

Mémoire

Auteur : Palmeri, Kelly

Promoteur(s) : Magain, Nicolas; Denayer, Dorothée

Faculté : Faculté des Sciences

Diplôme : Master en biologie des organismes et écologie, à finalité spécialisée en biologie de la conservation : biodiversité et gestion

Année académique : 2024-2025

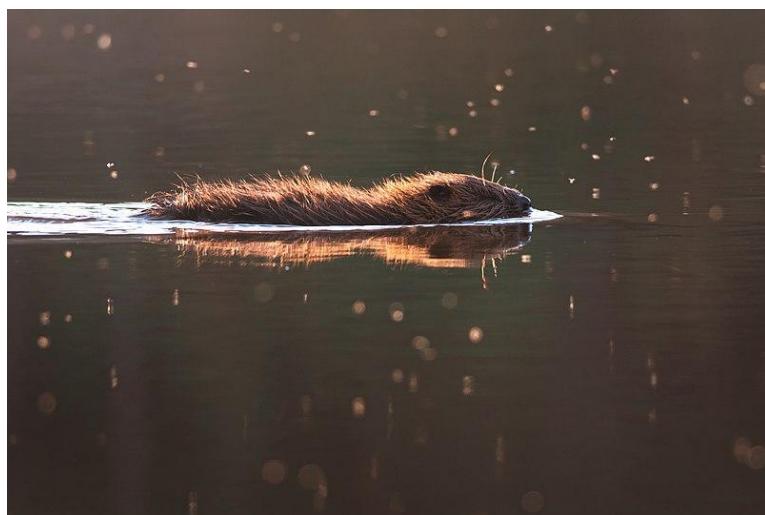
URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/23834>

Avertissement à l'attention des usagers :

Tous les documents placés en accès ouvert sur le site le site MatheO sont protégés par le droit d'auteur. Conformément aux principes énoncés par la "Budapest Open Access Initiative"(BOAI, 2002), l'utilisateur du site peut lire, télécharger, copier, transmettre, imprimer, chercher ou faire un lien vers le texte intégral de ces documents, les disséquer pour les indexer, s'en servir de données pour un logiciel, ou s'en servir à toute autre fin légale (ou prévue par la réglementation relative au droit d'auteur). Toute utilisation du document à des fins commerciales est strictement interdite.

Par ailleurs, l'utilisateur s'engage à respecter les droits moraux de l'auteur, principalement le droit à l'intégrité de l'oeuvre et le droit de paternité et ce dans toute utilisation que l'utilisateur entreprend. Ainsi, à titre d'exemple, lorsqu'il reproduira un document par extrait ou dans son intégralité, l'utilisateur citera de manière complète les sources telles que mentionnées ci-dessus. Toute utilisation non explicitement autorisée ci-avant (telle que par exemple, la modification du document ou son résumé) nécessite l'autorisation préalable et expresse des auteurs ou de leurs ayants droit.

Quantifier l'impact des barrages de castors en Wallonie par photo-interprétation



Mémoire présenté par **PALMERI Kelly**, en vue de l'obtention du grade de Master en Biologie des Organismes et Ecologie, à finalité Biologie de la Conservation : Biodiversité et Gestion

Promoteurs : MAGAIN Nicolas et DENAYER Dorothée

Encadrant : KINTS Olivier (Natagora)

Lecteurs : NZAU MATONDO Billy, WATTHEZ Quentin

Septembre 2025

REMERCIEMENTS

Passionnée par les mammifères, je suis profondément reconnaissante d'avoir eu l'opportunité de travailler sur ce projet dédié aux castors. Je tiens à exprimer ma sincère gratitude à Madame Dorothée Denayer, qui m'a proposé ce mémoire, fruit d'une précieuse collaboration entre Natagora et l'Université de Liège.

Mes remerciements s'adressent en particulier à mon encadrant, Olivier Kints (Natagora), ainsi qu'à mes promoteurs, Nicolas Magain et Dorothée Denayer (ULiège), pour leur encadrement, leurs temps et leurs précieux conseils. Merci de m'avoir accompagnée et guidée tout au long de ce travail.

Un grand merci aux autres mémorants du Projet Castor, Aurore Arimont, Marguerite Delrée et Julien Hainaut, pour leur aide et leur collaboration.

Je suis également reconnaissante envers les membres de Natagora et du Comité Scientifique du Projet Castor, notamment Benoît Manet (DEMNA) et Frederick Raes (GTcastors), ainsi que les représentants du DEMNA, de Natagora, du DNF, de NatuurPunt et de LifeWatch. Leur expertise et les données qu'ils ont partagées ont été essentielles à la réalisation de ce travail. Je remercie également Carole Baum pour son aide en statistiques.

Enfin, je souhaite remercier chaleureusement mes proches, ma famille et ma meilleure amie qui m'ont conseillée et relue lors de la rédaction de ce mémoire, ainsi que pour leur soutien indéfectible tout au long de mon parcours universitaire.

Quantifier l'impact des barrages de castors en Wallonie par photo-interprétation

Mémoire réalisé par Kelly Palmeri, sous la direction de Nicolas Magain (Département de Biologie, Ecologie et Evolution, Université de Liège) et de Olivier Kints (Département Etudes, Natagora) pour l'année académique 2024-2025.

RÉSUMÉ

Le castor européen (*Castor fiber*) est de retour en Wallonie depuis 1998. Après avoir disparu des paysages européens à la suite de sa chasse abusive séculaire, il regagne peu à peu ses habitats ancestraux. Cet ingénieur des écosystèmes modifie activement les milieux par la construction de barrages et l'induction d'inondations.

Cette étude a eu pour objectif de quantifier l'impact spatial de ces inondations et d'identifier les facteurs environnementaux et anthropiques qui les influencent. La méthode utilisée est la photo-interprétation. Nous avons analysé 2260 km² d'orthophotos du territoire wallon d'été 2023. La validité de la méthode a été rigoureusement testée et confirmée.

En 2023, la surface totale ennoyée par les castors était de 143.73 ha, représentant 0.008% du territoire wallon. Les castors, occupant 28% des zones d'aléas d'inondation de Wallonie, n'en inondent que 0.3%, et ne construisent pas de barrage dans 64% des cas. Les castors construisent leurs barrages sur les petits cours d'eau (catégorie 02 et 03). Une proportion significative de 48% de la surface ennoyée se situe en Réserves Naturelles, qui représentent seulement 1% de la Wallonie. Cet impact accru est potentiellement biaisé par la mise en Réserve de terrains déjà fortement impactés par le castor. La région de l'Ardenne est la plus impactée, cohérent avec les fronts de recolonisation venant d'Allemagne et de France.

Le castor joue un rôle clé dans la modification des paysages hydrologiques wallons, offrant des services écosystémiques précieux. La photo-interprétation est une méthode efficace pour évaluer l'ampleur des inondations causées par celui-ci. C'est également un outil qui peut aider les gestionnaires à mieux connaître les dynamiques des populations de castor et à mieux appréhender les questions de cohabitation qu'il pose.

Mots clés : Castor, Wallonie, photo-interprétation, impact, inondation

Quantifying the impact of beaver dams in Wallonia through photointerpretation

Master thesis by Kelly Palmeri, under the supervision of Nicolas Magain (Department of Biology, Ecology and Evolution, University of Liège) and Olivier Kints (Studies Department, Natagora) for the academic year 2024-2025.

ABSTRACT

The European Beaver (*Castor fiber*) has been recolonising Wallonia since 1998. After its historical disappearance from European landscapes due to centuries of excessive hunting, it is gradually reclaiming its ancestral habitats. This ecosystem engineer actively modifies environments through dam construction and the induction of flooding.

This study aimed to quantify the spatial impact of these floods and to identify the environmental and anthropogenic factors influencing them. The method employed was photointerpretation. We analysed 2260 km² of Walloon orthophotos from summer 2023. The validity of the method was rigorously tested and confirmed.

In 2023, the total area flooded by beavers amounted to 143.73 hectares, representing 0.008% of the Walloon territory. Beavers, while occupying 28% of Wallonia flood-prone areas, only inundate 0.3% of them, and do not construct dams in 64% of cases. Beavers build their dams primarily on smaller water courses (category 02 and 03). A significant proportion of 48% of the flooded area is located within Protected Areas (Natural Reserves, which constitute 1% of Wallonia), an increased impact potentially biased because several Reserves have been acquired because of the beaver's impact. The Ardenne region is the most impacted, consistent with the colonisation fronts originating from Germany and France.

The beaver plays a key role in modifying Walloon hydrological landscapes, providing valuable ecosystem services. Photointerpretation is an effective method for assessing the extent of beaver-induced flooding. It is also a tool that can help managers better understand beaver population dynamics and address the cohabitation issues they present.

Keywords: Castor, beaver, Wallonia, photointerpretation, impact, flooding

ABRÉVIATIONS

CE : Cours d'eau

CR : Contrats de Rivière

GLM : Generalized Linear Model

IFBL : Institut Floristique Belgo-Luxembourgeois

IUCN : International Union for Conservation of Nature

LM : Linear Model

OFFH : Observatoire de la Faune, de la Flore et des Habitats

PI : Photo-interprétation

QGIS : Quantum Geographic Information System

RN : Réserve Naturelle

RNA : Réserve Naturelle Agrée

RND : Réserve Naturelle Domaniale

SIG : Système d'Information Géographique

SGIB : Site de Grand Intérêt Biologique

ZHIB : Zone Humide d'Intérêt Biologique

TABLE DES MATIÈRES

Remerciements	ii
Résumé	iii
Abstract	iv
Abréviations	v
Table des matières	vi
Table des figures.....	ix
Table des tableaux.....	xi
I. Introduction	1
A. Ecologie du castor	1
1. Morphologie et adaptations à la vie semi-aquatique	1
2. Vie de famille, cycle de vie et reproduction.....	1
3. Territoire et territorialité.....	2
4. Capacité d'adaptation	4
B. Impacts du castor sur l'écosystème	4
1. Alimentation	4
2. Constructions/ouvrages	4
a) Gîtes.....	4
b) Barrages.....	5
c) Canaux.....	6
3. Impacts indirects du castor sur les écosystèmes	6
a) Formation de zones humides	6
b) Augmentation de la biodiversité.....	7
c) Augmentation de la connectivité	7
d) Importance de la temporalité	8
4. L'effet castor	8
5. Services écosystémiques	9
C. Historique, menaces et protection des castors	10
1. Répartition historique et déclin anthropique.....	10
2. Le retour du castor	10
3. Menaces actuelles pesant sur le castor.....	11
4. Conflits avec l'Homme.....	11
5. Protection et législation	12

D. Contexte et objectifs	12
1. Projet Castor	12
2. Première étude à l'échelle régionale de la Wallonie sur le castor	13
3. Objectif principal du mémoire.....	13
4. Objectifs spécifiques du mémoire	13
5. Hypothèses de recherche sur les facteurs d'influence	13
II. Matériel et Méthodes	15
A. Zone d'étude et unité d'observation	15
B. Critères d'évaluation de l'impact et facteurs d'influence	15
1. Variables dépendantes	15
2. Variables explicatives	15
C. Collecte des données par photo-interprétation	16
1. Couches SIG utilisées	16
2. Protocole de la méthode de photo-interprétation	17
D. Confrontation à la réalité	18
E. Traitement des données	18
1. Validation de la méthode de Photo-Interprétation	18
a) Biais inter-observateurs	18
b) Comparaisons avec des données de terrain	19
i. Les Réserves Naturelles Agréées (RNA) du Projet Castor	19
ii. Contrats de Rivière (CR)	19
2. Analyses de l'impact du castor	20
a) Description de l'impact des castors en Wallonie	20
b) Recherche des facteurs d'influence	20
III. Résultats et discussion	21
A. Validité de la méthode de quantification de l'impact des castors par photo-interprétation	21
1. Évaluation du biais inter-observateurs.....	21
2. Comparaison avec les données de terrain du Projet Castor sur les Réserves Naturelles Agréées (RNA)	22
a) Comparaison des Surfaces ennoyées.....	22
b) Comparaison du nombre d'arbres morts.....	23
3. Comparaison avec les données du suivi des Contrats de Rivière (CR)	24
a) Comparaison des données de Présence de barrage	24

b) Comparaison des dénombrements de barrages.....	25
4. Fiabilité de la méthode de photo-interprétation	27
B. Quel est l'impact des castors en Wallonie ?	27
1. Distribution des variables dépendantes.....	27
2. Description de l'impact des castors sur le milieu en Wallonie en 2023.....	28
C. Quels sont les facteurs qui influencent les inondations par les castors en Wallonie ?	31
1. Modèles de régression	31
2. Les facteurs d'influence.....	33
a) Influence de la catégorie des cours d'eau.....	33
b) Influence de la région biogéographique	35
c) Sélectivité du castor pour les réserves naturelles	37
d) Représentativité du Projet Castor.....	39
D. Limites de l'étude	40
E. Au-delà de l'inondation : l'impact global du castor	40
IV. Conclusion	42
A. Fiabilité de la méthode.....	42
B. Ampleur de l'impact et facteurs d'influence des inondations	42
C. Implications pour la conservation et la gestion	43
Références.....	44
Sommaire des annexes	54
Annexes	I

TABLE DES FIGURES

Figure 1 : Schématisation du processus de (re)colonisation du castor. Les numéros des pastilles correspondent aux phases (Luglia, 2024)	3
Figure 2 : Hutte de castor : l'entrée immergée en forme de siphon protège des prédateurs et la chambre est tapissée de litière de paille de bois qui est régulièrement renouvelée (Jim, 2012)	5
Figure 3 : Barrage à la RND Ru de Chawion (17 juin 2024, 1 ^e photo) ainsi que barrage (2 ^e photo) et canal (3 ^e photo) à la RND de Basseille (7 juin 2024). Photographies prises par Kelly Palmeri.	5
Figure 4 : Cas le plus extrême d'inondation par les castors en Wallonie : Plateau de Tailles, RND Fange de Bihain	17
Figure 5 : Zoom sur les étangs 1 et 2 de l'image précédente. Les flèches mesurent l'emprise maximale (empriseMAX). La surface ennoyée (Snoy) est estimée grâce à un quadrillage de maille 20x20m.	18
Figure 6 : Comparaison des estimations de <i>Surface ennoyée par le castor</i> entre observateurs en m ² . La ligne noire est la médiane et la boîte délimite les valeurs entre le 1 ^{er} et le 3 ^e quartile. Attention les échelles sont différentes.	21
Figure 7 : Comparaison des mesures de la Surface ennoyée selon deux méthodes : observée à partir des images de drone du Projet Castor (2023) et par photo-interprétation. La droite de régression est en rouge.....	23
Figure 8 : Comparaison des Surfaces ennoyées selon deux méthodes (observations et PI) : à gauche par PI et à droite par observation sur le terrain. Boîte à moustache (espace interquartile), la ligne noire est la médiane.....	23
Figure 9 : Comparaison des décomptes d'arbres morts selon deux méthodes (observations et PI). La droite de régression est en rouge.	24
Figure 10 : Comparaison des décomptes d'arbres morts selon deux méthodes : à gauche par photo-interprétation et à droite par observation sur le terrain. La ligne noire est la médiane.	24
Figure 11 : Distributions des variables nombre de barrages dans la méthode des Contrats de Rivière, et nombre de plans d'eau (NBetang) dans la méthode de PI.....	26
Figure 12 : Comparaison des nombres de barrages/plans d'eau selon deux méthodes (CR et PI). La droite de régression est en rouge.	26
Figure 13 : Distributions des variables dépendantes et leurs logarithmes : A/D- Surface ennoyée ; B/E- Nombre de plans d'eau ; C/F- Emprise maximale. Frequency : nombre d'observations, équivalent au nombre de carrés IFBL (2260 au total).....	27
Figure 14 : Distribution spatiale de l'impact des castors en Wallonie catégorisé par la Surface ennoyée selon les intervalles de valeurs repris dans la légende (en hectares).....	28
Figure 15 : Répartition de la fréquence selon l'intensité d'impact du castor par les Surfaces ennoyées (Snoy) en hectares.	28
Figure 16 : Histogramme des surfaces ennoyées non-nulles (808 données/2260), l'intervalle de barre est de 400, les surfaces ennoyées sont en m ²	29
Figure 17 : Surface ennoyée par les castors quand la catégorie de cours d'eau est présente (1) ou absente (0) dans le carré IFBL (1km ²). Les catégories de cours d'eau sont les suivantes :	

navigable (NA), non-classé (NC), de catégorie 01, 02 ou 03. Les moyennes sont en bleu et les écarts-type en rouge.....	34
Figure 18 : Répartition des variables dépendantes par région biogéographique : Surface ennoyée (Snoy) en mètres carrés, Nombre de plans d'eau (NBetang) en nombre entiers et Emprise maximale (empriseMAX) en mètres	36
Figure 19 : Comparaison des variables dépendantes avec absence (0) ou présence (1) de Réserves Naturelles. Surface ennoyée (Snoy) en m^2 , Nombre de plans d'eau (NBetang) en nombre entiers et emprise maximale (empriseMAX) en mètres. Les moyennes sont en bleu et les écarts-type en rouge.....	37
Figure 20 : Comparaison des variables dépendantes avec absence (0) ou présence (1) de Réserves Naturelles du Projet Castor (RNoli). Surface ennoyée (Snoy) en m^2 , Nombre de plans d'eau (NBetang) en nombre entiers et emprise maximale (empriseMAX) en mètres. Les moyennes sont en bleu et les écarts-type en rouge.....	39
Figure 21 : Relation entre le nombre de plans d'eau (NBetang) et la Surface ennoyée (Snoy) par les castors mise au logarithme	XII
Figure 22 : Relation entre l'emprise maximale (empriseMAX) et le logarithme de la surface ennoyée (Snoy).....	XII
Figure 23 : Comparaison des variables dépendantes avec présence (1) ou absence (0) de plans d'eau préexistants à proximité, dans le kilomètre carré (IFBL). Surface ennoyée (Snoy) en mètres carrés, Nombre de plans d'eau (NBetang) en nombre entiers et emprise maximale (empriseMAX) en mètres.	XIII

TABLE DES TABLEAUX

Tableau 1 : Moyennes et écart-types de la Surface ennoyée estimée en m ² et résultats des tests de Wilcoxon par observateurs.....	22
Tableau 2 : Données de présence de plans d'eau pour la méthode de photo-interprétation (PI) et de barrages pour le suivi des Contrats de Rivière (CR). 0=absence, 1=présence	24
Tableau 3 : Résultats du test de Wilcoxon avec données pairees pour comparer le dénombrement des barrages de castors selon deux méthodes (CR et PI).....	25
Tableau 4 : Paramètres descriptifs des variables décrivant l'impact des castors en Wallonie. SNOY représente la surface ennoyée par les castors en m ² . Ennoyé (SNOY-0) correspond à SNOY mais en excluant les valeurs nulles. NBETANG est le nombre entier de plans d'eau créés par les castors. EMPRISEMAX est la largeur maximale du plus grand plan d'eau en mètres, mesurée perpendiculairement au cours d'eau.....	29
Tableau 5 : Surfaces de différentes zones de Wallonie et leur portion inondée par les castors estimée par PI des orthophotos d'été 2023. La proportion inondée est calculée comme (Snoy/S_alea) par zone.....	31
Tableau 6 : Résultats du modèle de régression restreint contenant les facteurs d'influence de la surface ennoyée par les castors : lm(log(Snoy +1) ~ ...)	31
Tableau 7 : Résultats du modèle de régression restreint contenant les facteurs d'influence du nombre de plans d'eau créés par les castors : glm.nb(NBetang ~ ...)	32
Tableau 8 : Résultats du modèle de régression restreint contenant les facteurs d'influence de l'emprise maximale du plus grand plan d'eau créé par les castors : lm(log(empriseMAX +1) ~ ...)	33
Tableau 9 : Résultats des tests de Wilcoxon. Influence de la catégorie de cours d'eau sur la surface ennoyée (Snoy). En rouge, effet négatif/diminution et en vert, effet positif/augmentation.	34
Tableau 10 : Impact des castors par région en Wallonie. Ce tableau présente, pour chaque région naturelle de Wallonie, la surface des zones d'aléas d'inondation qui est la zone utilisable par le castor pour la construction de barrages, la surface des zones occupées par le castor, la surface totale et moyenne ennoyée par le castor. Les prévisions de surface ennoyée si la Wallonie était entièrement colonisée sont également incluses. La portion inondée en 2023 correspond au ratio (Snoy/S_alea) par region.	35
Tableau 11 : Résultats des tests de Wilcoxon. Influence de la variable Réserves Naturelles [RNTOT] sur les variables dépendantes. En vert, effet positif/augmentation.	37
Tableau 12 : Surfaces ennoyées par les castors dans différentes zones de Wallonie. Ce tableau présente les surfaces ennoyées totales (somme de Snoy) par zone, la proportion moyenne du lit majeur ennoyé (Snoy/S_alea) par zone, et la fraction de la surface totale ennoyée en Wallonie que représente chaque zone.	38
Tableau 13 : Moyennes et variances des variables dépendantes : la surface ennoyée (Snoy) en m ² , le nombre de plans d'eau (NBetang) en nombres entiers et l'emprise maximale (empriseMAX) en mètres.	VIII
Tableau 14 : Résultats des tests de Wilcoxon. Influence de la variable Plans d'eau préexistant sur les variables dépendantes. En vert, effet positif/augmentation.	XIII

Tableau 15 : Modèle de régression pour Snoy selon la variable NB_conflue : lm(log(Snoy+1) ~ NB_conflue)	XIV
Tableau 16 : Modèle de régression pour NBetang selon la variable NB_conflue : glm.nb(NBetang ~ NB_conflue).....	XIV
Tableau 17 : Modèle de régression pour empriseMAX selon la variable NB_conflue : lm(log(empriseMAX+1) ~ NB_conflue)	XV
Tableau 18 : Moyennes et écarts-type des variables dépendantes selon la région biogéographique. Les variables dépendantes sont la Surface ennoyée (Snoy) en mètres carrés, le Nombre de plans d'eau (NBetang) en nombre entiers et l'Emprise maximale (empriseMAX) en mètres.	XV

I. INTRODUCTION

Le castor, espèce ingénieur des écosystèmes, exerce une influence significative sur le fonctionnement des écosystèmes aquatiques, notamment par la construction de barrages et la création de zones inondées. Son retour en Wallonie suscite un intérêt croissant pour comprendre les conséquences de ses activités sur l'hydrologie et la morphologie de nos cours d'eau.

Ce mémoire vise à quantifier l'impact de ces modifications dans l'ensemble de la Wallonie en se concentrant sur les surfaces inondées, indicateur macroscopique de l'activité des castors. À partir des orthophotographies aériennes de l'été 2023, nous avons mis en œuvre une méthodologie de photo-interprétation pour cartographier et analyser spatialement les zones inondées attribuables aux activités des castors.

A. ECOLOGIE DU CASTOR

1. Morphologie et adaptations à la vie semi-aquatique

Le castor est le plus gros **rongeur** d'Europe (Véron, 1991). Il mesure plus d'un mètre de long et pèse environ 20 kilos à l'âge adulte. Ses incisives à croissance continue sont renforcées de fer et leur donne une couleur orangée. Il se sert de ses membres antérieurs préhensiles et de son diastème, espace entre les incisives et les molaires, pour transporter des branches.

Il possède une longue queue plate écailleuse et ses membres postérieurs sont palmés. Sa queue lui sert de gouvernail, mais également de propulseur pour la nage. Adapté à la plongée, il peut obstruer ses différents orifices et rester en apnée jusqu'à 15 minutes (Véron, 1991). Ainsi, le castor est un animal **amphibie**.

S'il est assez pataud sur terre, il est très habile dans l'eau. Cette dernière lui sert d'issue de secours, de cachette, de baignoire, de réservoir (d'eau et de nourriture) et de rampe d'accès pour le transport de troncs et branches mais également d'autres matériaux. En plus de toutes ces fonctionnalités, l'eau permet aux castors de se rafraîchir. En effet, le castor supporte mal la chaleur à cause de sa fourrure très épaisse : 12 000 poils par cm² contre 300 cheveux par cm² chez l'homme (Déom, 2004).

Étant un animal semi-aquatique, la toilette est très importante pour ce rongeur pour garder son pelage épais imperméable. C'est aussi l'occasion de sociabiliser avec les autres membres du groupe (Véron, 1991).

2. Vie de famille, cycle de vie et reproduction

Le castor vit en unités familiales composées en général de 6 individus : la femelle cheffe de famille et de chantier, le mâle reproducteur, les castorins de l'année et les subadultes de l'année précédente (Véron, 1991).

Les jeunes castors atteignent la maturité sexuelle vers l'âge de 3 ans. À ce stade, ils quittent le territoire parental à la recherche de leur propre territoire ainsi que d'un partenaire pour le partager. L'émancipation des jeunes castors contribue ainsi à la dispersion de la population.

L'accouplement se passe en janvier et la gestation dure 100 jours. La parturition a lieu entre le premier mai et le 15 juin. Les castorins nouveau-nés, pesant en moyenne 500 g, sont vulnérables à une multitude de prédateurs. Ils quittent le gîte pour la première fois vers l'âge de 6 à 8 semaines. Ils coupent leur première baguette vers 6-8 mois et leur premier tronc à la fin de leur 2e année (Blanchet, 1977).

Le castor est monogame. Le couple est très soudé, il va explorer ensemble et s'installer dans le meilleur territoire qu'ils vont trouver. Il y a une famille de castors par territoire.

3. Territoire et territorialité

Le castor se déplace rarement à plus de 25 mètres des berges de son cours d'eau (Piętka et al., 2022), ce qui limite fortement sa zone d'activité. De ce fait, son territoire, linéaire et suivant le cours d'eau, s'étend généralement sur 1 à 1.5 km.

Pour marquer son territoire, le castor utilise le castoréum, une sécrétion de ses glandes spécialisées. Il dépose cette substance odorante au niveau des berges sur des monticules de boue et de débris végétaux (Rahm, 2002). Cette substance, très prisée par l'homme, contient de l'acide salicylique (composant de l'aspirine) qui provient de son alimentation en écorce de saule.

Le castor est très territorial, mais uniquement envers ses congénères. À part son partenaire et ses petits immatures, il ne tolère aucun autre castor sur son territoire. Les conflits entre individus peuvent être violents, et les intrus sont souvent repoussés ou blessés (Blanchet, 1977). Malgré son caractère hautement territorial avec sa propre espèce, le castor cohabite sans problème avec les rats musqués et les ragondins qui partagent son milieu (Véron, 1991).

Lors de la colonisation de nouveaux territoires, les castors occupent préférentiellement les habitats de meilleure qualité, bien espacés les uns des autres. Cependant, à mesure que la densité de population augmente, ils peuvent être contraints de coloniser des milieux moins favorables (Blanchet, 1977). Leur capacité d'adaptation leur permet de coloniser une grande diversité d'habitats.

Lors de la recolonisation ou de l'expansion des castors, ceux-ci remontent le cours d'eau de proche en proche jusqu'aux limites habitables. Ils colonisent d'abord les biotopes de premier choix, séparés par de longs espaces inhabités. Puis, à mesure que la population augmente, ils vont coloniser les milieux de 2e puis 3e choix. « Les castors derniers venus se montrent de moins en moins difficile, jusqu'à s'accommoder des milieux les plus médiocres et à former une colonie à peu près continue » (Blanchet, 1977). La population parvient alors au seuil de la saturation. Cette « crise du logement » contraint certains castors à tenter de coloniser des milieux qui nous paraissent aberrants.

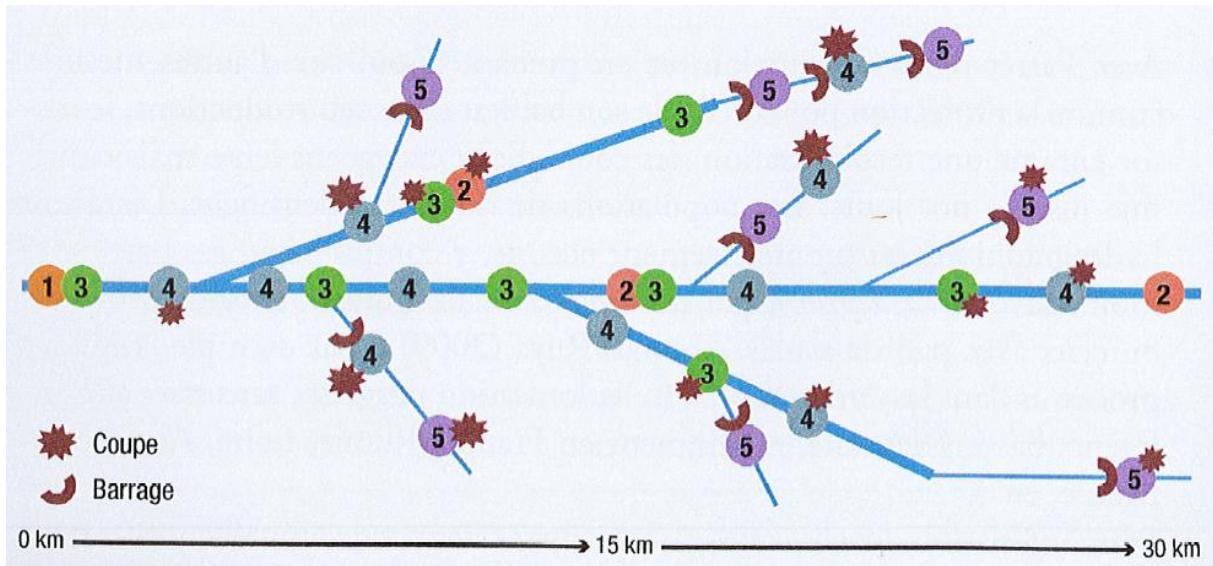


Figure 1 : Schématisation du processus de (re)colonisation du castor. Les numéros des pastilles correspondent aux phases (Luglia, 2024)

Ce modèle (fig.1) est une généralisation théorique de la dispersion spatiale discontinue avec plusieurs phases temporelles successives, caractéristiques du processus de colonisation des castors (Luglia, 2024). Il est applicable dans tous types d'espaces, de périodes et de niveaux d'anthropisation des milieux.

Dynamique de colonisation des castors (Luglia, 2024) :

1. **Phase initiale** (année 0) : installation des premiers castors sur un cours d'eau principal par recolonisation naturelle ou réintroduction
2. **Phase d'exploration** (années 1 et suivantes*, jusqu'à saturation du milieu) : Dispersion des individus à la recherche de nouveaux territoires, menant à une **installation distante** des autres castors établis.
3. **Phase de formation des familles** (années 1-5*) : les premières familles se forment et vont occuper les **habitats les plus favorables**. La croissance de la population est lente en raison du faible taux de reproduction (2 jeunes par an).
4. **Phase de densification de la population** (années 5-10) : **Occupation progressive** des interstices entre les territoires déjà établis. Les territoires sont alors plus contraints et la disponibilité alimentaire moindre. La colonisation des principaux cours d'eau se complète et les territoires de castors se stabilisent avec en moyenne une famille par 4km.
5. **Phase d'extension** (années 10 et suivantes) : Colonisation des petits affluents et ruisseaux, apparition de constructions notables (barrage, hutte) avec les chantiers d'abattage qui leur sont liés. Intensification de l'activité des castors mais également des **conflits** avec l'homme, il ne s'agit plus seulement d'abattages ponctuels, mais d'inondations dues aux barrages qui perdurent.

*Les différentes phases peuvent se dérouler simultanément dans différents sites.

« Il faut une douzaine d'années pour se rendre compte de la présence d'un castor après son installation » (Blanchet, 1977).

4. Capacité d'adaptation

Le castor a besoin d'arbres et d'eau calme en suffisance pour immerger l'entrée de son gîte. Ces conditions remplies, il peut s'accommoder de toutes sortes d'habitats, car il a une incroyable capacité d'adaptation.

- Il change son régime alimentaire selon le climat qui modifie la disponibilité des ressources. Il a un régime alimentaire très diversifié : il peut se nourrir d'herbacées, de plantes aquatiques et d'arbres dont il va manger le feuillage et l'écorce. Le castor va faire ses provisions d'écorce pour l'hiver, mais l'écorce est délaissée en été au profit d'autres plantes sûrement plus appétantes (Blanchet, 1977).
- S'il ne peut pas creuser de terrier, le castor va construire une hutte ou un terrier-hutte. Le castor est capable de constructions mais également de réparations.
- Si le castor ne dispose pas d'assez d'eau, il va construire des barrages et creuser des canaux.

B. IMPACTS DU CASTOR SUR L'ÉCOSYSTÈME

Le castor est un animal crépusculaire à nocturne. Très discret, « sa présence se signale avant tout par les importantes modifications qu'il est capable de faire subir à son environnement » (Véron, 1991).

1. Alimentation

Il n'y a que 3 animaux au monde capable de réaliser l'exploit d'abattre un arbre : L'homme, l'éléphant et le castor. Le castor a une force de mâchoire de 80 kilos (homme : 40kg), il est capable de couper les troncs avec les bois les plus durs (chêne, mérисier, acacia). Le castor est capable d'abattre un tronc d'un diamètre supérieur à 1m, mais il préfère abattre un arbre avec un diamètre inférieur à 10 cm, qu'il va abattre en moins de 5 minutes. On estime que le castor abat environ 200 à 300 arbres par an (Déom, 2004).

Ses essences préférées sont le saule, le peuplier et le bouleau (Blanchet, 1977). Le castor, en coupant les arbres, provoque des repousses et des rejets nombreux. Ces taillis bas favorisent la stabilisation des berges et forment un milieu favorable à la reproduction de beaucoup d'oiseaux et d'autres animaux (Véron, 1991).

2. Constructions/ouvrages

a) Gîtes

Le castor creuse des terriers quand les berges des cours d'eau sont assez hautes, sinon il va construire des huttes (fig.2). Dans nos régions, le gîte le plus courant est le terrier-hutte (Rahm, 2002). Il s'agit souvent d'un terrier dont le plafond s'est écroulé et qui a été réparé avec des branchages.

Les abris du castor sont composés d'une chambre et d'un tunnel d'entrée immergé, en forme de siphon, pour se protéger contre les prédateurs (Véron, 1991).



Figure 2 : Hutte de castor : l'entrée immergée en forme de siphon protège des prédateurs et la chambre est tapissée de litière de paille de bois qui est régulièrement renouvelée (Jim, 2012)

b) Barrages

Un barrage de castors est construit à partir de troncs et branches écorcés, de rameaux, de feuillage, d'herbes pourries, de terre, de vase et de rochers pour tasser le tout. Le barrage est une construction très solide et compacte qui n'arrête pas l'eau mais la ralentit (Déom, 2004; Morizot & Husky, 2024).

La construction de barrages permet aux castors de contrôler le niveau d'eau pour se déplacer en toute sécurité, atteindre des ressources plus éloignées, mais également garder l'entrée de ses gîtes immergée sans les inonder (Véron, 1991).



Figure 3 : Barrage à la RND Ru de Chawion (17 juin 2024, 1^e photo) ainsi que barrage (2^e photo) et canal (3^e photo) à la RND de Basseille (7 juin 2024). Photographies prises par Kelly Palmeri.

L'ouvrage en bois du castor, gîte ou barrage, persiste à courant faible, mais peut se faire emporter à courant trop important. Dès lors, le castor cherche des matériaux pour renforcer son ouvrage. Il utilise notamment de la boue ou de la vase creusée directement à côté de celui-ci, ce qui va augmenter la profondeur du lit à proximité (Blanchet, 1977). À cela s'ajoutent divers débris charriés par les eaux, ainsi qu'une possible pétrification du barrage, c'est-à-dire sa transformation en pierre, si les eaux sont suffisamment calcaires.

c) Canaux

Le castor creuse des canaux pour se déplacer par voie d'eau sur son territoire (Rahm, 2002). Ceux-ci mènent souvent vers des ressources alimentaires, mais peuvent également mener vers un autre bras d'eau. Ils servent surtout à la fuite et permettent de se déplacer et de transporter des matériaux en toute sécurité. Des écluses servent à rendre le niveau des canaux indépendant aux fluctuations (sécheresse, précipitations et débit de la rivière).

« Un des ouvrages **les plus durables** des castors. Prolongé d'année en année, il croît et se ramifie comme un arbre, et ses ramifications, de plus en plus étroites, s'achèvent provisoirement en piste boueuses » (Blanchet, 1977). Ce sont les seuls ouvrages qui persistent après la disparition des castors et de leurs barrages.

3. Impacts indirects du castor sur les écosystèmes

Le castor est reconnu comme une espèce **ingénierie des écosystèmes**. Il est capable de modifier directement ou indirectement la disponibilité des ressources pour d'autres espèces en modifiant des facteurs abiotiques et/ou biotiques d'un écosystème (Jones et al., 1994). Il crée, maintient ou modifie des habitats par la construction de structures. Ainsi, il génère son propre habitat, influençant les interactions écologiques.

Le castor est également une **espèce clé de voute**. Selon Sinclair, 2003, une espèce clé est définie comme une espèce ayant un impact considérable sur son écosystème par rapport à son abundance. Son élimination peut entraîner des changements significatifs dans la structure de la communauté et la composition des espèces, soulignant son rôle critique dans le maintien de l'équilibre écologique.

Le castor impacte significativement son environnement **par la construction de barrages**. Ceux-ci altèrent l'hydrologie, menant à la **formation de zones humides**, augmentant la rétention des sédiments, modifiant les cycles biogéochimiques et **influencant la composition et la diversité des communautés végétales et animales**. Ses activités peuvent persister dans le temps, créant des effets écologiques durables sur les flux des ressources utilisées par d'autres organismes (Hood & Larson, 2015; Janiszewski et al., 2014; Law et al., 2014; Morizot & Husky, 2024; Orazi et al., 2022; Rosell et al., 2005).

L'impact du castor varie d'un site à l'autre selon la localisation géographique, le relief et le type d'habitat (Rosell et al., 2005). Il ne construit pas toujours de barrages et a de fortes interactions avec son environnement seulement dans certaines circonstances.

a) Formation de zones humides

En retenant l'eau, le barrage ralentit et transforme le milieu lotique en système lentique. En gardant l'eau plus longtemps dans le système, il permet la recharge des nappes phréatiques et la réhydratation des sols (**Annexe 1**, Larsen et al., 2021; Morizot & Husky, 2024). L'impact du barrage dépend de son âge (Dias de Oliveira, 2020). La rétention d'eau conduit à des inondations qui créent ou agrandissent des zones humides (Hood & Larson, 2015). Ces changements peuvent entraîner le déplacement, la suppression ou la transformation des habitats et des espèces (Kints, 2024 unpubl.).

Ces modifications environnementales ont un impact macroscopique que l'on peut détecter par image satellite (Carpenter, 2023; Fairfax & Small, 2018). De la création du premier barrage aux conséquences sur le cours d'eau et la végétation, nous pouvons voir l'évolution de l'environnement au cours du temps.

b) Augmentation de la biodiversité

Les inondations localisées, créées par la construction de barrages, noient la végétation terrestre non-adaptée, ouvrant le milieu à l'établissement d'une nouvelle flore qui, à son tour, va attirer une faune diversifiée. Ces changements complexifient l'habitat et le rendent plus hétérogène, augmentant le nombre de niches écologiques et donc la biodiversité (Barvaux et al., 2015; Stringer & Gaywood, 2015). La capacité du castor à hétérogénéiser le milieu est d'autant plus cruciale en cette période d'extinction de masse, où le taux d'extinction est mille fois supérieur au taux naturel.

L'exposition du substrat et les habitudes alimentaires du castor favorisent l'apparition de nouvelles plantes, notamment des espèces pionnières, augmentant la diversité végétale (Law et al., 2014; Piętka et al., 2022). Le renouvellement de la flore et l'augmentation du plancton (Janiszewski et al., 2014) constituent une base de la chaîne trophique élargie, bénéficiant à de nombreux invertébrés et vertébrés. On observe une augmentation de la richesse et de l'abondance des populations d'insectes aquatiques, d'amphibiens et d'oiseaux d'eau, mais également des chauves-souris insectivores et d'autres prédateurs attirés par la nouvelle abondance de proies (Anderson et al., 2015; Arimont, 2024; Collet, 2022; Collinet, 2024; Dias de Oliveira, 2020). D'autres mammifères avec qui le castor partage son habitat sans compétition viennent également s'installer : le rat musqué, le ragondin, le surmulot mais également la loutre (Véron, 1991).

Le maintien de ces habitats complexes dépend directement de la présence du castor. C'est donc une **espèce parapluie**, sa conservation et celle de son habitat garantissent la protection d'une multitude d'autres espèces, y compris des espèces d'intérêt de conservation (Anderson et al., 2015; Orazi et al., 2022; Stoffyn-Egli & Willison, 2011).

Cependant, il est essentiel de nuancer cet impact. Les modifications hydrologiques et l'enrichissement en nutriments du milieu, à la suite de la construction de barrages, peuvent rendre l'habitat inhospitalier pour certaines espèces spécialisées. Des groupes, tels que les plécoptères, les trichoptères, certains mollusques et crustacés, ainsi que des espèces végétales oligotrophes, peuvent être moins favorisés, ce qui peut entraîner leur déplacement ou leur disparition locale (Kints, 2024; Spyra et al., 2024). Par ailleurs, les sites à castors peuvent parfois attirer des espèces invasives telles que le raton laveur.

c) Augmentation de la connectivité

Les castors permettent une amélioration de la connectivité entre des habitats aquatiques autrement isolés.

D'abord, la construction de barrages et le creusement de canaux augmentent significativement le volume et la complexité des plans d'eau. Cela allonge considérablement le périmètre des zones humides, créant ainsi des corridors écologiques (Hood & Larson, 2015).

Ensuite, la multiplication des zones humides favorise leur connectivité et celle de leurs biocénoses. Par exemple, l'hétérogénéité des étangs à castor augmente la richesse spécifique en amphibiens par la création de nouvelles zones de pontes (Anderson et al., 2015).

d) Importance de la temporalité

L'activité du castor génère un environnement dynamique, caractérisé par une mosaïque d'habitats évoluant dans l'espace et dans le temps. Cette dynamique est rythmée par l'installation et la disparition des castors ainsi que par les inondations induites par leurs barrages (Kivinen et al., 2020). Ces perturbations, comme la construction ou la destruction de barrages, ainsi que les mouvements des castors liés à la disponibilité des ressources ou à la territorialité, façonnent un réseau de zones inondées, visibles par analyse d'images satellites. En Belgique, on observe actuellement une dynamique de recolonisation où les sites, initialement éloignés, tendent à se rapprocher à mesure que la population de castors augmente, dû à leur territorialité.

Lorsqu'un territoire est abandonné (par itinérance, mort ou translocation humaine), le barrage peut céder, drainant la zone et perturbant la succession écologique en cours (Larsen et al., 2021). L'impact des barrages varie également en fonction de leur âge (Dias de Oliveira, 2020). Ces modifications influencent non seulement l'hydromorphologie des milieux riverains, mais aussi la composition végétale et la distribution des invertébrés, impactant ainsi l'ensemble du réseau trophique.

4. L'effet castor

Le castor aménage son milieu pour répondre à ses besoins : se protéger contre les prédateurs, s'abriter des intempéries, stocker de la nourriture. Mais ces modifications ont des conséquences indirectes à l'échelle du paysage.

Elles complexifient le réseau hydrologique. En construisant des barrages, le castor modifie le fonctionnement et la structure des écosystèmes (Hartman & Törnlöv, 2006). Il modifie la morphologie des milieux adjacents et la physionomie des berges et du lit des rivières. L'impact de ces modifications dépend du milieu, des barrages (nombre, taille, âge) et des précipitations. Il améliore la qualité de l'eau : le barrage diminue le débit, favorise la sédimentation en amont et agit comme un filtre en réduisant les sédiments et en filtrant certains polluants et nutriments en aval (Larsen et al., 2021). Ces structures augmentent également le temps de résidence de l'eau, favorisant l'enrichissement des étangs en matière organique et empêchent un trop plein de sédiments en aval, ce qui peut profiter aux frayères en améliorant les échanges gazeux avec l'eau.

Ils ont un impact sur la structure du sol, sur la structure du couvert végétal, la composition des espèces floristiques ou faunistiques, sur les successions écologiques des différents milieux proches de la rivière sur les caractéristiques physico-chimiques des cours d'eau et également sur la diversité et abondance des espèces types de ces milieux. Ces modifications du milieu ont été observées aussi bien en amont du site qu'en aval mais ces impacts sont dépendants du nombre de castors, des caractéristiques intrinsèques de la rivière telles que sa taille et ses propriétés hydrologiques (Larsen et al., 2021).

Le castor « soigne » les rivières en remédiant aux siècles d'anthropisation des milieux (Morizot & Husky, 2024). Il favorise l'aggradation (élévation) des lits incisés car ses barrages capturent les sédiments et permettent l'élévation du chenal d'environ 0.5m/an (Pollock et al., 2007), mais ils diminuent aussi l'érosion des berges et du fond des rivières (Janiszewski et al., 2014). Ces barrages permettent la reconnexion entre les nappes et le système racinaire (Fairfax & Small, 2018) et complexifient les milieux en augmentant leurs hétérogénéité (Stringer & Gaywood, 2015).

Ces transformations **augmentent la résilience et la résistance des écosystèmes** face aux conséquences du changement climatique (Morizot & Husky, 2024). Elles jouent un rôle crucial dans l'atténuation des inondations en réduisant les crues de 60% et l'érosion des sols (Puttock et al., 2020). En ce qui concerne les incendies, les zones humides agissent comme des barrières, ralentissant ou stoppant la propagation du feu et servant de refuge pour la faune et la flore (Fairfax et al., 2024), agissant également comme milieu source pour la régénération post-incendie. Contre les sécheresses, elles augmentent le temps de résidence de l'eau dans le système, garantissant une meilleure disponibilité hydrique pour la végétation même en période d'étiage (basses eaux) (Puttock et al., 2017). Contre l'érosion de la biodiversité, elles amènent de l'hétérogénéité dans le milieu, créant de nouvelles niches écologiques et améliorant la connectivité (Hood & Larson, 2015).

Enfin, le castor est un **restaurateur écologique**, il ouvre le paysage et permet la croissance d'herbacées. En coupant les arbres, il provoque des repousses et des rejets nombreux (Piętka et al., 2022). Ces taillis bas favorisent la stabilisation des berges. Cela renforce la résistance aux crues et à l'érosion. De plus, ils sont un milieu favorable à la reproduction de beaucoup d'oiseaux et d'autres animaux (Véron, 1991). Le castor crée une série de micro-habitats ouverts riches en ressources (Orazi et al., 2022). Comme l'affirme Luglia (2024), « les aménagements des castors, contrairement à la plupart de ceux des humains, accueillent plus de vies et contribuent à renforcer le tissu du vivant ». En conséquence, les castors jouent un rôle crucial dans le maintien et la régénération des écosystèmes aquatiques et terrestres.

Par conséquent, la suppression des castors réduit la résilience des écosystèmes et peut entraîner la destruction d'habitats essentiels pour de nombreuses espèces.

5. Services écosystémiques

Les zones humides créées par les barrages de castor fonctionnent comme des puits de carbone, des centres de traitement des nitrates et du phosphore, contribuant à la dépollution des eaux. Ils agissent également comme des réservoirs naturels, stockant et rafraîchissant l'eau, et jouent un rôle clé dans l'atténuation des sécheresses et des inondations, régulant ainsi les effets des extrêmes climatiques (Thompson et al., 2021).

L'impact économique de ces services est considérable : des estimations suggèrent des bénéfices de l'ordre de 179 000\$ par mile carré et par an (Buckley et al, 2011 cité dans Morizot & Husky, 2024). En Europe également, le castor réalise gratuitement des travaux d'épuration et de régulation hydrologique qui, autrement, coûteraient cher aux administrations (Fischer, 2025).

C. HISTORIQUE, MENACES ET PROTECTION DES CASTORS

1. Répartition historique et déclin anthropique

Les Castoridés sont présents en Europe depuis 30 millions d'années (Dewas et al., 2011). Cependant, il ne subsiste actuellement que 2 espèces de cette famille : *Castor fiber* et *Castor canadensis*. Historiquement, après la glaciation de Würm (mésolithique), les castors étaient environ 50 fois plus nombreux que les humains, facilitant l'habitabilité des milieux. Coévoluant avec les cours d'eau européens depuis au moins 8 millions d'années, ils agissaient comme des alliés contre l'aridité en stockant et filtrant l'eau, et en enrichissant les sols (Morizot & Husky, 2024).

Cependant, l'activité humaine augmente avec sa population. Dès le Moyen-Âge (vers 1200), l'homme a radicalement modifié le paysage par la déforestation, l'assèchement des marais et l'éradication délibérée des castors. Cette appropriation des terres s'est intensifiée avec l'ère industrielle et l'urbanisation, conduisant à une « ère du drainage ». Les rivières ont été canalisées, recalibrées et contraintes dans leur lit mineur, tandis que les zones humides étaient drainées pour l'agriculture et l'urbanisation. Cette gestion, motivée par le contrôle des crues et l'aménagement des fonds de vallée, a conduit à une homogénéisation et un appauvrissement des milieux (Morizot & Husky, 2024).

Les conséquences de cette ère du drainage sont multiples et critiques :

- Incision des cours d'eau : Un creusement vertical du lit mineur accentué par l'activité humaine, descendant la lame d'eau et la nappe alluviale, les déconnectant des systèmes racinaires. Il réduit également les débordements bénéfiques des crues.
- Sécheresse structurelle : une déconnexion hydrique entre l'eau et le système racinaire des plantes, réduisant le temps de résidence de l'eau en surface et dans les nappes, exacerbée par le changement climatique.
- Simplification des milieux : une perte de diversité abiotique et biotique due à l'homogénéisation des flux et des habitats.

Les castors, qui peuvent palier à ces effets grâce à leurs talents d'ingénieur, ont été éradiqués. Autrefois répandus dans toute l'Europe (**Annexe 2**), *Castor fiber* a connu un déclin drastique en raison de la traque excessive pour sa viande, sa fourrure et ses glandes produisant le castoréum, mais aussi pour son comportement d'ingénieur des écosystèmes (Luglia, 2013; Véron, 1991), réduisant sa population au XIXe siècle à seulement 1200 individus répartis en 8 populations isolées en Eurasie (Halley & Rosell, 2002). En Belgique, le castor a complètement disparu vers 1848 (Van den Bergh & Manet, 2003).

2. Le retour du castor

Le début du XXe siècle a marqué un tournant, après la quasi-extermination des castors, avec l'adoption de mesures de protection (Halley & Rosell, 2002). Un demi-siècle plus tard débutent les programmes de réintroduction, notamment à partir des populations résiduelles de l'Elbe et du Rhône (Blanchet, 1977). Ce retour, bien que n'indiquant pas une amélioration des conditions environnementales générales, témoigne d'un changement d'attitude de l'Homme envers cette espèce (Reichholf, 1999).

En Belgique, le castor européen (*Castor fiber*) a progressivement recolonisé les milieux aquatiques wallons suite à la réintroduction illégale d'une centaine d'individus à la fin des années 1990 (Destiné, 2022; Van den Bergh & Manet, 2003). Cette population a connu une croissance significative (**Annexe 3**), passant d'environ 120 individus en 2001 à une estimation de 4500 à 5000 individus répartis sur environ 1500 sites en 2024 (B. Manet, comm. pers., 2024).

Parallèlement, le castor nord-américain (*Castor canadensis*) a également été introduit en Europe. Bien que le castor américain et le castor européen ne puissent pas s'hybrider en raison de leur nombre différent de chromosomes (Véron, 1991), le castor américain est plus prolifique, ce qui lui confère un avantage compétitif. Sa présence en Europe peut donc le rendre invasif. C'est pourquoi, en Belgique, une campagne d'éradication a été menée pour retirer les populations sauvages de *Castor canadensis* du territoire (Dewas et al., 2011). A l'heure actuelle, il n'y a plus de castors américains sauvages en Belgique (B. Manet, comm. pers., 2023).

Le retour du castor est une excellente nouvelle pour la biodiversité. Il soulève cependant des questions de gestion et de cohabitation. Les inondations causées par les barrages peuvent entraîner des dommages matériels et économiques, générant des conflits avec les activités humaines (Kohler et al., 2023). De plus, la destruction illégale des barrages, particulièrement les plus anciens, a des impacts écologiques durables sur l'hydrologie et la physico-chimie des milieux, les canaux agissant comme des drains permanents après leur disparition et libérant sédiments, nutriments et polluants (cfr Ober Amel dans Kints, 2024).

3. Menaces actuelles pesant sur le castor

Avec la quasi-disparition de ses grands prédateurs naturels tels que l'ours, le loup et le lynx, l'Homme est désormais considéré comme la principale menace pesant sur le castor européen. Les pressions anthropiques contemporaines, notamment la surexploitation des terres, l'homogénéisation des milieux, la pollution, l'introduction d'espèces invasives et le changement climatique, entraînent la perte et la fragmentation de l'habitat du castor. A ces menaces indirectes s'ajoutent des menaces directes et localisées, comme les destructions illégales de barrage et la mortalité due aux accidents routiers (Barvaux et al., 2015).

4. Conflits avec l'Homme

Historiquement, la relation entre l'homme et le castor est complexe. Longtemps chassé, puis classé « nuisible » à partir du Siècle des Lumières, Le castor a été progressivement protégé et réintroduit au début du XXe siècle (Ferrant, 2024). Pourtant, cette relation reste souvent tendue. Le castor n'attire l'attention que s'il est source de « dégâts » (Blanchet, 1977), comme par l'inondation de cultures ou jardins, la perforation des berges par ses terriers, ou l'abattage d'arbres à valeur économique. Cependant, ses prélèvements sont souvent sur des essences sans valeur sylvicole, et le recru végétal compense annuellement ses actions. De plus, protéger les cultures est souvent simple et peu coûteux.

La période de forte croissance démographique du castor, si elle n'est pas gérée, peut conduire à une phase de déclin lorsque les habitats marginaux sont saturés, coïncidant avec un pic de conflits avec les activités humaines (Halley & Rosell, 2002). Cependant, l'éradication ou le

déplacement des castors sont des solutions inefficaces et non durables, les territoires étant souvent recolonisés en 6 mois à un an (Blanchet, 1977).

5. Protection et législation

Le castor européen (*Castor fiber*) bénéficie d'une protection juridique à plusieurs niveaux (European Environment Agency (EEA)). Au niveau européen, la Directive Habitats (92/43/EEC) et la Convention de Berne (82/72/EEC) encadrent sa conservation. En Wallonie, le castor est une espèce indigène classée Natura2000 (Natura2000 framework) et bénéficie d'une **protection intégrale** (SPW, 2001). Il est donc interdit de le chasser, le piéger, le capturer, le déplacer, le déranger intentionnellement, détruire ses constructions et dégrader son habitat (Conseil d'administration Natagora, 2012).

Cette protection est renforcée par la prise en compte des zones humides, habitats essentiels du castor, au sein de diverses désignations : Réserve Naturelle Agrée (RNA), Réserve Naturelle Domaniale (RND), Zone Humide d'Intérêt Biologique (ZHIB) (Art.3 AGW du 08 juin 1989), Natura2000, Site de Grand Intérêt Biologique (SGIB) (Bisteau et al., 2009).

Bien que la protection soit intégrale, des dérogations pour le démantèlement de barrage ou le déplacement de castors peuvent être accordées par le DNF (AGW du 20 novembre 2003), et des indemnisations de dégâts potentiels liés aux activités du castor sont possibles sous conditions. Des actions pour faciliter la cohabitation (aménagements, protections) sont privilégiées, la capture ou le tir n'intervenant qu'en dernier recours sous dérogation.

D. CONTEXTE ET OBJECTIFS

Le retour du castor, qui est une espèce indigène en Wallonie, offre l'opportunité de réapprendre à cohabiter avec la faune sauvage. Sa conservation est d'une importance capitale, non seulement pour l'espèce elle-même, mais aussi pour les nombreux bénéfices écologiques qu'elle apporte. En tant qu'espèce-clé et ingénieur des écosystèmes, le castor est également fondamental pour la **conservation des zones humides** qui, bien que ne représentant que 6% de la surface terrestre, abritent 40% de la biodiversité mondiale (United Nations, 2025).

1. Projet Castor

Ce mémoire fait partie d'un projet d'étude plus large que je nommerai dans ce travail le « Projet Castor ». Ce projet d'étude a été réalisé dans le cadre de la fiche 123 du Plan de Relance de la Wallonie (2023-2024), et est géré par Olivier Kints du département Études de Natagora. Il s'agit d'une synthèse globale des impacts positifs et négatifs du castor au sein des réserves naturelles wallonnes nommée : « **Rôle du Castor d'Europe (*C. fiber*) dans la gestion des sites naturels protégés en Wallonie** » (Kints, 2024).

Les Réserves Naturelles de ce Projet Castor ont été choisies car elles sont occupées par le castor depuis longtemps, avec un **impact important** par inondation, et car on dispose de données antérieures à leur installation (liste en **Annexe 4**).

Ce projet est composé de 3 volets :

- Habitats : évolution des milieux
- Suivi d'espèces cibles : recherches faunistiques
- Enquête auprès des gestionnaires de Réserves Naturelles : analyse des contraintes et opportunités pour les gestionnaires

Mon travail s'intègre dans le premier volet "habitats" et se concentre sur l'eau.

2. Première étude à l'échelle régionale de la Wallonie sur le castor

Il s'agit de la première étude sur l'impact des castors basée sur l'analyse d'orthophotos en Wallonie. Les orthophotos sont des images aériennes rectifiées géométriquement pour conformer à un plan (SPW, 2023). De plus, toute la région wallonne, où la présence de castor a été observée, a été analysée. Mais l'idée n'est pas nouvelle. Déjà au siècle passé, on contrôlait la présence de castors, aux USA, en vol d'avion durant l'automne. La chute des feuilles permet une vue dégagée sur les provisions d'hiver qui sont très visibles devant leur hutte. Sachant qu'une colonie de castors occupe environ 1 à 2 km de territoire, cela permettait leurs recensements (Blanchet, 1977). Il faut cependant être prudent car tous les castors ne provoquent pas d'inondation, et ne construisent pas d'ouvrages visibles.

3. Objectif principal du mémoire

Dans cette étude, nous avons mis en place une **méthode de photo-interprétation** consistant à **quantifier l'impact spatial des activités du castor en Wallonie**, en se concentrant spécifiquement sur les **modifications hydrologiques** induites par la construction de barrages. En effet, les aires inondées sont visibles et analysables à partir d'orthophotos (SPW, 2023).

La méthode de photo-interprétation sera utilisée pour détecter et calculer l'impact des castors. Ces informations seront précieuses pour la gestion des zones comme les Réserves Naturelles, pour le suivi des populations de castors, et pour d'autres applications telles que l'amélioration de la connectivité écologique. Les résultats obtenus permettront d'envisager des stratégies de gestion adaptées, visant à réduire les potentiels dommages matériels et économiques tout en préservant le castor et les bienfaits qu'il apporte à la biodiversité.

4. Objectifs spécifiques du mémoire

- **Valider la méthode de photo-interprétation** : Avant d'analyser les résultats, nous évaluerons la fiabilité de la méthode de photo-interprétation utilisée pour détecter et quantifier les zones inondées par les castors.
- **Décrire l'impact spatial des zones inondées** par les castors
- **Rechercher les facteurs d'influence** potentiels de ces inondations

5. Hypothèses de recherche sur les facteurs d'influence

Les castors en Wallonie impactent le milieu par leurs inondations quand ils construisent des **barrages**. Quels sont les facteurs influençant ces **inondations** ?

- a) *La présence de barrage dépend de la catégorie de cours d'eau où les castors sont installés. Quand le CE est assez profond, il n'y a pas de construction de barrage. Donc, il n'y a pas d'inondation dues aux castors sur les grands cours d'eau. Les castors vont construire des barrages sur les petits cours d'eau.*
- b) *Il n'y a pas de différences d'impact entre les régions biogéographiques*

c) Il n'y a pas de différences d'impact en et en dehors des Réserves Naturelles

Les Réserves Naturelles sont des endroits naturels peu dérangés par l'homme, vu leur accès restreint, et riches (actions pour préserver la biodiversité). L'absence de perturbations humaines pourrait favoriser l'installation et donc l'impact des castors en Réserve Naturelle, entraînant une augmentation des inondations.

*d) Les Réserves du Projet Castor (liste en **Annexe 4**) sont représentatives des autres Réserves Naturelles, et de toute la Wallonie.*

Les sites du Projet Castor (~40) sont des Réserves Naturelles qui ont été choisies spécifiquement pour leur **fort impact de l'activité des castors**, et la documentation de leur occupation depuis déjà plusieurs années. Ceci introduit un biais initial dans l'échantillon. La question se pose donc de savoir si cet échantillon est représentatif de l'ensemble des Réserves Naturelles Wallonnes ou même du réseau hydrographique total.

Vérifier la représentativité des Réserves étudiées dans le Projet Castor permettra de savoir si les résultats dudit projet sont applicables à l'ensemble du territoire wallon ou du moins aux autres Réserves Naturelles wallonnes.

II. MATÉRIEL ET MÉTHODES

A. ZONE D'ÉTUDE ET UNITÉ D'OBSERVATION

L'étude s'est concentrée sur la **population des castors de Wallonie**. L'analyse a porté sur toutes les données disponibles de **présence attestée (actuelle et/ou passée) du castor** sur le territoire wallon.

L'unité d'observation choisie est le **quadrat d'1 km² de la grille IFBL** (Institut Floristique Belgo-Luxembourgeois, SPW, 2016). Le choix de cette grille est motivé par sa standardisation, sa couverture géographique étendue et son utilisation dans d'autres travaux du Projet Castor (ex : inventaires amphibiens, oiseaux, papillons, libellules).

B. CRITÈRES D'ÉVALUATION DE L'IMPACT ET FACTEURS D'INFLUENCE

Cette étude a uniquement considéré l'aspect quantitatif de l'impact des castors, en se focalisant sur les modifications hydrologiques. Les aspects qualitatifs tels que les altérations de la végétation de surface ou des berges ne sont pas inclus (informations disponibles dans le Projet Castor (Kints, 2024)).

1. Variables dépendantes

Trois variables dépendantes ont été sélectionnées pour décrire et quantifier l'impact des castors par inondation :

- 1) **Surface ennoyée [Snoy]** : Représente la surface totale (en m²) des zones inondées directement attribuables à l'activité des castors (plans d'eau, canaux, débordements).
- 2) **Nombre de plans d'eau [NBetang]** : Dénombrement des plans d'eau créés par la construction de barrages.
- 3) **Emprise maximale [empriseMAX]** : Indique la largeur maximale (en mètres) du plus grand plan d'eau créé par le castor, mesurée perpendiculairement au cours d'eau

2. Variables explicatives

Les **facteurs d'influence potentiels** testés sur les variables dépendantes incluent :

- 1) **Cinq variables longueur de cours d'eau pour chaque catégorie hiérarchique [HYDRO]** : Navigable [NA], [01], [02], [03], et Non-Classé [NC] (regroupant également les cours d'eau non-répertoriés ou de sous-niveau) (Art_D35, Code de l'Eau).
- 2) **Région naturelle [region]** : L'appartenance majoritaire du carré IFBL à l'une des cinq principales régions biogéographiques wallonnes (**Ardenne, Condroz et sillon Sambro-Mosan, Fagne-Famenne-Calestienne, Lorraine, Région Limoneuse**).
- 3) **Réserves Naturelles [RN]** : Représentées par la surface (en m²) de l'ensemble des Réserves Naturelles de Wallonie [RNTOT], et des Réserves Naturelles spécifiques au Projet Castor [RNoli]. Ces surfaces ont été restreintes en leurs zones inondables (zones d'aléas d'inondation, S_alea), qui sont les seules surfaces utilisables par le castor pour créer des inondations (détails en **Annexe 6**).

- 4) **Nombre de confluences [NB_conflue]** : Dénombrement des croisements de cours d'eau au sein du carré IFBL, considérés comme des sites stratégiques pour la construction de barrages.
- 5) **Présence de plans d'eau pré-existants [eau_preex]** : Variable binaire (présence/absence) de plans d'eau naturels ou artificiels non attribuables à l'activité des castors (ex : lacs, étangs, mares, bacs de décantation, bassins d'orage)
- 6) **Bois mort** : Bon indicateur de la présence du castor dû à leur régime alimentaire. Mais leur présence peut également être due à des pathologies (ex : scolites), des chablis ou à l'activité de l'homme qui abat les arbres pour leur exploitation.

C. COLLECTE DES DONNÉES PAR PHOTO-INTERPRÉTATION

Les données ont été collectées par photo-interprétation sur 2260 km² en Wallonie, via le logiciel QGIS (QGIS Development Team, 2024), en utilisant les **orthophotos d'été 2023** du Géoportal de la Wallonie (SPW, 2023).

1. Couches SIG utilisées

Les couches SIG qui ont été indispensables à la réalisation de ce travail sont :

- **Orthophotos 2023 été** : imagerie ortho-rectifiée et mosaïquée couvrant l'ensemble du territoire wallon à une résolution de 25 cm, utilisée pour l'interprétation visuelle (SPW, 2023).
- **Données de présence castor (OFFH_castor_fiber, castor_obsbe_expor20230322)** : Points attestant la présence du castor en Wallonie, provenant de l'Observatoire de la Faune, de la Flore et des Habitats (OFFH, SPW, DGRNE) ; et d'observations.be (Observation International, 2023)
- **Cours_deau_recents** : Couche du réseau hydrologique wallon hiérarchisé (WalonMap).
- **RNA et RND, RNA_oli et RND_oli** : Couches vectorielles des Réserves Naturelles (Natagora et DNF), incluant celles spécifiques au Projet Castor (RN_oli) qui sont des sites sélectionnés pour leur fort impact et leur historique de données.
- **Ifbl01x01** : Grille de carrés d'1km² servant d'unités d'observation.
- **Castor_grille** : Quadrillage de 20x20m utilisé pour l'estimation de la surface ennoyée. Cette maille de 20m de côté a été choisie car la taille moyenne des plans d'eau créés par les castors digitalisés sur les RNA du Projet Castor est de 500m² (O. Kints unpubl.).
- **Castor2024CR_F_ExportFeature** : Données de suivi des Contrats de Rivière (points de territoire castor) en 2024.
- **Regions_Naturelles** : Couche des régions biogéographiques de Belgique
- **ALEA_INOND_2016** : Couche des zones d'aléas d'inondation (SPW, 2016), s'adaptant au terrain (par exemple, différence entre large plaine ou vallée encaissée). Elle est utilisée car elle reflète les zones utilisables par le castor pour la construction de barrages.
- **C1** : Cartographie des habitats réalisée par Olivier Kints sur les RNA du Projet Castor en 2023, contenant la localisation des bois morts et les polygones des plans d'eau qui ont été utilisés pour valider la méthode de photo-interprétation.

2. Protocole de la méthode de photo-interprétation

Le protocole a impliqué la fusion et le nettoyage des données castor, leur projection sur le réseau hydrographique pour délimiter les zones d'étude (carrés IFBL intersectant avec un tampon de 1km autour des sites castors) (détails en **Annexe 5 et 6**). Chaque carré IFBL sélectionné a été analysé pour :

- Identifier et dénombrer les plans d'eau créés par le castor (NB_{etang}), reconnaissables à leur forme irrégulière et leur positionnement transversal au cours d'eau, en distinguant des ombres ou des plans d'eau préexistants (par vérification visuelle sur des orthophotos historiques, zones indéterminées pas prises en compte) (**Annexe 13**).
- Estimer la surface ennoyée (Snoy) à l'aide du quadrillage 20x20m, en excluant les surfaces incertaines (ex : cachées sous de la végétation dense en **Annexe 12**).
- Mesurer l'emprise maximale (empriseMAX) du plus grand plan d'eau perpendiculairement au cours d'eau
- Dénombrer les confluences (NB_{conflue}) et noter la présence de plans d'eau préexistants (eau_pree).

Les longueurs des cours d'eau par catégorie et les surfaces des RN ont été calculées automatiquement et jointes aux carrés IFBL (**Annexe 6**).

L'impact des castors est assez caractéristique pour ne pas être confondu avec autre chose. Il est donc aisé, avec un peu d'exercice, de repérer les sites à castors sur des photos satellites.

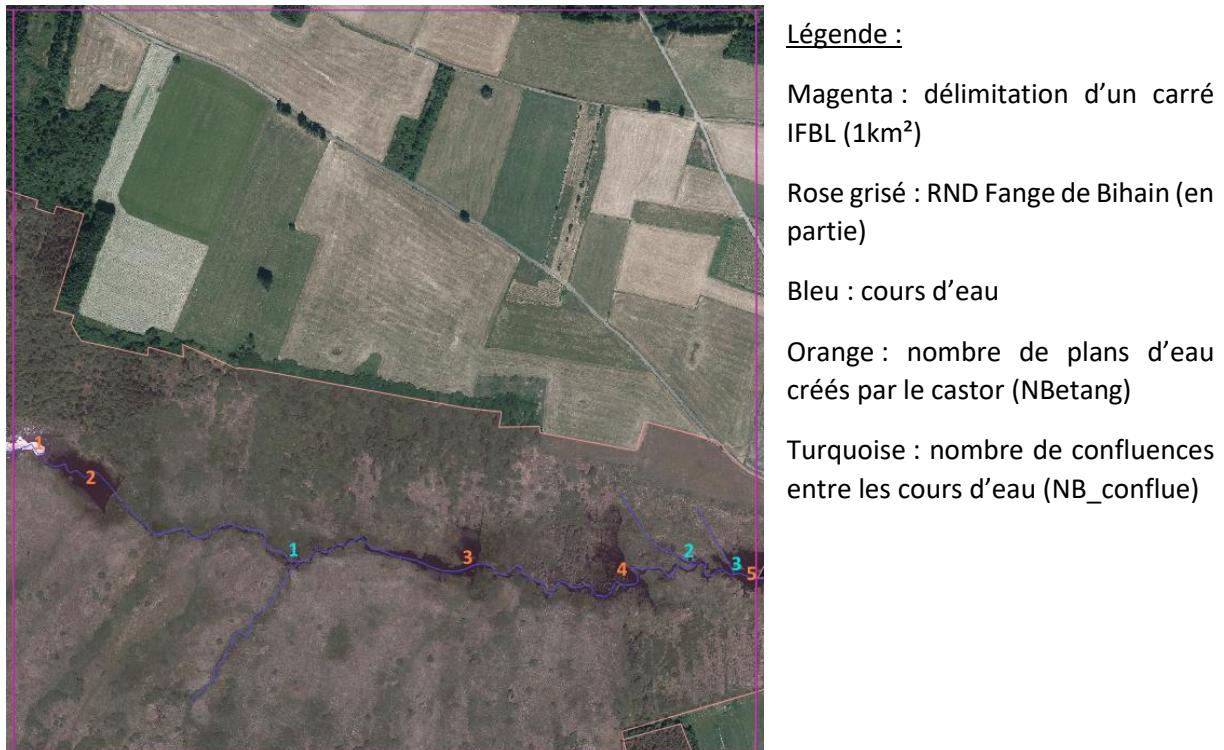


Figure 4 : Cas le plus extrême d'inondation par les castors en Wallonie : Plateau de Tailles, RND Fange de Bihain



Figure 5 : Zoom sur les étangs 1 et 2 de l'image précédente. Les flèches mesurent l'emprise maximale (empriseMAX). La surface ennoyée (Snoy) est estimée grâce à un quadrillage de maille 20x20m.

D. CONFRONTATION À LA RÉALITÉ

En passant de la théorie à la pratique, des difficultés ont été rencontrées.

NBetang : Certains plans d'eau ne sont pas visibles sous la canopée des arbres. Il peut s'agir d'un petit plan d'eau qui ne s'étendra pas dû à la nature du relief, par exemple, une vallée encaissée, ou d'une jeune inondation où les arbres qui ont les pieds dans l'eau ne sont pas encore morts (voir temporalité, dynamique des patches et succession végétale).

HYDRO : On trouve de nombreux cours d'eau dans un carré IFBL (1km²), et **plusieurs catégories** de cours d'eau sont présents. C'est pourquoi on a choisi de mesurer la longueur pour chaque catégorie de cours d'eau et déterminer s'il y a une relation positive ou négative entre ces longueurs et l'ampleur de l'impact du castor par inondation.

Comment déterminer si l'impact se trouve en Réserve Naturelle (**RN**) ? Nous n'avons pas localisé les impacts de castor en ou hors RN dans les carrés IFBL, et les RN n'occupent quasi jamais le kilomètre carré en entier. Nous avons donc choisi de déterminer qu'il y a un impact en RN s'il y a corrélation positive significative entre la surface des RN, restreintes par leur zone d'aléas d'inondation, et les variables décrivant l'impact des castors par inondation.

E. TRAITEMENT DES DONNÉES

Le traitement des données et les analyses statistiques ont été réalisés grâce au logiciel Rstudio (R version 4.3.2). La base de données finale par photo-interprétation rassemble 2260 carrés IFBL. Pour tous les tests effectués, le seuil de significativité établi est de 5%. Les résultats **significatifs** ressortent **en gras** et sont marqués d'un astérisque (*) dans les graphiques.

1. Validation de la méthode de Photo-Interprétation

a) *Biais inter-observateurs*

Vu le nombre important de carrés IFBL à analyser par photo-interprétation (PI), le travail a été divisé entre cinq observateurs. Afin de prévenir l'étude contre un potentiel biais inter-observateurs, nous avons comparé les estimations des surfaces ennoyées (**Snoy**, seule variable estimée) obtenues par chaque participant sur des carrés IFBL communs. Les

comparaisons ont été réalisées uniquement par rapport à l'observateur « Kelly », en raison de la répartition des autres observateurs sur différentes régions de la Wallonie pour couvrir l'ensemble des 2260 carrés IFBL.

Étant donné la distribution non-normale de la variable (fig.13), un test non-paramétrique de Wilcoxon pairé a été appliqué pour évaluer les différences entre les observateurs.

b) Comparaisons avec des données de terrain

i. Les Réserves Naturelles Agrées (RNA) du Projet Castor

Avant de commencer **l'analyse de tous les carrés**, nous avons voulu tester s'il était pertinent de continuer avec la méthode de photo-interprétation établie.

Cette **pré-validation** a été réalisée grâce aux données des 22 **RNA** analysées sur le terrain par O. Kints en 2023 dans le cadre du Projet Castor. Les données de terrain ont été collectées par observation directe (encodage des données sur observations.be) et par drone (prise d'images aériennes à 90m d'altitude). Ces données ont été compilées en une cartographie détaillée des habitats (couche C1) rassemblant les polygones des plans d'eau créés par le castor et la localisation des arbres morts.

Pour tester la fiabilité de la méthode de photo-interprétation (PI), les variables de Surface ennoyée par le castor (Snoy) et le nombre de bois morts (bois_mort) ont été sélectionnées pour comparer les deux méthodes (observations de terrain et PI). La distribution **non-normale** des variables a conduit à l'utilisation du **test non-paramétrique de Wilcoxon** avec données **pairées**, les mesures ayant été effectuées sur les mêmes unités d'observation. À cela s'ajoute des calculs de corrélation des mesures de la même variable selon les deux méthodes, l'illustration de la régression linéaire et la comparaison de la distribution entre les méthodes.

ii. Contrats de Rivière (CR)

Après l'analyse de tous les carrés IFBL, une **seconde validation** de la méthode de PI a été réalisée grâce au suivi des **Contrats de Rivière** (obtenu grâce à Mr Benoît Manet, superviseur du suivi).

Le suivi des Contrats de Rivière est résumé dans une base de données confidentielle comprenant des sites d'intérêt où le castor a un impact potentiel **récent**. Ces sites, hors RN, sont des zones analysées précédemment sans impact de castor. Cette base de données a été élaborée par plusieurs observateurs en **2024** et comprend 989 points. Chaque unité correspond à un **transect** le long d'un cours d'eau, qui débute avec la première trace de castor trouvée et s'arrête avec la dernière trace. Ce transect est **résumé** sur la carte par un point qui est son **centroïde**, correspondant au « centre du territoire » si le cours d'eau (CE) est rectiligne (pas forcément sur le CE si non linéaire). Ces données illustrent donc la présence de castors et notent également la présence et le nombre de barrages.

Les analyses ont été réalisées sur une nouvelle base de données créée pour comparer les méthodes de PI et de CR (voir chaînes de traitements en **Annexe 6**). Cette base de données contient 499 carrés IFBL avec des correspondances aux points CR.

Les variables utilisées pour les analyses statistiques sont le nombre de barrages (**barrage_nb**, CR) qui a été comparé au nombre d'étangs à castor (**NBetang**, PI). De plus, les données continues ont également été transformées en données de présence pour une analyse supplémentaire de détectabilité des terrains à castor.

Pour évaluer la fiabilité des méthodes, les erreurs alpha et bêta ont été calculées. Un test de Wilcoxon pairé a été utilisé pour déterminer l'équivalence des méthodes, et la corrélation a été évaluée par la méthode de Spearman. Ces choix sont justifiés par la non-normalité des données.

2. Analyses de l'impact du castor

Les analyses statistiques de l'impact du castor ont été réalisées sur la base de données (2260 carrés IFBL) **corrigée** obtenues par l'analyse des orthophotos d'été 2023 (méthode de photo-interprétation). Cette correction a été effectuée par le facteur du **ratio des moyennes** pour chaque observateur pour se prémunir du biais inter-observateurs.

a) Description de l'impact des castors en Wallonie

Une cartographie des impacts de castor par inondation sur toute la Wallonie a été réalisée, sur le logiciel QGIS, à partir des données récoltées par photo-interprétation des orthophotos d'été 2023.

Pour décrire l'impact des castors, des statistiques descriptives (moyennes, médianes, quartiles, écarts-types) ont été calculées pour Snoy, NBetang et empriseMAX sur le logiciel R studio. Des tests de normalité (Shapiro-Wilk) ont confirmé la non-normalité des distributions, justifiant l'utilisation de méthodes statistiques non-paramétriques ou de transformations.

b) Recherche des facteurs d'influence

Pour identifier les facteurs influençant les inondations provoquées par l'activité des castors, des **modèles de régression** ont été employés. Compte tenu de la nature des données (non-normales, présence d'énormément de zéros, asymétrique) des modèles linéaires généralisés (GLM) de type binomial négatif ont été privilégiés pour NBetang. Pour Snoy et empriseMAX, la forte dispersion des données a nécessité l'utilisation de régressions linéaires (LM) après une transformation logarithmique ($\log(X+1)$). (Choix détaillé en **Annexe 7**)

Les variables ont été sélectionnées par étapes descendantes (*stepwise backward selection*) à partir des modèles complets (**Annexe 8**). La sélection ascendante (*forward selection*) donnait exactement les mêmes modèles restreints.

Les facteurs d'influence ont ensuite été abordés séparément. Leurs répartitions ont été illustrés par rapport aux variables dépendantes et des tests de Mann-Whitney-Wilcoxon ont été effectués. Cette partie teste les hypothèses abordées au point I_D_5.

III. RÉSULTATS ET DISCUSSION

A. VALIDITÉ DE LA MÉTHODE DE QUANTIFICATION DE L'IMPACT DES CASTORS PAR PHOTO-INTERPRÉTATION

Avant de procéder à l'analyse des résultats, il était impératif d'évaluer la fiabilité de la méthode de photo-interprétation utilisée.

1. Évaluation du biais inter-observateurs

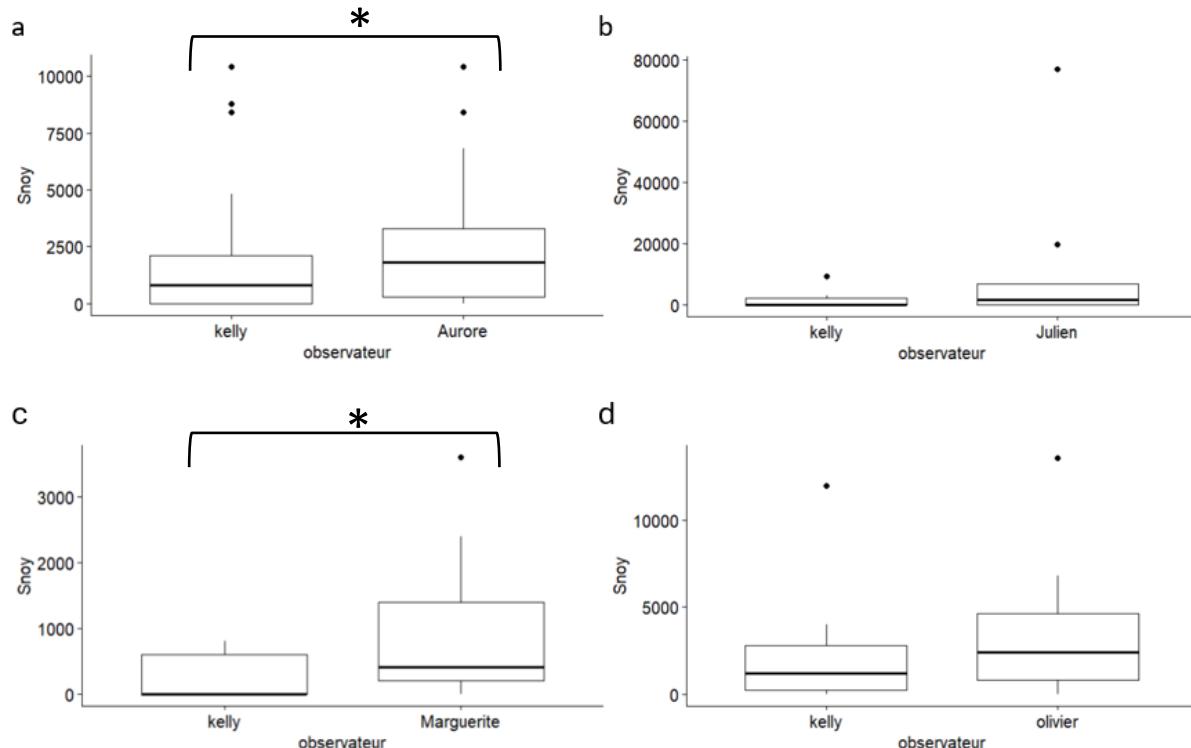


Figure 6 : Comparaison des estimations de *Surface envoiée par le castor* entre observateurs en m^2 . La ligne noire est la médiane et la boîte délimite les valeurs entre le 1^{er} et le 3^e quartile. Attention les échelles sont différentes.

Nous pouvons observer les disparités des **estimations de la Surface envoiée** (Snoy) entre observateurs dans la **Figure 6**. Les estimations restent dans le même ordre de grandeur, sauf dans le cas de Julien (fig.6_b) où on peut voir que l'axe y est différent des autres graphiques car des données extrêmement grandes ont été enregistrées.

Les résultats des comparaisons (tab.1) indiquent une différence significative entre les estimations de Surface envoiée avec celles d'Aurore ($p = 0.025$) et de Marguerite ($p = 0.020$). Bien que le test avec Julien ne soit pas statistiquement significatif ($p = 0.444$), la divergence considérable entre les moyennes des surfaces estimées ($1\,600 m^2$ pour Kelly contre $12\,222.22 m^2$ pour Julien) a justifié une correction.

Pour pallier ces disparités, une correction a été appliquée à toutes les estimations de surface envoiée de chaque observateur par rapport à l'observateur « Kelly », basée sur le **ratio des moyennes**.

Les facteurs de correction appliqués sont les suivants :

- Aurore : 0.79
- Julien : 0.13
- Marguerite : 0.26
- Olivier : 0.72

En plus des comparaisons statistiques, une comparaison visuelle des carrés divergents a été effectuée. Il en est ressorti que Marguerite confond beaucoup les ombres avec des plans d'eau et Julien confond des plans d'eau préexistants (mare, étang, bacs de décantation, etc.) avec des plans d'eau créés par les castors.

Observateurs comparés (nbr carrés)	Moy +/- sd observateur Kelly	Moy +/- sd autre observateur	Test Wilcoxon pairé
a) Kelly/Aurore (24)	2 066.667 +/- 3 070.57	2 616.667 +/- 2 828.38	V = 13 p = 0.025
b) Kelly/Julien (9)	1 600 +/- 3 033.15	12 222.22 +/- 25 152.42	V = 9 p = 0.444
c) Kelly/Marguerite (11)	254.546 +/- 369.77	981.818 +/- 1 177.98	V = 2.5 p = 0.02
d) Kelly/Olivier (7)	2 742.857 +/- 4 310.78	3 828.571 +/- 4 876.38	V = 0 p = 0.1

Tableau 1 : Moyennes et écart-types de la Surface envoiée estimée en m^2 et résultats des tests de Wilcoxon par observateurs

2. Comparaison avec les données de terrain du Projet Castor sur les Réserves Naturelles Agréées (RNA)

Avant de se lancer dans l'intégralité de l'analyse, une pré-validation a été effectuée avec les 22 Réserves Naturelles Agréées incluses dans le Projet Castor. Cette étape visait à évaluer la performance de la méthode en la confrontant aux données de terrain cartographiées durant l'été 2023.

a) Comparaison des Surfaces envoiées

La différence entre les surfaces envoiées mesurées par photo-interprétation et par observation sur le terrain n'est **pas significative** (p-value : 0.11). On **accepte** donc l'hypothèse nulle (**H0**), suggérant que les deux **méthodes** sont **équivalentes** pour la mesure de la surface envoiée par les castors (fig.8). Cette conclusion est renforcée par une forte corrélation positive ($r = 0.809$) entre les variables obtenues par les deux approches (fig.7).

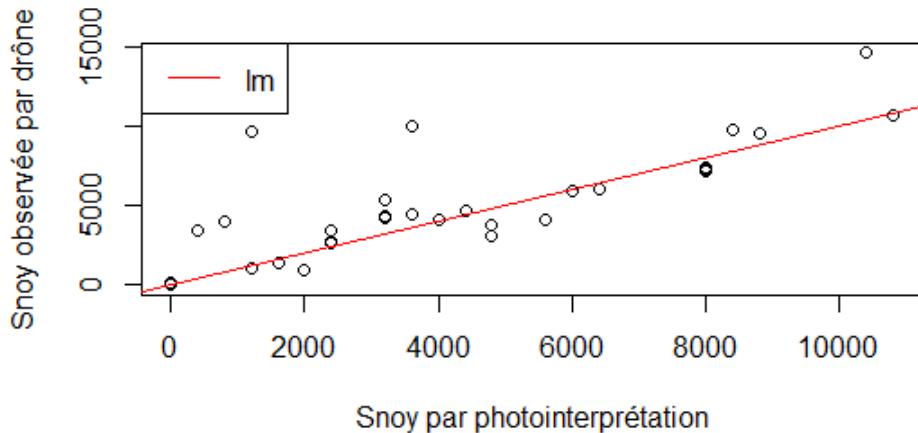


Figure 7 : Comparaison des mesures de la Surface envoiée selon deux méthodes : observée à partir des images de drone du Projet Castor (2023) et par photo-interprétation. La droite de régression est en rouge.

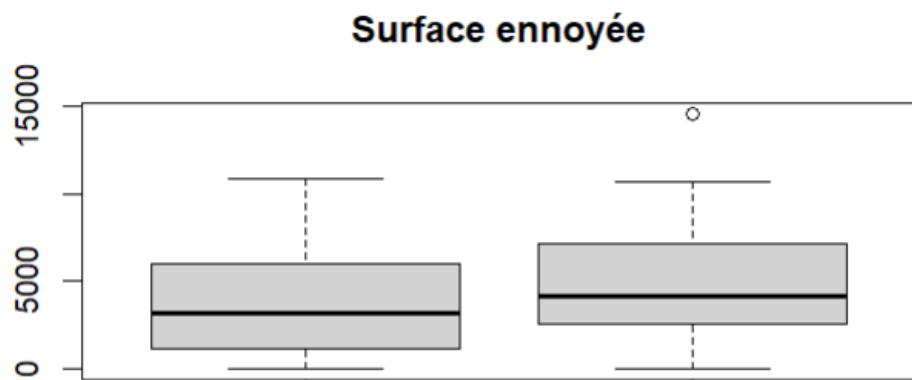


Figure 8 : Comparaison des Surfaces envoiées selon deux méthodes (observations et PI) : à gauche par PI et à droite par observation sur le terrain. Boîte à moustache (espace interquartile), la ligne noire est la médiane.

b) Comparaison du nombre d'arbres morts

Le nombre d'arbres morts étant un indicateur important de la présence des castors, l'efficacité de la photo-interprétation à les détecter a été évaluée.

La différence entre les deux méthodes pour le décompte des arbres morts est **significative** (p -value = 0.03) (fig.10), entraînant le rejet de l'hypothèse nulle (H_0). La corrélation positive moyenne ($r = 0.497$) indique que **si certains arbres morts sont détectés par photo-interprétation, la méthode n'est pas suffisamment efficace pour ce critère** (fig.9). En conséquence, le critère « arbres morts » a été **abandonné** pour la suite de l'étude.

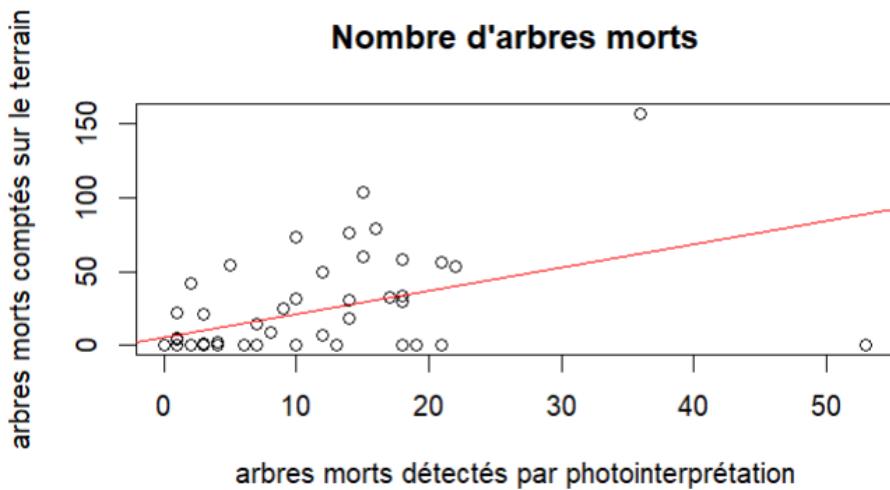


Figure 9 : Comparaison des décomptes d'arbres morts selon deux méthodes (observations et PI). La droite de régression est en rouge.



Figure 10 : Comparaison des décomptes d'arbres morts selon deux méthodes : à gauche par photo-interprétation et à droite par observation sur le terrain. La ligne noire est la médiane.

3. Comparaison avec les données du suivi des Contrats de Rivière (CR)

Afin de valider davantage la méthode de photo-interprétation (PI), une comparaison a été effectuée avec les données du suivi des Contrats de Rivière (CR), qui représentent des observations de terrain indépendantes.

a) Comparaison des données de Présence de barrage

En plus des 2260 carrés IFBL avec données de présence de castor analysés par photo-interprétation, 163 carrés de présence supplémentaire ont été identifiés par le suivi des Contrats de Rivière. Cela indique que la couverture analysée par PI a manqué environ 7% des données de présence récoltées par les CR. Cette divergence peut être partiellement attribuée au décalage temporel entre les données des CR (2024) et des orthophotos utilisés pour la PI (2023), correspondant à la zone d'expansion du castor.

Parmi les **240** carrés où un barrage est mentionné par les CR, 88 n'ont montré aucune présence par photo-interprétation (tab.2).

	PI 0	PI 1
CR 0	208	51
CR 1	88	152

Tableau 2 : Données de présence de plans d'eau pour la méthode de photo-interprétation (PI) et de barrages pour le suivi des Contrats de Rivière (CR). 0=absence, 1=présence

- **Erreur de type I (risque alpha)** : Représente les cas où la PI détecte une présence (PI=1) alors qu'elle est absente selon les CR (CR=0). Calcul : $51/(208+51) = 0.197$; La méthode de PI détecte un plan d'eau alors qu'il n'y en a pas dans **20%** des cas.
- **Erreur de type II (risque beta)** : Représente les cas où la PI ne détecte pas de présence (PI=0) alors qu'elle est présente selon les CR (CR=1). Calcul : $88/(88+152) = 0.367$; **La méthode de PI ne détecte pas 37% des barrages (toutes tailles confondues)**.

Il est à noter que les **barrages de moins de 10 mètres sont difficilement détectable par PI**, et leur **impact** sur les milieux naturels est considéré comme **moindre**.

Une analyse plus approfondie des 12 données de **barrages de plus de 10 mètres**, supposées visible par PI (compte tenu de l'activité dynamique des castors et de l'absence d'information de destruction), a révélé les points suivants après vérification de la base de données CR et une nouvelle analyse par PI par Olivier Kints :

- 4 exclusions : Ces cas ont été écartés pour diverses raisons (nouvelle colonisation en 2024 ou le centroïde du transect du suivi des CR tombe en dehors du carré IFBL où se trouve le plan d'eau).
- 5 difficilement visibles : ces barrages étaient situés dans des zones très boisées avec une colonisation récente rendant leur détection complexe même avec l'information.
- 3 potentiellement visibles : ces cas représentent des erreurs de détection par inattention, jugées acceptable compte tenu du volume de données analysées.

En conclusion, **95% des zones ennoyées par des barrages de plus de 10 mètres sont détectables par photo-interprétation**. Les 4% manquants sont principalement dû à des colonisations très récentes (< 2 ans), à la présence de milieux très boisés (3%), ou à des erreurs d'interprétation (1%). Calcul : $12/240$

b) Comparaison des dénombrements de barrages

Pour évaluer la concordance entre les observations de terrain (CR) et la photo-interprétation (PI) concernant le nombre de barrages de castor, nous avons comparé la variable « Nombre de barrages » relevée par les Contrats de Rivière (CR) et la variable « nombre de plans d'eau » (NBetang) issue de la PI.

La distribution de ces deux variables étant **non-normale** (fig.11), un test non-paramétrique de Wilcoxon pairé a été utilisé pour comparer leurs dénombrements.

V	P-VALUE	H1
26023	1.645e-08	=/=

Tableau 3 : Résultats du test de Wilcoxon avec données pairees pour comparer le dénombrement des barrages de castors selon deux méthodes (CR et PI)

Le test de Wilcoxon (tab.3) révèle une **différence significative** ($p = 1.645e-08$) entre le nombre de barrages recensés par les CR (moy= 2.367, sd= 4.201) et le nombre de plans d'eau identifiés par PI (moy= 1.389, sd= 2.617). Cela conduit au rejet de l'hypothèse nulle (H0). Bien qu'une relation existe, la **corrélation** de Spearman (0.52) est **positive modérée**, ces deux variables ne sont pas équivalentes en termes de dénombrement précis (fig.12).

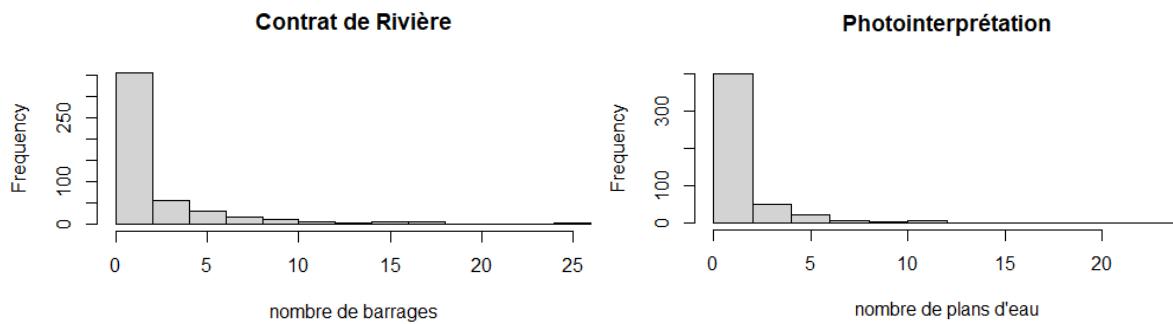


Figure 11 : Distributions des variables nombre de barrages dans la méthode des Contrats de Rivière, et nombre de plans d'eau (NBetang) dans la méthode de PI

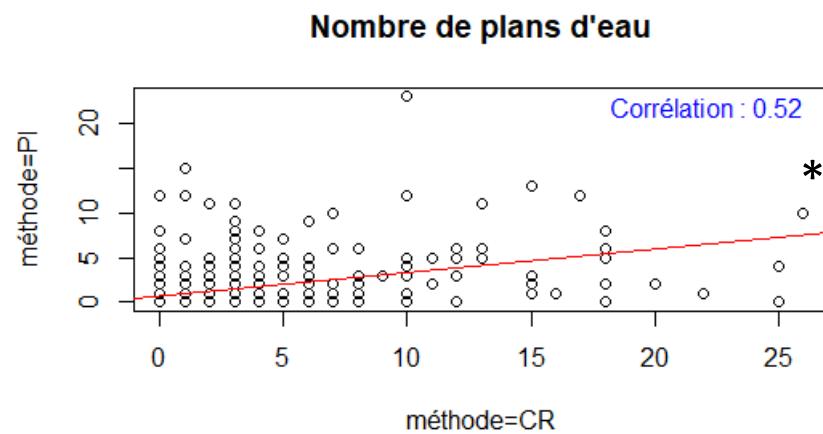


Figure 12 : Comparaison des nombres de barrages/plans d'eau selon deux méthodes (CR et PI). La droite de régression est en rouge.

En conséquence, la méthode de photo-interprétation n'est **pas validée pour le nombre précis des barrages** ou des plans d'eau créés par les castors.

Cette limitation peut s'expliquer par plusieurs facteurs :

- **Détection des petits barrages** : les barrages de moins de 10 mètres sont difficilement détectables par photo-interprétation.
- **Erreurs d'estimation par PI** : la photo-interprétation peut entraîner une sous-estimation des plans d'eau (par exemple, les plus petits ou ceux masqués par une végétation dense) ou, inversement, une surestimation due à la fausse interprétation d'éléments tels que des ombres comme des plans d'eau.
- **Variabilité temporelle** : Le nombre de plans d'eau peut avoir évolué entre le moment des observations de terrain par les Contrats de Rivière et celui de l'interprétation des images satellites. Ces changements peuvent être dus à des phénomènes naturels (sécheresse, inondation, nouvelles colonisations) ou à des activités humaines (aménagement du territoire).
- **Les variables comparées ne sont pas égales** : Le nombre de barrages (CR) a été comparé avec le nombre de plans d'eau (PI)

4. Fiabilité de la méthode de photo-interprétation

Parmi les variables dépendantes étudiées, la variable Surface ennoyée par le castor (Snoy) est la plus explicative. La variable Nombre d'étangs (NBetang) a manqué de **nombreux petits étangs (<10m²)** moins visibles en photo-interprétation, tandis que la longueur du barrage (empriseMAX) n'apporte pas assez d'informations sur l'inondation car la relation Snoy – empriseMAX n'est pas allométrique (**Annexe 9**). Cela peut s'expliquer par la diversité des reliefs, par exemple un long barrage peut inonder une très grande surface dans une zone plate, tandis que dans une vallée étroite le même barrage n'aura qu'un impact limité.

B. QUEL EST L'IMPACT DES CASTORS EN WALLONIE ?

1. Distribution des variables dépendantes

L'impact des castors par inondation est caractérisé par trois variables dépendantes principales, mesurées par photo-interprétation : **Snoy**, **NBetang** et **empriseMAX**. L'analyse des distributions de ces variables est cruciale pour le choix des méthodes statistiques appropriées. La distribution de ces variables est fortement **non-normale** et **asymétrique**, caractérisée par un nombre très élevé de zéros (fig.13_A/B/C). Ceci indique que la **présence d'un castor ne se traduit pas systématiquement par une inondation détectable**. Cette nature des données empêche l'utilisation directe de modèles statistiques basés sur l'hypothèse de normalité. Pour tenter de **normaliser ces distributions** et les rendre plus adaptées aux analyses statistiques, une **transformation logarithmique** a été appliquée aux variables (fig.13_D/E/F).

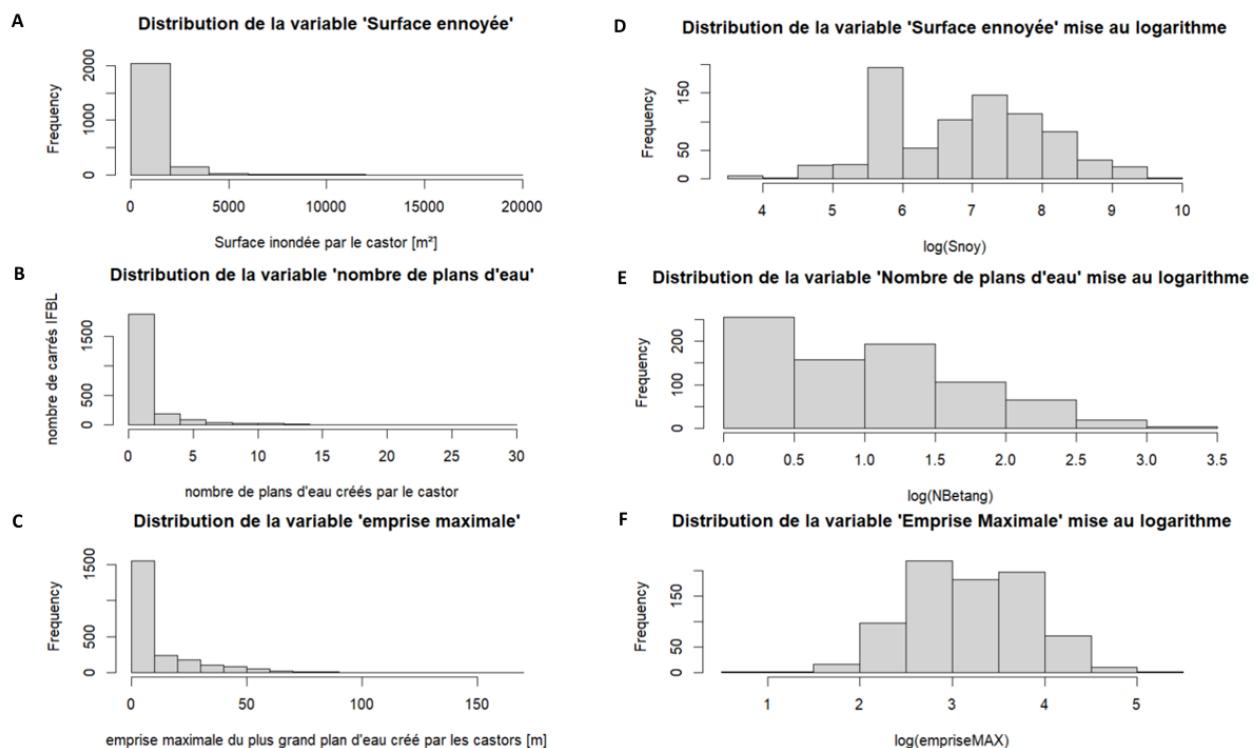


Figure 13 : Distributions des variables dépendantes et leurs logarithmes : A/D- Surface ennoyée ; B/E- Nombre de plans d'eau ; C/F- Emprise maximale. Frequency : nombre d'observations, équivalent au nombre de carrés IFBL (2260 au total).

2. Description de l'impact des castors sur le milieu en Wallonie en 2023

La Figure 14 illustre la répartition géographique de l'impact par inondation du castor en Wallonie en 2023. On remarque clairement que l'Ardenne est la région la plus impactée (la plus colorée). On remarque également que les carrés IFBL contenant des grands cours d'eau (ex : Meuse) ne contiennent aucun inondation visible par photo-interprétation (en noir).

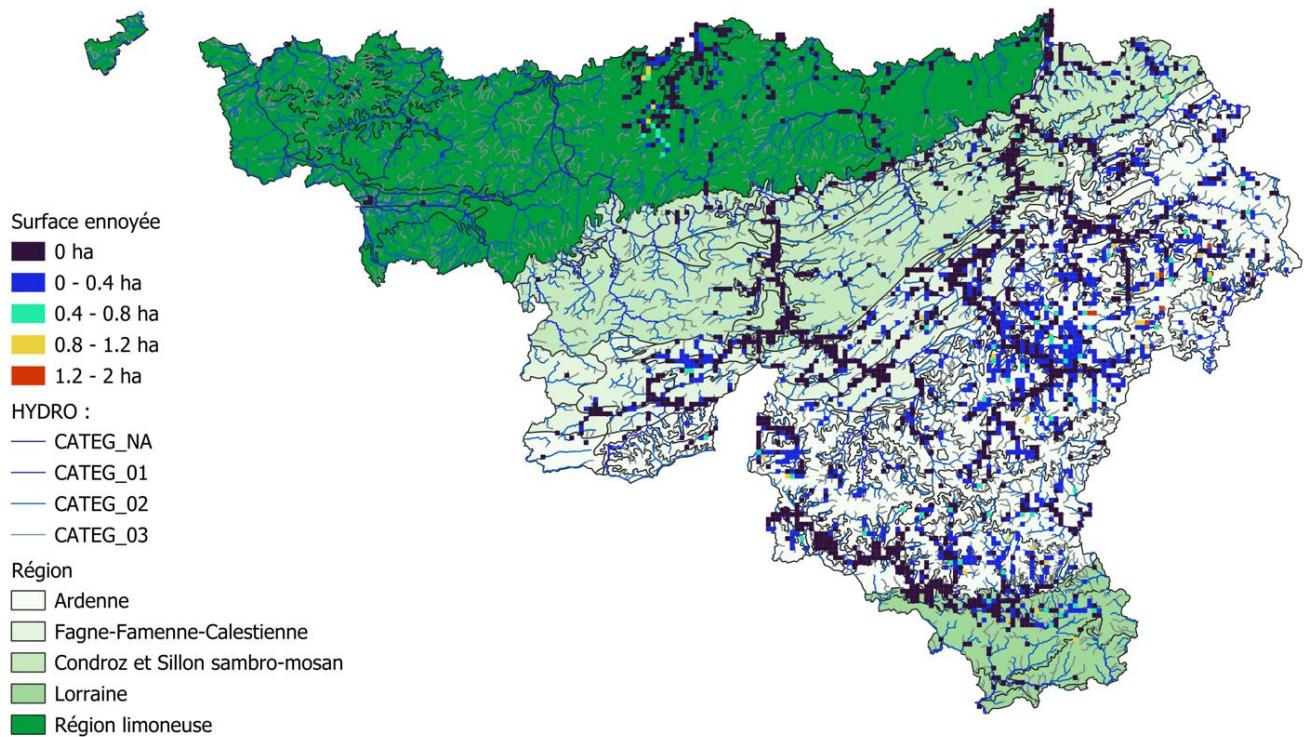


Figure 14 : Distribution spatiale de l'impact des castors en Wallonie catégorisé par la Surface ennoyée selon les intervalles de valeurs repris dans la légende (en hectares).

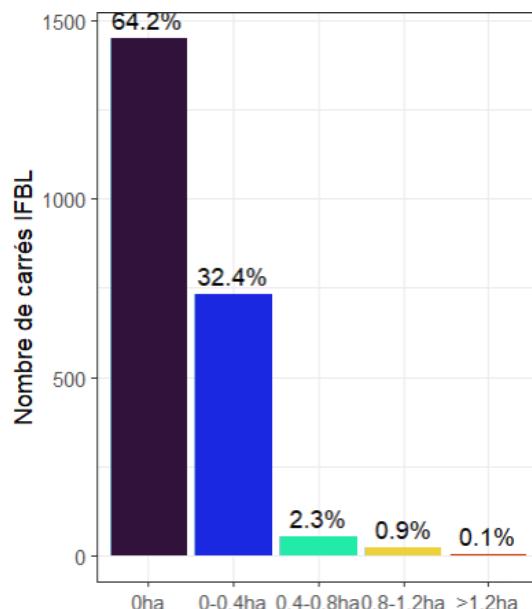


Figure 15 : Répartition de la fréquence selon l'intensité d'impact du castor par les Surfaces ennoyées (Snoy) en hectares.

Dans la **majorité des cas (64%)**, l'activité du castor ne conduit **pas** à des **inondations** visibles par photo-interprétation (fig.15). La construction de barrage n'est pas systématique, une inondation est observée uniquement en présence d'un barrage actif.

Dans les cas où une inondation est observée [Snoy-0], la surface ennoyée **moyenne** est de 1 779 m² (**<0.1ha**), et dans **75% des cas** elle ne dépasse pas 2 400 m² (**<0.24ha**) (fig.16).

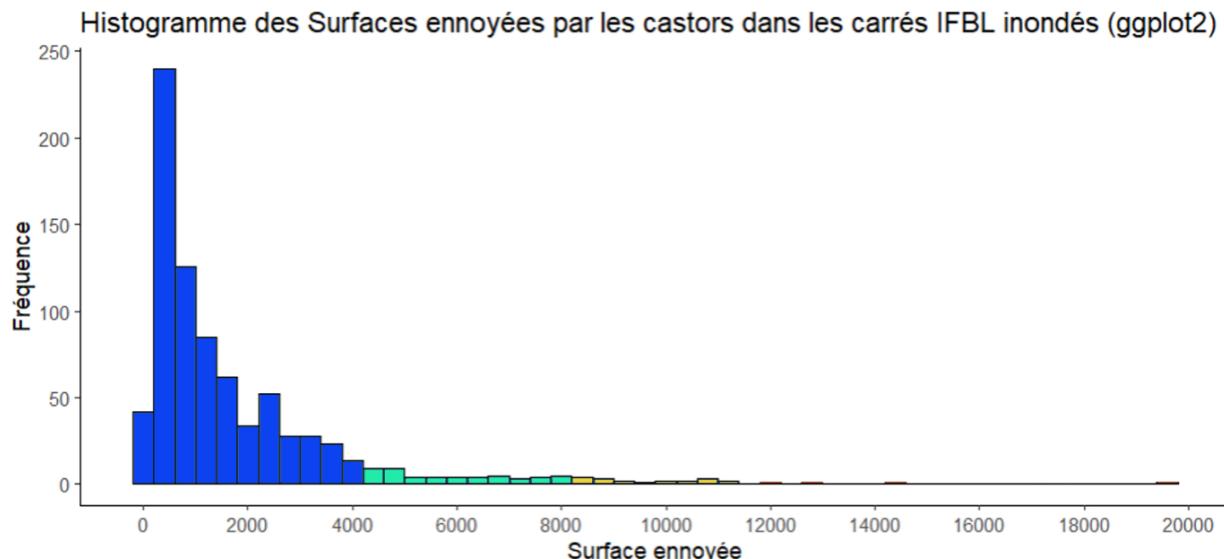


Figure 16 : Histogramme des surfaces ennoyées non-nulles (808 données/2260), l'intervalle de barre est de 400, les surfaces ennoyées sont en m².

Variables	Min	1er quartile	Médiane	Moyenne	3e quartile	Max	Sd	Total
Ennoyé (Snoy-0)	52	400	948	1 779	2 400	19	2	1 437 286
Snoy	0	0	0	636	400	19	1	1 437 286
NBetang	0	0	0	1.26	1	30	2.66	2 850
empriseMAX	0	0	0	10.79	17	163	18.77	24 375

Tableau 4 : Paramètres descriptifs des variables décrivant l'impact des castors en Wallonie. **SNOY** représente la surface ennoyée par les castors en m². **Ennoyé (SNOY-0)** correspond à **SNOY** mais en excluant les valeurs nulles. **NBETANG** est le nombre entier de plans d'eau créés par les castors. **EMPRISEMAX** est la largeur maximale du plus grand plan d'eau en mètres, mesurée perpendiculairement au cours d'eau.

Les castors ont **créé près de 3000 plans d'eau** en Wallonie, augmentant ainsi le nombre de zones humides et ouvrant le paysage (tab.4). Cette action a pour conséquence d'accroître la connectivité des zones humides et leurs espèces associées, favorisant ainsi la biodiversité des milieux devenus plus hétérogènes (Hood & Larson, 2015). **Plus de 24km de barrages** ont été construits (tab.4), impliquant un volume impressionnant de bois prélevé. Ces prélèvements stimulent la régénération végétale, l'ouverture du paysage et l'augmentation de la biodiversité du bois mort, y compris les xylophages (Law et al., 2014).

La superficie totale de la Wallonie est de 16 901 km² (Wikipedia, 2024). En 2023, la **surface totale ennoyée par les castors** s'élève à **143.73 ha**, ce qui représente 0.008% du territoire wallon. **Environ 0.01% du territoire wallon a été inondé par les castors.**

Bien que cette proportion soit minime par rapport aux modifications anthropiques, il est important de distinguer la surface inondée de la surface globalement modifiée par le castor, estimée à 1000 ha en Wallonie (à partir de O. Kints, 2024, données non-publiées). Cette dernière estimation pourrait être surestimée, les Réserves Naturelles (RNoli) choisies pour le Projet Castor n'étant pas représentatives de l'ensemble du territoire wallon (voir partie III_C_3).

Pour une évaluation plus pertinente de l'impact, nous avons considéré la **zone inondable**, correspondant au lit majeur des cours d'eau, où les castors construisent leurs barrages. Cette zone représente 1 698.62 km² (environ 10% de la Wallonie). Actuellement, seulement 0.08% de ces zones inondables sont ennoyées par les castors.

Si on ne prend que les **zones colonisées par le castor**, la surface des zones d'aléas d'inondation qu'il occupe est de 476.53 km², ce qui équivaut à **28% des zones d'aléas d'inondation** de toute la Wallonie (tab.5).

Dans les **zones** spécifiquement **colonisées par le castor** (représentant 476.53 km², soit 28% des zones inondables de Wallonie), **seulement 0.3% de la surface inondable est réellement ennoyées** par les plans d'eau créés par les barrages. En effet, si un cours d'eau est suffisamment large et profond, le castor ne construira pas de barrage et n'induira **pas d'inondation**. Le cas d'inondation le plus étendu mesuré en 2023 se situe dans la RND Fange de Bihain, atteignant près de 2ha/km² (**Annexe 11**).

Le castor est en pleine recolonisation de la Wallonie depuis une vingtaine d'années (Manet, 2012). **S'ils venaient à occuper l'ensemble des cours d'eau wallons**, nous pouvons anticiper la surface ennoyée totale en utilisant la proportion actuelle de surface **inondée dans les milieux occupés (0.3%)**. Cela projetterait une surface totale de 5.096 km² (**509.6 ha**) **inondés** en Wallonie, équivalant à environ 2x le lac de la Gileppe (2.5km²). On peut appliquer ce même principe par région (tab.10). Ces chiffres doivent être interprétés avec beaucoup de prudence, il s'agit d'une extrapolation qui ne tient pas compte, entre autres, de la territorialité des castors, de la saturation potentielle des milieux (Blanchet, 1977; Morizot & Husky, 2024) et, de la distribution non-homogène des catégories de cours d'eau sur le territoire. Avec l'augmentation de la population, les territoires pourraient se rapprocher, mais uniquement si le milieu n'est pas déjà saturé. Les castors colonisent d'abord les milieux de premiers choix, puis les milieux de second et troisième choix lorsque les premiers sont épuisés. Ils construisent des barrages uniquement sur les petits cours d'eau, donc en tête de bassin, et il devrait donc y avoir un impact plus important en altitude.

Zones de Wallonie	Surface (km ²)	Portion inondée
Wallonie (RW)	16 901	0.00008
Zones d'Aléas d'Inondation en Wallonie (S_alea)	1 698.62 = 10% de la RW	0.0008

Zones d'Aléas d'Inondation avec présence de castors	476.53 = 28% des S_alea	0.003
Zones d'Aléas d'Inondation en RN	45.43 = 0.03% de la RW = 2.7% des S_alea	0.015
Zones d'Aléas d'Inondation en RN avec présence de castors	29.18 = 1.7% des S_alea = 64% des S_alea dans les RN	0.024
Zones d'Aléas d'Inondation en RNoli	6.14 = 0.36% des S_alea = 21% des RN castor	0.042
Zones d'Aléas d'Inondation hors RN	1653.19 = 97% des S_alea	0.0005
Zones d'Aléas d'Inondation hors RN avec présence de castors	447.35 = 26% des S_alea	0.002

Tableau 5 : Surfaces de différentes zones de Wallonie et leur portion inondée par les castors estimée par PI des orthophotos d'été 2023. La proportion inondée est calculée comme ($Snoy/S_{alea}$) par zone.

C. QUELS SONT LES FACTEURS QUI INFLUENCENT LES INONDATIONS PAR LES CASTORS EN WALLONIE ?

Les inondations provoquées par les castors proviennent de la construction de barrages. Mais la construction de ces barrages dépend de différents facteurs.

1. Modèles de régression

La sélection des facteurs explicatifs a été réalisée par une approche descendante (**stepwise backward selection**). La sélection ascendante (*forward selection*) a produit des résultats identiques, ce qui renforce la robustesse de la sélection de variables. Les modèles complets sont disponibles en **Annexe 8**.

TERM	ESTIMATE	P-VALUE
INTERCEPT	3.053e+00	< 2e-16
NB_CONFLUE	6.201e-02	0.016
HYDRO_01	-1.135e-03	< 2e-16
HYDRO_02	5.199e-04	1.05e-06
HYDRO_03	7.972e-04	4.58e-09
HYDRO_NA	-1.074e-03	3.04e-14
RNOLI	3.090e-05	< 2e-16
REGION CONDROZ ET SILLON SAMBRO-MOSAN	-2.075e+00	< 2e-16
REGION FAGNE-FAMENNE-CALESTIENNE	-1.607e+00	< 2e-16
REGION LORRAINE	-1.722e+00	9.12e-10
REGION RÉGION LIMONEUSE	-1.878e+00	< 2e-16

Tableau 6 : Résultats du modèle de régression restreint contenant les facteurs d'influence de la surface ennoyée par les castors : $Im(\log(Snoy+1) \sim \dots)$

➤ **La Surface ennoyée (Snoy)**

- **Augmente** avec le nombre de confluences (NB_conflue) ($p = 0.016$) et la longueur des cours d'eau de catégorie 02 et 03 ($p < 0.001$). Une plus grande superficie en Réserve Naturelle du Projet Castor (RNoli) est également associée à un impact plus important ($p < 0.001$).
- **Diminue** avec l'augmentation de la longueur des cours d'eau navigables (NA) et de catégorie 01 ($p < 0.001$). De plus, un impact significativement moindre est observé dans toutes les régions biogéographiques par rapport à la région de référence, l'Ardenne ($p < 0.001$).

TERM	ESTIMATE	P-VALUE
INTERCEPT	4.564e-01	9.83e-08
HYDRO_01	-9.270e-04	< 2e-16
HYDRO_02	2.925e-04	1.53e-06
HYDRO_03	3.774e-04	1.23e-06
HYDRO_NA	-1.497e-03	< 2e-16
RNTOT	3.809e-06	4.37e-07
RNOLI	7.068e-06	6.22e-05
REGION CONDROZ ET SILLON SAMBRO-MOSAN	-2.169e+00	< 2e-16
REGION FAGNE-FAMENNE-CALESTIENNE	-1.195e+00	< 2e-16
REGION LORRAINE	-1.500e+00	2.16e-13
REGION RÉGION LIMONEUSE	-1.689e+00	< 2e-16

Tableau 7 : Résultats du modèle de régression restreint contenant les facteurs d'influence du nombre de plans d'eau créés par les castors : $glm.nb(NBetang \sim \dots)$

➤ **Le Nombre de plans d'eau (NBetang)**

- **Augmente** avec la longueur des cours d'eau de catégorie 02 et 03 ($p < 0.001$), ainsi qu'avec la surface totale en Réserve Naturelle (RNTOT et RNoli) ($p < 0.001$).
- **Diminue** avec l'augmentation de la longueur des cours d'eau navigables (NA) et de catégorie 01 ($p < 0.001$), et est significativement plus faible dans les régions autres que l'Ardenne ($p < 0.001$).

TERM	ESTIMATE	P-VALUE
INTERCEPT	1.462e+00	< 2e-16
NB_CONFLUE	3.495e-02	0.004
HYDRO_01	-5.601e-04	< 2e-16
HYDRO_02	2.252e-04	9.77e-06
HYDRO_03	3.616e-04	2.71e-08
HYDRO_NA	-5.217e-04	1.26e-14
RNOLI	1.163e-05	8.63e-14
REGION CONDROZ ET SILLON SAMBRO-MOSAN	-9.743e-01	< 2e-16
REGION FAGNE-FAMENNE-CALESTIENNE	-8.102e-01	< 2e-16
REGION LORRAINE	-7.066e-01	1.46e-07
REGION RÉGION LIMONEUSE	-9.788e-01	< 2e-16

Tableau 8 : Résultats du modèle de régression restreint contenant les facteurs d'influence de l'emprise maximale du plus grand plan d'eau créé par les castors : $Im/\log(empriseMAX+1) \sim ...$

➤ **L'Emprise maximale (empriseMAX)**

- **Augmente** avec le nombre de confluences (NB_conflue) ($p = 0.004$), la longueur des cours d'eau de catégorie 02 et 03 ($p < 0.001$) et la surface en RNoli ($p < 0.001$).
- **Diminue** avec l'augmentation de la longueur des cours d'eau navigables (NA) et de catégorie 01 ($p < 0.001$), et est significativement plus faible dans les régions autres que l'Ardenne.

Ces modèles mettent en évidence des liens significatifs entre l'impact des castors par inondations et la catégorie des cours d'eau sur lesquels ils s'établissent, la région naturelle d'implantation, la présence en Réserve Naturelle et le nombre de confluences.

Nos résultats corroborent l'hypothèse formulée à la suite des observations de terrain d'Olivier Kints : un impact accru du castor est associé aux cours d'eau (CE) de catégorie 02, aux RN et à la présence de confluences.

2. Les facteurs d'influence

Cette partie reprend plus en détail les facteurs d'influence significatifs de l'impact du castor par inondation ressortis de nos modèles (tab. 6, 7 et 8).

a) *Influence de la catégorie des cours d'eau*

Les castors sont présents sur toutes les catégories de cours d'eau. Mais la construction de leurs barrages est influencée par des caractéristiques hydrologiques, notamment la profondeur du cours d'eau. Quand un cours d'eau est suffisamment profond, les castors n'ont pas besoin de construire de barrages, limitant ainsi l'inondation (Snoy). Par conséquent, les inondations dues aux castors sont principalement attendues sur les cours d'eau de catégories 02, 03 et Non-Classées (NC) et négligeables sur les cours d'eau Navigables (NA) et de catégorie 01 (fig.17). Il est important de rester critique, car les carrés IFBL contiennent souvent un mélange de différentes catégories de cours d'eau, ce qui complexifie l'attribution directe de l'impact à une seule catégorie.

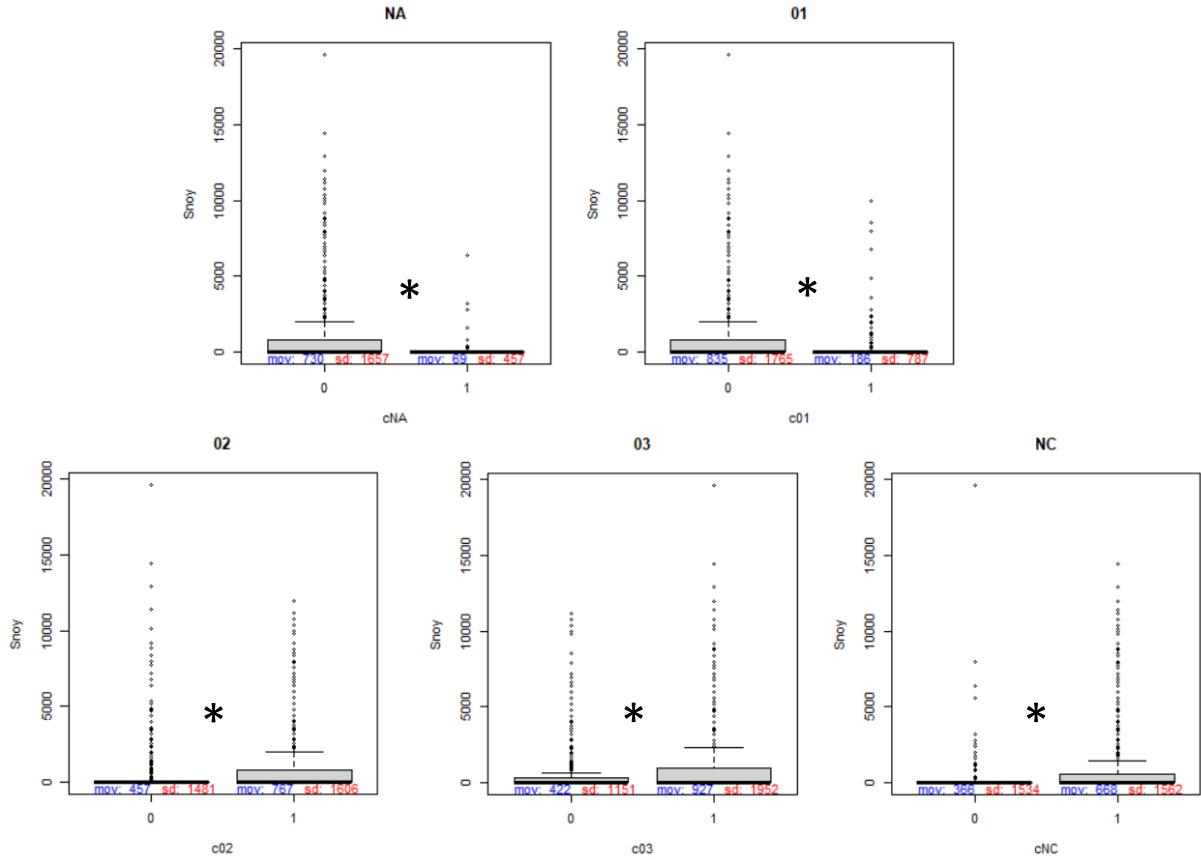


Figure 17 : Surface envoiée par les castors quand la catégorie de cours d'eau est présente (1) ou absente (0) dans le carré IFBL (1km²). Les catégories de cours d'eau sont les suivantes : navigable (NA), non-classé (NC), de catégorie 01, 02 ou 03. Les moyennes sont en bleu et les écarts-type en rouge.

CATEG_CE	W	P-VALUE	H1
HYDRO_NA	201 975	< 2.2e-16	1 < 0
HYDRO_01	376 124	< 2.2e-16	1 < 0
HYDRO_02	747 142	< 2.2e-16	1 > 0
HYDRO_03	738 981	< 2.2e-16	1 > 0
HYDRO_NC	284 540	8.234e-07	1 > 0

Tableau 9 : Résultats des tests de Wilcoxon. Influence de la catégorie de cours d'eau sur la surface envoiée (Snoy). En rouge, effet négatif/diminution et en vert, effet positif/augmentation.

Les tests de Wilcoxon confirment une différence hautement significative de la surface envoiée (Snoy) selon toutes les catégories de cours d'eau (tab.9). Il y a une diminution significative de Surface envoiée (Snoy) avec la présence de cours d'eau navigables (NA) et de catégorie 01, et une augmentation significative avec les catégories 02, 03 et NC. Ces résultats concordent avec la littérature (Hartman & Törlöv, 2006) qui indique que le talent d'ingénieur écosystémique des castors, manifesté par la modification des habitats comme la construction de barrages, s'exprime principalement sur les petits cours d'eau. La profondeur de l'eau est un facteur prédictif crucial de la construction de barrages. Ils sont construits dans 97% des cas si la profondeur d'eau est inférieure à 68 cm (K. Swinnen, 2015; K. R. R. Swinnen et al., 2018).

b) Influence de la région biogéographique

Région naturelle	Surface des zones d'aléas d'inondation (km ²)	Surface des zones d'aléas d'inondation colonisée par le castor (km ²)	Surface ennoyée totale (km ²)	Surface ennoyée moyenne (m ² /km ²)	Portion inondée en 2023	Prévisions de Snoy si Wallonie entièrement colonisée (km ²)
Ardenne	439.28	198.53 = 45%	1.11	895.76	0.0025	1.32
Condroz et sillon Sambro-Mosan	320.86	80.74 = 25%	0.02	62.01	0.00007	0.96
Fagne-Famenne-Calestienne	176.67	94.54 = 54%	0.12	340.33	0.0007	0.53
Lorraine	119.87	42.61 = 36%	0.05	412.27	0.0004	0.36
Région limoneuse	636.09	60.11 = 9%	0.14	672.64	0.0002	1.91

Tableau 10 : Impact des castors par région en Wallonie. Ce tableau présente, pour chaque région naturelle de Wallonie, la surface des zones d'aléas d'inondation qui est la zone utilisable par le castor pour la construction de barrages, la surface des zones occupées par le castor, la surface totale et moyenne ennoyée par le castor. Les prévisions de surface ennoyée si la Wallonie était entièrement colonisée sont également incluses. La portion inondée en 2023 correspond au ratio (Snoy/S_alea) par région.

Les résultats des modèles de régression (**tab 6, 7 et 8**) confirment que **l'impact du castor**, mesuré par la surface ennoyée, le nombre de plans d'eau et l'emprise maximale, **varie de manière significative entre les différentes régions**.

L'Ardenne se distingue comme la **région la plus impactée** (fig.18 et tab.18 en **Annexe 10**), avec 0.25% de ses zones d'aléas d'inondation ennoyées par les castors (tab.10). Cette conclusion est directement supportée par les modèles statistiques, où les coefficients des autres régions sont négatifs et significatifs, indiquant un impact inférieur.

Cette répartition spatiale est cohérente avec la dynamique de recolonisation du castor en Wallonie. En plus des réintroductions ponctuelles à la fin des années 1990, la région est soumise à deux fronts de recolonisation principaux : l'un venant d'Allemagne et l'autre de France (Barvaux et al., 2015). L'Ardenne étant une région naturelle limitrophe de ces deux pays, présente logiquement un impact de castor plus élevé. Cette hypothèse est renforcée par la significativité de la variable de coordonnées spatiales (Xcoord) dans le modèle complet (Mod0, **Annexe 8**).

De plus, les caractéristiques physiques de l'Ardenne contribuent probablement à son impact élevé. Il s'agit de la plus grande région de Wallonie et elle offre une densité élevée de

petits cours d'eau. Sa topographie, notamment la présence de plateaux (ex : Plateau des Tailles, Fange de Bihain), favorise également la création de barrages et plans d'eau de grande envergure (fig.18).

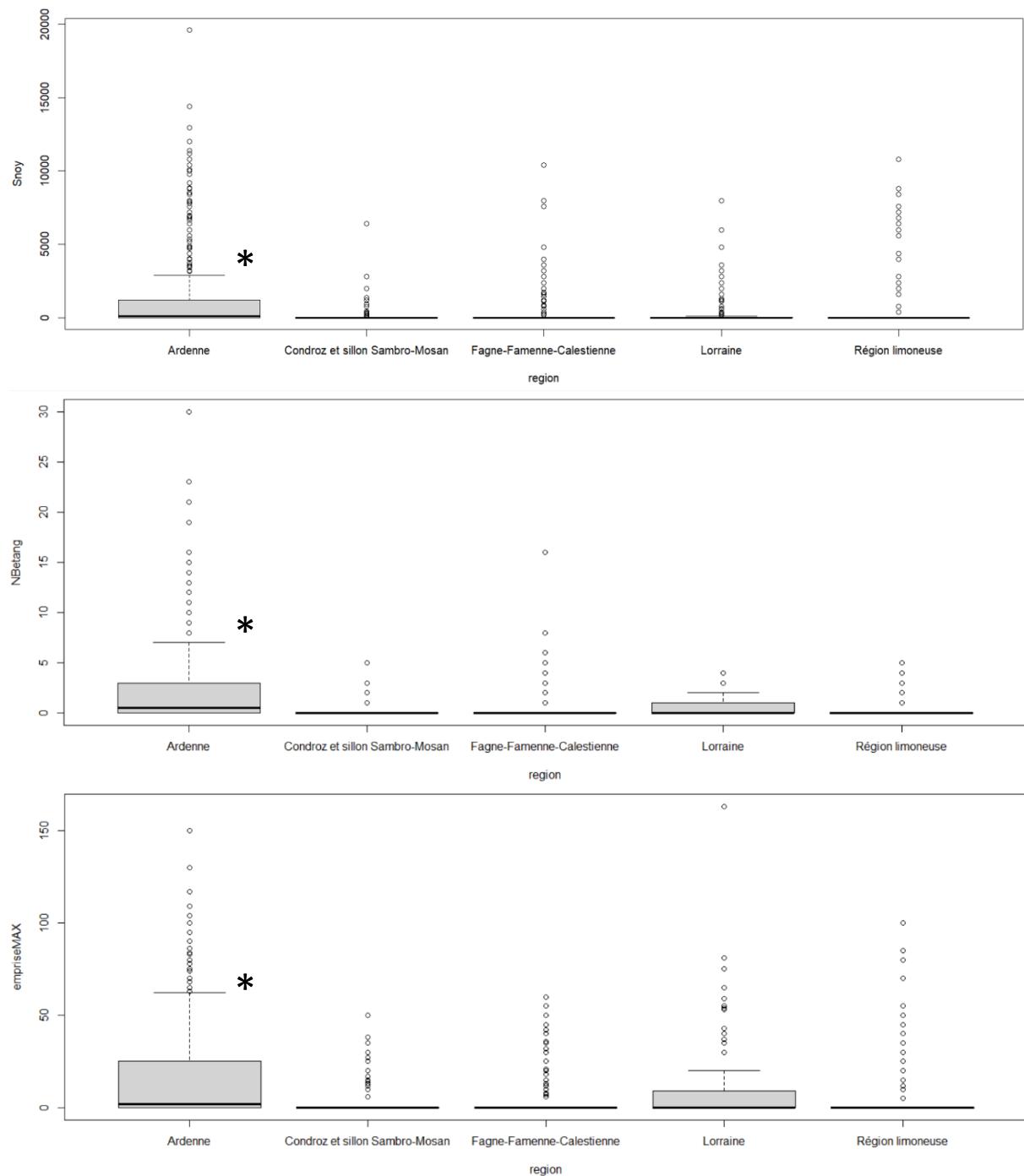


Figure 18 : Répartition des variables dépendantes par région biogéographique : Surface ennoyée (Snoy) en mètres carrés, Nombre de plans d'eau (NBetang) en nombre entiers et Emprise maximale (empriseMAX) en mètres

c) Sélectivité du castor pour les réserves naturelles

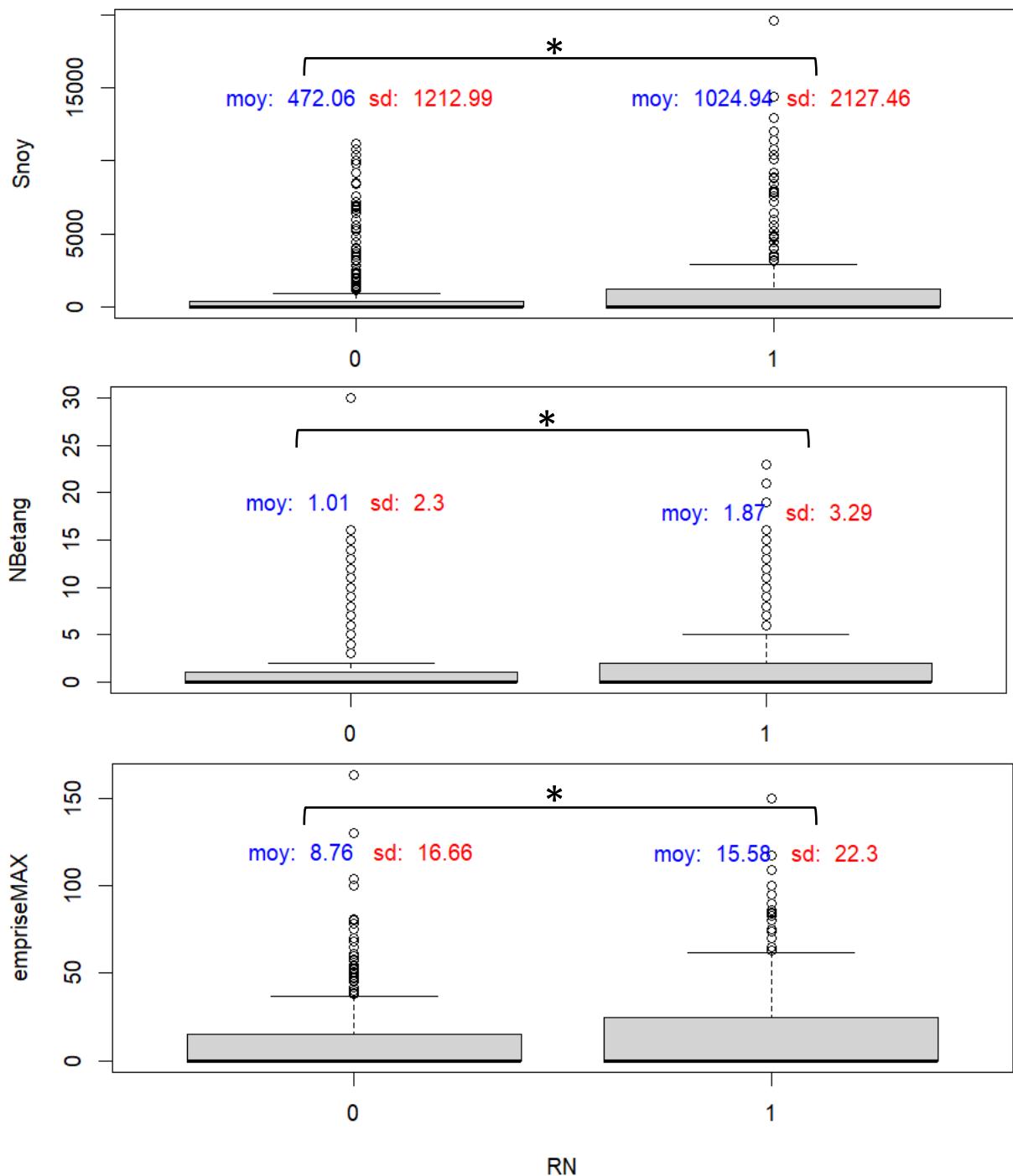


Figure 19 : Comparaison des variables dépendantes avec absence (0) ou présence (1) de Réserves Naturelles. Surface ennoyée (Snoy) en m^2 , Nombre de plans d'eau (NBetang) en nombre entiers et emprise maximale (empriseMAX) en mètres. Les moyennes sont en bleu et les écarts-type en rouge.

	W	P-VALUE	H1
SNOY	630 455	3.992e-16	1 >0
NBETANG	626 878	3.204e-15	1 >0
EMPRISEMAX	628 190	1.523e-15	1 >0

Tableau 11 : Résultats des tests de Wilcoxon. Influence de la variable Réserves Naturelles [RNTOT] sur les variables dépendantes. En vert, effet positif/augmentation.

L'analyse de la répartition spatiale de l'impact du castor met en évidence une concentration significative des inondations dans les Réserves Naturelles (fig.19 et tab.11).

En 2023, la Wallonie compte 14 335 ha de Réserves Naturelles Domaniales (RND) et 4 582 ha de Réserves Naturelles Agréés (RNA), soit un total de 18 917 hectares bénéficiant de ce statut de protection strict (Biodiversité, nature et forêts, 2023). Ces zones, qui ne représentent qu'environ **1% du territoire wallon**, totalisent **48% de la surface totale ennoyée** par les castors (tab.12).

La surface habitable par le castor en Réserve Naturelle est de 4 543 ha (tab.5). Il a déjà **colonisé** 2 918 ha, soit **64% des zones habitables en Réserve Naturelle**. Et il a inondé 68.7 ha en RN, soit 2.35% de ce territoire conquis en RN.

	Surface ennoyée totale	Proportion du lit majeur ennoyé par les castors en moyenne	Fraction de surface ennoyée
Surface ennoyée par les castors dans toute la Wallonie	1 437 286 m ²	0.006	1
Surface ennoyée par les castors en RN	686 708 m ²	0.008	0.48
Surface ennoyée par les castors en RNoli	260 788 m ²	0.018	0.18
Surface ennoyée par les castors hors RN	750 578 m ²	0.005	0.52

Tableau 12 : Surfaces ennoyées par les castors dans différentes zones de Wallonie. Ce tableau présente les surfaces ennoyées totales (somme de Snoy) par zone, la proportion moyenne du lit majeur ennoyé (Snoy/S_alea) par zone, et la fraction de la surface totale ennoyée en Wallonie que représente chaque zone.

Bien que cette concentration puisse suggérer une préférence des castors pour les RN, potentiellement due à une moindre pression anthropique, un **biais important** doit être pris en compte. Certaines réserves ou parties de réserves ont été établies précisément en raison de l'installation des castors. Des exemples incluent la RNA de Marais Chapelle à Lasnes (Natagora, 2020, 2021) et la RNA de Biron (Natagora, 2016). L'identification de toutes les parcelles de RN créées suite à la présence de castors depuis leur réintroduction nécessiterait une investigation approfondie chronophage auprès des parties prenantes. **Par conséquent, l'installation des castors en Réserve Naturelle n'est pas nécessairement due à une préférence pour ces zones.**

d) Représentativité du Projet Castor

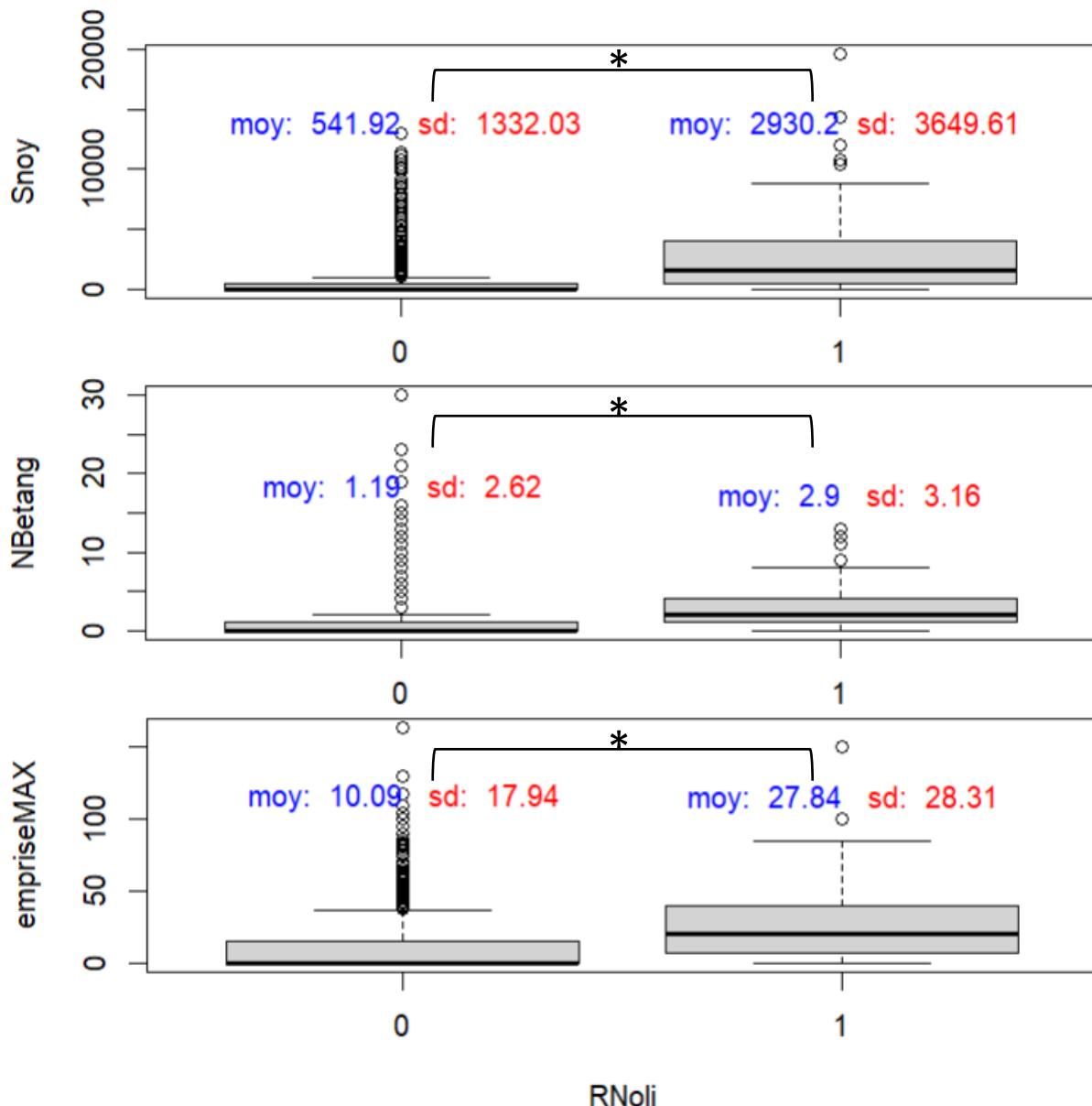


Figure 20 : Comparaison des variables dépendantes avec absence (0) ou présence (1) de Réserves Naturelles du Projet Castor (RNoli). Surface ennoyée (Snoy) en m^2 , Nombre de plans d'eau (NBetang) en nombre entiers et emprise maximale (empriseMAX) en mètres. Les moyennes sont en bleu et les écarts-type en rouge.

La surface habitable et colonisée par le castor en Réserve Naturelle du Projet Castor (RNoli) est de 614 ha (tab.5). La surface qu'il a inondée est de 26.1 ha en RNoli, soit 4.25% de ce territoire. Les Réserves Naturelles du Projet Castor (RNoli) représentent **21%** des **Réserves Naturelles colonisées par le castor** mais totalisent **18% de la surface totale ennoyée** en Wallonie (tab.12).

Les modèles de régressions (tab. 6, 7 et 8) confirment que la présence des Réserves Naturelles du Projet Castor (RNoli) exerce une **influence positive et fortement significative** sur toutes les variables d'impact (fig.20). Cependant, ces résultats doivent être interprétés avec la prudence nécessaire.

Il est important de noter que le choix de ces réserves pour le projet était initialement biaisé, celles-ci ayant été sélectionnées pour leur fort impact de l'activité des castors. En comparant la proportion du lit majeur ennoyé par les castors en moyenne par km² (IFBL), les RN du Projet Castor sont environ **trois fois plus inondées** par les castors **que les zones hors RN** (tab.12).

Nous pouvons donc conclure que **les Réserves Naturelles du Projet Castor ne sont pas représentatives de l'ensemble de la Wallonie, ni même des autres Réserves Naturelles**. Le fait que ces réserves aient été choisies pour leur fort impact de l'activité des castors en fait des **cas extrêmes**, susceptibles de « dramatiser » les résultats globaux du projet. **Il est important de souligner que de nombreux sites occupés par les castors en Wallonie présente des impacts très faibles, voire nuls.**

D. LIMITES DE L'ÉTUDE

Bien que cette étude quantifie de manière significative l'impact du castor en Wallonie, elle comporte certaines limitations.

Les **données de présence de castors**, collectées par des naturalistes, présentent possiblement des biais comme des données d'itinérance (hors du territoire) ou des erreurs humaines. Ces données peuvent omettre des sites à castor, non-répertoriés dans l'étude car aucune présence n'a été détectée.

Les **camps militaires** ont été exclus de l'étude car ils sont inexploitables par photo-interprétation en raison du floutage des images. Nous savons néanmoins que les castors y sont présents et que leur impact dans ces endroits est fort marqué (confirmé par les observations de terrain des naturalistes Natagora, projet rainettes ...). Ils occupent environ 75km² (soit 3% des données) du territoire wallon. Bien que cette surface soit négligeable par rapport à l'ensemble du territoire analysé, elle constitue un angle mort de l'étude.

La **photo-interprétation** elle-même présente des limitations. L'évaluation de la surface ennoyée est susceptible d'être sous-estimée pour plusieurs raisons. En zone forestière la présence d'une canopée dense peut masquer la surface de l'eau, et l'utilisation d'orthophotos prises durant l'été 2023, une saison généralement sèche, où le niveau de l'eau est bas, et la végétation luxuriante peut masquer les zones humides. De plus, la méthode ne permet pas de cartographier des modifications subtiles, comme les canaux creusés par les castors.

Un dernier point de prudence concerne la comparaison des données. Les mesures de terrain utilisées pour valider la méthode de photo-interprétation ont été collectées à des périodes différentes, en été 2023 pour les orthophotos et en 2024 pour le suivi des Contrats de Rivière. Ce **décalage temporel** a pu influencer nos résultats, car les conditions hydrologiques (saison, pluviosité, etc.) et l'activité des castors (déplacements, constructions de barrages), ainsi que d'autres perturbations peuvent potentiellement biaiser la comparaison.

E. AU-DELÀ DE L'INONDATION : L'IMPACT GLOBAL DU CASTOR

Cette étude s'est concentrée sur les inondations provoquée par le castor, mais il ne faut pas confondre cet impact avec **l'impact total** du castor qui prend en compte **toutes les surfaces modifiées** par celui-ci, comprenant les inondations potentielles mais aussi les changements

dans la végétation. Un site occupé par les castors ne contient pas forcément de barrage, et donc des surfaces inondées.

Leur impact ne se limite pas aux inondations **actuelles**. Les sites à castor forment un réseau de patchs dynamique (Kivinen et al., 2020). Au cours de l'analyse des orthophotos, plusieurs **anciens sites à castor** ont été rencontrés. Même si l'eau a été drainée de ces sites, ils restent reconnaissables. Un ancien site à castor contiendra des traces de l'impact du castor : des canaux creusés, des arbres morts, une modification de la végétation, etc. Les modifications sont plus ou moins importantes selon l'âge du barrage. Au cours de l'étude, 17 barrages ont été détruits de manière illégale sur les 37 sites du Projet Castor. Pour rappel, le castor est une espèce protégée intégralement, la destruction des barrages est interdite sauf sous dérogation. Les répercussions de ces destructions sur l'environnement peuvent être moins que désirables. Par exemple, la RNA d'Ober Amel est devenue une friche à ortie après destruction illicite d'un vieux barrage (Kints, 2024).

IV. CONCLUSION

Ce mémoire avait pour objectif principal de quantifier l'impact spatial des activités du castor européen (*Castor fiber*) en Wallonie, en se focalisant sur les modifications hydrologiques induites par la construction de barrages. L'étude visait également à identifier les facteurs environnementaux et anthropiques influençant ces impacts. Cette recherche, la première de cette envergure en Wallonie, fournit des informations essentielles pour la gestion future de l'espèce et des écosystèmes qu'elle façonne.

A. FIABILITÉ DE LA MÉTHODE

L'utilisation de la photo-interprétation pour étudier l'ampleur des inondations causées par le castor est une méthode probante. Les validations, incluant l'analyse des biais inter-observateurs et les comparaisons avec des données de terrain issues du Projet Castor (RNA) et des Contrats de Rivière (CR), ont révélé un seuil de confiance acceptable de la méthode. L'estimation par photo-interprétation de la surface ennoyée par le castor (**Snoy**) s'est révélée être la mesure la plus pertinente pour évaluer l'impact global du castor. Bien que la méthode puisse sous-estimer les plus petits barrages ou les plus récents, elle satisfait l'objectif initial, à savoir évaluer dans quelle mesure le castor modifie globalement les habitats naturels dans nos vallées wallonnes. L'analyse de 2260 carrés IFBL de présence du castor en Wallonie, bien que chronophage, se révèle être une méthode simple et pertinente pour donner un ordre de grandeur à l'impact du castor sur notre territoire. Cet outil est d'autant plus intéressant qu'il est aisément reproductible et pourrait être réutilisé afin d'étudier l'évolution des sites inondés par le castor et pour l'identification d'habitats potentiels pour d'autres espèces dépendant des zones humides.

B. AMPLÉUR DE L'IMPACT ET FACTEURS D'INFLUENCE DES INONDATIONS

Grâce à ce travail, la **surface inondée en 2023** par le castor en Wallonie a pu être estimée à **143.73 hectares**. En extrapolant ces chiffres aux données d'habitats collectées par le Projet Castor de Natagora (O. Kints unpubl) cela représente une surface de plus de 1000 hectares d'habitats modifiés par le castor dans notre région depuis son retour, un nombre significatif au regard de la rareté et la fragilité des milieux humides en Wallonie. Le castor a également créé près de 3000 plans d'eau, augmentant ainsi le nombre de zones humides et la connectivité écologique. Le castor est donc un **acteur écologique de premier plan** dans la gestion de nos paysages. Mais nos résultats démontrent également que la présence du castor ne mène pas systématiquement à la construction de barrages, qui dépend des conditions environnementales : dans 64% des cas, le castor ne provoque aucune inondation détectable par photo-interprétation.

Cette étude a mis en évidence des facteurs d'influence clés. Les analyses (GLM) ont montré que l'impact du castor est significativement plus élevé sur les **petits cours d'eau** (catégories 02/03) et moins sur les plus grands (catégories NA/01). Ces résultats confirment que le talent d'ingénieur du castor s'exprime principalement sur les cours d'eau de faible profondeur, où la construction de barrages est nécessaire pour créer des conditions de vie optimales. Des différences significatives ont également été observées entre les régions biogéographiques,

l'Ardenne présentant l'impact le plus élevé, cohérent avec sa position sur les fronts de recolonisation. Les résultats soulignent aussi qu'une part notable (48%) de la surface ennoyée totale se situe en **Réserve Naturelle**. Cependant, ce constat doit être interprété avec prudence, il est potentiellement biaisé car de nombreuses réserves ont été créées précisément en raison de la présence du castor. L'étude a également démontré que les Réserves Naturelles du Projet Castor ne sont pas représentatives de l'ensemble des Réserves Naturelles wallonnes ni du territoire régional, car elles ont été sélectionnées pour leur fort impact de l'activité du castor.

C. IMPLICATIONS POUR LA CONSERVATION ET LA GESTION

Après des siècles d'absence, le castor est de retour en Wallonie. En l'espace de 25 ans, l'espèce s'est non seulement réintégrée aux écosystèmes belges, mais elle a également joué un rôle essentiel en modifiant l'hydrographie et en créant de l'hétérogénéité dans les milieux naturels (Kints, 2024). Le castor est un ingénieur écosystémique, dont les activités ont contribué activement à la **formation de zones humides** et, par conséquent, à l'augmentation de la biodiversité en Wallonie.

La protection légale de l'espèce, qui inclut l'interdiction de détruire ses barrages, est malheureusement trop souvent ignorée. Le constat de **destructions illégales**, y compris au sein des Réserves Naturelles, met en lumière les tensions entre les bénéfices écologiques du castor et les préoccupations humaines.

Cette situation soulève des défis de cohabitation qui nécessitent une gestion proactive et une meilleure sensibilisation. L'action du castor, en créant des zones humides, est souvent plus rapide et plus efficace que de nombreux projets de restauration écologique. Par exemple, des castors ont parfois achevé la construction de barrages alors que les procédures administratives pour des projets similaires étaient encore en cours (Fischer, 2025).

La photo-interprétation se présente comme un outil pertinent pour les gestionnaires, leur permettant de mieux comprendre les dynamiques de population du castor et d'anticiper les défis posés par son retour.

En conclusion, la compréhension de l'impact spatial du castor est cruciale pour élaborer des stratégies de gestion qui visent à maximiser les bénéfices écologiques de cette espèce clé, tout en minimisant les conflits avec les activités humaines.

RÉFÉRENCES

- Anderson, N. L., Paszkowski, C. A., & Hood, G. A. (2015). Linking aquatic and terrestrial environments : Can beaver canals serve as movement corridors for pond-breeding amphibians? *Animal Conservation*, 18(3), 287-294. <https://doi.org/10.1111/acv.12170>
- Arimont, A. (2024). *Influence de la présence du castor européen (Castor fiber) sur la densité et la localisation des pontes de grenouilles rousses (Rana temporaria) en Wallonie* [Master thesis, Université de Liège Master biol. orga. & écol., Fin Spéc Biodiv]. <https://matheo.uliege.be/handle/2268.2/21027>
- Barvaux, C., Manet, B., & Liégeois, S. (2015). *Cohabiter avec le castor en Wallonie...* (SPW éditions). <https://biodiversite.wallonie.be/fr/09-07-2015-cohabiter-avec-le-castor-en-wallonie.html?IDC=3355&IDD=3597>
- Biodiversité, nature et forêts. (2023, décembre 15). *Création annuelle de 1.000 ha réserves naturelles : Objectif atteint !* <https://www.wallonie.be/fr/actualites/creation-annuelle-de-1000-ha-reserves-naturelles-objectif-atteint>
- Bisteau, E., Baugnée, J.-Y., Dufrêne, M., & Mahy, G. (2009). L'inventaire des Sites de Grand Intérêt Biologique en Région wallonne. *Forêt.Nature*, 103, 31:40.
- Blanchet, M. (1977). *Le castor et son royaume (Le Roman de Bièvre) Le castor du Rhône chez lui et la réintroduction en Suisse d'une espèce disparue* (Ligue Suisse pour la Protection de la Nature). LSPN.
- Carpenter, K. (2023, juillet 17). *Researchers Become “Beaver Believers” After Measuring the Impacts of Rewilding* / *Landsat Science*. <https://landsat.gsfc.nasa.gov/article/researchers-become-beaver-believers-after-measuring-the-impacts-of-rewilding/>

- Collet, M. (2022). *Le castor européen (Castor fiber) facilite-t-il la reproduction de la grenouille rousse (Rana temporaria) en Wallonie ?* [Master thesis, Université de Liège Master biol. orga. & écol., Fin Spéc Biodiv]. <https://matheo.uliege.be/handle/2268.2/16076>
- Collinet, G. (2024). *Le Râle d'eau (Rallus aquaticus L.) en Ardenne, habitats et effectifs en migration et en hivernage* [TFE, Haute École de la Province de Liège Bachelier en agronomie, orientation environnement]. https://biblio-hepl.be/pmb/opac_css/index.php?lvl=notice_display&id=127854
- Conseil d'administration Natagora. (2012, avril 23). *Position de Natagora sur le castor en Wallonie*. Natagora. <https://www.natagora.be/position-sur-le-castor>
- Council of Europe. (1982, juin 6). *Bern Convention* [An official website of the European Union]. EUR-Lex. <https://eur-lex.europa.eu/EN/legal-content/summary/bern-convention.html>
- Council of Europe. (1992, juin 10). *Protecting Europe's biodiversity (Natura 2000)* [An official website of the European Union]. EUR-Lex. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?uri=legissum:l28076>
- Déom, P. (2004). L'Einstein des Rats. *La hulotte*, 85.
- Destiné, P. (Réalisateur). (2022). *Mission castor* [Documentaire]. Dancing Dog Productions. <https://auvio.rtbf.be/emission/mission-castor-24395>
- Dewas, M., Herr, J., Schley, L., Angst, C., Manet, B., Landry, P., & Catusse, M. (2011). Recovery and status of native and introduced beavers *Castor fiber* and *Castor canadensis* in France and neighbouring countries. *Mammal Review*, 42(2), 144-165. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2907.2011.00196.x>

Dias de Oliveira, F. (2020). *Impact du castor sur les populations d'odonates en Ardenne belge* [Faculté des sciences, Université Catholique de Louvain]. <https://hdl.handle.net/2078.2/15901>

European Commission. (2025a, juin 3). *The Habitats Directive* [An official website of the European Union]. Environment. https://environment.ec.europa.eu/topics/nature-and-biodiversity/habitats-directive_en

European Commission. (2025b, juin 12). *Natura 2000* [An official website of the European Union]. Environment. https://environment.ec.europa.eu/topics/nature-and-biodiversity/natura-2000_en

European Environment Agency (EEA). (s. d.). *European beaver—Castor fiber—Linnaeus, 1758*. EUNIS. Consulté 18 juin 2025, à l'adresse https://eunis.eea.europa.eu/species/1377#legal_status

Fairfax, E., & Small, E. E. (2018). Using remote sensing to assess the impact of beaver damming on riparian evapotranspiration in an arid landscape. *Ecohydrology*, 11(7), e1993. <https://doi.org/10.1002/eco.1993>

Fairfax, E., Whipple, A., Wheaton, J. M., Osorio, B., Miller, J., Kirksey, K., Perez, N., Gilbert, J. T., & Jordan, C. E. (2024). Impacts of beaver dams on riverscape burn severity during megafires in the Rocky Mountain region, western United States. In J. L. Florsheim, A. P. O'Dowd, & A. Chin (Éds.), *Biogeomorphic Responses to Wildfire in Fluvial Ecosystems* (Vol. 562, p. 0). Geological Society of America. [https://doi.org/10.1130/2024.2562\(07\)](https://doi.org/10.1130/2024.2562(07))

Ferrant, A. (2024). Vivre en castor : Histoires de cohabitations et de réconciliation. *VertigO - la revue électronique en sciences de l'environnement*. <https://doi.org/10.4000/11ump>

Fischer, A. (2025, février 11). Comment une bande de huit castors a fait économiser plus d'un million d'euros aux contribuables. *Ouest-France.fr*. <https://www.ouest-france.fr>

france.fr/leditiondusoir/2025-02-11/comment-une-bande-de-huit-castors-a-fait-economiser-plus-d-un-million-d-euros-aux-contribuables-0c11c043-2a93-4ced-91eb-c3e788fc1cbf

Gouvernement wallon. (1989, juin 8). *Arrêté de l'Exécutif régional wallon relatif à la protection*

des zones humides d'intérêt biologique. Wallex.

https://wallex.wallonie.be/files/pdfs/12/3578_Arr%C3%AAt%C3%A9_de_l'Ex%C3%A9cutif_r%C3%A9gional_wallon_relatif_%C3%A0_la_protection_des_zones_humides_d'int%C3%A9r%C3%A9t_biotique_04-07-2017-.pdf

Halley, D. J., & Rosell, F. (2002). The beaver's reconquest of Eurasia : Status, population development and management of a conservation success. *Mammal Review*, 32(3), 153-178. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2907.2002.00106.x>

Hartman, G., & Törnlöv, S. (2006). Influence of watercourse depth and width on dam-building behaviour by Eurasian beaver (Castor fiber). *Journal of Zoology*, 268(2), 127-131. <https://doi.org/10.1111/j.1469-7998.2005.00025.x>

Hood, G. A., & Larson, D. G. (2015). Ecological engineering and aquatic connectivity : A new perspective from beaver-modified wetlands. *Freshwater Biology*, 60(1), 198-208. <https://doi.org/10.1111/fwb.12487>

Janiszewski, P., Hanzal, V., & Misiukiewicz, W. (2014). The Eurasian Beaver (Castor fiber) as a Keystone Species – a Literature Review. *Baltic Forestry*, 20(2), 277-286.

Jim. (2012, juillet 31). *Des Castors... Pas énervés ! Loire & biodiversité.* <https://www.loire-et-biodiversite.com/article-des-castors-pas-enerves-108405625.html>

Jones, C. G., Lawton, J. H., & Shachak, M. (1994). Organisms as Ecosystem Engineers. *Oikos*, 69(3), 373-386. <https://doi.org/10.2307/3545850>

Kints, O. (2024). *Rôle du Castor d'Europe dans la gestion des sites naturels protégés en Wallonie* (Rapport final). Natagora.

Kivinen, S., Nummi, P., & Kumpula, T. (2020). Beaver-induced spatiotemporal patch dynamics affect landscape-level environmental heterogeneity. *Environmental Research Letters*, 15(9), 094065. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ab9924>

Kohler, F., Andrieu, D., Bois, E., Cloiseau, G., Drelon, S., Eggert, C., Guetemme, G., Luglia, R., Pughe, T., & Serrano, J. (2023). Our Neighbor the Beaver : Anthropomorphism to Facilitate Environmental Mediation in Rural France. *Human Ecology*, 51(3), 513-528. <https://doi.org/10.1007/s10745-023-00406-z>

Larsen, A., Larsen, J. R., & Lane, S. N. (2021). Dam builders and their works : Beaver influences on the structure and function of river corridor hydrology, geomorphology, biogeochemistry and ecosystems. *Earth-Science Reviews*, 218, 103623. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2021.103623>

Law, A., Jones, K. C., & Willby, N. J. (2014). Medium vs. Short-term effects of herbivory by Eurasian beaver on aquatic vegetation. *Aquatic Botany*, 116, 27-34. <https://doi.org/10.1016/j.aquabot.2014.01.004>

Luglia, R. (2013). Le castor d'Europe (*Castor fiber*). Regards historiques anciens et nouveaux sur un animal sauvage. *Trajectoires. Revue de la jeune recherche franco-allemande*, 7, Article 7. <https://doi.org/10.4000/trajectoires.1130>

Luglia, R. (2024). *Vivre en castor : Histoires de cohabitations et de réconciliation* (Quae). Manet, B. (2012, novembre 6). *Biologie de l'espèce et évolution de sa présence*. 6e rencontre entre acteurs de la rivière « La cohabitation avec le castor en Wallonie », Lierneux.

Morizot, B., & Husky, S. (2024). *Rendre l'eau à la terre, Alliances dans les rivières face au chaos climatique* (Actes Sud).

Natagora. (2016). *Biron*. <https://www.natagora.be/reserves/biron>

Natagora. (2020, décembre 15). *Une place pour le castor en plein Brabant*.

<https://www.natagora.be/news/une-place-pour-le-castor-en-plein-brabant>

Natagora. (2021). *Le Marais de Chapelle à Lasne—Brabant Wallon*.

<https://brabantwallon.natagora.be/decouvrez-nos-reserves/le-marais-de-chapelle-a-lasne>

Noguès, X., Garenne, A., Bouteiller, X., & Fiévet, V. (2018). *Le cours de biostatistique* (Dunod).

Observation International. (2023). *Observations.be*. [Observations.be](https://observations.be/).

<https://observations.be/>

Orazi, V., Hagge, J., Gossner, M. M., Müller, J., & Heurich, M. (2022). A Biodiversity Boost From the Eurasian Beaver (*Castor fiber*) in Germany's Oldest National Park. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 10. <https://doi.org/10.3389/fevo.2022.873307>

Piętka, S. 1, Misiukiewicz, W. 2 1 F. of A., Forestry, U. of W., & Mazury, P. Ł. 2. (2022). *Impact of European Beaver (*Castor fiber L.*) on Vegetation Diversity in Protected Area River Valleys*. 613. <https://doi.org/10.3390/conservation2040040>

Pollock, M. M., Beechie, T. J., & Jordan, C. E. (2007). Geomorphic changes upstream of beaver dams in Bridge Creek, an incised stream channel in the interior Columbia River basin, eastern Oregon. *Earth Surface Processes and Landforms*, 32(8), 1174-1185. <https://doi.org/10.1002/esp.1553>

Puttock, A., Graham, H. A., Ashe, J., Luscombe, D. J., & Brazier, R. E. (2020). Beaver dams attenuate flow: A multi-site study. *Hydrological Processes*, 35(2), e14017. <https://doi.org/10.1002/hyp.14017>

Puttock, A., Graham, H. A., Cunliffe, A. M., Elliott, M., & Brazier, R. E. (2017). Eurasian beaver activity increases water storage, attenuates flow and mitigates diffuse pollution from

intensively-managed grasslands. *Science of The Total Environment*, 576, 430-443.

<https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.10.122>

QGIS Development Team. (2024). *QGIS Geographic Information System* [Logiciel]. QGIS Association. <https://qgis.org/>

Rahm, U. (2002). *Vade-mecum pour les amis du castor, petit guide pour la récolte d'observations de terrain* (CSCF). Centre suisse de cartographie de la faune.

Reichholf, J. (1999). *Le retour des castors* (Flammarion).

<https://www.eyrolles.com/Sciences/Livre/le-retour-des-castors-9782080814319/>

Rosell, F., Bozsér, O., Collen, P., & Parker, H. (2005). Ecological impact of beavers Castor fiber and Castor canadensis and their ability to modify ecosystems. *Mammal Review*, 35(3-4), 248-276. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2907.2005.00067.x>

Sinclair, A. R. E. (2003). Mammal Population Regulation, Keystone Processes and Ecosystem Dynamics. *Philosophical Transactions: Biological Sciences*, 358(1438), 1729-1740.

SPW. (s. d.). *L'observatoire de la faune, de la flore et des habitats en wallonie* ; Ministère de la Région Wallonne, DGRNE. La biodiversité en Wallonie. Consulté 12 juillet 2025, à l'adresse <https://biodiversite.wallonie.be/fr/l-observatoire-de-la-faune-de-la-flore-et-des-habitats-en-wallonie-ministere-de-la-region-wallonne-dgrne.html?IDC=122>

SPW. (2001, décembre 6). *Décret relatif à la conservation des sites Natura 2000 ainsi que de la faune et de la flore sauvages*. Wallex.

<https://wallex.wallonie.be/contents/acts/12/12149/1.html>

SPW. (2003, novembre 20). *Arrêté du Gouvernement wallon relatif à l'octroi de dérogations aux mesures de protection des espèces animales et végétales, à l'exception des oiseaux*. Wallex. <https://wallex.wallonie.be/eli/arrete/2003/11/20/2004200174/2017/07/04>

SPW. (2005, mars 3). *Code de l'Environnement—Livre 2 : Code de l'Eau (Partie décrétale)*.

Wallex.

<https://wallex.wallonie.be/eli/loi-decret/2005/03/03/1111111111/2020/01/01>

SPW. (2016, avril 23). *Atlas de la Flore de Wallonie : IFBL / Flore / Espèces / La biodiversité en Wallonie*.

<https://web.archive.org/web/20160423060337/http://biodiversite.wallonie.be/fr/atlas-de-la-flore-de-wallonie-ifbl.html?IDD=1351&IDC=807>

SPW. (2023). *Orthophotos 2023 Été* [Géoportail de la Wallonie]. WalOnMap.

<https://geoportail.wallonie.be/catalogue/ad55c2ce-62ad-4c3c-b3cf-8fbc270a6b6e.html>

Spyra, A., Cieplok, A., & Krokiewska, M. (2024). Beavers ecosystem altering : Influence of beaver dams on aquatic invertebrates in newly created beavers ponds and small mountain river. *Ecohydrology & Hydrobiology*, 24(2), 249-261.

<https://doi.org/10.1016/j.ecohyd.2023.06.009>

Stoffyn-Egli, P., & Willison, J. H. M. (2011). Including wildlife habitat in the definition of riparian areas : The beaver (*Castor canadensis*) as an umbrella species for riparian obligate animals. *Environmental Reviews*, 19, 479-493.

Stringer, A. P., & Gaywood, M. J. (2015). The impacts of beavers *Castor* spp. On biodiversity and the ecological basis for their reintroduction to Scotland, UK. *Mammal Review*, 46(4), 270-283. <https://doi.org/10.1111/mam.12068>

Swinnen, K. (2015). *The return of the European beaver (*Castor fiber*) in Flanders, Belgium : Ecology and risk assessment* [Thèse de doctorat]. University of Antwerp.

Swinnen, K. R. R., Rutten, A., Nyssen, J., & Leirs, H. (2018). Environmental factors influencing beaver dam locations. *The Journal of Wildlife Management*, 83(2), 356-364.
<https://doi.org/10.1002/jwmg.21601>

Thompson, S., Vehkaoja, M., Pellikka, J., & Nummi, P. (2021). Ecosystem services provided by beavers *Castor spp.* *Mammal Review*, 51(1), 25-39.
<https://doi.org/10.1111/mam.12220>

United Nations. (2025, février 2). *Journée mondiale des zones humides*. United Nations; United Nations. <https://www.un.org/fr/observances/world-wetlands-day>

Van den Bergh, M., & Manet, B. (2003). *The European beaver (Castor fiber L.) in Wallonia (southern Belgium) : The set-up of an afterthought management programme*. 46 (2), 117-122.

Véron, G. (1991). *Les castors* (Payot Lausanne, Vol. 26).

Wikipedia. (2024). Région wallonne. In *Wikipédia*.
https://fr.wikipedia.org/w/index.php?title=R%C3%A9gion_wallonne&oldid=2278392

99

Couverture :

Ryzhkov, S. (2014, 7 octobre). *Eurasian beaver or European beaver (Castor fiber)*. Ukraine [Photo]. Wikimedia Commons. https://commons.wikimedia.org/wiki/File:%D0%A0%D1%96%D1%87%D0%BA%D0%BE%D0%B2%D0%B8%D0%B9%D0%B1%D0%BE%D0%B1%D0%B5%D1%80%28Castor_fiber%29.jpg

Chaînes de traitement :

Palmeri, K. (2025). *Elaboration des chaînes de traitement QGIS* [Mind Map]. Miro. <https://miro.com/app/board/uXjVK1uUyG8=/>

Aide statistique :

C. Baum, communication personnelle, 21 novembre 2024 : Aide à la génération des modèles de régression

Livre « Le cours de biostatistique » (Noguès et al., 2018)

Google. (2025). Gemini. <https://gemini.google.com> (Google AI) : Aide à la génération de codes R et aide à l'interprétation de résultats de tests statistiques

R : logiciel et packages

(RStudio) R Core Team (2023). *_R: A Language and Environment for Statistical Computing_*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.R-project.org/>

(readxl) Wickham H, Bryan J (2023). *_readxl: Read Excel Files_*. R package version 1.4.3, <https://CRAN.R-project.org/package=readxl>

(car) Fox J, Weisberg S (2019). *_An R Companion to Applied Regression_*, Third edition. Sage, Thousand Oaks CA. <https://socialsciences.mcmaster.ca/jfox/Books/Companion/>

(dplyr) Wickham H, François R, Henry L, Müller K, Vaughan D (2023). *_dplyr: A Grammar of Data Manipulation_*. R package version 1.1.4, <https://CRAN.R-project.org/package=dplyr>

(ggpubr) Kassambara A (2023). *_ggpubr: 'ggplot2' Based Publication Ready Plots_*. R package version 0.6.0, <https://CRAN.R-project.org/package=ggpubr>

(ggplot2) H. Wickham. *ggplot2: Elegant Graphics for Data Analysis*. Springer-Verlag New York, 2016

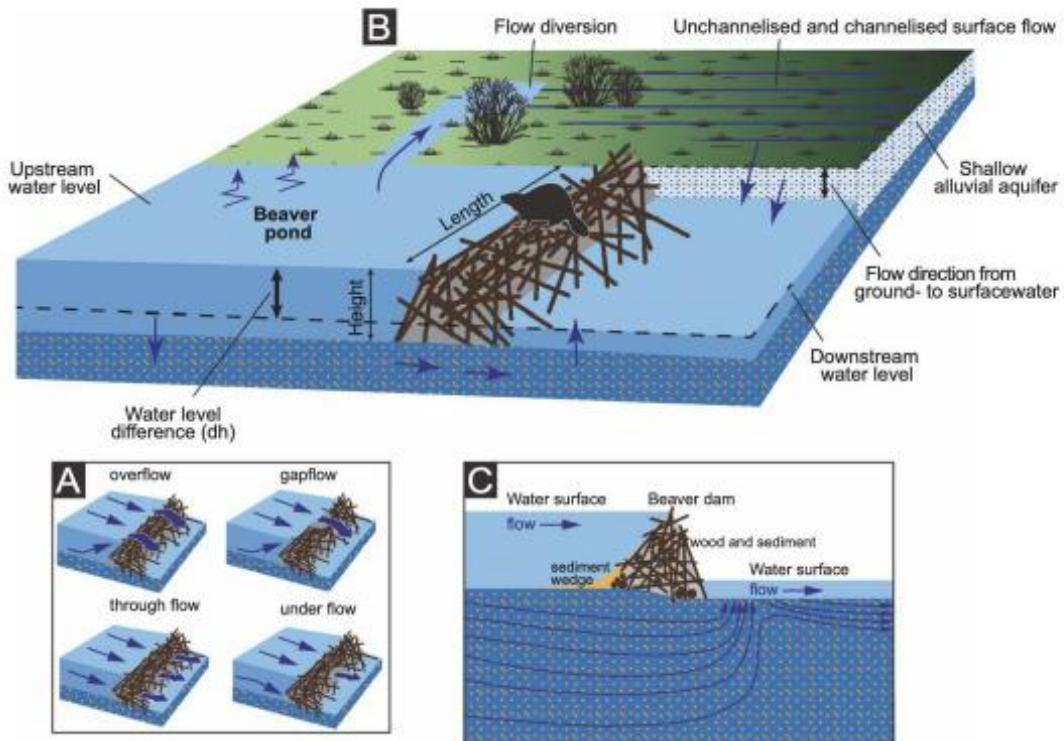
(lmtree) Achim Zeileis, Torsten Hothorn (2002). Diagnostic Checking in Regression Relationships. *R News* 2(3), 7-10. URL <https://CRAN.R-project.org/doc/Rnews/>

(MASS) Venables, W. N. & Ripley, B. D. (2002) *Modern Applied Statistics with S*. Fourth Edition. Springer, New York. ISBN 0-387-95457-0

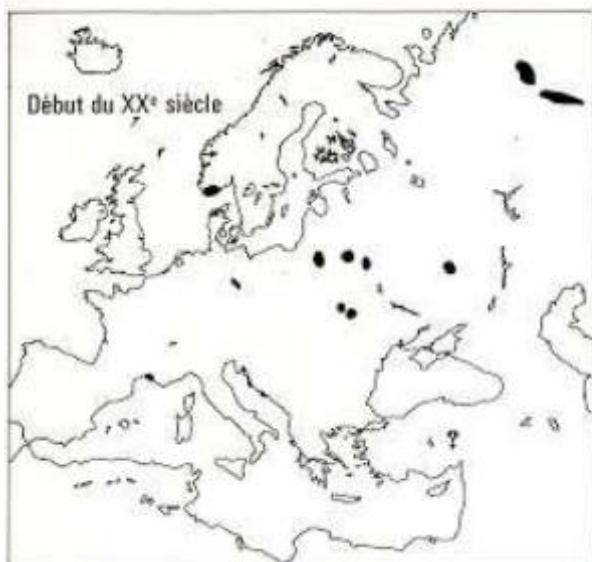
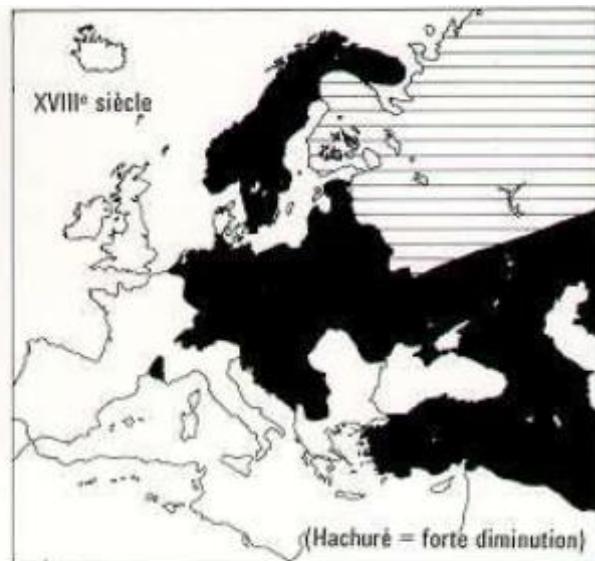
SOMMAIRE DES ANNEXES

Annexe 1. Modèle conceptuel de l'influence des barrages de castors sur l'hydrogéomorphologie des cours d'eau (Larsen et al., 2021).....	I
Annexe 2. Évolution de la répartition du castor en Europe (Véron, 1991).....	II
Annexe 3. Évolution de la répartition des castors en Wallonie de 1997 à 2012 (Manet, 2012) III	
Annexe 4. Liste des Réserves Naturelles comprises dans le Projet Castor (RNoli)	IV
Annexe 5. Détails du protocole : préparation du projet sur QGIS, étapes préliminaires nécessaires à la création du jeu de données	V
Annexe 6. Détails du protocole : chaînes de traitements.....	VI
1. Photo-interprétation	VI
2. Validation de la méthode de photo-interprétation	VII
a) Comparaison avec les données de terrain du Projet Castor sur les RNA.....	VII
b) Comparaison avec les données des Contrats de Rivière	VII
Annexe 7. Choix du meilleur modèle	VIII
Annexe 8. Modèles complets	VIII
Annexe 9. Recherche des facteurs d'influence potentiels de l'impact par inondation des castors XII	
- Le nombre de barrage influence positivement la surface d'inondation	XII
- Plus le barrage est grand, plus le plan d'eau créé par le castor est large, plus il y a de surface inondée	XII
- Influence de la présence d'un plan d'eau préexistant.....	XIII
- Influence des confluences.....	XIV
Annexe 10. Différences inter-régionales.....	XV
Annexe 11. RND Fange de Bihain : dépassement de la zone d'aléas d'inondation (en rose). Cas extrême d'inondation provoquée par le castor	XVI
Annexe 12. Castors en zone forestière (en vert), sous canopée dense	XVI
Annexe 13. Zones indéterminées sur un territoire de castor (?). Cours d'eau en bleu, nombre de plans d'eau (NBetang) en orange, données castor en rouge, délimitation du carré IFBL en corail. XVII	

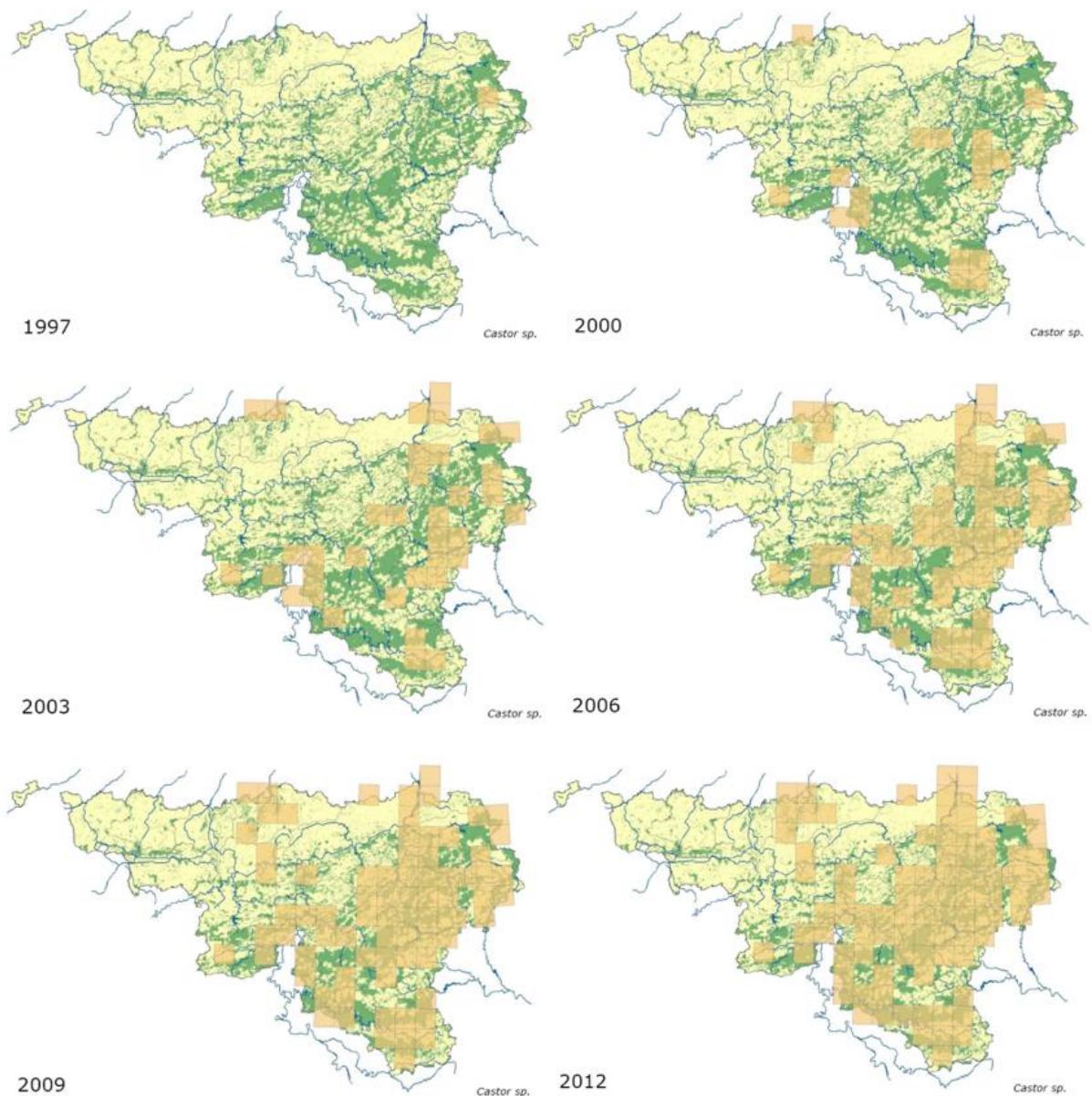
ANNEXES



Annexe 1. *Modèle conceptuel de l'influence des barrages de castors sur l'hydrogeomorphologie des cours d'eau (Larsen et al., 2021)*



Annexe 2. *Évolution de la répartition du castor en Europe (Véron, 1991)*



Annexe 3. *Évolution de la répartition des castors en Wallonie de 1997 à 2012 (Manet, 2012)*

RNA	# carrés IFBL	RND	# carrés IFBL
Abattis	2	Rechtervenn	1
Bec du Feyi	1	Emmels	1
Biron	1	Hasselbach	1
Breuvanne	3	Ru de chawion	3
Chantemelle	1	Solwaster	1
Emmels	2	Vallée de Lienne	1
Heinsch	1	Basse Wanchie	1
Hollogne sur Geer	2	Laid ru	1
La Prée	2	Louftémont Vlessart	2
Les prés de l'Hermeton	1	Grande Fange de Bihain	3
Les Tournailles	2	Prés de la Lienne	2
Marais chapelle	3	Vallée de la Basseille	3
Mellier	1	Orti	2
Ober Amel	1	Etang de Coubry	1
Pré de la Wamme	1	Marie Mouchon	2
Rechterbach	1		
Soulwez	1		
Vallée de la Hulle	3		
Vallée de la Sure	3		
Vallée du Glain	2		
Vierre	2		
Vis Pré	1		
22	37	15	25

Annexe 4. *Liste des Réserves Naturelles comprises dans le Projet Castor (RNoli)*

Annexe 5. Détails du protocole : préparation du projet sur QGIS, étapes préliminaires nécessaires à la création du jeu de données

0. Chargement des couches :

- nécessaires : ORTHOS 2023, ifbl01x01, OFFH_castor_fiber, castor_obs.be, cours_d'eau_récents, RNA, RND, RNA_oli, RND_oli, Castor2024CR_F_ExportFeature, Regions_Naturelles, ALEA_INOND_2016
- utiles à l'interprétation : Openstreetmap, ORTHOS (des années passées), grille_20x20m

1.1. Fusion des données castor (OFFH et obs.be)

1.2. Nettoyage de la couche : retirer les données hors 100m réseau hydrographique (trop loin de l'eau) *

2.1. Report des données castor sur le réseau hydro (par perpendicularité)

2.2. Fusion castors sur cours d'eau (nouvelle couche « hydro_kelly »)

2.3. Tampon 1km sur hydro_kelly

3.1. Sélection des carrés ifbl01x01 qui intersectent avec tampon hydro_kelly

3.2. Sélection des carrés IFBL avec donnée castor ou avec présence visible d'un site à castor

4. Analyse des carrés IFBL par photo-interprétation sur les orthophotos d'été 2023

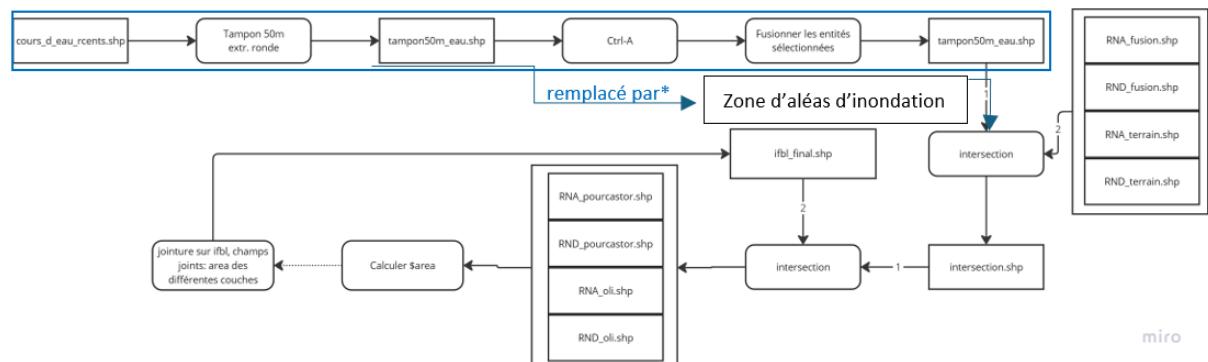
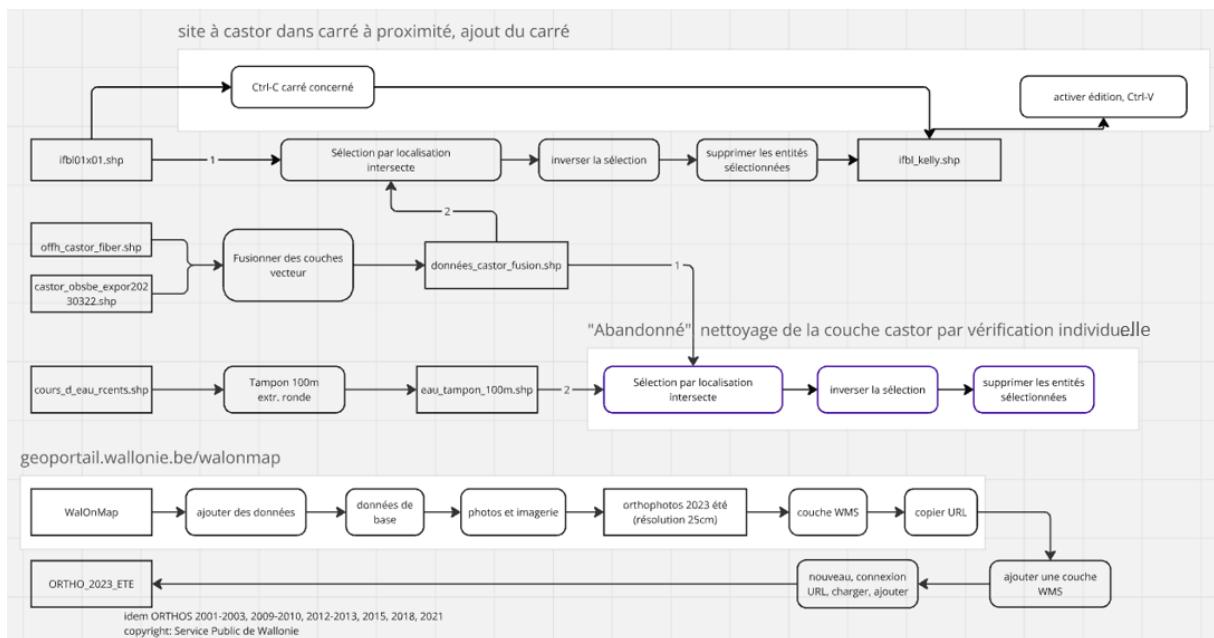
4.1. Remplissage des colonnes : NBetang, Snoy, empriseMAX, conflu, eau_pree, bois_mort

4.2. Remplissage automatique des colonnes : longueurs en mètres par catégorie de cours d'eau, surface en m² pour les RN

* Nettoyage « automatique » des données castors si >100m d'un cours d'eau (sauf ceux installés sur les étangs hors carto hydro -> carrés récupérés par après) -> Toutes les données ont été revérifiées individuellement pour ne pas supprimer des vraies données de présence de castors. Élimination des données anormales : roadkill (si aucun habitat possible à proximité => *castor en itinérance sans territoire ?*), à l'intérieur de maisons, etc.

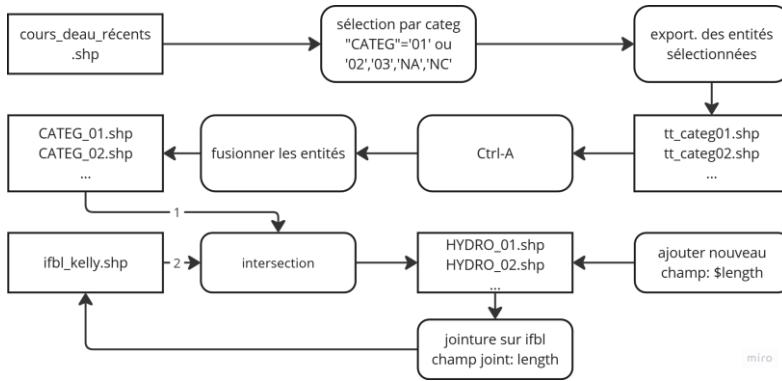
Annexe 6. Détails du protocole : chaînes de traitements

1. Photo-interprétation



-> Toutes les informations utiles provenant d'autres couches ont suivi ce processus d'intersection avec la grille IFBL, suivi d'un calcul d'aire (RN) ou de longueur (HYDRO) si nécessaire. Ensuite ces informations ont été retranscrites dans la couche IFBL grâce au procédé de jointure.

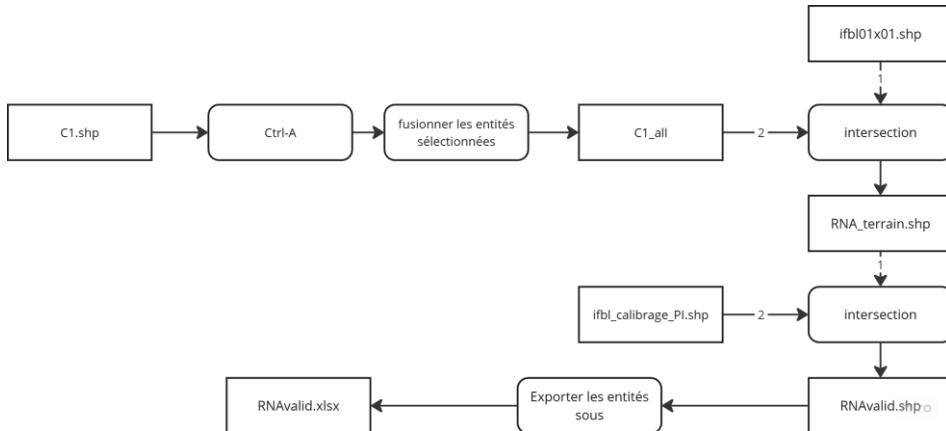
*Choix du tampon de 50 m, précédemment, car le castor s'éloigne de 25m des berges (Piętka et al., 2022). Mais cela ne reflète pas la réalité du terrain et du relief, il y a des différences entre une grande plaine et une vallée encaissée. De plus, sur les cartes, un cours d'eau est résumé par une ligne et n'a aucune épaisseur. Ce tampon a donc été abandonné et remplacé par la **zone d'aléas d'inondations** (=lit majeur du cours d'eau), qui est plus adapté pour représenter la **surface utilisable** par le castor pour la **création de plans d'eau par la construction de barrage**.



2. Validation de la méthode de photo-interprétation

a) Comparaison avec les données de terrain du Projet Castor sur les RNA

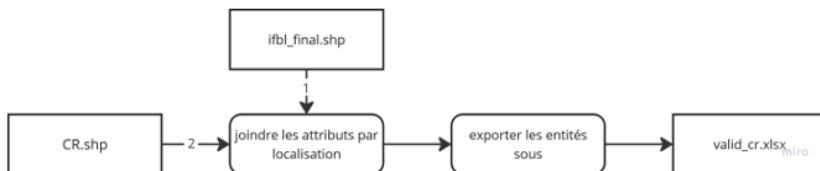
Surfaces envoiées :



Arbres morts :

- Compter les points dans les polygones : points = arbres morts observés sur le terrain (pointés avec obs.be), polygones = carrés IFBL
- Ajouter colonne nombre_points à la couche IFBL par jointure
- Exporter la couche IFBL sous format .xlsx

b) Comparaison avec les données des Contrats de Rivière



-> Fait correspondre les carrés IFBL (si présence d'un carré) avec les données points (centroïde) de territoire castor (CR)

Annexe 7. Choix du meilleur modèle

GLM qui pourraient correspondre : Poisson (condition : var = moy), quasi-poisson (condition : variance = fct lin moy) et binomial négatif (**condition : variance > moyenne**). Ces modèles utilisent le log comme fonction de lien, ce dont on a besoin suivant la distribution des données (non-normale, avec beaucoup de 0, asymétrique). Si le meilleur modèle (négatif binomial) n'est pas applicable, dans notre cas pour les variables Snoy et empriseMAX, (car le facteur de dispersion thêta n'a pas su converger* dû à la trop grande dispersion des données), on utilise la régression linéaire normale (lm) en transformant la variable avec le log**, et en ajoutant 1***.

* malgré cela, ces 3 modèles ont donné les mêmes paramètres. Tentative de diminuer la dispersion en transformant la variable avec sqrt (racine carrée), mais cela n'a pas fonctionné

**pour convenir au modèle, il faut une distribution normale

*** car $\log(0) = -\infty$, et le changement est négligeable entre $\log(1)$ et $\log(2)$

Variable	Moyenne	Variance
Snoy	635.97	2 439 141.99
NBetang	1.26	7.09
empriseMAX	10.79	352.22

Tableau 13 : Moyennes et variances des variables dépendantes : la surface envoisée (Snoy) en m^2 , le nombre de plans d'eau (NBetang) en nombres entiers et l'emprise maximale (empriseMAX) en mètres.

Modèles choisis :

- lm(log(**Snoy** + 1) ~ ...)
- glm.nb(**NBetang** ~ ...)
- lm(log(**empriseMAX** + 1) ~ ...)

Annexe 8. Modèles complets

Modèle 0 : comprenant toutes les variables de la base de données
 $lm(\log(Snoy+1) \sim ...)$

TERM	ESTIMATE	P-VALUE
INTERCEPT	-5.123e-01	0.562216
XCOORD	1.324e-05	5.50e-05
YCOORD	6.444e-07	0.893318
NB_CONFLUE	8.612e-02	0.011039
EAU_PREEX1	2.788e-02	0.824646
HYDRO_01	-1.081e-03	< 2e-16
HYDRO_02	4.758e-04	4.78e-05

HYDRO_03	6.802e-04	1.82e-06
HYDRO_NA	-8.330e-04	3.22e-08
HYDRO_NC_A	-3.091e-05	0.760237
OBSERVATEUJULIEN	-1.671e+00	0.000125
OBSERVATEUKELLY	5.051e-01	0.053000
OBSERVATEUMARGUERITE	-2.906e-01	0.358459
OBSERVATEUOLIVIER	1.336e+00	0.000237
RNTOT	2.023e-06	0.154869
RNOLI	2.683e-05	2.89e-15
REGIONCONDROZ ET SILLON SAMBRO-MOSAN	-1.930e+00	1.74e-11
REGIONFAGNE-FAMENNE-CALESTIENNE	-1.563e+00	1.03e-11
REGION LORRAINE	-1.583e-01	0.665850
REGIONRÉGION LIMONEUSE	-1.320e+00	0.005803

Modèle 1 : variable dépendante = Surface ennoyée par les castors
 $\text{Im}(\log(\text{Snoy}+1) \sim \dots)$

TERM	ESTIMATE	P-VALUE
INTERCEPT	2.981e+00	< 2e-16
NB_CONFLUE	5.073e-02	0.136
EAU_PREEX1	9.406e-02	0.460
HYDRO_01	-1.112e-03	< 2e-16
HYDRO_02	5.315e-04	7.25e-06
HYDRO_03	8.001e-04	2.97e-08
HYDRO_NA	-1.047e-03	4.52e-12
HYDRO_NC_A	3.701e-05	0.717
RNTOT	1.443e-06	0.316
RNOLI	2.976e-05	< 2e-16
REGIONCONDROZ ET SILLON SAMBRO-MOSAN	-2.078e+00	< 2e-16
REGIONFAGNE-FAMENNE-CALESTIENNE	-1.615e+00	< 2e-16
REGION LORRAINE	-1.757e+00	5.82e-10
REGIONRÉGION LIMONEUSE	-1.916e+00	< 2e-16

Modèle 2 : variable dépendante = Nombre de plans d'eau créés par les castors
 $\text{glm.nb}(\text{NBetang} \sim \dots)$

TERM	ESTIMATE	P-VALUE
INTERCEPT	3.884e-01	0.000381
NB_CONFLUE	1.558e-02	0.487017
EAU_PREEX1	1.579e-02	0.847432
HYDRO_01	-9.457e-04	< 2e-16
HYDRO_02	2.827e-04	0.000128
HYDRO_03	3.619e-04	3.36e-05
HYDRO_NA	-1.497e-03	8.74e-16

HYDRO_NC_A	2.708e-05	0.677930
RNTOT	3.721e-06	4.15e-06
RNOLI	7.033e-06	6.88e-05
REGIONCONDROZ ET SILLON SAMBRO-MOSAN	-2.160e+00	< 2e-16
REGIONFAGNE-FAMENNE-CALESTIENNE	-1.181e+00	< 2e-16
REGION LORRAINE	-1.490e+00	4.00e-13
REGIONRÉGION LIMONEUSE	-1.710e+00	< 2e-16

Modèle 3 : variable dépendante = Emprise maximale, plus grand barrage contenu dans l'unité d'observation

Im(log(empriseMAX+1) ~ ...)

TERM	ESTIMATE	P-VALUE
INTERCEPT	1.423e+00	< 2e-16
NB_CONFLUE	2.784e-02	0.0874
EAU_PREEX1	3.972e-02	0.5148
HYDRO_01	-5.451e-04	< 2e-16
HYDRO_02	2.351e-04	3.34e-05
HYDRO_03	3.672e-04	1.05e-07
HYDRO_NA	-5.050e-04	3.03e-12
HYDRO_NC_A	2.639e-05	0.5897
RNTOT	6.728e-07	0.3280
RNOLI	1.108e-05	1.03e-11
REGIONCONDROZ ET SILLON SAMBRO-MOSAN	-9.759e-01	< 2e-16
REGIONFAGNE-FAMENNE-CALESTIENNE	-8.148e-01	< 2e-16
REGION LORRAINE	-7.220e-01	9.98e-08
REGIONRÉGION LIMONEUSE	-9.955e-01	< 2e-16

TERM	VIF
XCOORD	3.367156
YCOORD	6.982871
NB_CONFLUE	2.238573
EAU_PREEX	1.110627
HYDRO_01	1.795868
HYDRO_02	1.875720
HYDRO_03	1.434589
HYDRO_NA	1.588659
HYDRO_NC_A	2.014213
OBSERVATEU	7.446308
RNTOT	1.281547
RNOLI	1.157041
REGION	14.762307

VIFs modèle 0 : Tous les autres VIFs des autres modèles sont ok (< 3)

Modèle 0 restreint : variable dépendante = Surface envoiée par les castors
 Comprenant avant restriction toutes les variables de la base de données (en plus des facteurs choisis d'être testés, les coordonnées et les observateurs)
 $\text{Im}(\log(\text{Snoy}+1) \sim \dots)$

TERM	ESTIMATE	P-VALUE
INTERCEPT	-3.441e-01	0.679
XCOORD	1.287e-05	2.20e-05
NB_CONFLUE	8.111e-02	0.001
HYDRO_01	-1.067e-03	<2e-16
HYDRO_02	4.960e-04	2.10e-06
HYDRO_03	7.033e-04	1.39e-07
HYDRO_NA	-8.158e-04	9.72e-09
OBSERVATEUJULIEN	-1.734e+00	2.03e-06
OBSERVATEUKELLY	4.742e-01	0.047
OBSERVATEUMARGUERITE	-2.851e-01	0.364
OBSERVATEUOLIVIER	1.298e+00	5.53e-05
RNOLI	2.819e-05	<2e-16
REGIONCONDROZ ET SILLON SAMBRO-MOSAN	-1.928e+00	<2e-16
REGIONFAGNE-FAMENNE-CALESTIENNE	-1.568e+00	1.01e-15
REGION LORRAINE	-1.111e-01	0.748
REGIONRÉGION LIMONEUSE	-1.272e+00	1.61e-05

Annexe 9. Recherche des facteurs d'influence potentiels de l'impact par inondation des castors

- **Le nombre de barrage influence positivement la surface d'inondation**

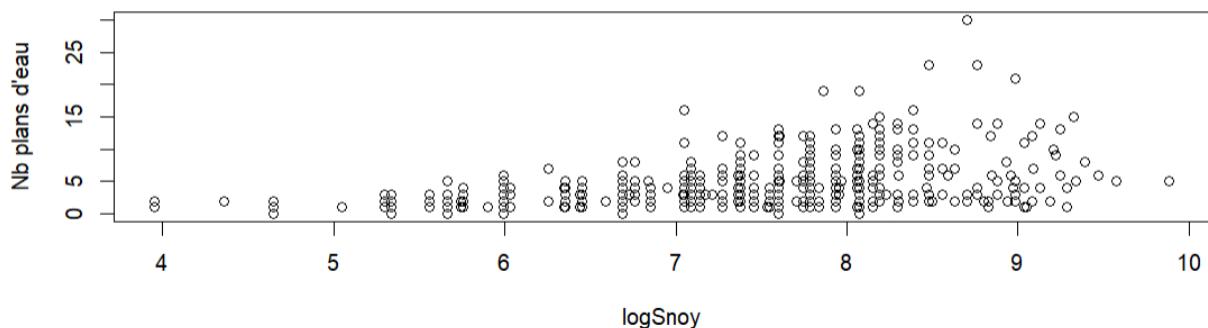


Figure 21 : Relation entre le nombre de plans d'eau (NbEtang) et la Surface ennoyée (Snoy) par les castors mise au logarithme

La Surface ennoyée augmente avec le nombre de plans d'eau (fig.21). La relation entre ces deux variables est positive modérée ($r = 0.63$) et significative (Im: $p < 2e-16$), mais cette relation n'est pas proportionnelle. On peut avoir une grande Surface inondée sans un grand Nombre de plans d'eau, il suffit que la taille du plan d'eau soit grande.

Le nombre d'étangs à castor dépend surtout du terrain. Il y aura plus d'étangs dans une vallée encaissée mais pas forcément plus de surface ennoyée. Dans une grande plaine, où le lit majeur du cours d'eau est large, un barrage, et donc un étang, peut inonder une grande surface.

- **Plus le barrage est grand, plus le plan d'eau créé par le castor est large, plus il y a de surface inondée**

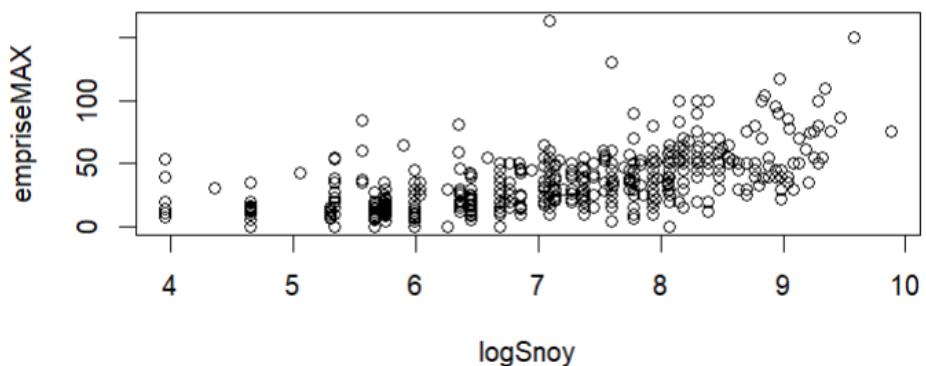


Figure 22 : Relation entre l'emprise maximale (empriseMAX) et le logarithme de la surface ennoyée (Snoy)

Plus le barrage est long, plus il retient l'eau (fig.22). La corrélation entre les variables surface ennoyée et emprise maximale est de 0.75. Leur relation est positive forte et significative (Im: $p < 2e-16$) mais pas allométrique, ce qui veut dire que ce n'est pas une simple relation de puissance où la surface ennoyée (Snoy) serait proportionnelle à une puissance de la longueur du barrage (empriseMAX). Il s'agit d'une situation de non-linéarité et de dépendance à d'autres facteurs, comme le relief du terrain, les précipitations, les saisons, etc.

- *Influence de la présence d'un plan d'eau préexistant*

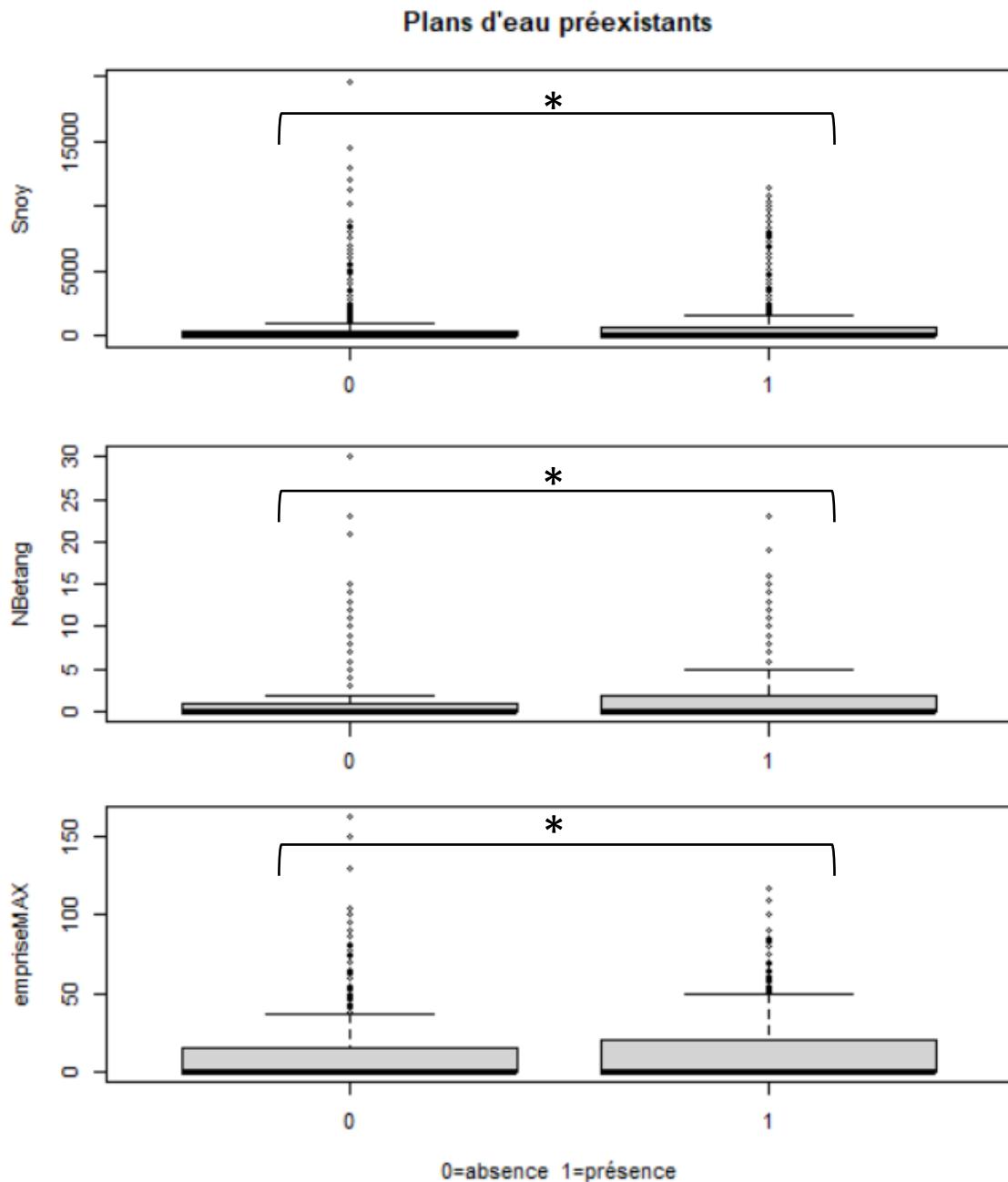


Figure 23 : Comparaison des variables dépendantes avec présence (1) ou absence (0) de plans d'eau préexistants à proximité, dans le kilomètre carré (IFBL). Surface ennoyée (Snoy) en mètres carrés, Nombre de plans d'eau (NBetang) en nombre entiers et emprise maximale (empriseMAX) en mètres.

VARIABLE	W	P-VALUE	H1
SNOY	678 289	0.001	1 >0
NBETANG	664 865	0.022	1 >0
EMPRISEMAX	677 961	0.001	1 >0

Tableau 14 : Résultats des tests de Wilcoxon. Influence de la variable Plans d'eau préexistant sur les variables dépendantes. En vert, effet positif/augmentation.

L'hypothèse initiale était que la présence d'un plan d'eau préexistant [eau_preeex] à l'installation des castors pourrait limiter ou neutraliser leur impact en fournissant des conditions suffisantes pour leurs besoins, sans nécessiter la construction de barrages. Malheureusement, les données disponibles pour cette étude ne comprennent que la présence de plans d'eau préexistants, sans information sur leur surface ou leur profondeur, ce qui limite l'analyse.

Contre-intuitivement, les tests de Wilcoxon (tab.14) indiquent que les valeurs de Surface ennoyée, Nombre d'étangs et emprise maximale sont **significativement plus élevées** en présence d'un plan d'eau préexistant (fig.23). Cela suggère qu'il pourrait être plus facile pour les castors d'agrandir un plan d'eau existant plutôt que d'en créer un nouveau à partir de zéro. Quelquefois, les castors s'installent également sur des étangs creusés par l'homme ou d'autres plans d'eau préexistants, même sans rivière à proximité (observé sur 7 sites).

Il serait intéressant de tester l'impact des inondations de castor avec la surface et la profondeur des plans d'eau préexistants dans une étude ultérieure.

- *Influence des confluences*

Nos modèles (tab.6 et 8) montrent que le nombre de confluences est un prédicteur significatif de la surface ennoyée (Snoy) (**p = 0.016**) et de l'emprise maximale (empriseMAX) (**p = 0.004**) suggérant une relation positive entre la densité de confluences et la fréquence des constructions.

Cependant, la variable « nombre de confluences » (NB_conflue) n'est pas significative dans tous ces modèles réduits (tab.7 sur le nombre de plans d'eau (NBetang)).

Dans la littérature, les **confluences** sont souvent citées comme des sites privilégiés pour la construction de barrages et la création de plans d'eau par les castors, mais cette étude n'est pas idéale pour tester ceci. L'unité d'observation est le carré IFBL (1km²) et il n'y a pas de localisation précise des confluences et des barrages/plans d'eau.

Bien qu'une corrélation entre le nombre de plans d'eau et le nombre de confluences puisse être testé, des conclusions robustes concernant l'impact direct des confluences ne peuvent pas être tirées dans ce cadre spatial. Cela suggère que l'étude n'est pas optimale pour évaluer finement ce facteur.

TERM	ESTIMATE	P-VALUE
INTERCEPT	0.12	0.1
NB_CONFLUE	0.03	0.06

Tableau 15 : Modèle de régression pour Snoy selon la variable NB_conflue : $lm(\log(Snoy+1) \sim NB_conflue)$

TERM	ESTIMATE	P-VALUE
INTERCEPT	2.17	<2e-16
NB_CONFLUE	0.09	0.0006

Tableau 16 : Modèle de régression pour NBetang selon la variable NB_conflue : $glm.nb(NBetang \sim NB_conflue)$

TERM	ESTIMATE	P-VALUE
INTERCEPT	1.01	<2e-16
NB_CONFLUE	0.05	0.0004

Tableau 17 : Modèle de régression pour *empriseMAX* selon la variable *NB_conflue* :
 $lm(\log(empriseMAX+1) \sim NB_conflue)$

Les modèles précédents contiennent uniquement le nombre de confluences comme facteur d'influence de l'impact du castor par inondation (variables dépendantes). En regardant les valeurs significatives, on peut tirer les conclusions suivantes : Une confluence a plus de chances d'être le site de construction d'un barrage pour créer un plan d'eau (tab.16) et, les plans d'eau installés sur des confluences sont plus larges (tab.17).

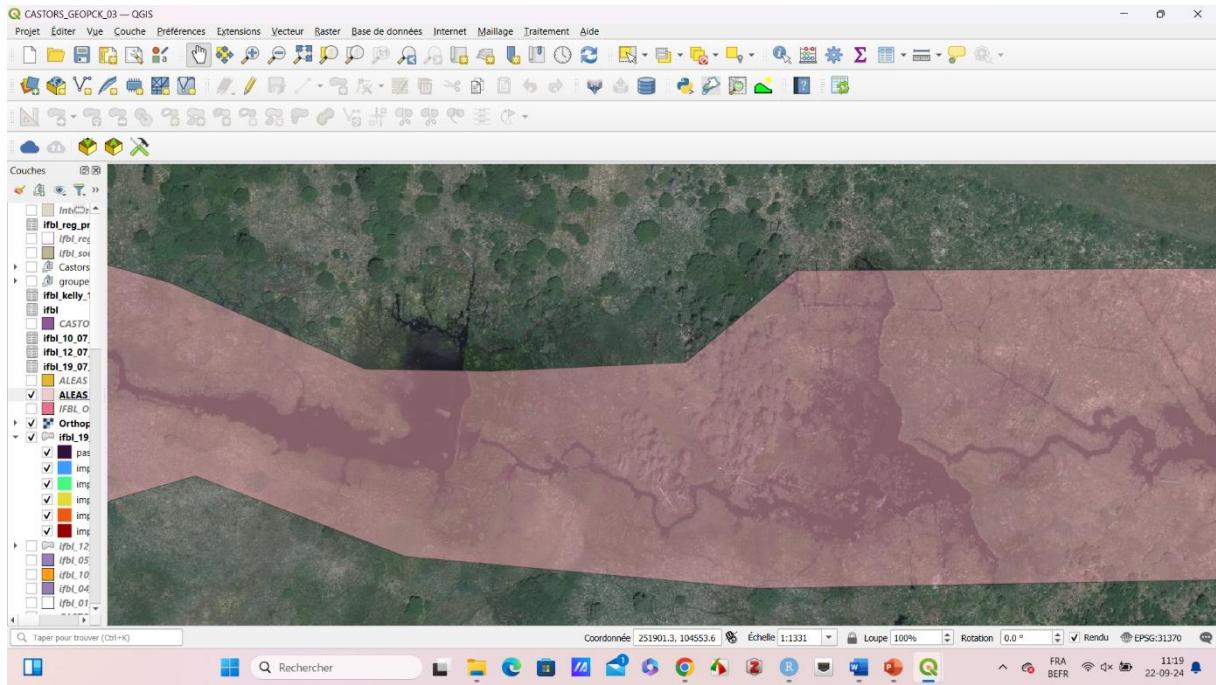
Cela suggère que les zones avec une densité plus élevée de confluences sont plus propices à l'établissement de barrages et à la création de plans d'eau plus importants.

Il est crucial de noter que la résolution spatiale de l'étude (carrés IFBL de 1km²) ne permet pas d'affirmer que les barrages sont construits sur les confluences. Les résultats indiquent plutôt que le nombre de confluences agit comme un indicateur général de la complexité ou de la richesse du réseau hydrographique dans une zone, ce qui favorise l'activité de l'espèce.

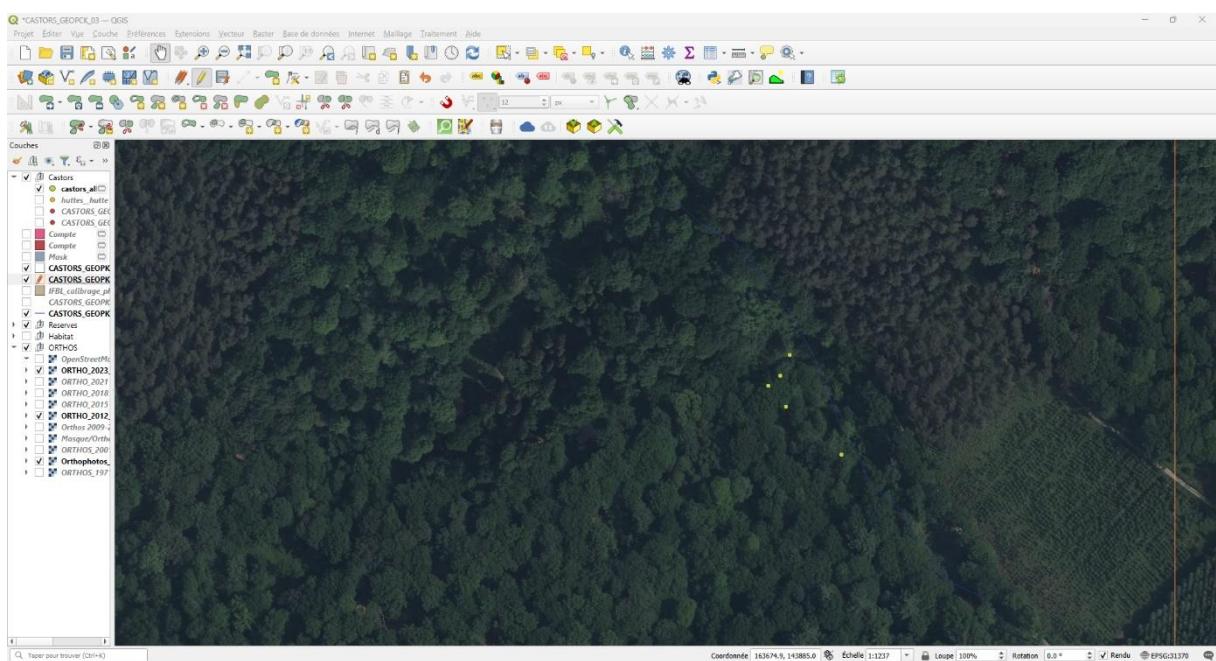
Annexe 10. Différences inter-régionales

Variable	Ardenne	Condroz et sillon Sambro-Mosan	Fagne-Famenne-Calestienne	Lorraine	Région limoneuse
Moy_Snoy	896	62	340	412	673
Sd_Snoy	1767	416	1047	1181	1995
Moy_NBetang	2.01	0.12	0.55	0.52	0.33
Sd_NBetang	3.29	0.49	1.41	1.02	0.86
Moy_empriseMAX	15.6	1.95	5.41	10.2	5.93
Sd_empriseMAX	20.8	7.49	11.9	23.3	16.4

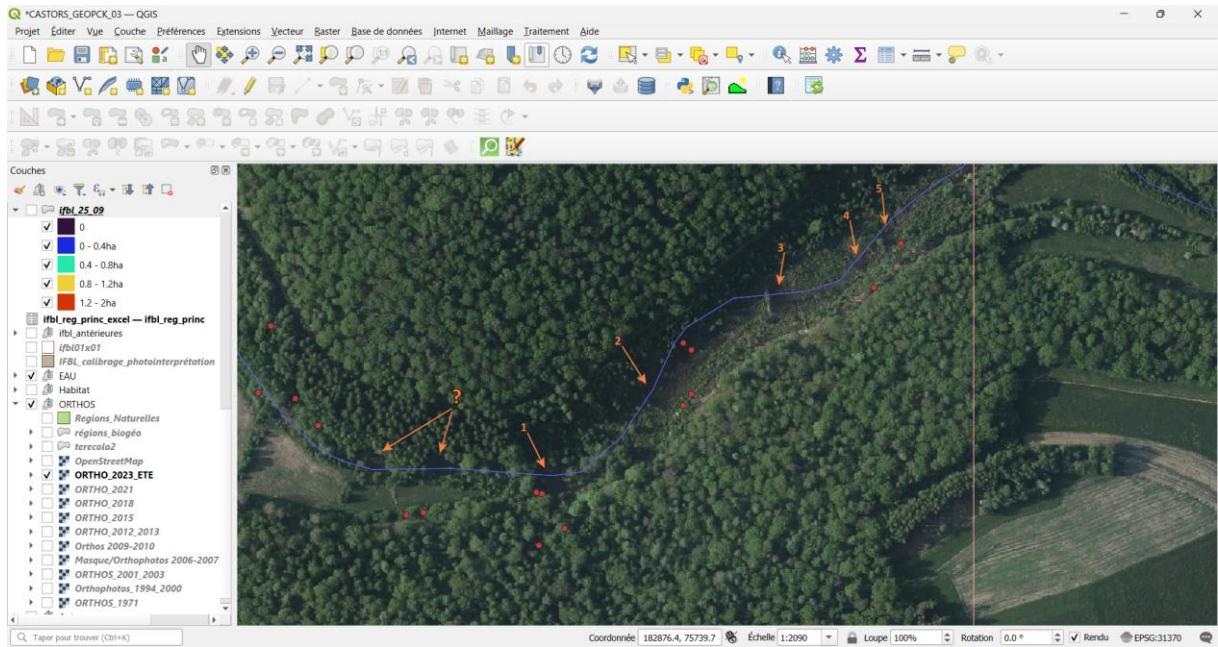
Tableau 18 : Moyennes et écarts-type des variables dépendantes selon la région biogéographique. Les variables dépendantes sont la Surface ennoyée (Snoy) en mètres carrés, le Nombre de plans d'eau (NBetang) en nombre entiers et l'Emprise maximale (empriseMAX) en mètres.



Annexe 11. RND Fange de Bihain : dépassement de la zone d'aléas d'inondation (en rose). Cas extrême d'inondation provoquée par le castor



Annexe 12. Castors en zone forestière (en vert), sous canopée dense



Annexe 13. Zones indéterminées sur un territoire de castor (?). Cours d'eau en bleu, nombre de plans d'eau (NBetang) en orange, données castor en rouge, délimitation du carré IFBL en corail.