLOGIQUES	10
1. <i>... De la végétation riveraine</i>	10
2. <i>... Des renouées asiatiques</i>	10
II. REFLEXIONS PRELIMINAIRES	12
A. HYPOTHESES	12
1. <i>La source</i>	12
2. <i>Le transport</i>	12
3. <i>Le dépôt</i>	13
4. <i>Le développement</i>	13
5. <i>Le maintien</i>	13
B. CHOIX DU TERRAIN D'ÉTUDE.....	14
C. CHOIX DES VARIABLES EXPLICATIVES.....	15
D. GRAPHIQUE GENERAL DE SYNTHÈSE	17
III. MÉTHODOLOGIE	20
A. OUTILS A DISPOSITION	20
1. <i>Données brutes</i>	20
2. <i>Matériel</i>	22
B. MÉTHODOLOGIE APPLIQUÉE	23
1. <i>Acquisition des données de terrain</i>	23
2. <i>Création de nouvelles données à partir des SIG</i>	25
a) <i>Distance à l'amont du banc</i>	26
b) <i>Distance à l'eau</i>	26

c) Hauteur à l'eau	28
3. <i>Choix des analyses statistiques</i>	28
IV. PREMIERS RÉSULTATS ET DISCUSSION	30
A. TESTS STATISTIQUES	30
1. <i>Relations entre les variables explicatives</i>	30
a) Tests de corrélation	30
b) L'Analyse en Composantes Principales (ACP)	31
2. <i>Relations avec la variables réponse</i>	35
a) Barplots.....	35
b) Boxplots	36
B. GENERALIZED LINEAR MODEL MIXED (GLMM)	39
1. <i>Choix du modèle</i>	39
2. <i>Conditions d'application</i>	40
a) Significativité des effets aléatoires	40
b) Facteur d'inflation de variance (VIF).....	41
c) Pseudo R ²	41
3. <i>Mesure de l'influence des variables explicatives</i>	42
C. DISCUSSIONS	43
1. <i>Distance à l'eau</i> :.....	43
2. <i>Hauteur à l'eau</i> :.....	43
3. <i>Distance à l'amont du banc</i> :.....	43
4. <i>Pourcentage de recouvrement de la strate herbacée</i>	43
5. <i>Pourcentage de recouvrement de la strate arbustive</i>	44
6. <i>Pourcentage de recouvrement de la strate arborée</i>	44
7. <i>Classe granulométrique de surface la plus grossière</i>	44
8. <i>Classe granulométrique dominante en surface</i>	44
9. <i>Classe granulométrique dominante en subsurface</i>	45
10. <i>Présence d'un obstacle à proximité</i>	45
CONCLUSION ET PERSPECTIVES	46
A. APPORTS.....	46
B. LIMITES.....	46
C. PERSPECTIVES	47
RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES	I
LISTE DES FIGURES	IV
LISTE DES TABLES	V
TABLE DES MATIERES	VI
ANNEXES VIII	
1. <i>Objectif</i> :.....	XI
2. <i>Moyens matériels et humains</i> :.....	XI
a) Moyen humains	XI
b) Moyens matériels techniques.....	XI
c) Moyens matériels de sécurité.....	XI
3. <i>Préparation à la campagne de terrain</i> :.....	XII
a) Préparation en amont.....	XII
b) Préparation in situ	XII
4. <i>Relevés de terrain</i> :.....	XII
a) Présences des renouées asiatiques	XII
b) Absences des renouées asiatiques	XIII
c) Acquisitions d'images aériennes.....	XIV

ANNEXES

ANNEXE 1 : CAPTURE D'ECRAN DU LOGICIEL AGISOFT METASHAPE IX

ANNEXE 2 : PRESENTATION DES BANCS SEDIMENTAIRES PROSPECTES X

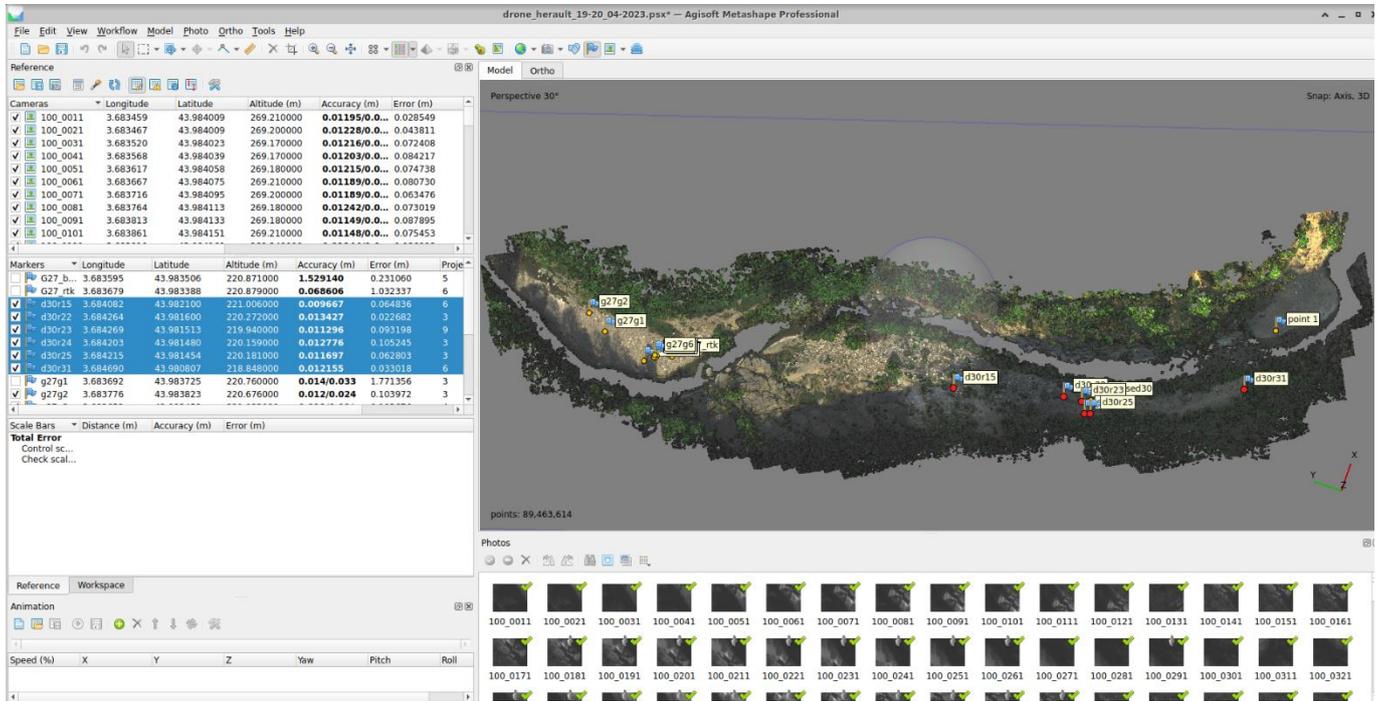
ANNEXE 3 : PROTOCOLE DE TERRAIN XI

ANNEXE 4 : COMPARAISON DES ALTITUDES ENTRE LIDAR HD DE L'IGN ET LE MNT GENERE A PARTIR
DU DRONE. XVIII

ANNEXE 5 : SELECTION DU MODELE XIX

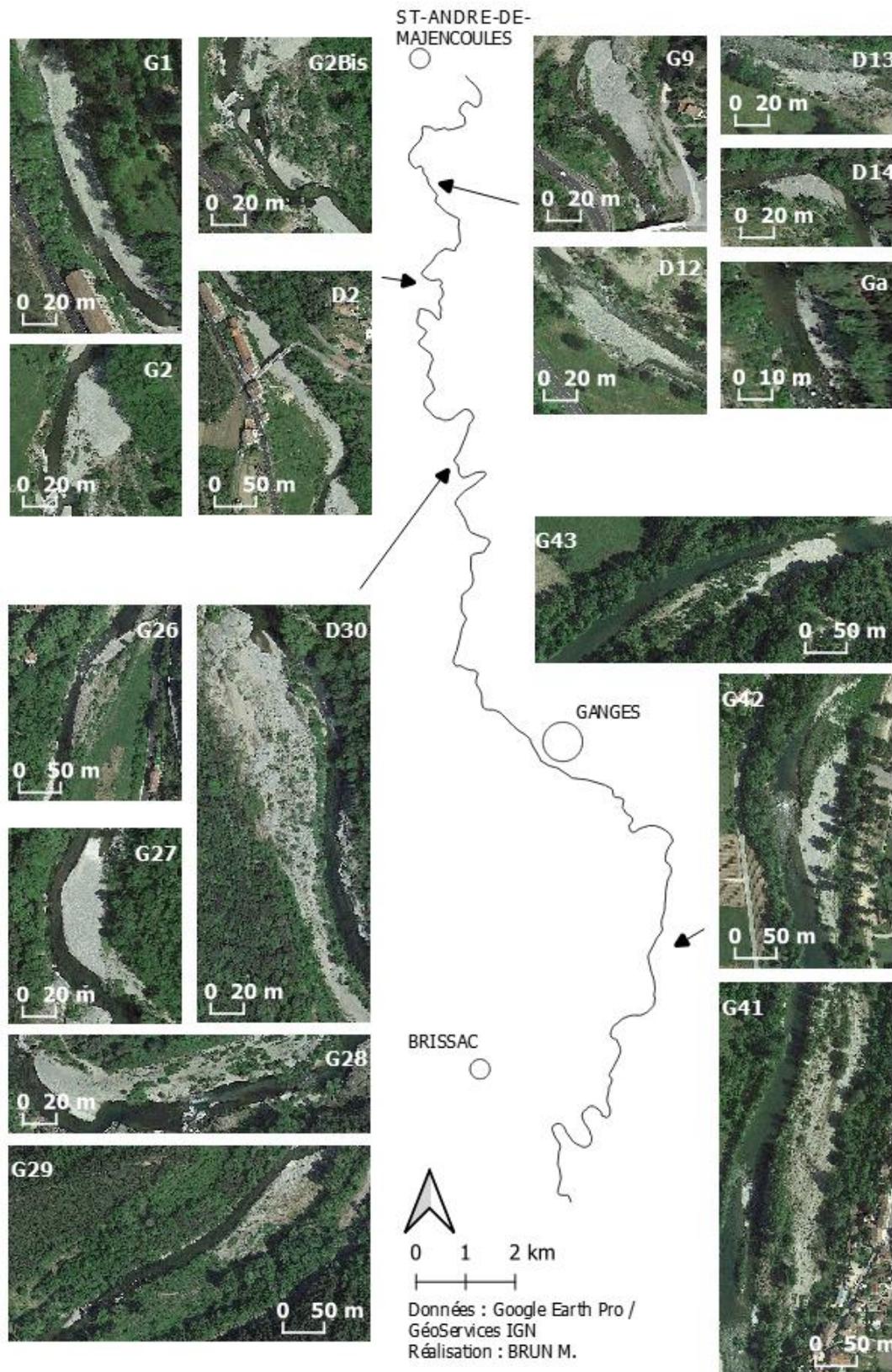
ANNEXE 1 :

CAPTURE D'ECRAN DU LOGICIEL AGISOFT METASHAPE



ANNEXE 2 :

PRESENTATION DES BANCS SEDIMENTAIRES PROSPECTES



ANNEXE 3 :

PROTOCOLE DE TERRAIN

1. Objectif :

L'objectif de cette campagne de terrain est de récupérer des données de localisation et des caractéristiques biotiques et abiotiques influençant potentiellement l'installation des renouées asiatiques sur les bancs sédimentaires. Pour étudier ces facteurs influents, il est nécessaire de comparer des observations où les renouées asiatiques sont présentes avec des zones où elles sont absentes.

2. Moyens matériels et humains :

a) Moyen humains

Il est conseillé de faire les mesures de terrain par binômes afin d'être efficace dans les relevés en terme de timing et de précision. La réalisation de vols drones, présent en supplément dans le protocole de terrain afin d'augmenter l'acquisition des données, nécessite un télépilote professionnel.

Une à deux demi-journées peuvent être nécessaires pour effectuer l'ensemble des relevés sur un banc sédimentaire en fonction de sa taille et de son envahissement.

b) Moyens matériels techniques

- 2 cadres de 1m² ou 2 mètres de chantier
- 1 mètre de chantier
- 1 décamètre
- 2 grilles de granulométrie
- 2 piochons
- 2 GPS différentiels (avec tablette ou portable)
- Carnets de terrain et crayons
- Drone DJI Phantom 4 RTK
- Base RTK

c) Moyens matériels de sécurité

- Bottes ou Waders avec gilet de sauvetage
- Trousse de secours
- Téléphone portable
- Corde flottante et couteau

3. Préparation à la campagne de terrain :

a) Préparation en amont

Il est primordial de bien préparer la phase de bureau précédant la campagne de terrain afin d'optimiser les déplacements et le temps passé sur site. Il est intéressant de nommer les différents bancs dans cette phase de préparation afin de s'y retrouver tout au long du protocole expérimental.

Nous avons fait le choix de nommer les différents bancs sédimentaires en fonction de leur rive et de leur position par rapport à l'amont du cours d'eau. Ainsi, le banc le plus en amont de notre tronçon d'étude situé en rive gauche se nomme « G1 », le suivant « G2 » et ainsi de suite. Pour la rive droite et pour les bancs en ilots, ils suivent respectivement le même principe : « D1 », « D2 », ... et « I1 », « I2 », ...

Le croisement des données de localisations passées des renouées asiatiques avec les images aériennes disponibles en ligne permet de sélectionner des premiers bancs sédimentaires. Une analyse plus poussée, et bien que peu exhaustive, permet d'éliminer des bancs dont l'accessibilité est nulle.

b) Préparation in situ

La préparation sur site concerne principalement la délimitation du banc qui n'est pas toujours aisée. Avec l'ensemble des opérateurs présents, il peut être judicieux de prospecter un peu la zone et de se questionner sur les limites à donner au banc, à l'amont, à l'aval et au niveau de la berge. Les critères permettant la bonne délimitation du banc sont une rupture de pente évidente, la limite avec les gros arbres ou la présence d'un chenal secondaire.

Une fois le banc correctement délimité, il convient de réaliser les dernières petites préparations nécessaires au bon déroulé des relevés de terrain tel que la connexion des GPS avec les satellites, la vérification du nom du banc ou la préparation du carnet de terrain (Annexe 1).

Enfin, il est nécessaire de diviser les missions de chacun en trois groupes distincts. De préférence, deux binômes consacrés aux localisations de présence et d'absence des renouées asiatiques puis un dernier opérateur, pilote de drone professionnel, pour les acquisitions d'images aériennes.

4. Relevés de terrain :

a) Présences des renouées asiatiques

Dans cette mission, le binôme prospecte le banc sédimentaire exhaustivement afin de localiser l'ensemble des massifs de renouées asiatiques présents. Les massifs de renouées se distinguent les uns des autres par un écartement de plus de 2m.

1- Localisation au dGPS :

Lorsqu'un massif est distingué, l'opérateur a deux choix.

- Le massif fait moins de 50 cm de diamètre. L'opérateur fait donc un seul point de localisation avec le GPS.
- Le massif fait plus de 50 cm de diamètre. L'opérateur fait donc un polygone en enregistrant plusieurs points le long du massif.

L'opérateur nomme son point enregistré afin de s'y retrouver lors de l'analyse des données. Nous avons fait le choix de nommer nos points de la manière suivante : Nom du banc + R (pour renouées) + Numéro

d'enregistrement. Ainsi, pour le troisième enregistrement d'une renouée sur le banc sédimentaire nommé G28, le point enregistré sera **G28R3**.

2- Caractéristique de végétation

Le binôme se questionne ici sur le recouvrement de la strate herbacée, de la strate arbustive et de la strate arborée.

Grâce au cadre de 1m² posé autour de la tâche la plus dense du massif de renouées et grâce à une grille d'estimation disponible en ligne (Annexe 2) le binôme inscrit sur son carnet de terrain le pourcentage de recouvrement de la végétation pour chacune des trois strates.

ATTENTION : Ne pas prendre la renouée asiatique dans l'estimation du pourcentage de recouvrement.

3- Caractéristiques granulométriques

Le binôme se questionne, ici, sur la granulométrie. A l'intérieur du cadre de 1m², il mesure, à l'aide d'un gabarit visuel de granulométrie (Annexe 3) la classe granulométrique la plus grossière, la classe granulométrique avec le recouvrement le plus important en surface et la classe granulométrique avec le recouvrement le plus important en subsurface. Il note ensuite, dans son carnet de terrain, la classe retenue avec le code microhabitats.

4- Obstacle

La présence d'un obstacle à proximité directe du point de localisation (moins d'1m) et pouvant participer au dépôt de la renouée asiatique est noté ainsi que sa localisation. De ce fait, une souche d'arbre, un amas de branches ou de troncs ou un déchet anthropique, dès lors qu'ils semblent ancrés dans le sol peuvent constituer un obstacle.

L'opérateur indique alors, sur son carnet de terrain, si l'obstacle est situé en amont, au milieu ou à l'aval de la tâche renouée respectivement « AMONT », « MILIEU » ou « AVAL ». S'il n'y a pas d'obstacle, il indique « N ».

5- Densité des tiges

Le binôme compte le nombre de tiges de renouées asiatiques présentes dans le quadra d'1m² et l'inscrit sur le carnet de terrain.

6- Diamètre des 5 plus grosses tiges

Le binôme mesure le diamètre des cinq plus grosses tiges situées dans la tâche de renouée et l'inscrit sur le carnet de terrain.

b) Absences des renouées asiatiques

Dans cette mission, le binôme réalise des transects semi-aléatoirement, transversaux et séparés de 10 à 30 m. Cette distance dépend de la taille du banc et de l'irrégularité topographique de la limite avec l'eau. La longueur du transect et le nombre de points enregistrés dépendent, quant à eux, de la longueur et de la variation morphologique du banc. L'ensemble des transects réalisés démarre du point en limite à l'eau et chemine linéairement en direction de la berge.

L'objectif, ici, est de capturer une variabilité sur les différents facteurs étudiés.

1- Localisation au dGPS :

Le binôme se déplace le long du transect en partant de la berge. Il prend un premier point en limite à l'eau puis un second à proximité afin de pouvoir placer son cadre d'1m² sur une zone sans eau. Dès que la topographie, la végétation ou la granulométrie du sol varie significativement, un nouveau point GPS est enregistré.

L'opérateur nomme son point enregistré afin de s'y retrouver lors de l'analyse des données. Nous avons fait le choix de nommer nos points de la manière suivante : Nom du banc + Numéro de transect + Numéro du point d'enregistrement. Ainsi, pour le troisième points d'enregistrement, du cinquième transect, sur le banc sédimentaire nommé D12, le point enregistré sera **D12T5P3**.

2- Caractéristique de végétation

Le binôme se questionne ici sur le recouvrement de la strate herbacée, de la strate arbustive et de la strate arborée.

Grâce au cadre de 1m² posé autour de la tâche la plus dense du massif de renouées et grâce à une grille d'estimation disponible en ligne (Annexe 2) le binôme inscrit sur son carnet de terrain le pourcentage de recouvrement de la végétation pour chacune des trois strates.

ATTENTION : Ne pas prendre la renouée asiatique dans l'estimation du pourcentage de recouvrement.

3- Caractéristiques granulométriques

Le binôme se questionne, ici, sur la granulométrie. A l'intérieur du cadre de 1m², il mesure, à l'aide d'un gabarit visuel de granulométrie (Annexe 3) la classe granulométrique la plus grossière, la classe granulométrique avec le recouvrement le plus important en surface et la classe granulométrique avec le recouvrement le plus important en subsurface. Il note ensuite, dans son carnet de terrain, la classe retenue avec le code microhabitats.

4- Obstacle

La présence d'un obstacle à proximité directe du point de localisation (moins d'1m) et pouvant participer au dépôt de la renouée asiatique est noté ainsi que sa localisation. De ce fait, une souche d'arbre, un amas de branches ou de troncs ou un déchet anthropique, dès lors qu'ils semblent ancrés dans le sol peuvent constituer un obstacle.

L'opérateur indique alors, sur son carnet de terrain, si l'obstacle est situé en amont, au milieu ou à l'aval de la tâche renouée respectivement « AMONT », « MILIEU » ou « AVAL ». S'il n'y a pas d'obstacle, il indique « N ».

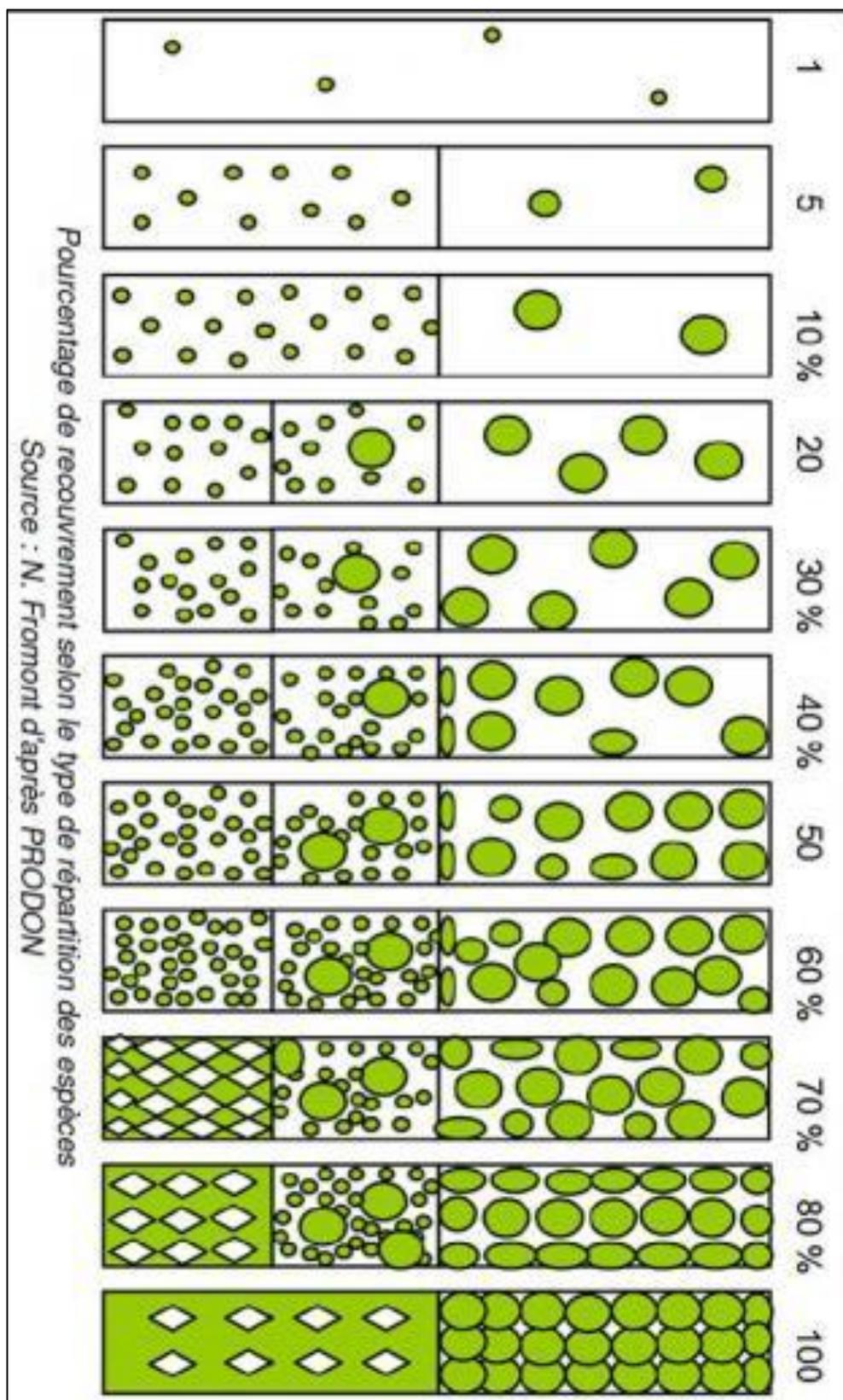
c) Acquisitions d'images aériennes

L'acquisition des images aériennes se font à partir de vols drones au-dessus des bancs sédimentaires. Nous utilisons un drone DJI Phantom 4 équipé d'un récepteur RTK et d'une caméra multispectrale.

La base RTK doit être positionnée sur un point dont les coordonnées sont connues. Elles peuvent avoir été acquises par un des deux GPS.

L'utilisation de *GSPRO*, une application de DJI, permet d'entrer les coordonnées de la base RTK, d'indiquer la zone de vol et de régler le recouvrement des photos. Dans notre cas, nous avons volé à 50 m au-dessus des bancs et paramétrer un recouvrement des photos de 85% sur la largeur du banc et de 70% sur la longueur. Le drone alors géoréférencé et les paramètres indiqués, il ne reste plus qu'à lancer le vol et surveiller l'état des batteries.

Annexe 2 : Grille d'estimation du recouvrement de la végétation



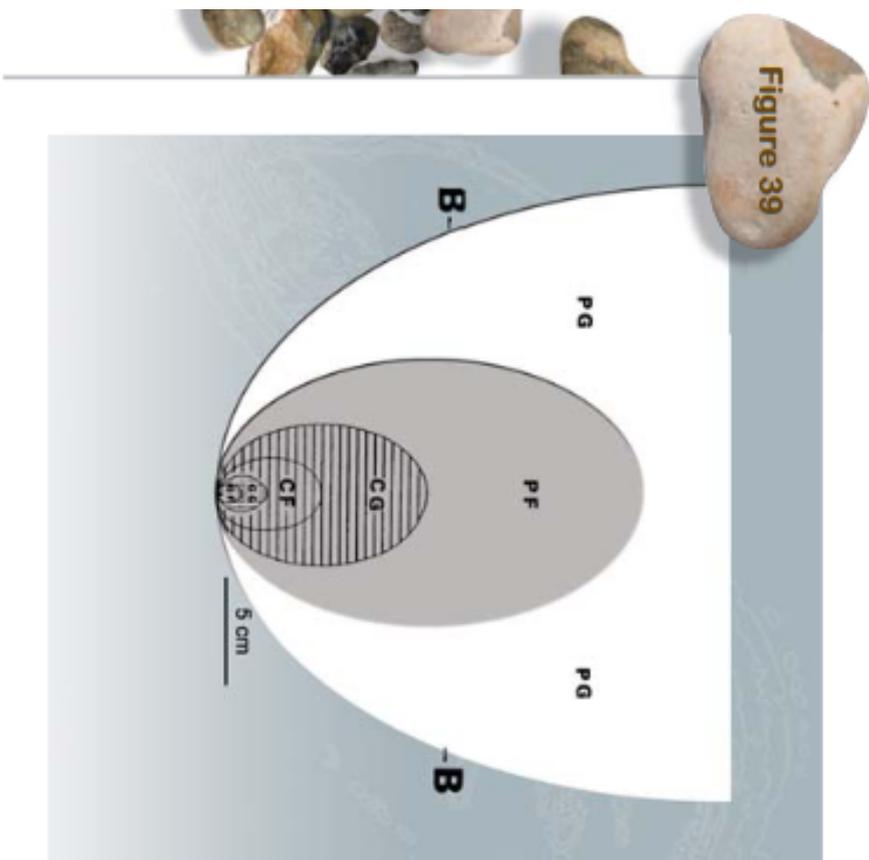


Figure 39

Type Granulométrique	Taille (mm)	Code microhabitats
Rocher ou Dalle	> 1024	R ou D
Bloc	256-1024	B
Pierre Grossière	128-256	PG
Pierre Fine	64-128	PF
Caillou Grossier	32-64	CG
Caillou Fin	16-32	CF
Gravier Grossier	8-16	GG
Gravier Fin	2-8	GF
Sabie Grossier	0.5-2	SG
Sabie Fin	0.0625-0.5	SF
Limon	3.9-62.5µ	L
Argile	< 3.9µ	A

© OFB

Echelle granulométrique utilisée et gabarit pour les évaluations granulométriques visuelles (Malavoi, Souchon, 1989). **Attention** de bien mettre le gabarit à la bonne échelle avant de l'emmener sur le terrain...

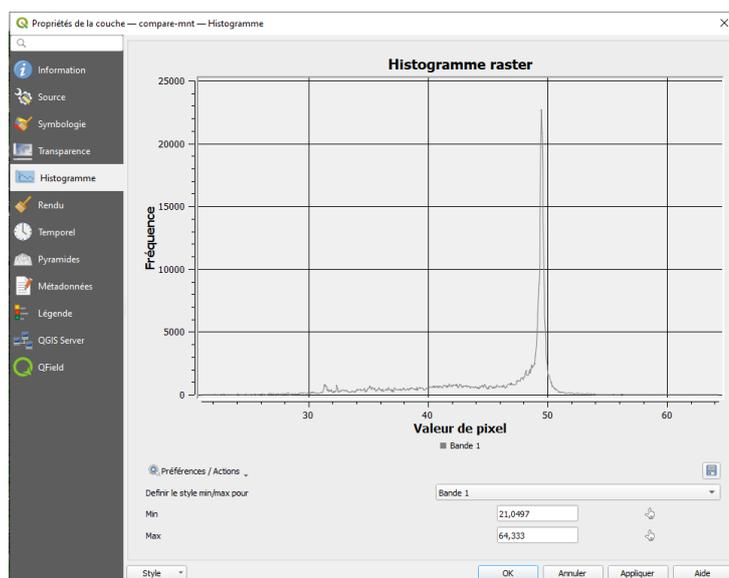
ANNEXE 4 :

COMPARAISON DES ALTITUDES ENTRE LIDAR HD DE L'IGN ET LE MNT GENERE A PARTIR DU DRONE.

Par manque de moyens humains, nous n'avons pas pu réaliser de vols drone sur l'ensemble des bancs sédimentaires prospectés. Sur certains bancs, situés plus en aval et dont les perturbations hydrologiques n'ont pas été très importantes, l'utilisation des données LiDAR HD de l'IGN s'est révélée essentielle.

Avant d'utiliser les données LiDAR HD de l'IGN, une comparaison entre ces dernières et les Modèles Numériques de Terrain générés à partir des images du drone a été réalisée sur tous les bancs possédant à la fois le LiDAR HD et le MNT du drone.

La calculatrice raster (Bande1 du MNT du drone – Bande1 du LiDAR HD) montre que le LiDAR HD de l'IGN donne des altitudes inférieures de près de 50 cm en moyenne par rapport au MNT du drone.



Bancs	Ecart
<i>G1 – D2 – G2</i>	49.5 cm
<i>G28</i>	50.2 cm
<i>G29</i>	50.1
<i>G41 – G43</i>	49.9 cm
Moyenne :	49.93 cm

Face à ces résultats, nous avons fait le choix de corriger les données LiDAR HD de l'IGN utilisés pour la création de la variable « Hauteur à l'eau » en leur rajoutant 50 cm.

ANNEXE 5 :

SELECTION DU MODELE

Plusieurs combinaisons de variables explicatives ont été réalisées afin de trouver le modèle le plus parcimonieux. Le Critère d'Information Akaike (AIC) et le Critère d'Information Bayésien (BIC) ont été complétés par le R² marginal afin d'assurer la sélection du modèle. Plus les Critères d'Informations Akaike et Bayésien sont faibles, plus le modèle est intéressant. C'est l'inverse pour le R² marginal qui doit se rapprocher de 1 pour être choisi.

18 combinaisons ont d'abord été testées et ont permis de sélectionner le Modèle M10.

	(Intercept)	Dist_Min	Ht_Min	Amont_Min	X.Herbacée	X.Arbustive	X.Arbores	GranuloMax	GraDomSurf	GraDomSubS	Obstacle				AIC	BIC
											Amont	Aval	Milieu	Non		
M1		*	.		***				***		Ref		***	759,8	819,9	
M2	***		.					***		***				747,6	784,5	
M3	***		*											857,6	885,3	
M4		*	.		***				***		Ref		***	758,8	809,7	
M5			.		***			***		***	Ref		***	697,9	734,8	
M6		**	.		***				***		Ref		***	755,3	792,3	
M7		**	.		***			*			Ref		***	792,6	829,6	
M8		**	.		***			***		***	Ref		***	692,5	734,1	
M9	*	*	.		***			***		***			***	729,6	757,4	
M10		*	.		***			***		***	Ref		***	691,4	737,7	
M11			.					***		***	Ref		***	715,5	757,1	
M12		*	.		***			***		***	Ref		***	693,4	744,3	
M13		*	.		***				***		Ref		***	756,8	803,1	
M14		*	.		***				***		Ref		***	754,9	796,6	
M15		*	.		***			***		***	Ref		***	691,7	742,6	
M16		**	.		***			***		***	Ref		***	692,5	738,8	
M17		*	.		***			***		***	***		***	691,4	737,7	
M18		*	.		***			***		***	Ref		.	691,4	737,7	

Une deuxième vague de tests a été réalisée après avoir fait le choix de recoder la variable « Obstacle » en une variable binaire (1 = Présence d'un obstacle ; 0 = Absence d'un obstacle). Cette deuxième vague a permis valider le modèle M51 qui n'est autre que le modèle M10 avec la modification de la variable « Obstacle ».

	(Intercept)	Dist_Min	Ht_Min	Amont_Min	X.Herbacée	X.Arbustive	X.Arborees	GranuloMax	GraDomSurf	GraDomSubS	Obstacle_Rec	AIC	BIC	R2m
M20	Neg ***	Pos *	Pos .		Neg ***			Pos ***		Neg ***	Pos ***	689,6	726,6	0,587
M21	Neg ***	Pos										860,8	874,7	0,004
M22	Neg ***		Pos *									857,4	871,3	0,011
M23	Neg ***			Pos .								859,8	873,6	0,008
M24	Neg ***				Neg ***							850,4	864,2	0,017
M25	Neg ***					Pos						862,3	876,1	0,001
M26	Neg ***						Pos *					858,9	872,8	0,007
M27	Neg ***							Pos **				852,4	866,3	0,013
M28	Neg ***								Pos ***			802	815,8	0,203
M29	Neg .									Neg ***		783,8	797,8	0,497
M30	Neg ***										Pos ***	817,4	831,3	0,057
M31	Neg ***	Pos				Pos						862	880,5	0,005
M32	Neg ***		Pos *				Pos *					855,6	874,1	0,018
M33	Neg ***			Pos *				Pos ***				849,6	868,1	0,021
M34	Neg ***				Pos **				Pos ***			791,1	815,6	0,197
M35	Neg **									Neg ***	Pos ***	744,1	762,6	0,521
M36	Neg				Neg ***					Neg ***	Pos ***	717,1	740,5	0,588
M37	Neg ***	Pos		Pos		Pos						861,6	884,7	0,135
M38	Neg ***	Pos .	Pos	Pos								858,8	882	0,019
M39	Neg **				Neg ***	Pos	Pos *					848,3	871,4	0,25
M40	Neg ***							Pos ***		Neg ***	Pos ***	716,4	739,5	0,55
M41	Neg ***				Neg ***				Pos ***		Pos ***	762,6	785,7	0,21
M42	Neg ***				Neg ***					Neg ***	Pos ***	717,3	740,5	0,588
M43	Neg .	Pos *			Neg ***					Neg ***	Pos ***	713,1	740,8	0,572
M44	Neg	Pos .			Neg ***					Neg ***		759,8	782,9	0,555
M45	Neg **	Pos **			Neg ***			Pos ***		Neg ***	Pos ***	690,7	723,1	0,586
M46	Neg ***	Pos **		Pos	Neg ***			Pos ***		Neg ***	Pos ***	690,5	727,5	0,578
M47	Neg ***	Pos *	Pos .	Pos	Neg ***			Pos ***		Neg ***	Pos ***	689,8	731,4	0,58
M48	Neg ***	Pos *	Pos .		Neg ***		Pos	Pos ***		Neg ***	Pos ***	691,6	733,2	0,587
M49	Neg ***	Pos *	Pos .	Pos	Neg ***		Pos	Pos ***		Neg ***	Pos ***	691,8	738	0,581
M50	Neg ***	Pos *	Pos .	Pos	Neg ***		Pos	Pos ***	Pos ***		Pos ***	755,2	792,2	0,217
M51	Neg ***	Pos *	Pos .		Neg ***			Pos ***		Neg ***	Pos ***	689,6	726,6	0,587