

Mémoire

Auteur : Collet, Margaux

Promoteur(s) : Magain, Nicolas; 16354

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 : 2021-2022

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/16076>

Avertissement à l'attention des usagers :

Tous les documents placés en accès restreint sur le site MatheO sont protégés par le droit d'auteur. Par conséquent, seule une utilisation à des fins strictement privées, d'enseignement ou de recherche scientifique est autorisée conformément aux exceptions légales définies aux articles XI. 189 et XI. 190. du Code de droit économique. Toute autre forme d'exploitation (utilisation commerciale, diffusion sur le réseau Internet, reproduction à des fins publicitaires, ...) sans l'autorisation préalable de l'auteur est strictement interdite et constitutive de contrefaçon.

Le castor européen (*Castor fiber*) facilite-t-il la reproduction de la grenouille rousse (*Rana temporaria*) en Wallonie ?

Mémoire de fin d'études présenté par **Margaux Collet** en vue de l'obtention du grade de **Master en Biologie de la Conservation : Biodiversité et Gestion**

Août 2022



©Cécile Monseur

Nicolas Magain
Université de Liège
Promoteur

Benoît Manet
Service public de Wallonie
Co-promoteur

Thierry Kinet
Natagora
Encadrant

REMERCIEMENTS

Tout d'abord, je tiens à remercier mon promoteur Nicolas Magain pour son encadrement, ses conseils, et son implication tout au long de ce travail de fin d'études, ainsi que pour ses commentaires constructifs lors des nombreuses réunions en rapport avec chaque phase d'élaboration de ce mémoire. Merci, également, à Thierry Kinet, mon encadrant, pour son temps, son investissement, et ses encouragements, qui m'ont permis d'aboutir au choix final des sites à castors à prospecter, de tenir le coup jusqu'à la fin de la saison de terrain, mais aussi, de me conforter dans mon choix de sujet de mémoire. Je remercie mon co-promoteur, Benoît Manet, pour son expertise sur le castor.

Je tiens à témoigner ma gratitude à toutes les personnes qui ont participé, de près ou de loin, à la conception de ce TFE. À Jean-Pierre Facon, Frédéric Raes, Mikaël George, le CR Lesse, Etienne Cols, George Buxant, Harry Mardulyn, et Philippe Ryelandt pour leurs conseils, leur temps, et leurs connaissances sur la problématique étudiée dans le cadre de ce travail. Au DNF et à Stéphane Abras de m'avoir permis de réaliser une grande partie de mes relevés sur son cantonnement. À Sébastien Herman, Thierry Petit, Didier Bouvy, Raphaël Thunus, et Jean-Yves Grenson, pour m'avoir montré des sites à castors dans la région de Nassogne-Tenneville, Vielsalm, et Marche-en-Famenne. À Philippe Moës, Stéphane Schmatz et Stéphan Adant pour le partage de leurs connaissances et de leur avis sur le sujet. À Corentin Leroy d'avoir pris le temps de m'aider et de répondre à toutes mes questions. Merci, aussi, aux bénévoles qui ont récolté des données utiles à la réalisation des statistiques, et à Céline Charlier et Karl Gillebert pour la récolte de celles-ci sur les sites à castors situés à Marche-en-Famenne.

Je remercie le jury, composé de Dorothée Denayer, Johan Michaux, et Vincianne Schockert.

Enfin, merci à mes amis et à ma famille, pour leur soutien moral et pour leur aide. À Alix, Nicolas, Juliette, et Xavier pour leur accompagnement sur le terrain. Florine, Amandine et Eva, pour tous ces beaux moments partagés depuis 5 ans. À toutes mes copines du Master BOE, et plus particulièrement à Marie, pour m'avoir prêté plusieurs fois main forte sur site, mais aussi, pour son soutien et ses encouragements durant ces deux années. Je remercie Sarah pour son aide précieuse en statistiques, et Maxime, pour ses conseils avisés de rédaction. Merci à Simon, pour sa présence et son soutien, même dans les moments difficiles, qui m'ont permis de donner le meilleur de moi-même. Merci profondément à ma maman, très courageuse, qui m'a aidé dans ce travail, et qui m'a soutenu tant d'années, afin que je puisse atteindre mes objectifs.

RÉSUMÉ

La grenouille rousse (*Rana temporaria*), espèce jadis répandue et abondante dans toute l'Europe, semble subir un déclin alarmant. Bien que les raisons de cette diminution ne soient pas encore tout à fait identifiées, elle pourrait être attribuée aux changements climatiques, à la perte de son habitat, à l'arrivée de certaines espèces invasives ou encore, à la résurgence de certaines maladies. En Wallonie, l'impression générale de la sphère naturaliste penche également pour un déclin notable de cette espèce. Dans nos régions, le castor européen (*Castor fiber*) se porte plutôt bien, après sa persécution entre le XII^{ème} et le XIX^{ème} siècle. En Wallonie, ses effectifs ne cessent d'augmenter, et il est déjà bien répandu en Ardenne et en Fagne-Famenne. Ce rongeur, surnommé ingénieur des écosystèmes, module l'environnement selon ses besoins et construit des barrages qui entravent le flux de la rivière sur laquelle il s'installe, inondant de vastes étendues. Cet aménagement peut également bénéficier à la grenouille rousse dont la reproduction se déroule exclusivement dans le milieu aquatique.

Les objectifs de ce mémoire sont, en première partie, de mettre en évidence la tendance des populations de grenouilles rousses en Wallonie, et en seconde partie, d'évaluer l'impact du castor européen sur les populations du batracien en Ardenne.

Pour la première partie de ce mémoire, des données existantes et récoltées antérieurement ont été utilisées. Les modèles linéaires généralisés (GLM) appliqués à ces données, ont partiellement mis en évidence le déclin de la grenouille rousse en Wallonie. Pour la seconde partie, les pontes de grenouilles rousses, ainsi que l'ensemble des points d'eau semblant leur convenir, ont été comptabilisés dans la région de Vielsalm et de Nassogne, en employant l'unité d'échantillonnage du carré kilométrique. Trois passages ont été effectués, entre mars et avril 2022, sur 20 carrés comportant des sites à castors, 10 âgés de plus de 5 ans et 10 âgés de moins de 5 ans, et 10 carrés sans castors. L'analyse de variance à un facteur (one-way ANOVA) a montré le rôle positif que le castor joue sur la grenouille rousse : plus de pontes de grenouilles rousses ont été comptabilisées sur les carrés à castors que sur les carrés sans castors, à l'échelle du plan d'eau, du carré, en fonction de la région, ou dans les deux régions combinées.

Cette recherche permet donc de mettre en évidence le rôle d'une espèce dont les effectifs ne cessent d'augmenter, sur une espèce dont les effectifs ne cessent de diminuer, ce qui représente un réel intérêt pour la conservation de celles-ci.

ABSTRACT

The common frog (*Rana temporaria*) was once the most abundant and widespread amphibian species in Europe. However, an alarming decline of its population numbers has been observed on the continent for several decades. Although the reasons of this decline have not been fully understood yet, it could be attributed to climate change, the loss of their habitat, the arrival of invasive species, or the resurgence of diseases. In Wallonia, the general impression of the naturalist world also leans towards a notable decline of this species. In our regions, the European beaver (*Castor fiber*) is doing rather well, after its persecution between the 12th and 19th centuries. In Wallonia, its numbers are constantly increasing, and it is already widespread in the Ardennes and Fagne-Famenne. This rodent, considered as an ecosystem engineer, modulates the environment according to its needs, and builds dams that retain the river flow on which it settles, flooding vast areas. This construction can also benefit the common frog, whose reproduction takes place exclusively in the aquatic environment.

The objectives of this master's thesis are, in the first part, to highlight the trend of common frog's populations in Wallonia, and in the second part, to evaluate the impact of the European beaver on the common frog in the Ardennes.

For the first part of this thesis, existing and previously collected data was used. Generalized linear models (GLM) applied to this data have partially highlighted the decline of the common frog in Wallonia. For the second part, the common frog's spawns were counted, as well as the water points that seemed to suit them in Vielsalm and Nassogne, using square kilometer sampling units. Three passages were carried out, between March and April 2022, on twenty squares with beaver sites, ten with beavers over five years old and ten with beavers under five years old, and ten squares without beavers. The one-way ANOVA showed the positive role that beaver can play on the common frog: it seems that there are more frog eggs on the squares with beavers than on the squares without beavers, for every test.

Therefore, this research highlights the role of a species whose numbers are constantly increasing, on a species whose numbers are constantly decreasing, which represents a real interest for their conservation.

LISTE DES ABRÉVIATIONS

IUCN = The International Union for Conservation of Nature

LCN = Loi sur la Conservation de la Nature

DNF = Département de la Nature et des Forêts

I.F.B.L = Institut Floristique Belgo-Luxembourgeois

GLM = Generalized Linear Model (ou modèles linéaires généralisés)

DEMNA = Département de l'Étude du Milieu Naturel et Agricole

WMS = Web Map Services

KML = Keyhole Markup Language

PwDR = Plan wallon de Développement Rural

TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION.....	1
1. Écologie du castor européen	1
2. Histoire récente du castor.....	2
3. Législation concernant l'espèce <i>Castor fiber</i>	4
4. Impact du castor sur l'écosystème	5
5. Répartition géographique de la grenouille rousse.....	8
6. Écologie de la grenouille rousse	8
7. Menaces et état des populations de grenouilles rousses	9
8. Statut de conservation de la grenouille rousse.....	11
9. Lien entre le castor et la grenouille rousse.....	11
10. Objectifs du mémoire	13
MATÉRIELS & MÉTHODES	14
1. État des populations de grenouilles rousses en Wallonie	15
1.1. Sélection des carrés pour les analyses.....	15
1.2. Traitement et analyse des données	15
2. Influence du castor européen (<i>Castor fiber</i>) sur les populations de grenouilles rousses (<i>Rana temporaria</i>) 17	
2.1. Sélection des sites et récolte des données	18
2.2. Traitement des données et analyses statistiques.....	21
RÉSULTATS	25
1. État des populations de grenouilles rousses en Wallonie	25
2. Influence du castor sur les populations de grenouilles rousses.....	27
2.1. Description des données.....	28
2.1. Analyses statistiques	31
DISCUSSION	36
1. État des populations de grenouilles rousses en Wallonie	36
2. Influence du castor européen sur les populations de grenouilles rousses	37
2.1. Comparaison des résultats du mémoire avec les résultats de l'étude de Dalbeck <i>et al.</i> (2014)....	37
2.2. Comparaison du mémoire avec les données des naturalistes de Wallonie	40
2.3. Influence du passage sur le nombre de pontes	41
2.4. La grenouille rousse, le raton laveur, et le castor.....	42
3. Limitations de l'étude et perspectives.....	44
3.1. La grenouille rousse	44
3.2. Le choix des sites et les analyses statistiques.....	45
CONCLUSION	47

TABLE DES FIGURES

Fig.1- Lieux approximatifs de réintroduction du castor européen en Wallonie, entre 1998 et 2001	3
Fig.2- Répartition de <i>Castor fiber</i> et <i>canadensis</i> en Europe, et de <i>Castor canadensis</i> en Wallonie	4
Fig.3- Barrage de castor à Vielsalm	6
Fig.4- Hutte à castors et ses entrées inondées	6
Fig.5- Répartition de la grenouille rousse en Europe en 2010	8
Fig.6- Résultats d'un sondage sur l'état des populations de grenouilles rousses en Wallonie	9
Fig.7- Carte des Hürtgenwald	12
Fig.8- Pontes de grenouilles rousses	15
Fig.9- Sites témoignant d'indices de présence de castors en Wallonie.....	17
Fig.10- Carrés kilométriques choisis dans les régions de Nassogne et de Vielsalm.....	20
Fig.11- Tendances observées des populations de grenouilles rousses (famille Poisson)	26
Fig.12- Tendances observées des populations de grenouilles rousses (famille gaussienne).....	27
Fig.13- Moyenne du nombre de pontes trouvées dans chaque point d'eau par catégorie de carré.....	28
Fig.14- Moyenne du nombre de pontes trouvées par catégorie de carré.....	29
Fig.15- Nombre de points d'eau répertoriés comme propices au frai des grenouilles rousses	30
Fig.16- Proportions de pontes trouvées sur les plans d'eau de chaque catégorie de carré et proportions de points d'eau présentant des pontes sur le total des points d'eau répertoriés sur chaque catégorie de carré.....	31
Fig.17- Corrélation entre le nombre total de points d'eau répertoriés et le nombre de pontes, indépendamment de la région et de la catégorie du carré	34
Fig.18- Corrélation entre le nombre total de points d'eau répertoriés et le nombre de pontes, en fonction de la catégorie du carré.....	35
Fig.19- Surface de pontes (en m ²) entre 1994 et 2021	37
Fig.20- Eau de retenue d'un barrage à castors au milieu d'une pessière	39
Fig.21- Mare artificielle creusée dans la forêt de Saint-Hubert à Nassogne.....	39
Fig.22- Températures et précipitations mensuelles pour les mois de mars et d'avril 2022 à Uccle	42
Fig.23- Restes de grenouilles rousses avec pontes séchées	43
Fig.24- Eau de retenue d'un barrage à castors très vaste	46

TABLE DES ANNEXES

Annexe 1 : répartition géographique des carrés prioritaires	1
Annexe 2 : sites sélectionnés en Wallonie	1
Annexe 3 : sites sélectionnés en Wallonie sur base de l'accessibilité	2
Annexe 4 : tableau des dates auxquelles les passages ont été effectués dans les deux régions d'intérêt	2
Annexe 5 : géolocalisation au sein d'un carré kilométrique sur Google Maps (via son smartphone).....	3
Annexe 6 : remplissage des champs de l'application iObs concernant le comptage des pontes de grenouilles rouges.....	4
Annexe 7 : aperçu du jeu de données utilisé pour les analyses statistiques visant à identifier le rôle du castor sur les populations de grenouilles rouges	5
Annexe 8 : outliers identifiés au moyen de boxplots et outliers extrêmes identifiés à l'aide d'une fonction sur R	5
Annexe 9 : tableaux récapitulatifs des résultats des GLM.....	9
Annexe 10 : résultats des tests de normalité et d'homoscédasticité concernant l'évaluation de l'impact du castor sur la grenouille rousse.	10

INTRODUCTION

1. Écologie du castor européen

L'Homme (*Homo sapiens*) est une espèce animale modifiant profondément son écosystème depuis la nuit des temps (Oro *et al.*, 2013). Ce n'est pas la seule à moduler l'environnement selon ses besoins et son confort. Une autre espèce travaille dans ce sens, provoquant ainsi beaucoup de débats et de controverses autour d'elle. Cette espèce c'est le castor. Dans le cadre de ce mémoire, un intérêt particulier est porté au castor européen (*Castor fiber*),

Le castor européen est un mammifère de l'ordre des rongeurs, et de la famille des Castoridae. Il est considéré comme le plus gros rongeur d'Europe, car à l'âge adulte, il peut peser jusqu'à 30 kilogrammes, et mesurer jusqu'à 120 centimètres de long, dont 30 centimètres de queue (Barvaux *et al.*, 2015).

C'est un animal amphibie (Graf *et al.*, 2018), car il vit en dépendance avec l'eau, mais a besoin du milieu terrestre pour certaines de ses activités, comme l'alimentation. Son régime alimentaire varie en fonction des saisons. Au printemps et en été, il se nourrit plutôt de plantes herbacées et aquatiques, alors qu'en hiver, il se sustente de l'écorce des plantes ligneuses. En rongant celle-ci, ils créent les fameux crayons caractéristiques de l'espèce. Les arbres meurent sur pied, et finissent par tomber en ouvrant le milieu (Barvaux *et al.*, 2015).

Le castor atteint la maturité sexuelle à l'âge de trois ans (Girling *et al.*, 2015). C'est un individu monogame (Syrůčková *et al.*, 2015). Un couple peut avoir une portée de 1 à 5 castorins par an (Campbell *et al.*, 2013). Les subadultes d'une famille de castors, c'est-à-dire, les castorins âgés de 2 ans, aident le couple parental avec les nouveau-nés, et sont, l'année suivante, chassés de la famille afin de trouver leur propre territoire, et leur partenaire (Barvaux *et al.*, 2015). Le castor est extrêmement territorial (Rosell et Thomsen, 2006), et un couple formé le restera à vie. Pour marquer et délimiter son territoire, il se sert de deux glandes anales situées dans son pseudo cloaque, une cavité dans laquelle se trouvent l'anus, l'urètre, et l'appareil génital (info fauna, s.d), qui sécrètent une substance odorante appelée castoréum (Rosell *et al.*, 1998).

Le choix d'un territoire est conditionné par la disponibilité en ressources alimentaires, surtout en hiver. Une fois le territoire trouvé, l'individu, ou le couple, va occuper celui-ci, et s'installer confortablement, en élaborant son gîte, qui peut être un terrier-hutte, un terrier, une hutte, où être creusé à même les berges en fonction de la catégorie du cours d'eau colonisé (Barvaux *et al.*, 2015).

2. Histoire récente du castor

Le castor européen est répandu à travers toute l'Eurasie (Halley et Rosell, 2002), jusqu'au XII^{ème} siècle. À partir de ce moment, il disparaît dans plusieurs pays. En Belgique, son déclin se situe au cours du XIX^{ème} siècle (Veron, 1992). Cette disparition est liée à sa chasse (Romashova, 2016). Le castor est fortement persécuté pour sa fourrure épaisse, pour sa viande, et pour son castoréum, qui entre dans la composition de nombreux produits cosmétiques et médicaux (Halley et Rosell, 2002). Cette persécution à travers toute l'Eurasie réduit le nombre d'individus à environ 1200 au début du XX^{ème} siècle, formant huit populations, dont une située en France, une en Allemagne, une en Pologne, une au sud de la Norvège, une en Biélorussie, une en Russie, une en Ukraine, et une en Mongolie (Veron, 1992). Ces populations persistantes reçoivent, dès lors, un statut de protection. Les réintroductions du gros rongeur commencent en 1922, de la Suède à la Norvège (Halley et Rosell, 2002).

En Wallonie, le dernier individu est observé en 1848 (Manet et Van den Bergh, 2003). Cependant, en 1990, après plus d'un siècle d'absence, une première observation a lieu sur la rivière Ruhr, à proximité de la frontière allemande. Mais ce n'est qu'en 1997 que l'on considère que le castor réapparaît dans nos contrées, lorsque plusieurs individus sont observés dans la vallée de la Ruhr. Au cours de l'automne 1998, de nombreuses traces sont trouvées dans la vallée de l'Ourthe. En 1999, on observe des traces similaires dans la vallée de la Houille, et en 2000, c'est le tour de la vallée de la Meuse. En 2001, le bassin de la Semois et de la Dyle sont également colonisés, et on devine donc aisément que la réintroduction du castor en Belgique, ne s'est pas faite naturellement, mais de façon illégale, à partir d'individus provenant vraisemblablement de Bavière (Manet et Van den Bergh, 2003) (Fig.1).

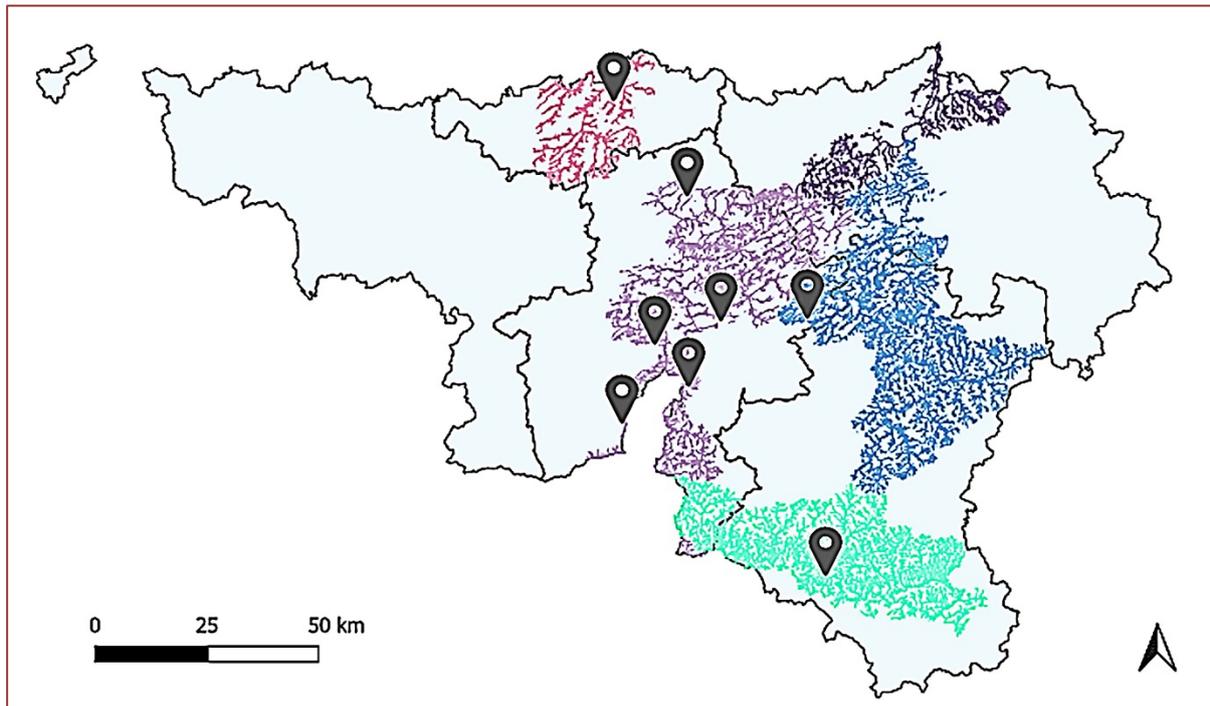


Fig.1- Lieux approximatifs de réintroduction du castor européen en Wallonie, entre 1998 et 2001, représentés par des icônes grises. Les couleurs représentent les bassins dans lesquels les réintroductions ont eu lieu, avec, en bleu, le bassin de l'Ourthe, en mauve clair, le bassin de la Meuse (amont), en mauve foncé, le bassin de la Meuse (aval), en vert, le bassin de la Semois, et en rose, le bassin de la Dyle (sur base de Manet et Van den Bergh, 2003).

On suppose que les dernières réintroductions ont eu lieu en 2001, et que le castor s'est naturellement étendu sur le territoire belge depuis, (Manet et Van den Bergh, 2003).

Les diverses réintroductions et la dispersion naturelle de l'espèce ont provoqué un accroissement important du nombre d'individus, ces dernières années (Wróbel, 2020), provoquant un changement rapide des effectifs du castor européen (Wróbel, 2020).

En effet, en 2012, en Europe, on dénombre environ 1.04 million de spécimens (Halley *et al.*, 2012), contre 1.22 million en 2020 (Wróbel, 2020).

La même comparaison peut être effectuée à l'échelle du territoire belge. En 2012, on estime la population belge du castor européen à un minimum de 800-1000 individus (Halley *et al.*, 2012), alors qu'en 2020, cette même population est estimée à 3600 spécimens, dont 600 en Flandre, et 3000 en Wallonie (Wróbel, 2020).

On peut supposer que quatre années après la publication de ces informations, le nombre d'individus a encore augmenté, et continuera certainement de s'accroître dans les années à venir.

On ne peut pas parler de réintroduction de castor sans mentionner le castor américain (*Castor canadensis*) qui, lui aussi, est apparu de manière clandestine en Europe. En effet, au cours du XX^{ème} siècle, quelques individus de castors américains sont introduits dans l'ouest de l'Europe. En France, dans les années 70, certains se sont échappés d'un parc animalier pour donner une population qui commence à s'étendre, et quelques individus sont retrouvés en Allemagne, au Luxembourg, et en Belgique dans les années 2000 (Dewas *et al.*, 2012).

Cette espèce de castor suscite l'inquiétude car, bien qu'incapable de s'hybrider avec le castor européen, dû à son nombre différent de chromosomes, et des variations dans les sécrétions anales, elle est capable d'entrer en compétition avec ce dernier car son écologie est similaire. Le castor américain est donc considéré comme espèce invasive (Parker *et al.*, 2012). Pour cette raison, des campagnes d'extermination voient le jour en Europe, dont la Belgique, en 2009-2010 (Dewas *et al.*, 2012 ; Stéphan Adant, *in litt.*).

À l'heure actuelle, il semblerait que sa répartition en Europe soit à cheval sur la Finlande et la Russie, suite à une réintroduction (Halley *et al.*, 2020), mais il existe une donnée de castor canadien validée en Wallonie (Manet, 2022) (Fig.2). Leur présence sur notre territoire n'est donc pas à exclure.

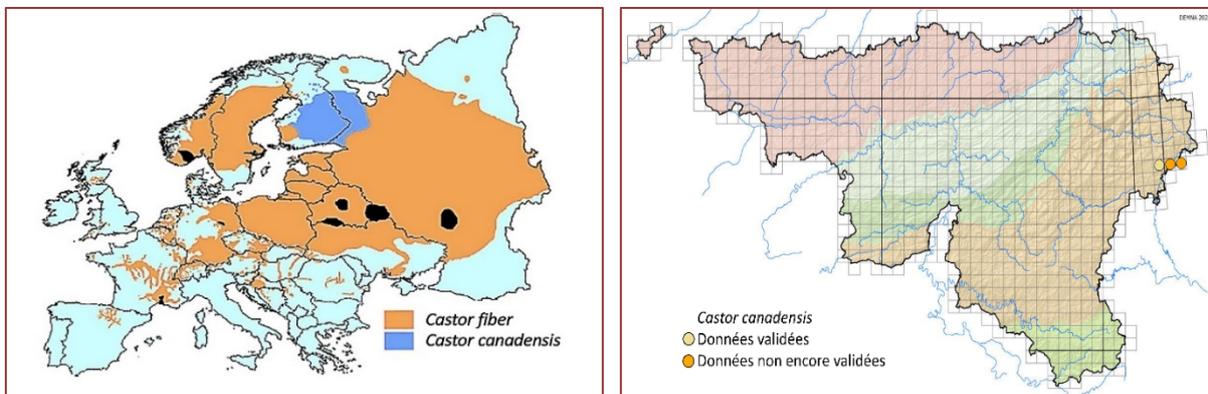


Fig.2- Répartition de *Castor fiber* (en orange) et de *Castor canadensis* (en bleu), en Europe, en 2020 (à gauche) (Halley, *et al.*, 2020). Répartition de *Castor canadensis* en Wallonie en 2022 (à droite) avec en jaune, les données validées, et en orange, les données encore non validées. Source : <https://tinyurl.com/4yhs4zsy>

3. Législation concernant l'espèce *Castor fiber*

Le castor européen est concerné par deux grands textes légaux pour son statut de conservation.

Le premier est la Directive 92/43/CEE, ou plus simplement, Directive habitats, qui vise à protéger les habitats et les espèces d'intérêt communautaire (Barvaux *et al.*, 2015), et le second est la convention de Berne, également impliquée dans la protection de la vie sauvage (EUR-lex, 2020).

À échelle européenne, l'annexe IV de la Directive habitats indique que le castor bénéficie d'un statut de protection stricte dans son aire de répartition naturelle, à l'exception de certains pays, à savoir, l'Estonie, la Lettonie, la Lituanie, la Pologne, la Finlande et la Suède. La convention de Berne va également dans ce sens (European Environment Agency, 2019)^[a].

En Wallonie, en vertu des deux textes légaux cités ci-dessus, le castor européen est mentionné dans l'Annexe 2a du décret du 6 décembre 2001¹, qui indique que c'est une espèce intégralement protégée (Manet, 2010).

Cependant, comme le castor modifie profondément son habitat, cela peut parfois engendrer des conflits avec l'Homme. Il est donc possible, dans certaines conditions, de faire appel à une dérogation, selon la loi du 12 juillet 1973, et son arrêté d'application du 20 novembre 2003 (Barvaux *et al.*, 2015).

Le castor n'est considéré, par la liste rouge de l'IUCN, que comme une espèce à « préoccupation mineure », à échelle mondiale et européenne, (IUCN, 2016) car elle fait partie d'un taxon considéré comme abondant et répandu (Fichefet, 2008).

4. Impact du castor sur l'écosystème

La plupart des espèces animales et végétales s'adaptent à l'environnement dans lequel elles se trouvent. Le castor ne déroge pas à cette règle, mais il est également capable d'adapter celui-ci à ses propres besoins (Janiszewski *et al.*, 2014).

En effet, le castor est une espèce dite clé des écosystèmes (Pinto *et al.*, 2009). Cela signifie qu'il modifie considérablement la structure et la fonction de l'habitat qu'il colonise, créant énormément d'hétérogénéité et une multitude de niches écologiques propices à d'autres espèces animales et végétales, ce qui lui procure le surnom d'ingénieur des écosystèmes (Rosell *et al.*, 2005).

Les barrages qu'il construit exercent une influence majeure sur son environnement (Hartman et Törnlöv, 2006) (Fig.3).

¹ Modifiant la Loi du 12 juillet 1973 de la Conservation de la Nature



Fig.3- Barrage situé sur un site à castor dans la région de Vielsalm. Photo : © Margaux Collet.

Ces constructions permettent le passage d'un milieu lotique, c'est-à-dire, où les eaux sont courantes (Aquaportail, 2021), à un milieu lenthique, où les eaux sont calmes (Aquaportail, 2022). Elles créent l'inondation de larges zones en retenant l'eau, immergeant les entrées de sa hutte (Richard, 1973), lorsqu'il en construit une, ou de son terrier, le protégeant des prédateurs, et lui permettant de voyager en sécurité jusqu'aux berges (Barvaux *et al.*, 2015) (Fig. 4).



Fig.4- Hutte à castors et ses entrées inondées. Dessin issu du site : <https://tinyurl.com/48xsakzb>

La construction de telles infrastructures impacte la faune et la flore aussi bien négativement que positivement. Ainsi, le barrage modifie le transit sédimentaire (Larsen *et al.*, 2021), causant un colmatage du lit en amont de celui-ci (Houbrechts *et al.*, 2022), ce qui peut nuire à des espèces sensibles à ce paramètre telle que la mulette épaisse (*Unio crassus*) (Houbrechts *et al.*, 2022),

ou la mulette perlière (*Margaritifera margaritifera*) (Stringer et Gaywood, 2016). Néanmoins, la charge sédimentaire est moindre en aval, et donc, il se peut que cet effet ne soit pas observé à ce niveau (Stringer et Gaywood, 2016).

De plus, certains salmonidés ne profitent pas non plus de la présence de barrages car ceux-ci représentent des obstacles qui entravent leur migration en période de reproduction (Janiszewski *et al.*, 2014).

Cependant, de nombreuses autres espèces tirent parti de la présence du rongeur. Une étude réalisée en Ecosse entre 2003 et 2012 met en évidence que le castor, grâce à son broutage, augmente la richesse spécifique, mais aussi, le turnover des populations de macrophytes dans certains habitats, en y induisant une diminution dans l'abondance des espèces prédominantes, et une augmentation dans l'abondance d'autres espèces très peu présentes initialement (Law *et al.*, 2014).

En période de sécheresse, l'eau retenue par le(s) barrage(s) peut progressivement être relâchée, par l'animal, afin d'éviter un assèchement du milieu. Parmi les autres rôles joués par le castor, on peut citer l'ouverture du milieu par la coupe des arbres dont il se nourrit, la création de zones humides constituées de plans d'eau plus ou moins profonds, plus ou moins grands, et plus ou moins ensoleillés, ou encore, l'augmentation de la biomasse planctonique et entomique impactant toute la chaîne trophique (Janiszewski *et al.*, 2014).

La construction de barrages par l'animal induit une augmentation des températures de l'eau de retenue de ceux-ci, ce qui est propice pour le phytoplancton, et le zooplancton, qui sont à la base de la chaîne alimentaire de nombreuses espèces. Ces eaux deviennent favorables à de nombreux ordres d'invertébrés, dont les Ephemeroptera, les Trichoptera, et les Diptera. Ceux-ci entrent dans la composition du régime alimentaire de nombreux oiseaux, amphibiens, et poissons. Pour ces derniers, le biotope devient un environnement de protection riche en ressources alimentaires, où l'érosion des berges et du fond de la rivière se voit diminuée (Janiszewski *et al.*, 2014).

Le castor est également considéré comme bénéfique pour d'autres mammifères, comme le rat musqué, le ragondin ou le surmulot, qui peuvent vivre avec lui, sans qu'il y ait compétition pour le gîte ou la nourriture (Janiszewski *et al.*, 2014). De plus, une étude récente a comparé l'effet du castor européen sur 8 taxons dans 3 environnements différents : des points d'eau créés par le castor, des rivières, et des forêts, dans la plus vieille réserve naturelle de Bavière. Les chercheurs montrent que sur les 1996 espèces étudiées, 196 apparaissent exclusivement dans

les plans d'eau de castors, contre 192 dans les rivières, et 156 dans l'écosystème forestier. Ils montrent également que sur une série d'espèces d'intérêt de conservation, 76 apparaissent sur les sites à castors, contre 67 et 63 pour les rivières et les forêts, respectivement. Les sites à castors arborent également bien plus de chauvesouris et d'oiseaux que dans les deux autres types d'écosystèmes, car ils recréent une série de micro-habitats ouverts (Valerio *et al.*, 2022), riches en ressources (Ciechanowski *et al.*, 2011), et contiennent même une espèce de scarabée que l'on croyait éteinte en Allemagne, *Aegialia sabuleti*, et un des plus rares mammifères d'Europe centrale, *Sicista betulina* (Valerio *et al.*, 2022).

Enfin, le castor semble impacter positivement de nombreuses espèces d'amphibiens, dont la grenouille rousse (*Rana temporaria*), qui se raréfie en Europe, en recréant des habitats propices pour celle-ci (Dalbeck *et al.*, 2020).

5. Répartition géographique de la grenouille rousse



Fig.5- Répartition de la grenouille rousse en Europe en 2010. Photographie issue du site : <https://tinyurl.com/2p82jark>

La grenouille rousse (*Rana temporaria*), est l'espèce la plus familière du grand public, car c'est une des espèces les plus répandues et les plus abondantes en Wallonie et en Europe. Elle occupe une grande partie de la zone paléarctique, et n'est absente que du sud du continent, ce qui inclut la péninsule ibérique, l'Italie du sud, la Grèce, et une partie des Balkans (Jacob *et al.*, 2007)

(Fig.5). En Belgique, et plus précisément, en Wallonie, cette espèce est répartie sur l'ensemble de la région (Jacob *et al.*, 2007).

6. Écologie de la grenouille rousse

La grenouille rousse a une reproduction dite « explosive » (Ryser, 1989), signifiant qu'elle se reproduit, théoriquement, dès le début du printemps météorologique, sur une période assez courte. En fonction des régions, la période de frai se situe entre fin février et fin avril (Jacob *et al.*, 2007). Elle requiert des températures nocturnes assez douces, de l'ordre de 5°C minimum, et une météo pluvieuse, ou humide, pour pouvoir migrer et se reproduire dans des plans d'eau à une température de 4°C minimum. C'est donc une espèce dite ubiquiste, car elle colonise une très large gamme d'habitats (Laurila et Kujasalo, 1999), dû à sa faible exigence thermique (Jacob *et al.*, 2007).

Les grenouilles rouges pondent dans des eaux stagnantes peu profondes, riches en nourriture, et si possible ensoleillées (Jacob *et al.*, 2007). Ces plans d'eau peuvent être de toutes dimensions, allant de mares temporaires, aux zones peu profondes de grands étangs, en passant par des ornières. L'essentiel étant que les plans d'eau de frai soient de faible profondeur (Jacob *et al.*, 2007).

Sur une frayère, il y a, en général, un ou plusieurs endroits de regroupements des pontes, et ceux-ci sont, dans la majeure partie des cas, fidèlement refréquentés d'une année à l'autre (Jacob *et al.*, 2007).

7. Menaces et état des populations de grenouilles rouges

Les amphibiens représentent le taxon le plus menacé, avec 41% de ses espèces qui sont en danger (IUCN, 2021). Cela représente 1 espèce d'amphibiens sur 3 (IUCN, 2007). Ceci n'a rien d'étonnant puisque les espèces d'eau douce ont perdu 84% de leur abondance globale depuis 1970, et regroupent les espèces les plus en péril (Valerio *et al.*, 2022).

Bien que la grenouille rousse ait le statut d'espèce de « préoccupation mineure » d'après la liste rouge de l'IUCN (IUCN, 2008), la sphère naturaliste wallonne a remarqué, depuis quelques années déjà, un déclin de ses populations dans notre région (Fig.6).

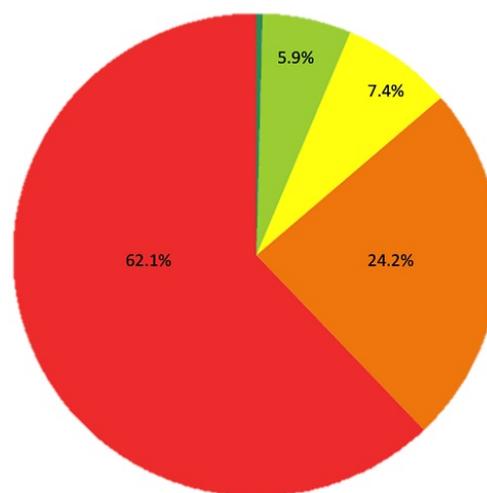


Fig.6- Résultats d'un sondage réalisé chez 95 sondés, quant à leur perception du statut des populations de grenouilles rouges en Wallonie, en 2021. Légende : rouge = déclin alarmant, orange = diminution modérée, jaune = inconnu, vert clair = stable, vert foncé = augmentation modérée (Thierry Kinet, 2021).

En effet, d'après un sondage réalisé chez 95 personnes appartenant à la sphère naturaliste, plus de 85% d'entre eux considèrent que les populations de grenouilles rousses déclinent.

Les raisons potentielles de ce déclin, en Belgique, et partout ailleurs, sont multiples. Il semblerait résulter de l'anthropisation des écosystèmes, notamment par la banalisation de l'habitat (Denoël, 2004), c'est-à-dire, la perte de complexité environnementale résultant de sa dégradation (Alexander *et al.*, 2015), et par l'introduction d'organismes invasifs, comme le poisson (Sequeiros *et al.*, 2018). Une étude réalisée par des chercheurs suisses montre qu'une population de grenouilles rousses a vu ses effectifs diminuer au cours du temps suivant l'introduction de poissons rouges, au lac de Widi, en Suisse (Meyer *et al.*, 1998). Les poissons, lorsqu'ils sont petits, s'attaquent aux larves et aux œufs, tandis que les plus gros peuvent directement s'attaquer aux adultes (Denoël, 2004).

Outre la présence de ces prédateurs, l'arrivée de nouvelles espèces envahissantes telles que le raton laveur (*Procyon lotor*), nuisent probablement aux amphibiens, et en particulier à la grenouille rousse, nécessitant de futures investigations plus approfondies.

Une autre des hypothèses qui peut expliquer les observations d'aujourd'hui est la perte d'habitat(s) propice(s) à la grenouille rousse, en faveur de l'extension agricole. Une étude réalisée en 2014, en Irlande, étudie la perte des plans d'eau propices à l'espèce, sur 125 ans, et met en évidence que 54% d'entre eux ont disparu entre 1887-1913, et 2005-2011 (Reid *et al.*, 2014), sans doute à cause des remblaiements (Denoël, 2004). Une étude réalisée en 2007 en Suède, met en évidence que la fragmentation de l'habitat, induite par la construction du réseau routier (Bekker et Iuell, 2003), ou de zones urbanisées (Gibb et Hochuli, 2002), provoque un fitness, une diversité génétique, ainsi qu'une hétérozygotie moindre, manifestés par une anomalie de la taille des têtards et un plus faible taux de reproduction, que dans une population continue. Cela montre que la fragmentation d'habitat altère l'adaptation des populations naturelles de grenouilles rousses, menant celles-ci au vortex d'extinction (Johansson *et al.*, 2007).

Outre la perte d'habitat liée à l'agriculture, une étude expérimentale datant de 2006 met en évidence que certains pesticides, trouvés à de fortes concentrations, peuvent être létaux pour les têtards, ou au moins provoquer des problèmes de croissance, de développement, et de comportement. Cette recherche fait le pont avec d'autres études de terrain, qui ont mis en évidence l'effet synergique de certains pesticides avec des facteurs comme la prédation (Johansson *et al.*, 2006).

La résurgence de certaines maladies (Brühl *et al.*, 2013), ainsi que le réchauffement climatique (Araújo *et al.*, 2006) contribuent également au déclin des amphibiens, y compris la grenouille rousse, en asséchant les mares de reproduction (Astruc *et al.*, 2021), en avançant le moment de ponte à cause des augmentations de températures (Neveu, 2009), ou en perturbant leurs fonctions métaboliques (Bickford *et al.*, 2008).

Enfin, le braconnage intense de cette espèce, il y a quelques décennies, par les « grenouillers » (Jacob *et al.*, 2007), ainsi que l'acidification des eaux (Cummins, 1986), peuvent également, en combinaison avec d'autres facteurs, contribuer à cette décroissance.

8. Statut de conservation de la grenouille rousse

La grenouille rousse, tout comme le castor, est concernée par la convention de Berne et la directive habitat (Annexe V), lui procurant le statut d'espèce partiellement protégée à échelle européenne, ce qui signifie que son prélèvement ou son exploitation sont susceptibles de requérir des mesures de gestion (European Environment Agency, 2019_[b] ; Portail Wallonie, 2022).

À l'échelle de la Wallonie, dans l'Annexe III de la loi sur la conservation de la nature (LCN 1973), cette espèce est également partiellement protégée, ce qui implique que l'on ne peut pas capturer d'individus adultes ou de pontes, donner la mort à cette espèce, la déranger, ou en faire commerce. Des dérogations sont possibles, notamment à des fins pédagogiques ou scientifiques. En plus de la LCN, l'arrêté du 16 février 1984 stipule que certaines personnes peuvent bénéficier d'un permis de capture des individus adultes et des têtards, si celui-ci est délivré par le chef de cantonnement du DNF. Les têtards peuvent également être capturés et transportés à des fins pédagogiques (Portail Wallonie, 2022).

9. Lien entre le castor et la grenouille rousse

Malgré le déclin notable des amphibiens à travers le monde, et les observations allant dans ce sens en Wallonie, le castor pourrait pallier ce phénomène en jouant sur un des facteurs de décroît, à savoir, la destruction/perte d'habitat (Dalbeck, *et al.*, 2020). Lutz Dalbeck, un scientifique allemand s'intéressant au lien existant entre le castor européen et les amphibiens, met en évidence le rôle positif que pourrait jouer celui-ci sur les populations de grenouilles rousses, en publiant une étude sur le sujet en 2014 (Dalbeck *et al.*, 2014). Cette dernière a été l'amorce de ce mémoire de fin d'études. Pour cette recherche, Mr Dalbeck explore une zone de

24,48 km² dans les Hürtgenwald² (Fig.7), où l'ensemble des points d'eau semblant propices à la reproduction des grenouilles rouges sont recensés. Cela inclut de vieux plans d'eau créés par le castor, ainsi que de jeunes plans d'eau créés par ce dernier, et des mares indépendantes au castor, parfois artificielles. Sur l'ensemble de ces points d'eau, des comptages de pontes de grenouilles rouges sont effectués, et les résultats montrent que sur l'ensemble des pontes comptabilisées, 82.5% sont trouvées sur les sites à castors, en nombre significativement supérieur sur les « vieux sites » (Dalbeck *et al.*, 2014).



Fig.7- Forêt de Hürtgenwald en vert, située dans le massif de Rhenish, dans la région de l'Eifel. Source de l'image : <https://tinyurl.com/bdmkzd6r>

Ce phénomène peut s'expliquer, d'une part, parce que le castor, en ouvrant son habitat, permet un ensoleillement supérieur des points d'eau et aux têtards de se développer plus rapidement, ouverture d'autant plus marquée que le site est vieux. D'autre part, l'étude montre qu'en 2013, alors que le climat est sec dans la zone d'étude, bon nombre de têtards et de pontes sèchent dans les plans d'eau non liés au castor, au contraire des plans d'eau créés par le castor, où le niveau d'eau reste plus ou moins stable (Dalbeck *et al.*, 2014).

² Forêt caractéristique du massif de Rhenish d'Europe centrale, situé dans la région de l'Eifel

10.Objectifs du mémoire

Au vu de l'impact positif que le castor semble avoir sur les populations d'amphibiens, dont la grenouille rousse, dans les Hürtgenwald, nous pouvons nous attendre à observer cette même tendance en Wallonie.

L'objectif principal de ce travail de fin d'études est donc d'évaluer l'influence locale du castor européen, sur la possibilité de frai de la grenouille rousse, au vu de l'hétérogénéité qu'il récrée dans les milieux qu'il colonise.

Ainsi, les objectifs spécifiques du mémoire sont les suivants :

- (1) Évaluer l'état des populations de grenouilles rousses en Wallonie entre 2016 et 2022
- (2) Comparer des zones à castors avec des zones sans castors en Ardenne, et vérifier si les zones « castors » contiennent plus de pontes de grenouilles rousses que les zones « sans castors ».
- (3) Évaluer l'influence potentielle de l'âge des zones à castors sur la reproduction des grenouilles rousses en Ardenne.

MATÉRIELS & MÉTHODES

Deux jeux de données principaux ont été utilisés pour la réalisation de ce mémoire, le scindant en deux parties distinctes.

Pour la première partie, plus générale, et concernant la première question de recherche, les données employées ont été collectées par de multiples observateurs bénévoles sur plusieurs années, antérieurement.

Dans la seconde partie s'intéressant à la deuxième et à la troisième question de recherche, le jeu de données utilisé a été récolté par mes soins avec l'aide des personnes ayant accepté de m'accompagner sur le terrain.

QGIS version 3.16 Hannover (QGIS Development Team, 2020) a été choisi pour la sélection des sites sur lesquels les analyses statistiques ont été réalisées dans la première partie de ce mémoire, et pour la sélection des sites à prospecter lors de ma période de terrain, se rapportant à la seconde partie de ce mémoire.

L'unité d'échantillonnage utilisée, aussi bien pour la première que pour la deuxième partie, est le carré kilométrique. Cette unité d'échantillonnage, d'une surface de 1km², provient du carroyage I.F.B.L, ou Institut Floristique Belgo-Luxembourgeois, et a été mis en place par des botanistes néerlandais, afin de réaliser des prospections systématiques du territoire, en vue de la réalisation d'une base de données floristique détaillée (Portail Wallonie, s.d). Cette méthode est utilisée depuis quelques années, en Wallonie, pour le comptage des pontes de grenouilles rousses, car elle permet une standardisation des mesures (Thierry Kinet, *in litt.*). En pratique, la méthodologie consiste à parcourir l'entièreté du carré kilométrique, c'est-à-dire, une surface de 1x1 km, soit 100 hectares, en période de reproduction de la grenouille rousse, afin de repérer l'ensemble des points d'eau qu'il comporte, et de dénombrer le nombre de pontes trouvées par point d'eau, et donc, par carré. Le comptage des pontes est très fréquemment employé comme proxy pour évaluer les populations de cette espèce d'amphibiens. En effet, une grenouille femelle ne pondra qu'une seule fois lors de la période de reproduction, et donc, en estimant le nombre de pontes, il suffit de multiplier ce nombre par 2 pour estimer le nombre d'individus totaux de la population, car le sex-ratio est supposé équitable (Lustrat, 1999). De plus, c'est une méthode très simple car les pontes sont très reconnaissables (Fig.8). Elles forment de gros amas gélatineux flottant à la surface (Jacob *et al.*, 2007). Les carrés kilométriques ont été choisis grâce à une grille IFBL dans QGIS.



Fig.8- Pontes de grenouilles rousses. Photo : © Cécile Monseur

1. État des populations de grenouilles rousses en Wallonie

1.1. Sélection des carrés pour les analyses

J'ai pu bénéficier d'un fichier shapefile contenant l'ensemble des carrés sur lesquels des mesures ont été effectuées sur plusieurs années dits « carrés prioritaires » (voir Annexe 1) et définis comme tels par Thierry Kinet (Natagora).

Ces carrés prioritaires comportent des données allant de 1985 à 2022. Cependant, l'effort d'échantillonnage n'a pas toujours été rigoureux, et il manque de nombreuses données avant 2016. Le choix s'est porté sur les carrés avec au moins deux données entre 2016 et 2022 pour effectuer l'analyse. 29 carrés, appartenant à 4 régions agro-géographiques de Wallonie, ont été retenus sur les 177 carrés prioritaires. Les carrés retenus étaient les suivants : L71621, K75643, K75312, et K74431 en Ardenne, J52813, J52711, J51343, J51341, H64634, H64731, H71143, et H62824 en Fagne-Famenne, G64343, G64242, G64331, G64341, G64342, G64413, G64311, G64321, G64322, G63333, G63343, G63342, G63324, et G63441 dans le Condroz, et enfin, G61124, G61122, et G61211 dans la région sablo-limoneuse. La localisation géographique de ces carrés est reprise en Annexe 1.

1.2. Traitement et analyse des données

L'ensemble des analyses statistiques, ainsi que les graphiques les illustrant, ont été réalisés avec le programme RStudio, version 3.6.3 (RStudio Team, 2020).

Afin d'illustrer la tendance des populations de grenouilles rousses, les modèles linéaires généralisés (GLM), ont été utilisés.

Une première GLM (modèle 1a) a été effectuée, considérant, comme variable réponse, le nombre total de pontes présentes par carré kilométrique, et comme variable explicative, l'année (c'est-à-dire les années entre 2016 et 2022). Comme la variable réponse est de type « comptage », la famille Poisson a été utilisée. Le modèle peut être représenté comme suit :

Modèle 1a : *nombre de pontes total/carré kilométrique ~ année, famille = Poisson*

Une seconde GLM (modèle 1b) a été réalisée, considérant toujours, comme variable dépendante, le nombre total de pontes présentes par carré, et comme variables explicatives, l'année, la région d'appartenance des carrés, qui comprend les 4 régions agro-géographiques mentionnées ci-dessus, à savoir, l'Ardenne, le Condroz, la région Sablo-limoneuse, et la Famenne, et l'interaction entre ces deux variables. Un modèle de famille poisson a, à nouveau, été choisi pour les mêmes raisons que le modèle 1a. Il peut être représenté comme suit :

Modèle 1b : *nombre de pontes total/carré kilométrique ~ année*région, famille = Poisson*

Deux autres GLM (modèles 2a et 2b) ont ensuite été réalisées, en normalisant la variable réponse « nombre total de pontes/carré kilométrique », pour obtenir une valeur maximale par carré de 1, avec la formule suivante :

$$x_{norm} = \frac{x}{x_{max}}$$

où x représente le nombre total de pontes/ carré kilométrique d'une année, et x_{norm} le nombre total de pontes/ carré kilométrique normalisé, que nous appellerons, plus simplement, « données de pontes normalisées », et x_{max} étant le nombre de pontes maximal du carré, toutes années confondues. La raison de cette normalisation est liée aux nombreuses données manquantes au sein du jeu de données, comme expliqué ci-dessus. Les données normalisées ont des valeurs de 0 à 1 pour chaque carré, et montrent donc la tendance au sein de chacun plutôt que les abondances totales. Ces données sont donc moins sensibles à l'absence de carrés avec des nombres de pontes importants pour certaines années.

Ainsi, la troisième GLM (modèle 2a) considère, comme variable réponse, les données de pontes normalisées, et comme variable explicative, l'année. Etant donné que la variable réponse est maintenant de type numérique positive (avec des zéros) et continue, la famille utilisée pour l'application de ce modèle est la gaussienne. Il peut être représenté comme suit :

Modèle 2a : données de pontes normalisées ~ année, famille = gaussienne

Enfin, la quatrième GLM (modèle 2b), considérant toujours, comme variable dépendante, les données de pontes normalisées, et comme variables explicatives, l'année, la région d'appartenance des carrés, et leur interaction. Il peut être représenté comme suit :

Modèle 2b : données de pontes normalisées ~ année*région, famille = gaussienne

2. Influence du castor européen (*Castor fiber*) sur les populations de grenouilles rouges (*Rana temporaria*)

Comme expliqué précédemment, le castor a majoritairement été réintroduit en Ardenne belge, via des individus provenant de Bavière, à la fin des années 90. (Barvaux *et al.*, 2015).

Il paraît donc assez logique que les densités de populations soient supérieures dans le sud de la Wallonie que dans le nord, ce qui est confirmé par la figure 9 ci-dessous, qui nous montre que le nombre de sites contenant des traces de castor en Ardenne et en Fagne-Famennaise est très grand.

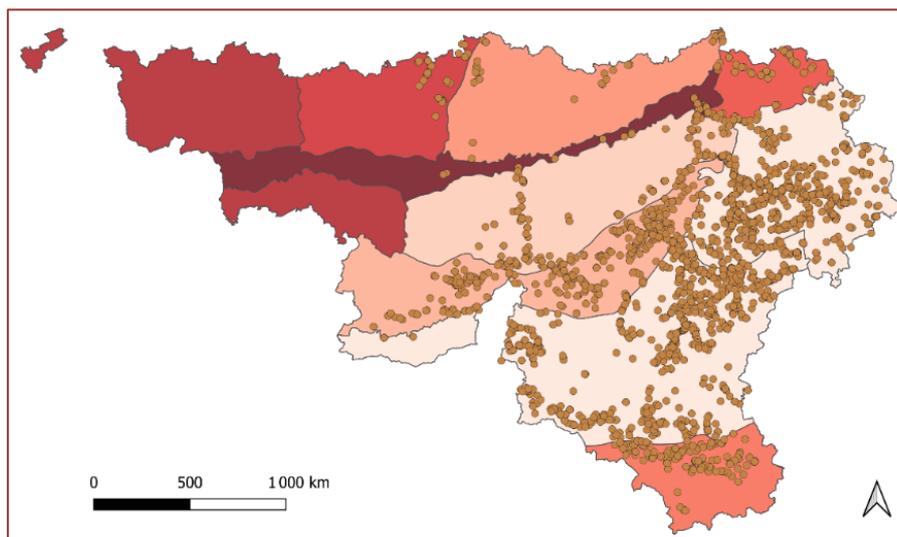


Fig.9- Sites témoignant d'indices de présence de castors européens en Wallonie, représentés par des points bruns

2.1. Sélection des sites et récolte des données

Sur base de l'étude de Lutz Dalbeck (Dalbeck *et al.*, 2014), un intérêt particulier a été porté sur la différence entre de « vieux sites » à castors, de « jeunes sites » à castors, et des sites « sans » castors dans le cadre de ce mémoire. Pour ce faire, il a été décidé de considérer les « vieux sites » à castors comme étant des sites avec une présence de castors depuis plus de 5 ans, et de considérer les « jeunes sites » à castors comme étant des sites avec une présence de castors de moins de 5 ans (Dalbeck *et al.*, 2014).

Ensuite, je me suis basée sur la base de données de l'OFFH appartenant au DEMNA (OFFH-DEMNA, s.d), dont j'ai pu obtenir un extrait. Cette base de données contient l'ensemble des informations relatives à la présence du castor en Wallonie ; la géolocalisation des sites en coordonnées Lambert, la date à laquelle les individus ou les indices de présence ont été observés, le nombre de barrages sur un site donné, etc. Un tri a été effectué sur les 2612 données de l'extrait, à l'aide du programme QGIS. Chaque ligne de données a été explorée individuellement afin d'identifier dans la colonne « remarques » de la table d'attributs, le mot « barrage », et de ne garder ainsi que les données faisant référence à ce mot. Comme les grenouilles rousses ont besoin d'eau stagnante pour se reproduire, il était nécessaire de s'assurer que les sites prospectés contenaient un ou plusieurs barrages recréant ainsi un environnement propice à ces amphibiens. Cela a permis de réduire le nombre de données à 628. Ensuite, cette couche de 628 sites a été croisée avec la couche du réseau hydrographique des cours d'eau non navigables de 3^{ème} catégorie, au moyen d'une intersection dans le logiciel QGIS, car ce sont ces cours d'eau qui sont les plus propices à l'installation de barrages par le castor, permettant ainsi le développement de micro-habitats. Cette étape a nécessité la réalisation préalable d'un « buffer », dans le programme QGIS, au niveau des cours d'eau de 3^{ème} catégorie, afin que l'intersection entre ceux-ci et les points relatifs à la couche de géolocalisation des sites à castors soit possible. Le diamètre des cours d'eau a été augmenté de 50 mètres au total, soit 25 mètres de chaque côté du cours d'eau, via cette méthode. Ensuite, l'intersection des deux couches a permis d'obtenir 167 sites, dont 61 étaient de « jeunes sites » à castors, et 106 étaient de « vieux sites à castors » (Annexe 2).

Après cela, la sélection s'est poursuivie en se basant sur le critère d'accessibilité de ces sites. Différents paramètres ont été vérifiés pour évaluer celle-ci, comme le maillage routier, la végétation, ou encore, le relief, au moyen des services WMS, trouvés sur le site <http://cartoweb.be>. Ces derniers permettent l'affichage, dans QGIS, de cartes de données

géoréférencées trouvées sur des serveurs de données (Géoma-SIG, 2020). Cette étape a permis d'obtenir 40 « vieux sites » et 26 « jeunes sites » (Annexe 3).

Cette première méthode a mis en évidence les sites les plus accessibles et répondant à tous les critères fixés. Cependant, les sites retenus étaient assez éloignés les uns des autres, ce qui, logistiquement, n'était pas optimal pour une période de terrain courte, à cause de la reproduction explosive des grenouilles rousses. De plus, la présence de sites dans différentes régions aurait compliqué l'analyse des résultats, en ajoutant plus de variation dans les paramètres extérieurs au castor, comme les paramètres physico-chimiques du sol, le relief, ou encore, la végétation. Pour ces raisons, deux régions ont été privilégiées. La première étant la région de Vielsalm, et la seconde la région de Nassogne-Tenneville.

Afin d'avoir suffisamment de sites de chaque catégorie, dans ces deux régions, les agents du DNF du cantonnement de Nassogne et de Vielsalm ont été sollicités pour leur connaissance du terrain, afin de finaliser la sélection.

Dans chacune de ces deux régions, cinq sites par catégorie (« vieux sites à castors », « jeunes sites à castors ») ont été sélectionnés, soit vingt sites à castors au total.

Des visites préalables des sites ont été organisées durant le mois de février 2022, afin de s'assurer de leur adéquation pour permettre une récolte optimale des données.

Une fois l'entièreté des sites choisis, ceux-ci ont été inclus dans leur carré kilométrique, unité d'échantillonnage standardisée fréquemment utilisée pour les comptages de pontes de grenouilles rousses, comme expliqué précédemment. Pour se faire, l'utilisation du logiciel QGIS a été nécessaire. Un Plugin Plus nommé « Tile+ » (geomatics, 2018), a permis d'afficher Google Maps dans QGIS (Google, s.d). Ensuite, ayant les coordonnées de tous les sites d'intérêt sur Google Maps version mobile, il a suffi d'évaluer sur la carte présente dans QGIS où se trouvaient les sites à castors choisis, et de sélectionner les carrés correspondants aux emplacements des sites à castors.

Une fois l'entièreté des carrés « avec castors » sélectionnés, les carrés « sans castors » ont été choisis dans les deux régions d'intérêt, en veillant à sélectionner le même type de végétation que celui trouvé dans les carrés « avec castors », afin de pouvoir comparer des carrés les plus proches possibles. Cette étape a pu être possible en utilisant Google Satellite, également obtenu sur QGIS suite à l'installation du Plugin Tile+.

Les carrés considérés sont les carrés IFBL suivants : J74113, J74111, J73224, J73112, J72323 (carrés sans castors), J64822, J64844, J73133, J73111, J72331 (jeunes carrés à castors), J74131, J74132, J73313, J72333, J74313 (vieux carrés à castors) dans la région de Nassogne, et H74741, H84231, H83224, H83212, H82221 (carrés sans castors) H82234, H82244, H81521, H74831, H83242 (jeunes carrés à castors) et H82512, H84144, H82223, H82224, H82514 (vieux carrés à castors) dans la région de Vielsalm (Fig.10).

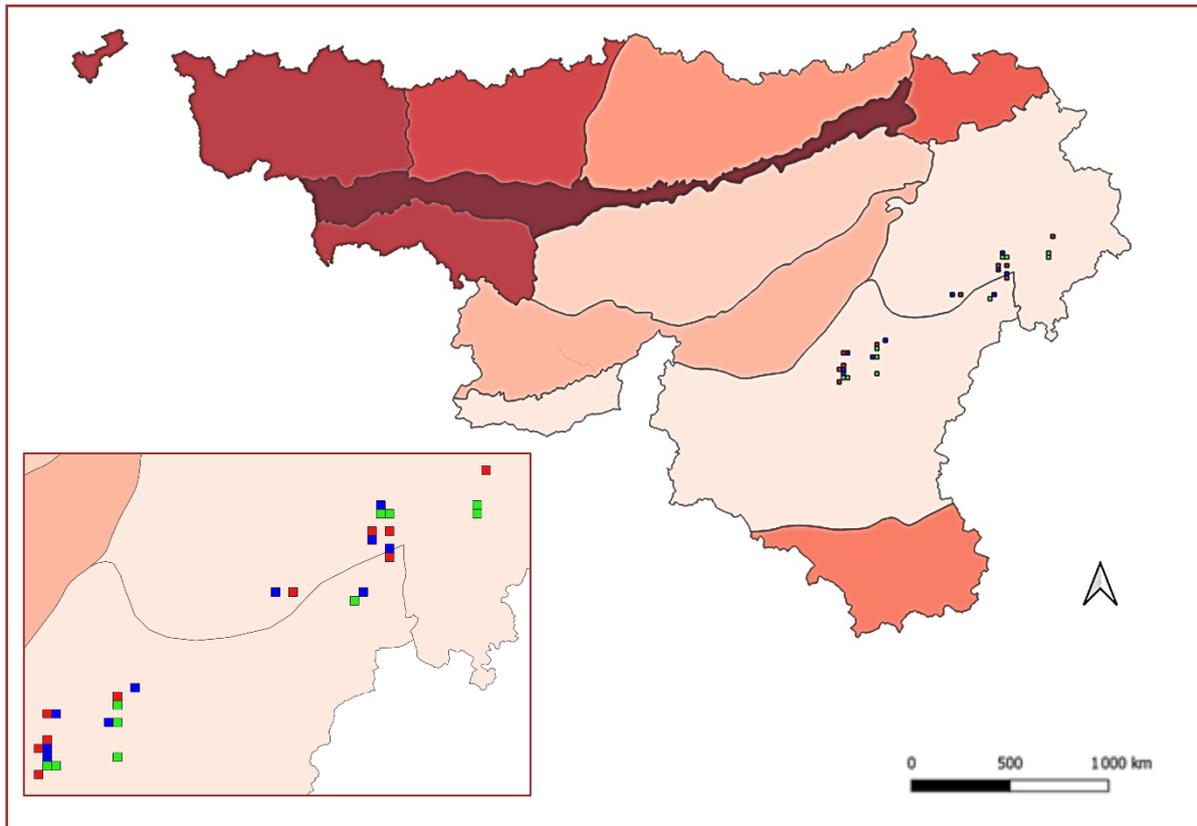


Fig.10-Carrés kilométriques choisis dans les régions de Nassogne-Tenneville et de Vielsalm, avec, en rouge, les carrés comportant les « jeunes » sites à castors, en vert, les carrés comportant les « vieux » sites à castors », et en bleu, les sites « sans » castors.

La récolte des données a été effectuée entre le 12 mars 2022 et le 17 avril 2022, et a consisté en un comptage des pontes de grenouilles rousses sur l'ensemble des points d'eau trouvés dans les carrés kilométriques choisis. Trois passages ont été effectués sur l'ensemble des carrés, afin de s'assurer que la majeure partie des pontes de grenouilles rousses ont été prises en compte lors de la saison de reproduction.

Les dates auxquelles les différents passages ont été réalisés sont reprises dans le tableau en Annexe 4.

Afin de collecter les données, il était, tout d'abord, nécessaire d'exporter les carrés kilométriques dans Google Maps, à partir de QGIS, au format KML, afin de pouvoir se situer dans le carré kilométrique via son smartphone, et sa géolocalisation, lors de la récolte des données. Cela a permis de créer une carte visualisable dans l'application mobile Google Maps, et d'indiquer directement notre position au sein du carré (Annexe 5).

Une fois localisé au sein d'un carré kilométrique, la prospection a pu commencer afin d'identifier les points d'eau semblant convenir à la reproduction des grenouilles rousses. Les points d'eau propices, mais ne contenant pas de pontes, ainsi que les points d'eau contenant des pontes, ont été encodés au moyen de l'application mobile « iObs³ », en version 4.2.5, qui est une application permettant d'encoder ses observations naturalistes, pour ensuite les transférer sur le site d'Observations.be (Observations.be, s.d). Le remplissage des champs se trouve en Annexe 6.

Le champ « nombre » correspond au nombre de pontes comptabilisées, et lorsqu'il n'y en avait aucune dans un point d'eau semblant convenir à la grenouille rousse en termes de profondeur, et d'ensoleillement, le nombre « 9999 » a été indiqué, témoignant d'une limitation de l'application qui ne permet pas d'inscrire, tout simplement, le chiffre « 0 » dans ce champ. Lors du terrain, tout le monde a utilisé le même mode opératoire avec son smartphone personnel.

Les données encodées sur l'application ont été transférées sur le site d'Observations.be au fur et à mesure. 1856 données ont été récoltées, en incluant les « 0 » et les nombres de pontes.

2.2. Traitement des données et analyses statistiques

Une fois la période de terrain terminée, et l'ensemble des données importées sur le site d'Observations.be, il était nécessaire de changer l'ensemble des « 9999 » en « 0 » sur le site, afin de ne pas fausser les données exploitées par d'autres personnes. Cette étape a été effectuée par l'ensemble des personnes ayant participé au terrain. Ensuite, l'ensemble des données ont été extraites du site, sous forme d'un fichier Excel. Elles ont, finalement, été mises en commun en un seul fichier Excel global.

Observations.be offre de nombreux champs lorsque l'on importe les données sous forme de fichier Excel, mais la plupart d'entre eux ne sont pas utiles au traitement statistique. Ainsi, seuls

³ iObs est la version pour Iphone, et ObsMapp est la version pour Androïd, mais elles sont tout autant reliées au serveur d'Observations.be

les champs “IFBL”, “id”, “date”, “number”, “lat” (latitude), “lng” (longitude), “local x”, et “local y” ont été gardés. Un champ “pontes” a également été ajouté, en indiquant un 1 lorsque des pontes ont été comptées sur un point d’eau dans un carré kilométrique, et un 0 lorsqu’il n’y avait pas de pontes, ainsi qu’un champ « status », qui donne la catégorie du carré (« vieux », « jeune », et « sans ») et les données relatives à celui-ci, et d’un champ « passage » attribuant aux données le passage auxquelles elles ont été relevées (passage 1, 2 ou 3). Un aperçu du jeu de données final est visualisable en Annexe 7.

Q1 : Sur quelle catégorie de carré kilométrique y-avait-t-il le plus de pontes de grenouilles rouges ?

Pour répondre à cette question, il fallait d’abord effectuer un test comparant deux échantillons indépendants, afin de détecter s’il existait des différences entre les mêmes catégories de carrés (« vieux carré à castors » ou « vieux », « jeune carré à castors » ou « jeune », et « carrés sans castors » ou « sans ») entre nos deux régions d’intérêt. Ce test était nécessaire afin de voir si les données collectées, pour les deux régions, pouvaient être combinées ensemble pour la suite des analyses.

Le T-test de Student permet de comparer les moyennes de deux populations indépendantes (STHDA, s.d)^[a].

Afin de réaliser celui-ci, deux conditions devaient être respectées. La première était que les observations de chaque échantillon, prélevé dans mes régions d’intérêt, devaient suivre une distribution normale. Ceci a été vérifié au moyen d’un test de Shapiro-Wilk. La seconde condition était que la variance entre mes deux échantillons devait être égale. Ceci a été vérifié au moyen d’un F-test. (STHDA, s.d)^[a]. La normalité n’étant pas respectée pour l’ensemble des catégories, un test non-paramétrique de Wilcoxon-Mann-Whitney a été utilisé à la place du T-test.

Une analyse visant à comparer les différentes catégories de carrés (« vieux », « jeune », et « sans ») entre elles a ensuite été appliquée. L’analyse de variance à un facteur (ou one-way ANOVA) permet d’effectuer cette comparaison. Tout comme le Student T-test, l’ANOVA nécessitait de vérifier la distribution normale de la variable dépendante, ce qui a été testé au moyen d’un test de Shapiro-Wilk. L’homoscédasticité a, quant à elle, été testée avec un test de Barlett, lorsque la normalité des résidus était respectée, ou de Levene lorsqu’elle ne l’était pas. Ces conditions n’étant pas respectées, un test non paramétrique de Kruskal-Wallis a été utilisé,

suivi du test post hoc de Dunn, utilisant la méthode de Bonferroni (STHDA, s.d)^[b]. Ce dernier permet de déterminer quels groupes diffèrent significativement l'un de l'autre (Mangiafico, 2016).

La même analyse a été effectuée en retirant les valeurs aberrantes, ou outliers, lorsqu'ils étaient considérés comme extrêmes par RStudio. Les outliers ont été détectés au moyen de boxplot, et les outliers extrêmes via une fonction dans RStudio (Annexe 8).

Le test non paramétrique de Kruskal-Wallis, suivi d'un test de Dunn, ont été effectués sur la région de Vielsalm. À Nassogne, comme les conditions de normalité et d'homoscédasticité étaient respectées, une analyse de variance à un facteur, ainsi qu'un test post hoc de Tukey ont pu être utilisés. Ce dernier a le même rôle que le test de Dunn.

Enfin, les analyses ont été répétées en s'intéressant au nombre moyen de pontes de grenouilles par plan d'eau au sein de chaque catégorie de carré kilométrique. Ces analyses ont été réalisées sur les jeux de données de chaque région. Les analyses n'ont pas été effectuées sans les outliers (Annexe 8).

Q2 : Trouvait-t-on plus ou moins de pontes entre les passages ?

À nouveau, pour répondre à cette question, les mêmes analyses ont été effectuées sur les jeux de données des deux régions, en comparant, cette fois, le nombre moyen de pontes par passage et par carré (passages 1, 2 et 3). Un test de Wilcoxon-Mann-Whitney a été appliqué, suivi du test de Kruskal-Wallis à un facteur, et du test post hoc de Dunn, et enfin, d'une analyse sans les outliers (Annexe 8).

Q3 : Trouvait-t-on plus de points d'eau sur les carrés avec ou sans castors ?

Un test de Wilcoxon-Mann-Whitney a été effectué, suivi d'un test de Kruskal-Wallis et d'un test post hoc de Dunn, comparant le nombre total de points d'eau selon la catégorie de carré, par région.

Q4 : Y-avait-t-il une corrélation entre le nombre de plans d'eau et le nombre de pontes ?

Deux analyses de corrélation ont été réalisées, afin d'évaluer si le nombre de points d'eau exerçait une influence sur le nombre de pontes trouvées dans les carrés prospectés.

Une première analyse a été réalisée de façon plus générale, en testant la corrélation (méthode Spearman) entre le nombre de plans d'eau et le nombre de pontes, indépendamment du statut

des carrés à castors, et de la région. Un test de Shapiro-Wilk a été réalisé afin de vérifier la normalité des données.

Une seconde analyse de corrélation a été réalisée entre les plans d'eau et le nombre de pontes, pour chaque catégorie de carrés à castors, indépendamment de la région. La normalité des données a également été vérifiée via un test de Shapiro-Wilk. Suite aux résultats de ce test, pour la catégorie de « jeunes carrés à castors » et de « carrés sans castors », la méthode Spearman a été utilisée. Pour la catégorie de « vieux sites », la méthode de Pearson a été utilisée.

RÉSULTATS

Pour tous les tests statistiques, j'ai considéré qu'il existait une différence significative lorsque la p-valeur était inférieure à 0.05.

1. État des populations de grenouilles rousses en Wallonie

Modèle 1a : *nombre de pontes total/carré kilométrique ~ année, famille = Poisson*

La variable « année » a montré un effet significatif ($p\text{-valeur} < 2 \cdot 10^{-16}$) sur la variable « nombre de pontes de grenouilles rousses/carré kilométrique ». Il semblerait que le nombre de pontes de grenouilles rousses diminue au cours du temps ($\beta = -0.154$), tendance observée à la Fig.11.

Modèle 1b : *nombre de pontes total/carré kilométrique ~ année*région, famille = Poisson*

En plus d'un déclin marginalement significatif⁴ ($\beta = -0.076$, $p\text{-valeur} = [0.078]$) du nombre de pontes/carré kilométrique au cours du temps, on a observé significativement moins de pontes dans le Condroz ($\beta = -293.25$, $p\text{-valeur} = [8.45 \cdot 10^{-4}]$), et plus de pontes en Famenne ($\beta = 363.40$, $p\text{-valeur} = [4.47 \cdot 10^{-7}]$) et en région sablo-limoneuse ($\beta = 596.03$, $p\text{-valeur} = [1.40 \cdot 10^{-11}]$) qu'en Ardenne. De plus, les interactions entre les deux variables explicatives « année » et « région » étaient significatives ($p\text{-valeur}_{\text{temps-Condroz}} = [7.79 \cdot 10^{-4}]$; $p\text{-valeur}_{\text{temps-Famenne}} = [4.64 \cdot 10^{-5}]$; $p\text{-valeur}_{\text{temps-Limon}} = [1.67 \cdot 10^{-11}]$). Le nombre de pontes de grenouilles rousses augmenterait dans le Condroz au cours du temps ($\beta = 0.146$), et diminuerait dans les deux autres régions, au cours du temps ($\beta_{\text{Famenne}} = -0.179$ et $\beta_{\text{Limon}} = -0.294$), comme en témoigne la Fig. 11.

⁴ C'est-à-dire que la p-valeur est comprise entre 0.05 et 0.1, et n'est donc tout juste pas significative.

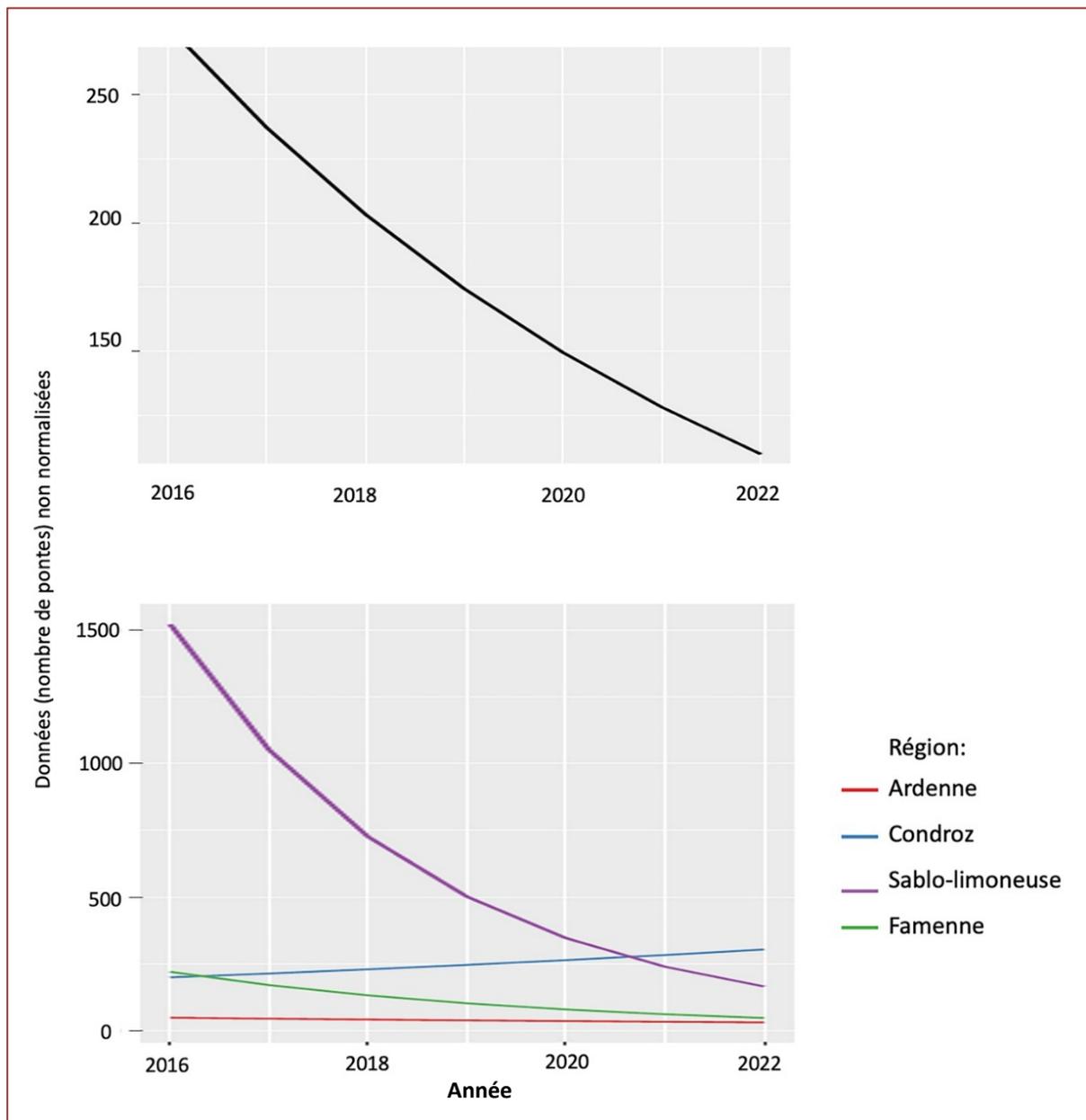


Fig.11-Tendance observée des populations de grenouilles suite à l'application d'un modèle linéaire généralisé de famille Poisson, au cours du temps (en haut) et dans chaque région au cours du temps (en bas).

Modèle 2a : données de pontes normalisées/carré kilométrique ~année, famille = gaussienne

La variable « année » a montré un effet significatif (p-valeur = [0.029]) sur la variable « données de pontes normalisées/carré kilométrique » (Annexe 9), et le nombre de pontes semblerait légèrement diminuer au cours du temps ($\beta = -0.044$) (Fig.12).

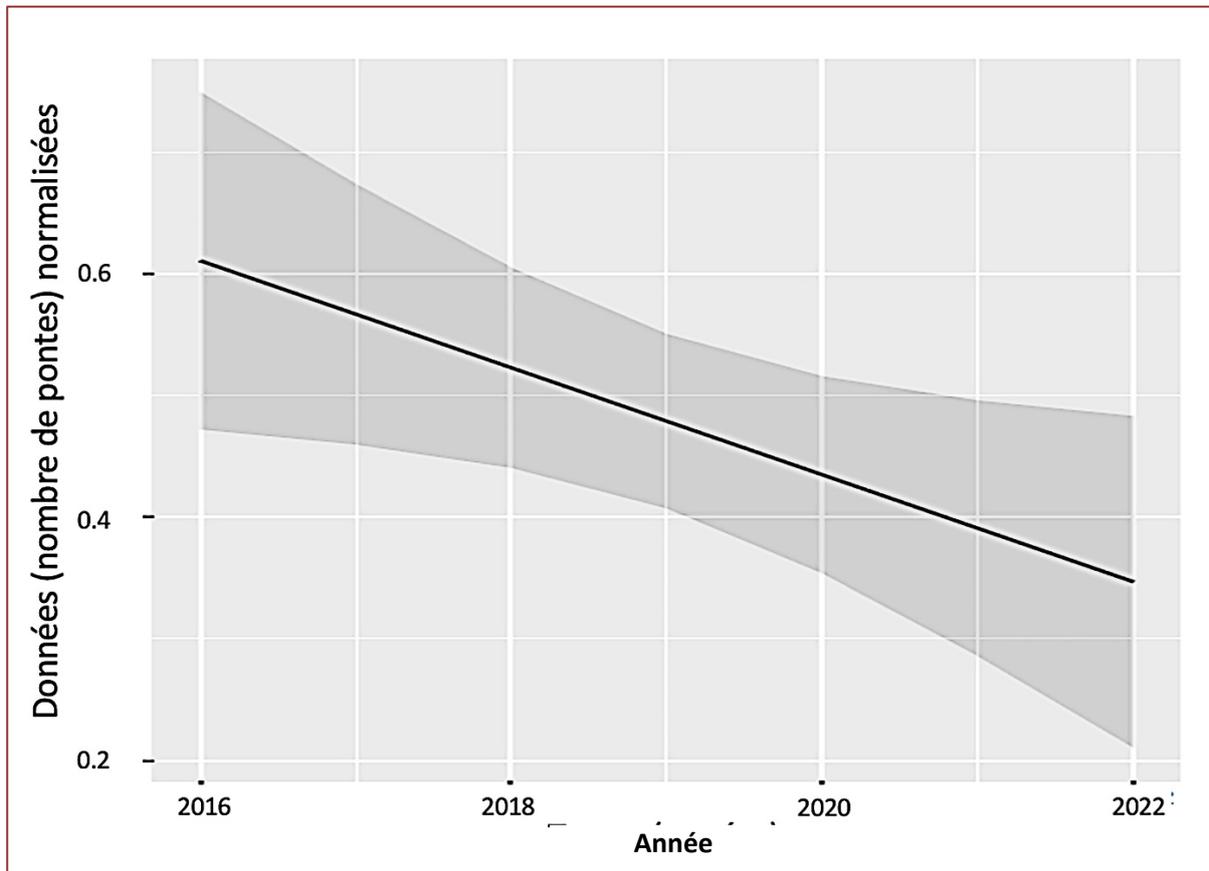


Fig.12-Tendance observée des populations de grenouilles rousses suite à l'application d'un modèle de famille gaussienne, en prenant en compte l'année comme unique variable explicative

Modèle 2b : données de pontes normalisées/carré kilométrique ~année*région, famille = gaussienne

Il n'y avait pas de déclin significatif au cours du temps ($\beta=-0.02$, p-valeur = [0.82]), et il n'y avait pas significativement moins de pontes dans le Condroz ($\beta=- 37.80$, p-valeur = [0.86]), et significativement plus de pontes en Famenne ($\beta=76.55$, p-valeur = [0.72]) et dans la région sablo-limoneuse ($\beta=190.58$, p-valeur = [0.45]) qu'en Ardenne. Les interactions entre les deux variables explications « année » et « région » n'étaient pas significatives (p-valeur_{temps-Condroz} = [0.860] ; p-valeur_{temps-Famenne} = [0.723] ; p-valeur_{temps-Limon} = [0.448]). Le nombre de pontes de grenouilles rousses ne changerait pas au cours du temps en fonction de la région (Annexe 9).

Des tableaux récapitulatifs des résultats des quatre modèles se trouvent en Annexe 9.

2. Influence du castor sur les populations de grenouilles rousses

2.1. Description des données

Le nombre moyen ($\pm\sigma$) de pontes de grenouilles rouges trouvées par point d'eau dans chaque région, et pour chaque catégorie carré (« vieux », « jeune », et « sans »), était 6.20 (± 1.41), contre 3.94 (± 0.90) et 1.49 (± 0.58) à Nassogne. À Vielsalm, la moyenne du nombre de pontes par plan d'eau était de 4.05 (± 0.79), contre 2.87 (± 0.79) et 1.49 (± 0.86), respectivement, pour les carrés de catégories « vieux », « jeune », et « sans ». Ces résultats ont donc montré un nombre supérieur de pontes dans les points d'eau des carrés de catégorie « vieux », dans les deux régions d'intérêt (Fig.13).

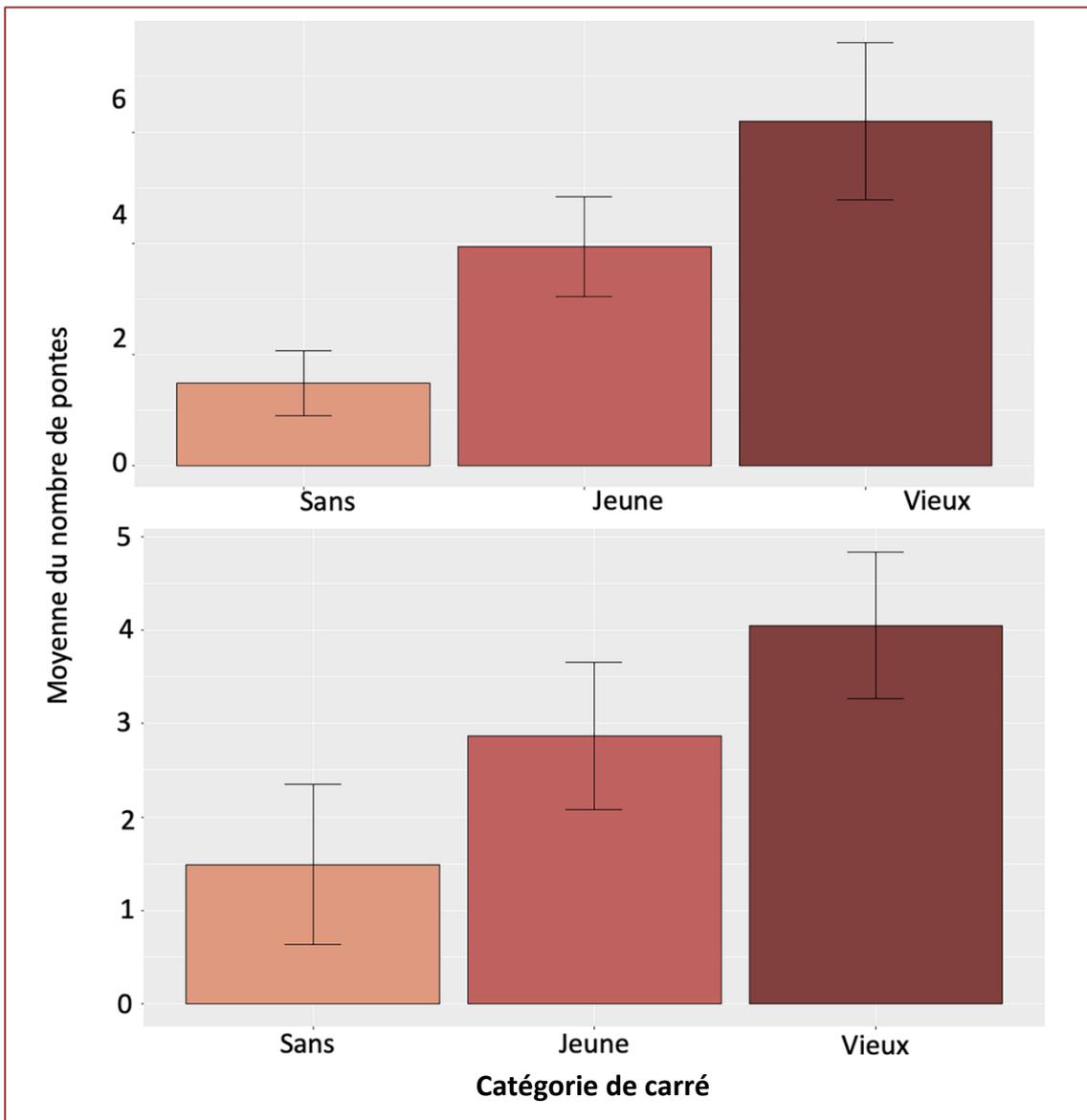


Fig.13- Moyenne et erreur-standard du nombre de pontes trouvées par point d'eau dans chaque catégorie de carré ("vieux", "jeune", et "sans castors"), à Nassogne (en haut) et à Vielsalm (en bas)

À l'échelle du carré kilométrique, les résultats étaient similaires, avec une moyenne de pontes de grenouilles rouges trouvées par catégorie de carré kilométrique de 422.40 (± 128.06), 401 (± 117.56) et 67.80 (± 41.95) à Nassogne, et de 330.40 (± 132.19), 141.40 (± 48.85) et 37 (± 30.07) à Vielsalm, respectivement pour les catégories de carrés « vieux », « jeune », et « sans » (Fig.14).

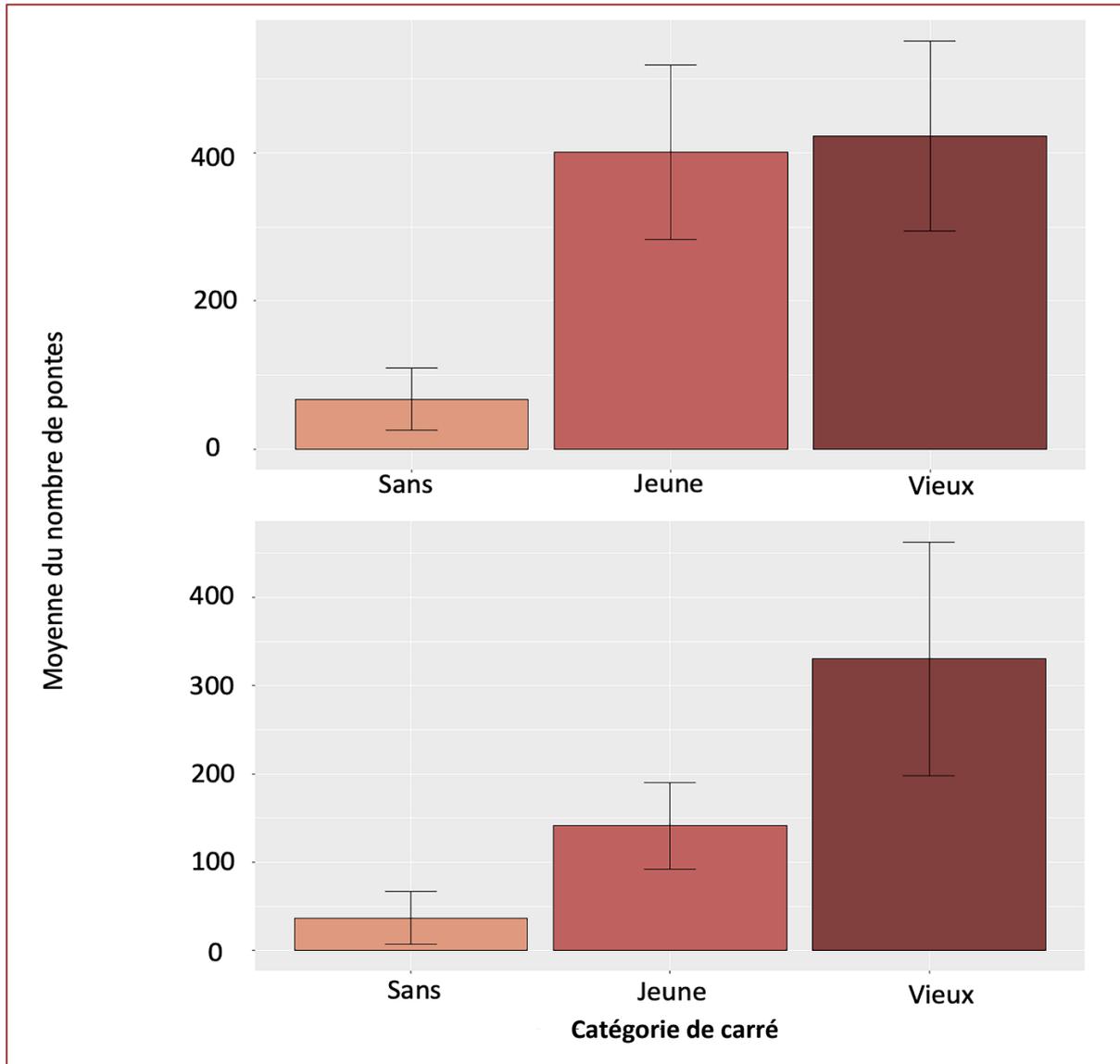


Fig.14- Moyenne et erreur-standard du nombre de pontes trouvées par catégorie de carré kilométrique ("vieux", "jeune", et "sans castors"), à Nassogne (en haut) et à Vielsalm (en bas)

Le nombre total de points d'eau propices à la grenouille rousse comptabilisé par région, était de 341, 510 et 228 à Nassogne, pour les catégories « vieux », « jeunes », et « sans », et de 408, 247 et 124 à Vielsalm, respectivement pour ces mêmes catégories (Fig.15).

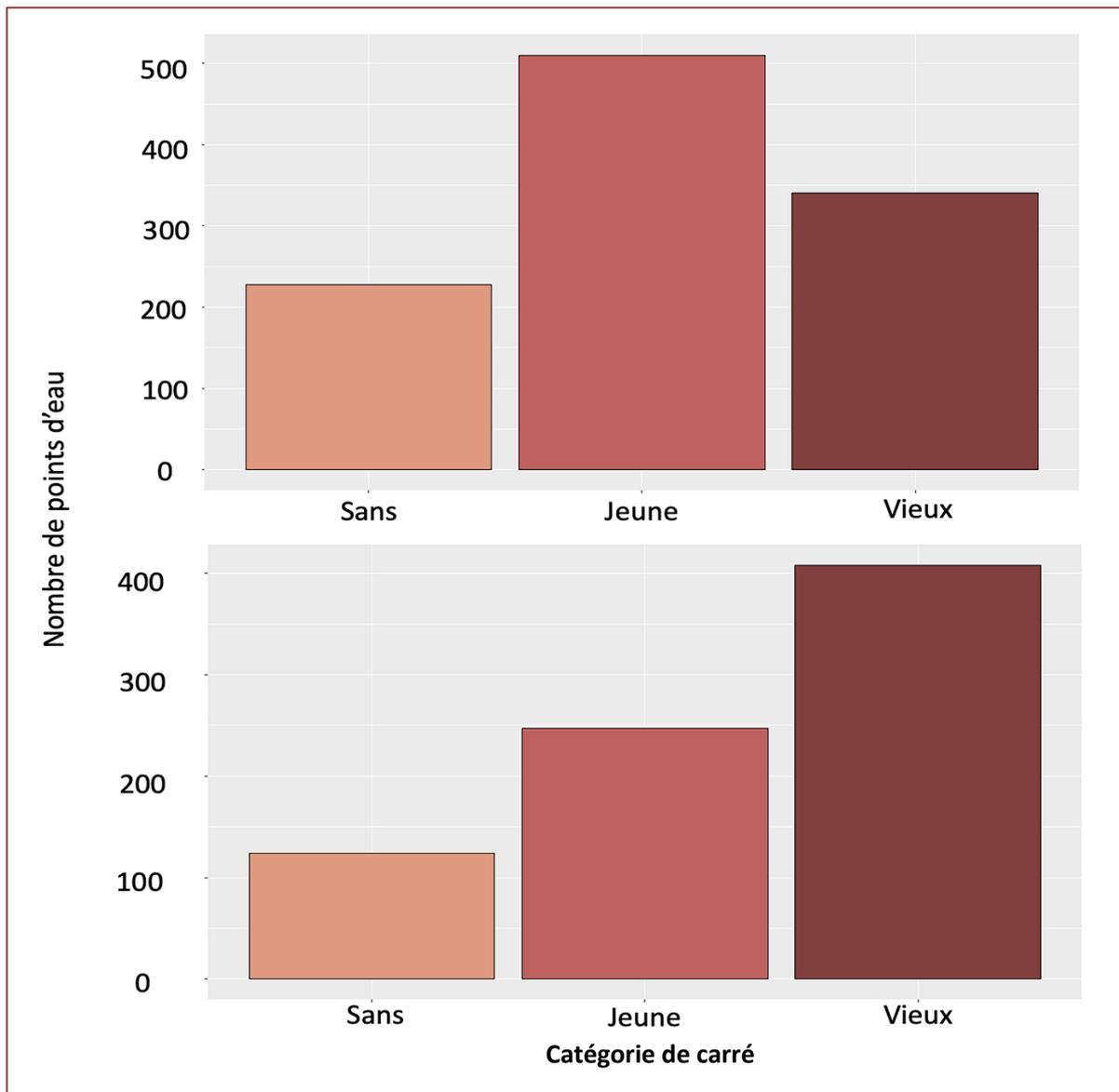


Fig.15- Nombre total de points d'eau répertoriés comme propices à la reproduction de la grenouille rousse dans chaque catégorie de carré kilométrique, dans la région de Nassogne (en haut) et de Vielsalm (en bas).

Enfin, les proportions de pontes trouvées dans les points d'eau de chaque catégorie de carré étaient de 10.72, 27.51 et 13.03 dans la région de Nassogne, et de 15.30, 12.42 et 23.12, dans la région de Vielsalm, respectivement pour les catégories de carrés « vieux », « jeune », et « sans ». Cela pourrait signifier qu'il y avait beaucoup de pontes dans peu de plans d'eau concernant la catégorie « jeune » à Nassogne, et concernant la catégorie « sans » à Vielsalm. Le calcul des proportions de points d'eau contenant des pontes, sur le total des points d'eau répertoriés étaient de 0.58, 0.14, et 0.11 à Nassogne, et de 0.26, 0.23, et 0.064 à Vielsalm, respectivement pour les catégories de carrés « vieux », « jeune », et « sans ». Cela montrait que

la catégorie de carré « vieux » contenait plus de points d'eau avec des pontes que les deux autres catégories, surtout à Nassogne. (Fig.16)

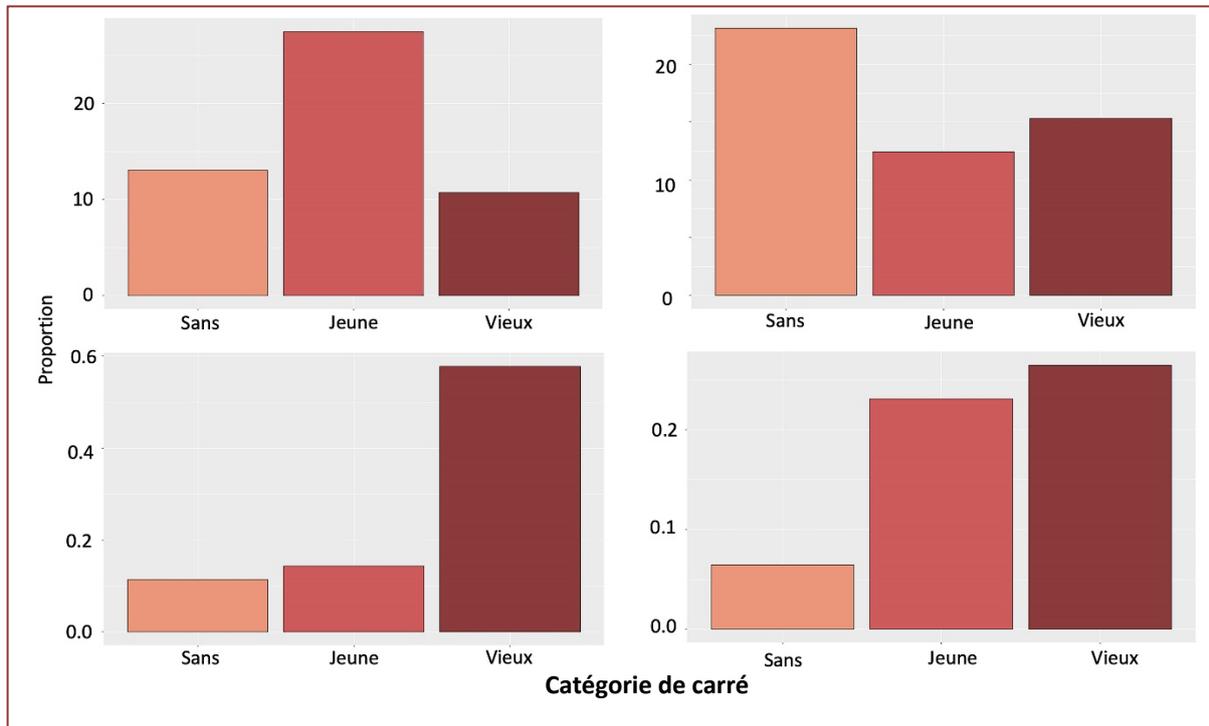


Fig.16- Proportions de pontes de grenouilles rouges trouvées sur les points d'eau dans chaque catégorie de carré, dans la région de Nassogne (en haut à gauche), dans la région de Vielsalm (en haut à droite) et proportions de plans d'eau présentant des pontes sur le total des plans d'eau répertoriés dans la région de Nassogne (en bas à gauche) et de Vielsalm (en bas à droite) pour chaque catégorie de carrés.

2.1. Analyses statistiques

L'ensemble des résultats des tests de normalité et d'homoscédasticité sont visualisables en Annexe 10.

Q1 : Sur quelle catégorie de carré à castors y-avait-t-il le plus de pontes de grenouilles rouges ?

Les analyses ne montraient pas de différence statistique significative au sein des catégories entre les deux régions d'intérêt ((Wilcoxon-Mann-Whitney : $W_{\text{vieux}} = 19$, p-valeur = [0.222]) ; (Wilcoxon-Mann-Whitney : $W_{\text{jeune}} = 16$, p-valeur = [0.55]) ; (Wilcoxon-Mann-Whitney : $W_{\text{sans}} = 16.5$, p-valeur = [0.45])). Nous pouvons donc regrouper les jeux de données ensemble pour la suite des analyses. L'analyse sans les outliers ne modifiait pas les résultats. Ils ont été gardés pour la suite.

Une différence significative entre les différentes catégories de carrés à castors sur les deux régions combinées existait (Kruskal-Wallis : $H_{(2)} = 10.68$, p-valeur = [0.0048]). Elle était statistiquement significative entre les catégories « vieux » et « sans » (Dunn : p-valeur = [0.0064]), et « jeune » et « sans » (Dunn : p-valeur = [0.03]), mais pas entre les « vieux » et « jeune » (Dunn : p-valeur = [1.00]). **Il existerait plus de pontes sur les vieux et sur les jeunes carrés à castors, que sur ceux sans castors.**

Les analyses effectuées sur la région de Vielsalm ont indiqué une différence statistiquement significative entre les trois catégories de carrés à castors (Kruskal-Wallis : $H_{(2)} = 13.06$, p-valeur = [$1.5 \cdot 10^{-3}$]). Les catégories « vieux » et « sans » présentaient une différence significative entre elles (Dunn : p-valeur = [0.001]), ainsi que les catégories « jeune » et « sans » (Dunn : p-valeur = [0.04]). Ce n'était pas le cas des catégories « vieux » et « jeune » (Dunn : p-valeur = [0.958]). **Il semblerait y avoir plus de pontes de grenouilles rousses sur les carrés avec castors que sur les carrés sans castors dans la région de Vielsalm.**

Dans la région de Nassogne, il existait une différence significative entre les trois catégories de carrés (One-way Anova : $F_{(2,12)} = 3.70$, p-valeur = [$5 \cdot 10^{-3}$]). Cette différence était significative entre les carrés « vieux » et « sans » (Tukey : p-valeur = [0.03]), et « jeune » et « sans » (Tukey : p-valeur = [0.02]) mais pas entre les catégories « jeune » et « vieux » (Tukey : p-valeur = [0.91]). **Il semblerait y avoir plus de pontes de grenouilles rousses sur les carrés avec castors que sur les carrés sans castors dans la région de Nassogne.**

Enfin, lorsque l'on compare le nombre moyen de pontes par plan d'eau et par catégorie de carré, on a remarqué qu'il n'y avait pas de différence statistiquement significative entre les régions, pour les catégories « jeune » et « sans » respectivement ((Wilcoxon-Mann-Whitney : $W_{\text{jeune}} = 71243$, p-valeur = [0.469]) ; (Wilcoxon-Mann-Whitney : $W_{\text{sans}} = 14731$, p-valeur = [0.159])), mais bien pour la catégorie « vieux » (Wilcoxon-Mann-Whitney : $W_{\text{vieux}} = 57918$, p-valeur = 0.006), ne permettant pas aux régions d'être regroupées ensemble. Il existait des différences entre les trois catégories de carrés à castors à Nassogne (Kruskal-Wallis : $H_{(2)} = 35.61$, p-valeur = [$1.85 \cdot 10^{-8}$]), et ces différences se présentaient entre les catégories « vieux » et « sans » (Dunn : p-valeur = [$5.71 \cdot 10^{-7}$]) et « vieux » et « jeune » (Dunn : p-valeur = [$1.07 \cdot 10^{-6}$]) mais pas entre les « jeune » et « sans » (Dunn : p-valeur = [0.78]). **Il existerait un nombre supérieur de pontes dans les plans d'eau appartenant à la catégorie de vieux carrés, en comparaison aux deux autres catégories, à Nassogne.** Dans la région de Vielsalm, ces mêmes tests ont révélé une différence significative entre les catégories (Kruskal-Wallis : $H_{(2)} =$

20.155, p-valeur = $[4.20 \cdot 10^{-5}]$), et plus précisément, entre les catégories « vieux » et « sans » (Dunn : p-valeur = $[2.25 \cdot 10^{-5}]$), et « jeune » et « sans » (Dunn : p-valeur = $1.95 \cdot 10^{-3}$). **Il existerait plus de pontes par plan d'eau, dans les carrés à castors, que dans les carrés sans castors.**

Q2 : Trouvait-t-on plus ou moins de pontes entre les passages ?

Les régions ne pouvaient pas être regroupées pour la suite des analyses, car les résultats des tests ont révélé une différence significative entre les régions, lors de la comparaison d'un même passage ((Wilcoxon-Mann-Whitney : $W_{\text{passage1}} = 107.5$, p-valeur = $[0.851]$) ; (Wilcoxon-Mann-Whitney : $W_{\text{passage2}} = 164.5$, p-valeur = $[0.031]$) ; (Wilcoxon-Mann-Whitney : $W_{\text{passage3}} = 125$, p-valeur = $[0.613]$)).

Dans la région de Nassogne, une différence significative existait entre les catégories (Kruskal-Wallis : $H_{(2)} = 9.544$, p-valeur = $[8.46 \cdot 10^{-3}]$). Plus précisément, le « passage2 » et le « passage3 » différaient entre eux (Dunn : p-valeur = $[6.75 \cdot 10^{-3}]$). **Il semblerait que plus de pontes aient été trouvées lors du deuxième passage.**

Dans la région de Vielsalm, aucune différence significative n'a été détectée entre les passages (Kruskal-Wallis : $H_{(2)} = 2.571$, p-valeur = $[0.276]$).

Les résultats restaient inchangés après suppression des outliers.

Q3 : Trouvait-t-on plus de points d'eau sur les sites avec ou sans castors ?

Les régions pouvaient être regroupées ensemble pour la suite des analyses, car les résultats montraient une différence marginalement⁵ significative du nombre de points d'eau entre les régions, pour un même statut ((Wilcoxon-Mann-Whitney : $W_{\text{sans}} = 15$, p-valeur = $[0.06]$) ; (Wilcoxon-Mann-Whitney : $W_{\text{jeune}} = 15$, p-valeur = $[0.06]$) ; (Wilcoxon-Mann-Whitney : $W_{\text{vieux}} = 15$, p-valeur = $[0.06]$)). **Aucune différence significative n'existait entre les catégories** (Kruskal-Wallis : $H_{(2)} = 4.47$, p-valeur = $[0.11]$).

Q4 : Y avait-t-il une corrélation entre le nombre total de plans d'eau et le nombre de pontes ?

⁵ C'est-à-dire une p-valeur comprise entre 0.05 et 0.09

En ne prenant pas en compte la région, ni la catégorie des carrés à castors, une corrélation a été trouvée entre le nombre total de plans d'eau par carré kilométrique, et le nombre de pontes (Spearman : $r_p = 0.78$, p-valeur = $[3.5 \cdot 10^{-7}]$) (Fig. 17).

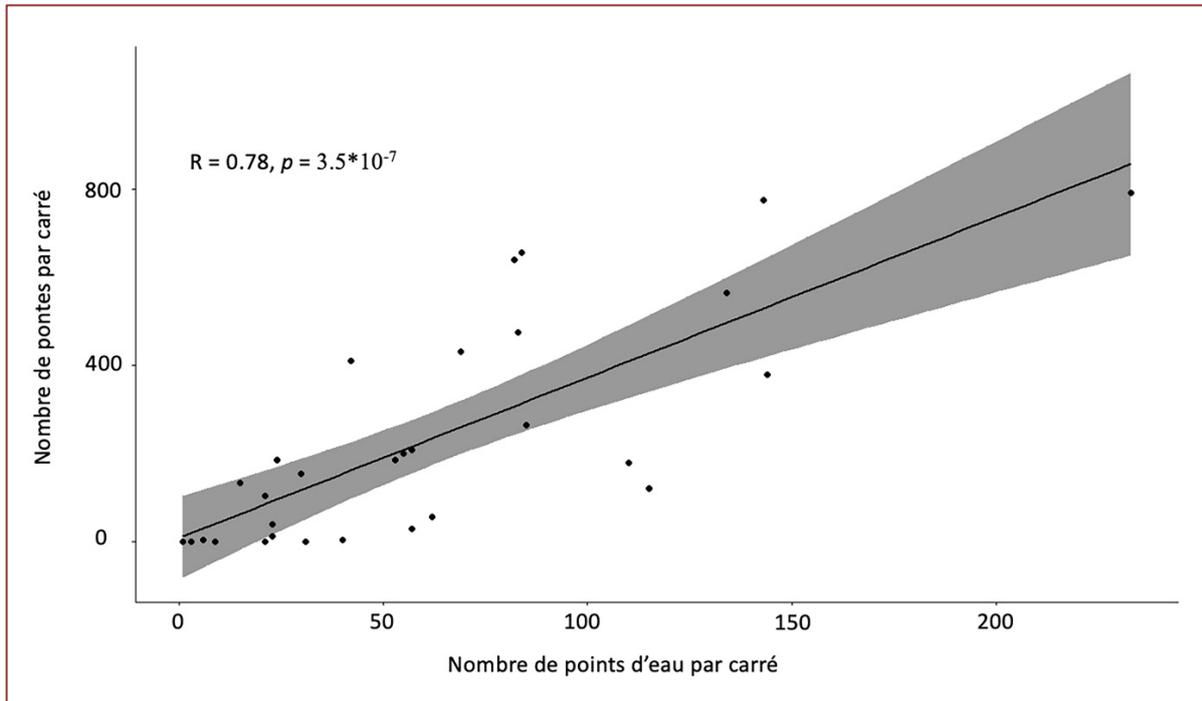


Fig.17- Corrélation entre le nombre total de points d'eau et le nombre de pontes trouvées par carré kilométrique, indépendamment de la région, et de la catégorie du carré à castors (« vieux », « jeune », « sans »).

Lorsque le statut des carrés a été pris en compte, une corrélation existait entre le nombre de pontes et le nombre total de plans d'eau par carré kilométrique de chaque catégorie ((Spearman : $r_{\tau(\text{jeune})} = 0.66$, p-valeur = $[0.04]$) ; (Pearson : $r_{\tau(\text{vieux})} = 0.77$, p-valeur = $[9 \cdot 10^{-3}]$) ; (Spearman : $r_{\tau(\text{sans})} = 0.66$, p-valeur = $[0.04]$)) (Fig.18).

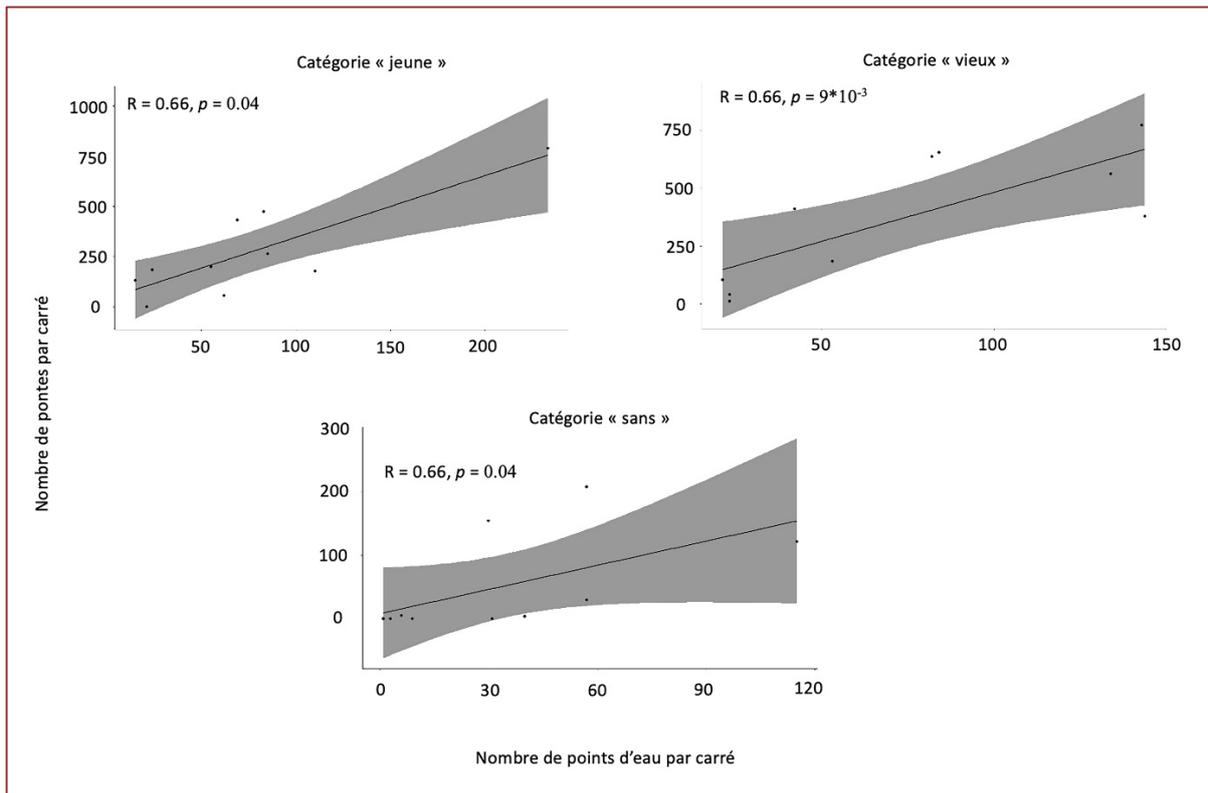


Fig.18- *Corrélation du nombre total de plans d'eau et du nombre de pontes trouvées par carré kilométrique, indépendamment de la région, pour les catégories de carrés à castors « jeune » (en haut à gauche), « vieux » (en haut à droite) et « sans » (en bas).*

DISCUSSION

1. État des populations de grenouilles rousses en Wallonie

Les résultats des GLM observés dans la première partie de ce travail sont partiellement concordants avec les impressions des naturalistes de Wallonie. En réalisant les tests indépendamment de la région, un déclin significatif est détecté avec les données brutes et normalisées. Lorsque nous utilisons les données brutes, nous observons un déclin significatif dans toutes les régions, à part celle du Condroz, où une augmentation significative est détectée, au cours du temps. Ceci n'a pas été observé avec les données normalisées, qui révèlent un déclin non significatif dans chaque région au cours du temps. Ceci est peut-être lié à la normalisation des données, qui présenteraient des conclusions moins sensibles aux données manquantes.

Ces résultats sont partiellement similaires à ceux mis en évidence dans le travail de Corentin Leroy, qui tente d'évaluer la tendance des populations de grenouilles rousses au cours du temps en Wallonie, notamment, en fonction de la région (Leroy, à paraître). Certaines analyses ont été effectuées sur base d'observations courantes obtenues sur le site d'Observations.be, en considérant les données à partir de 2006, et d'autres ont été réalisées à l'échelle du carré kilométrique, en considérant les données à partir de 2016. Les conclusions générales de ces tests statistiques sont qu'un déclin semble apparent en Ardenne et en Fagne-Famenne (Leroy, à paraître).

Enfin, certains naturalistes collectent, d'année en année, des données de pontes de grenouilles rousses, localement. C'est le cas de Harry Mardulyn, qui estime la surface de pontes de grenouilles rousses (en m²) depuis 1994, dans la réserve naturelle du Bec de Feyi, à Wibrin (Natagora, s.d) (Fig.19).

Le graphique ci-dessous montre un déclin alarmant de la surface de pontes à partir de 2012-2013, jusqu'à la disparition quasi-totale de *Rana temporaria* autour de 2018. Bien que ces données ne concernent qu'un seul site, elles renforcent les observations effectuées par de nombreux naturalistes en Wallonie, quant au déclin de cette espèce dans nos contrées.

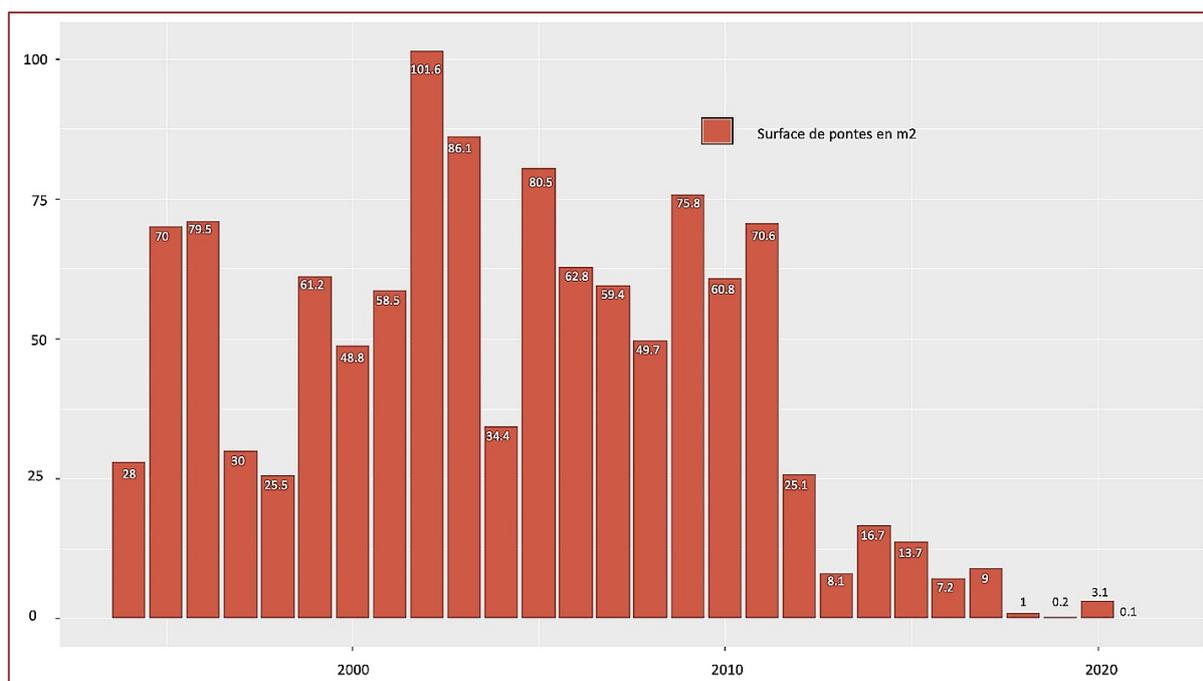


Fig.19- Surface de pontes de *Rana temporaria* entre 1994 et 2021, dans la réserve naturelle du Bec de Feyi à Wibrin.

Source : Harry Mardulyn

2. Influence du castor européen sur les populations de grenouilles rousses

2.1. Comparaison des résultats du mémoire avec les résultats de l'étude de Dalbeck *et al.* (2014)

Les résultats obtenus par l'analyse de variance à un facteur dans ce mémoire montrent qu'il existe une différence significative dans le nombre moyen de pontes trouvées entre les carrés kilométriques sans castor, ceux avec un castor établi récemment, et un castor établi de longue date. Plus précisément, ces analyses indiquent qu'il y a une différence significative entre les « **vieux carrés à castors** », où le **nombre moyen de pontes semble être supérieur**, et les « carrés sans castors ». Ces résultats sont cohérents avec ceux mis en évidence par Lutz Dalbeck dans son étude publiée en 2014 (Dalbeck *et al.*, 2014).

L'analyse de variance à un facteur comparant le nombre moyen de pontes par plan d'eau dans chaque catégorie de carré kilométrique de ce mémoire, mène à des conclusions assez similaires. Les résultats de celle-ci montrent, à nouveau, qu'une différence significative existe entre les plans d'eau « vieux » et « sans », mais aussi « vieux » et « jeune », avec un **nombre supérieur** de pontes de grenouilles rousses sur les « **vieux** » carrés à castors, à Nassogne. À Vielsalm, cette analyse fournit les mêmes résultats que ceux de l'analyse à échelle du carré, sans tenir compte du plan d'eau.

Cependant, au contraire des résultats de Monsieur Dalbeck, l'analyse de variance à un facteur, ne présente pas de différence significative entre les catégories de « vieux » carrés à castors et de « jeunes » carrés à castors, peu importe que l'on s'intéresse aux régions séparément, ou combinées ensemble. Ceci pourrait s'expliquer par le fait que les catégories déterminées dans le cadre de ce mémoire sont beaucoup plus larges, que celles choisies pour l'étude de Monsieur Dalbeck. En effet, alors que seules les catégories « vieux », sites de plus de 5ans, et « jeune », de moins de 5ans, sont choisies pour notre étude, les catégories déterminées par Monsieur Dalbeck sont les suivantes : nouveau site (entre 1 et 3 ans), jeune site (entre 3 et 6 ans), vieux site (plus de 6 ans), site fraîchement abandonné (abandonné depuis moins de 2 ans), et restes de barrages dans un écosystème lotique. Dans ce mémoire, il se pourrait que certains sites considérés comme « jeunes » soient, par exemple, âgés de 4 ans, laissant le temps au castor de s'étendre et de former une zone hétérogène et vaste et pouvant ressembler à des sites de la catégorie « vieux ». Dans le cas de Monsieur Dalbeck, il est donc logique de trouver statistiquement moins de pontes sur les nouveaux sites, qui n'ont pas plus de 3 ans, que sur un site plus vaste, et plus vieux.

Le fait que le nombre de pontes de grenouilles rousses soit supérieur dans les sites à castors serait lié à deux paramètres clés : la canopée, et l'hydropériode, qui traduit la durée des variations en intensité et en fréquence du niveau d'eau annuellement (Aquaportail, 2013). En effet, le castor, en rongant l'écorce des arbres dont il ne nourrit, favorise leur chute, ouvrant ainsi le milieu, et permettant à l'eau, retenue par la création de ses barrages, de se réchauffer plus vite, ce qui est fortement apprécié des communautés d'amphibiens, dont la grenouille rousse. En plus de cela, l'eau, présente grâce à la création de barrage(s), voit son niveau maintenu constant, dans le temps, à part lors d'épisodes de très grosses sécheresses, ce qui est également favorable à la grenouille rousse, dont la reproduction se déroule exclusivement dans le milieu aquatique. Cette eau, en immergeant le pied des arbres, va finir par les faire mourir sur pied, ce qui sera, dans un premier temps, bénéfique pour une série d'espèces appréciant le bois mort, et dans un second temps, permettra d'ouvrir le milieu (Dalbeck *et al.*, 2014). Ce phénomène a été observé, à maintes reprises, lors des prospections de carrés kilométriques, et dans des pessières, milieux très peu propices pour les populations de grenouilles rousses à cause de leur sol très sec et acide, traversées par peu de lumière, mais qui, grâce aux castors, deviennent des milieux immergés, ouverts, et surtout, très hétérogènes (Fig.20).



Fig.20- Eau de retenue d'un barrage au milieu d'une pessière sur un site à castor à Vielsalm. On voit quelques arbres morts de part et d'autre de l'étendue d'eau. Photo : © Margaux Collet.

Lutz Dalbeck démontre, également, qu'un nombre important de pontes est trouvé sur les plans d'eaux artificiels. La raison d'un tel phénomène est que ces derniers présenteraient des caractéristiques similaires (taille, structure, ...) aux sites à castors, accueillant ainsi les mêmes assemblages d'amphibiens (Dalbeck *et al.*, 2014). Dans le cadre de ce mémoire, nous avons aussi constaté, sur les carrés sans castor, que les plans d'eaux présentant beaucoup de pontes de grenouilles sont des mares artificielles (Fig.21).



Fig.21- Mare artificielle creusée dans la forêt de Saint-Hubert à Nassogne. Photo : © Margaux Collet.

Comme mentionné précédemment, avec l'arrivée du castor, le nombre de points d'eau, apparus dans la région d'étude de Monsieur Dalbeck, dans les Hürtgenwald, semble avoir augmenté de presque 50%. Ceci n'est pas mis en évidence dans le cadre de ce mémoire, car il n'y a pas de différence significative entre les carrés à castors et les carrés sans castors. Ceci résulterait peut-être du fait que la majorité des points d'eau comptabilisés dans les carrés sans castors étaient de petites flaques subsistantes, susceptibles d'accueillir quelques pontes. Cependant, elles n'avaient rien de comparable aux plans d'eau encodés dans les carrés avec castors.

Enfin, les analyses de corrélation entre le nombre total de plans d'eaux répertoriés par carré, et le nombre de pontes identifiées par carré, montrent des corrélations, en prenant, ou non, en compte la catégorie du carré à castors (« vieux », « jeune », ou « sans »). Bien que cela soit assez intuitif, cela reste très intéressant car les castors tendent à maintenir un niveau d'eau constant sur leurs sites, qui pourraient donc servir de frayères même en cas d'épisodes de sécheresse, au contraire de mares naturelles ou artificielles.

2.2. Comparaison du mémoire avec les données des naturalistes de Wallonie

Des conclusions partiellement similaires, à celles tirées par Monsieur Dalbeck ainsi que dans ce travail de fin d'études, se retrouvent dans un travail de terrain réalisé par Philippe Ryelandt (Ryelandt, 2018). En 2018, il fait le lien entre le castor et la grenouille rousse. Dans cet article, deux carrés kilométriques ont été prospectés, le premier contenant un site à castors à Matagne-la-petite (carré n°1), où l'on retrouve de nombreux barrages et des modifications du paysage, et le second contenant les argilières de Romedenne (carré n°2), site industriel où le castor, présent, n'a pas réellement modifié l'habitat. Les résultats de ces prospections montrent la présence de 134 pontes dans le carré n°1, et de 268 pontes dans le carré n°2. De nouvelles prospections ont été réalisées en 2022, sur ces mêmes carrés. Alors que le carré n°2 ne présente plus que 63 pontes, le carré n°1 en présente presque sept fois plus qu'en 2018, avec un nombre total de 996. Ceci, grâce à l'étalement du site à castor, et l'éclaircissement de certaines zones. La diminution du nombre de pontes pour le second carré pourrait s'expliquer comme suit : la réserve a subi des travaux importants en 2016, résultant d'un PwDR (Plan wallon de Développement Rural), visant à déboiser la zone afin de recréer des ornières et mares permanentes. La grenouille rousse aurait pu, immédiatement, bénéficier de la création de points d'eau temporaires, ce qui expliquerait le nombre important de pontes trouvé en 2018. Sur ce site, le castor n'a pas eu besoin de construire de barrages, grâce à la présence de nombreuses

mares interconnectées, créées grâce au PwDR, suffisantes pour les déplacements de l'animal. Cependant, à force de se déplacer au sein de ces mares, il les aurait agrandies, formant ainsi des zones trop profondes et donc peu propices pour la grenouille rousse, ce qui expliquerait qu'en 2022, peu de pontes aient été trouvées sur ce site (Ryelandt, 2022). Ainsi, si le castor est bénéfique pour la grenouille rousse à Matagne, il est important de ne pas généraliser son influence trop vite, comme le démontre le site de Romedenne.

Enfin, j'ai pu bénéficier du jeu de données de l'ensemble des carrés prioritaires prospectés en 2022 par de nombreux bénévoles. Sur l'ensemble de ceux-ci, trois se situent en Ardenne, quatre dans le Condroz, onze en Famenne, et vingt-cinq dans la région sablo-limoneuse. Les moyennes du nombre de pontes de grenouilles trouvées dans chaque région⁶ sont, respectivement, les suivantes : 1(±1), 98.2(±118), 42.5(±50.1), et 51.8(±122). Six carrés à castors ont également été prospectés en Fagne-Famenne par des naturalistes de la région. La moyenne du nombre de pontes trouvées dans ces carrés est de 113(±104). En comparant ces derniers avec les moyennes des carrés prioritaires sans castors en Famenne, aucune différence significative nette n'est détectée (Wilcoxon-Mann-Whitney : $W = 15$, p -valeur = [0.06]). Cependant, on peut supposer que si plus de carrés à castors avaient été prospectés en Famenne, cette différence aurait pu être mise en évidence. Les comparaisons des nombres moyens de pontes entre les carrés à castors prospectés dans le cadre de ce mémoire (en Ardenne), et les carrés sans castors parcourus par les bénévoles, sont très différents. Très peu de pontes ont été comptées en Ardenne (avec une moyenne de 1(±1) ponte par carré), sur les sites sans castors, ce qui renforce l'hypothèse du déclin de l'espèce, en dehors des sites à castors.

2.3. Influence du passage sur le nombre de pontes

Les passages n°1 ont eu lieu entre le 12/03/2022 et le 20/03/2022, et entre le 11/03/2022 et le 25/03/2022 à Nassogne et Vielsalm respectivement, les passages n°2 entre le 23/03/2022 et le 27/03/2022, et entre le 28/03/2022 et 5/04/2022 dans ces mêmes régions, respectivement, et le passage n°3 a eu lieu entre le 6/4/2022 et le 15/4/2022, et entre le 14/4/2022 et le 17/4/2022 respectivement. Les résultats n'indiquent pas de différence entre les différents passages à Vielsalm, au contraire de Nassogne, où une différence significative existe entre le premier et le second passage. Les amphibiens étant très sensibles aux conditions météorologiques, par la perméabilité de leur peau, et leur caractéristique d'ectotherme (Bickford *et al.*, 2018), ceci

⁶ Après la suppression des données provenant de carrés avec castor(s).

pourrait s'expliquer par les températures et les précipitations répertoriées lors des mois de mars et d'avril 2022. En effet, sur la figure ci-dessous (Fig.23), on note qu'au cours du passage n°1 à Nassogne, les températures minimales, que l'on pourrait associer aux températures nocturnes, sont très basses, tout comme les précipitations. Or, la grenouille rousse a besoin d'au moins 5°C pour effectuer sa migration jusqu'aux sites de reproduction, et d'une météo humide (Jacob *et al.*, 2007), conditions non réunies lors de ce premier passage à Nassogne (Fig.23). Lors du second passage, et à partir du 20 mars, les températures augmentent, ce qui expliquerait un nombre plus important de pontes comptabilisées : plus de grenouilles rousses auraient migré, malgré de très faibles précipitations, et le pic de pontes aurait été atteint. Pour la région de Vielsalm, le premier passage est effectué sur une longue période, permettant à de nombreuses grenouilles rousses de migrer. De plus, le passage n°2 a lieu jusqu'au début du mois d'avril, où de fortes précipitations sont répertoriées et donc, beaucoup d'individus auraient pu migrer à ce moment (Fig.22).

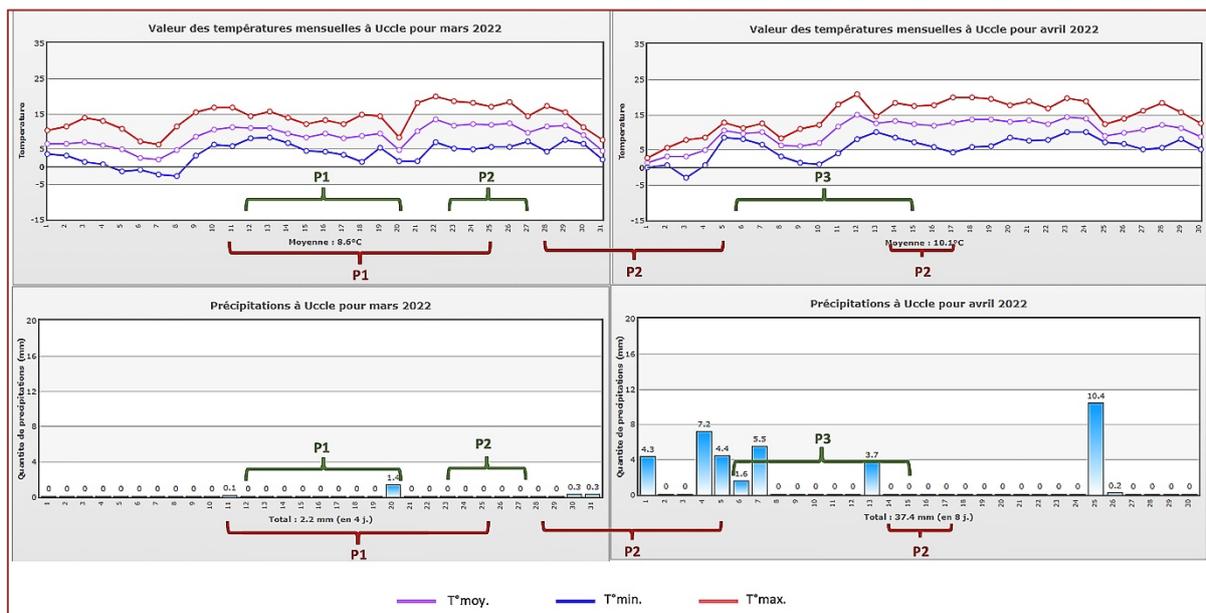


Fig.22- Températures mensuelles à Uccle pour le moi de mars 2022 (en haut à gauche) et pour le mois d'avril 2022 (en haut à droite), et précipitations mensuelles à Uccle pour le mois de mars 2022 (en bas à gauche) et d'avril 2022 (en bas à droite). Légende : P1 = passage 1, P2 = passage2, P3 = passage3, où les accolades bordeaux correspondent à la région de Vielsalm, et les accolades vertes à celle de Nassogne. Source photos : (<https://tinyurl.com/4tyza5f6>; <https://tinyurl.com/3mbtznrt>)

2.4. La grenouille rousse, le raton laveur, et le castor

Rana temporaria semble être fortement appréciée par le raton laveur (*Procyon lotor*) qui a un régime alimentaire opportuniste et saisonnier, composé à 12% d'amphibiens au printemps (Libois *et al.*, 2019). Lorsque les grenouilles rousses se reproduisent à la sortie de l'hiver, il est probable que celui-ci soit en mesure de décimer un nombre important d'individus adultes.

Un phénomène particulier a d'ailleurs été observé lors des prospections de sites, où de nombreux corps éventrés de grenouilles rousses ont été retrouvés au niveau de points d'eau très accessibles (Fig.23).



Fig.23- Restes de grenouilles rousses, avec pontes séchées. Photo : © Margaux Collet

Philippe Moës et Sébastien Herman (agents au DNF du Cantonement de Nassogne), connaisseurs de cette problématique, semblent adhérer à cette théorie, car le raton tend à retirer la peau et les organes des amphibiens avant de les manger (Philippe Moës, *in litt.*).

En plus de fournir un habitat de frai pour la grenouille rousse, le castor lui offrirait également une protection contre ce prédateur. Les sites à castors étant des zones très difficiles d'accès, et le raton laveur étant un animal fainéant (Jernelöv, 2017), il serait envisageable que celui-ci n'ose pas s'aventurer sur ce genre de terrain, qui nécessiterait, de sa part, de gros efforts de nage dans de l'eau froide, contenant de nombreux obstacles entravant son chemin.

3. Limitations de l'étude et perspectives

3.1. La grenouille rousse

Il y a beaucoup de données manquantes dans le jeu de données utilisé pour la réalisation des GLM dans la première partie de ce mémoire. Il serait intéressant d'obtenir des données standardisées récoltées sur plusieurs années et sur plus de carrés, dans chacune des régions agro-géographiques de Wallonie, afin de réellement mettre en évidence une tendance générale de l'état des populations de grenouilles rousses. Par exemple, les résultats semblent montrer qu'il y a une nette tendance au déclin dans la région sablo-limoneuse en utilisant les données brutes. Or, seuls trois carrés de cette catégorie sont utilisés pour effectuer l'analyse. Cette problématique est confirmée par les analyses effectuées par Corentin Leroy (Leroy, à paraître). Un net déclin des pontes de grenouilles rousses est mis en évidence en Ardenne, en se basant sur les données courantes, mais pas en se basant sur les carrés kilométriques. Trop peu de carrés sont prospectés dans cette région, par rapport à d'autres régions agro-géographiques telle que la Fagne-Famenne. Ceci se vérifie pour la région Sablo-limoneuse.

En outre, l'effort d'échantillonnage peut varier d'une personne à l'autre ; certain(e)s parcourent assidument le carré, et d'autres ne reportent que des données ponctuelles au sein du carré. Cet effort peut également varier au cours du temps, ce qui est précisément le problème du jeu de données exploité dans la première partie de ce mémoire. Il y avait trop peu de données avant 2016, et donc, les analyses n'ont pu être effectuées que sur des données provenant de carrés exploités à partir de cette date. Corentin Leroy a éprouvé le même problème lors de la réalisation de ses analyses sur les données courantes, et a mis en évidence qu'en Ardenne, 76% des données postérieures à 2006 provenaient d'observations réalisées entre 2018 et 2021. Une diminution est quand même mise en évidence grâce à son travail malgré ce biais ce qui soutient qu'il existe, très probablement, un déclin des grenouilles rousses en Ardenne (Leroy, à paraître).

Finalement, il se peut que certaines données soient erronées. En effet, il est assez fréquent que les observateurs notent les pontes de grenouilles rousses sous forme d'absence/présence, bien que l'application iObs n'offre pas ce champ, ou en termes de surface. Ainsi, des sous-estimations, ou surestimations du nombre de pontes peuvent facilement être effectuées.

Par conséquent, des analyses des tendances des populations de grenouilles rousses par comptage à l'échelle du carré kilométrique semblent très pertinentes, en termes de standardisation, mais comme le protocole d'échantillonnage n'est établi, à grande échelle, que

depuis peu, plusieurs années seront probablement nécessaires avant de réaliser des analyses statistiques plus robustes, basées sur cette méthode. De plus, malgré la standardisation des données qu'une approche par carré kilométrique offre, il est important de noter qu'elle engendre également certains biais, tels que la prospection incomplète de certains carrés, comme les mares de jardin, ou les sites privés, induisant une sous-estimation du nombre de pontes par carré. De plus, les zones prospectables peuvent changer d'une année à l'autre.

Dans les GLM effectuées dans le cadre de ce mémoire, aucune variable, autre que la région et l'année, ne sont prises en compte. Or, les amphibiens sont sensibles aux variables météorologiques, influencées par les changements climatiques. Dans son travail, Corentin Leroy a effectué des analyses en considérant ces variables, mais les résultats ne sont pas probants. Ceci pourrait s'expliquer par l'utilisation de données moyennes mensuelles, qui sont trop imprécises par rapport à l'écologie de la grenouille rousse. À l'avenir, une étude plus approfondie pourrait s'intéresser au relevé quotidien de ces paramètres durant la période de reproduction du batracien, pour avoir une idée plus précise de l'influence de ceux-ci sur l'espèce. Il serait également intéressant de considérer, dans ces analyses, l'impact de certains prédateurs comme le raton laveur, qui peut avoir un effet particulièrement destructeur sur cette espèce de batracien, comme mentionné précédemment, tout en considérant le rôle que pourrait jouer le castor dans la protection de *Rana temporaria*.

Enfin, en Ardenne, les résultats mis en évidence par Corentin Leroy, la moyenne du nombre de pontes trouvée dans les carrés sans castors prospectés par les bénévoles, ou encore, la perception des naturalistes de Wallonie vont tous dans le même sens : il semblerait qu'un net déclin des populations de grenouilles rousses existe. Cependant, c'est sans tenir compte des sites à castors. Il est possible que les grenouilles rousses s'adaptent aux menaces pesant sur elles, en se réfugiant sur ceux-ci dans cette région.

3.2. Le choix des sites et les analyses statistiques

Dans la cadre de la seconde partie de ce mémoire, le choix s'est porté sur 5 sites par catégorie. Ceci est susceptible d'occasionner un biais lors de l'application d'analyses statistiques. Seules deux régions ont été prospectées en rapport avec tous les critères fixés. Bien que Vielsalm soit situé en Haute Ardenne, et Nassogne plutôt dans la Famenne-Ardenne, ces deux régions présentent toutes deux des caractéristiques du milieu ardennais. À l'avenir, des études similaires devraient prendre en considération plus de sites par région, mais également, d'autres régions

agro-géographiques, afin d'évaluer si les mêmes conclusions que celles présentées dans ce mémoire peuvent être tirées ailleurs en Wallonie.

Pour des raisons logistiques, il n'a pas été possible de prendre en considération d'autres variables environnementales. De futures investigations devraient incorporer certains paramètres aux analyses, afin d'approfondir l'étude.

De plus, certains profils de sites à castors ne semblent pas convenir à la grenouille rousse, comme le montre Philippe Ryelandt dans les argilières de Romedenne, où le nombre de pontes est moindre en 2022 qu'en 2018. C'est également le cas d'un site prospecté dans un carré à Vielsalm, où très peu de pontes ont été trouvées. Celui-ci présente une eau de retenue du barrage très vaste et très profonde (Fig. 24).



Fig.24- *Etendue d'eau très vaste située à Vielsalm. Photo : © Margaux Collet.*

Comme mentionné précédemment, aucune différence significative n'a été mise en évidence entre le nombre de plans d'eau trouvés sur les carrés à castors, et sans castors. À l'avenir, une étude pourrait s'intéresser à la surface d'eau par carré, plutôt qu'au nombre de points d'eau propices par carré.

Enfin, cette étude ne s'intéresse qu'au succès reproducteur de la grenouille rousse, par le comptage du nombre de pontes, mais il pourrait être judicieux de s'intéresser au succès d'éclosion de l'espèce. Ceci pourrait être utile afin d'évaluer si effectivement le castor joue un rôle de protection de la grenouille rousse face aux prédateurs.

CONCLUSION

Ce travail de fin d'études a pu mettre en évidence un effet positif du castor sur les populations de grenouilles rousses en Ardenne, malgré la non-considération de certains paramètres, et le biais lié à la méthodologie utilisée. Cependant, si une recherche plus poussée avait été effectuée, il est probable que des conclusions similaires auraient pu être tirées.

En effet, de nombreuses études ont mis en évidence le rôle du castor sur la biodiversité, grâce à l'hétérogénéité incomparable des habitats qu'il recrée. Même si cette espèce n'a pas que des rôles positifs sur toutes les autres (notamment la mulette perlière et épaisse), l'effet positif qu'elle a sur les amphibiens, dont la grenouille rousse, est indéniable.

Cette espèce est maintenant source d'inquiétude au sein de la sphère naturaliste, car l'impression générale est la diminution du nombre d'individus d'année en année. Cependant, très peu de naturalistes se sont déjà aventurés sur des sites à castors, où un équipement adapté est nécessaire. Grâce à ce travail, de nombreux sites ont été prospectés et des plages entières de dizaines (voire de centaines) de pontes ont été trouvées. Ceci soutient l'hypothèse selon laquelle le castor joue un rôle primordial dans la pérennité de la grenouille rousse, en lui offrant un habitat de frai et une possible protection face aux prédateurs, grâce aux chantiers qu'il crée.

En outre, ce gros rongeur est maintenant très bien implanté en Wallonie, et il est fort peu probable qu'il ne cesse de s'étendre avant d'avoir saturé l'entièreté de l'espace exploitable. Il est donc primordial que l'Homme trouve un terrain d'entente avec cet animal encore fort controversé, qui pourtant, joue un rôle clé dans le maintien de la biodiversité.

BIBLIOGRAPHIE

Alexander, M.E., Kaiser, H., Weyl, O.L.F. et Dick, J.T.A. (2015) 'Habitat simplification increases the impact of a freshwater invasive fish', *Environmental Biology of Fishes*, 98(2), pp. 477–486. Disponible sur : <https://doi.org/10.1007/s10641-014-0278-z>.

Aquaportail. (2013) *Hydropériode : définition, explications*. Disponible sur Aquaportail: <https://tinyurl.com/242chp6m>. Consulté le 11/8/2022

Aquaportail. (2021) *Lotique : définition, explications*. Disponible sur Aquaportail: <https://tinyurl.com/8kw3z97n>. Consulté le 11/8/2022

Aquaportail. (2022) *Lentique : définition, explications*. Disponible sur Aquaportail: <https://tinyurl.com/nxypj3ew>. Consulté le 11/8/2022

Araújo, M.B., Thuiller, W. et Pearson, R.G. (2006) 'Climate warming and the decline of amphibians and reptiles in Europe', *Journal of Biogeography*, 33(10), pp. 1712–1728. Disponible sur : <https://doi.org/10.1111/j.1365-2699.2006.01482.x>.

Astruc, G., Miaud, C., Besnard, A. et Barrioz, M. (2021) 'Le déclin alarmant des amphibiens de France : L'exemple étayé de la Normandie The alarming decline of amphibians in France : The documented example of Normandy', 178, pp. 57–74. Disponible sur : <https://doi.org/10.48716/bullshf.178-4>.

Barvaux, C., Manet, B. et Liégeois, S. (2015) *Cohabiter avec le castor en Wallonie*. Service Public de Wallonie, Jambes. Disponible sur : <https://tinyurl.com/bdfhp8z4>.

Bekker, H. et Iuell, B. (2003) 'Habitat fragmentation due to infrastructure'. Disponible sur: <https://escholarship.org/uc/item/9693w540>.

Bickford D.P., Alford R., Crump M.L., Whitfield S., Karraker N. et Donnelly M.A. (2018) 'Impacts of Climate Change on Amphibian Biodiversity', *The Encyclopedia of the Anthropocene*, vol. 2, pp. 113-121. Oxford: Elsevier. Disponible sur: <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-409548-9.10022-3>.

Brühl, C.A., Schmidt, T., Pierper, S. et Alscher, A. (2013) 'Terrestrial pesticide exposure of amphibians: An underestimated cause of global decline?', *Scientific Reports*, 3. Disponible sur: <https://doi.org/10.1038/srep01135>.

Campbell, R.D., Newman, C., Macdonald, D.W. et Rosell, F. (2013) 'Proximate weather patterns and spring green-up phenology effect Eurasian beaver (*Castor fiber*) body mass and reproductive success: The implications of climate change and topography', *Global Change Biology* 19, 4, pp. 1311-1324. Disponible sur : <https://doi.org/10.1111/gcb.12114>.

Ciechanowski, M., Kubic, W., Rynkiewicz, A. et Zwolicki, A. (2011) 'Reintroduction of beavers *Castor fiber* may improve habitat quality for vespertilionid bats foraging in small river valleys', *European Journal of Wildlife Research*, 57(4), pp. 737–747. Disponible sur : <https://doi.org/10.1007/s10344-010-0481-y>.

Cummins, C.P. (1986) 'Effects of Aluminium and Low pH on Growth and Development in *Rana temporaria* Tadpoles', *Oecologia*, 69(2), pp. 248–252. Disponible sur: <https://doi.org/10.1007/BF00377630>.

Dalbeck, L., Hachtel, M. et Campbell-Palmer, R. (2020) 'A review of the influence of beaver *Castor fiber* on amphibian assemblages in the floodplains of European temperate streams and rivers', *Herpetological Journal*, 30(3), pp. 135–146. Disponible sur: <https://doi.org/10.33256/HJ30.3.135146>.

Dalbeck, L., Janssen, J. et Luise Völsgen, S. (2014) 'Beavers (*Castor fiber*) increase habitat availability, heterogeneity and connectivity for common frogs (*Rana temporaria*)', *Amphibia Reptilia*, 35(3), pp. 321–329. Disponible sur : <https://doi.org/10.1163/15685381-00002956>.

Denoël, M. (2004) 'Répartition, habitat et conservation des amphibiens du Pays de Herve (Belgique)', *Bulletin de la Société Herpétologique de France*, 111–112, pp. 49–77.

Dewas, M., Herr, J., Schley, L., Angst, C., Manet, B., Landry, P. et Catusse, M. (2012) 'Recovery and status of native and introduced beavers *Castor fiber* and *Castor canadensis* in France and neighbouring countries', *Mammal Review*, 42(2), pp. 144–165. Disponible sur : <https://doi.org/10.1111/j.1365-2907.2011.00196.x>.

EUR-Lex. (2020) *Bern convention*. Disponible sur EUR-Lex: <https://tinyurl.com/mr3ez35z>. Consulté le 31/5/2022

European Environment Agency. (2019)^[a] *European beaver - Castor fiber Linnaeus, 1758*. Disponible sur EUNIS: <https://eunis.eea.europa.eu/species/1377>. Consulté le 31/5/2022

European Environment Agency. (2019)^[b] *Common frog - Rana temporaria Linnaeus, 1758*. Disponible sur EUNIS: <https://tinyurl.com/94t2tpjv>. Consulté le 31/5/2022

Fichet, V. (2008) *Catégories et critères*. Disponible sur Portail Biodiversité en Wallonie: <https://tinyurl.com/4c3zc6u2>. Consulté le 19/6/2022

geomatics. (2018) *Adding Basemap and Some Updated Earth Data with Tile+ Plugin QGIS 3*. Disponible sur GEODOSE: <https://tinyurl.com/4fnpe3bu>. Consulté le 11/8/2022

Gibb, H. et Hochuli, D.F. (2002) 'Habitat fragmentation in an urban environment: large and small fragments support different arthropod assemblages', *Biological Conservation*, 106(1), pp. 91–100. Disponible sur : [https://doi.org/10.1016/S0006-3207\(01\)00232-4](https://doi.org/10.1016/S0006-3207(01)00232-4).

Girling, S.J., Campbell-Palmer, R., Pizzi, R., Fraser, M.A., Cracknell, J., Arnemo, J. et Rosell, F. (2015) 'Haematology and serum biochemistry parameters and variations in the eurasian beaver (*Castor fiber*)', *PLoS ONE*, 10(6). Disponible sur : <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0128775>.

Google. (s.d.). Récupéré sur Google Maps: <https://tinyurl.com/3zspk9>. Consulté le 11/8/2022

Graf, P.M., Wilson, R.P., Sanchez, L.C., Hackländer, K. et Rosell, F. (2018) 'Diving behavior in a free-living, semi-aquatic herbivore, the Eurasian beaver *Castor fiber*', *Ecology and Evolution*, 8(2), pp. 997–1008. Disponible sur: <https://doi.org/10.1002/ece3.3726>.

Géoma-SIG. (2020) *Qu'est-ce qu'une couche WMS?*. Disponible sur Géoma-SIG: <https://tinyurl.com/muncs9p4>. Consulté le 20/8/2022

Halley, D., Rosell, F. and Saveljev, A. (2012) 'Population and distribution of Eurasian beaver (*Castor fiber*)', *Baltic Forestry*, 18(1), pp. 168–175.

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

Halley, D.J., Saveljev, A.P. et Rosell, F. (2020) 'Population and distribution of beavers *Castor fiber* and *Castor canadensis* in Eurasia', *Mammal Review*, 51(1), pp. 1–24. Disponible sur: <https://doi.org/10.1111/mam.12216>.

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

Henle, K., Dick, D., Harpke, A., Kühn, I., Schweiger O. et J. Settele. (2008) 'Climate change impacts on European amphibians and reptiles', *Biodiversity and climate change: Reports and guidance developed under the Bern Convention Council of Europe Publishing, Strasbourg, France*, 225-305.

Houbrechts, G., Vaessen, Q. et Peeters, A. (2022) 'Suivi hydro-sédimentaire d'un démantèlement de barrages de castors et impacts sur les habitats des moules d'eau douce', *Bulletin de la Société Géographique de Liège*. Disponible sur : <https://doi.org/10.25518/0770-7576.6606>.

info fauna, Centre Suisse de Cartographie de la Faune (CSCF). (s.d.) *Services Conseil Castor : reproduction*. Disponible sur : <https://tinyurl.com/4xny6vcx>. Consulté le 12/8/2022.

IRM. (2022) *Changement climatique en Belgique, tendance observée en Belgique*. Disponible sur IRM: <https://tinyurl.com/2p9hfmxr>. Consulté le 4/8/2022.

IUCN. (2007) *Species extinction - The facts*. Disponible sur IUCN Red List: <https://www.iucn.org/content/species-extinction>. Consulté le 23/5/2022.

IUCN. (2008) *Rana temporaria*. Disponible sur IUCN Red List: <https://www.iucnredlist.org/species/58734/86470817>. Consulté le 31/5/2022.

IUCN. (2016) *Eurasian beaver (Castor fiber)*. Disponible sur IUCN Red List: <https://www.iucnredlist.org/species/4007/197499749>. Consulté le 31/5/2022.

IUCN. (2021) *The IUCN Red List of Threatened Species*. Disponible sur IUCN: <https://www.iucnredlist.org/>. Consulté le 19/5/2022.

Jacob, J.-P., Percsy, C., de Wavrin, H., Graitson, E., Kinet, T., Denoël, M., Paquay, M., Percsy, N. & Remacle, A. (2007) 'Amphibiens et Reptiles de Wallonie'. *Aves – RAINNE et Centre de Recherche de la Nature, des Forêts et du Bois (MRW - DGRNE)*, Série « Faune - Flore - Habitats » n° 2, Namur. 384 pp. 180-196.

Janiszewski, P., Hanzal, V. and Misiukiewicz, A.W. (2014) 'The Eurasian beaver (*Castor fiber*) as a keystone species - A literature review', *Baltic Forestry*, 20(2), pp. 277–286.

Jernelöv, A. (2007) 'The Long-Term Fate of Invasive Species-Aliens Forever or Integrated Immigrants with Time?', Disponible sur: <https://tinyurl.com/29unt9kr>

Johansson, M. *et al.* (2006) 'Toxicity of six pesticides to common frog (*Rana temporaria*) tadpoles', *Environmental toxicology and chemistry*, 25(12), pp. 3164–3170. Disponible sur: <https://doi.org/10.1897/05-685R1.1>.

Johansson, M., Primmer, C.R. et Merilä, J. (2007) 'Does habitat fragmentation reduce fitness and adaptability? A case study of the common frog (*Rana temporaria*)', *Molecular ecology*. Received 23 February 2007; accepted 20 March 2007, 16(13), pp. 2693–2700. Disponible sur: <https://doi.org/10.1111/j.1365-294X.2007.03357.x>.

Larsen, A., Larsen, J.R. et 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*. Disponible sur: <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2021.103623>.

Laurila, A. et Kujasalo, J. (1999) 'Habitat duration, predation risk and phenotypic plasticity in common frog (*Rana temporaria*) tadpoles', *Journal of Animal Ecology*, 68(6), pp. 1123–1132. Disponible sur: <https://doi.org/10.1046/j.1365-2656.1999.00354.x>.

Law, A., Jones, K.C. et Willby, N.J. (2014) 'Medium vs. short-term effects of herbivory by Eurasian beaver on aquatic vegetation', *Aquatic botany*, 116, pp. 27–34. Disponible sur : <https://doi.org/10.1016/j.aquabot.2014.01.004>.

Leroy, C. (2022) 'Tendances des populations de la grenouille rousse (*Rana temporaria*) en Wallonie : analyse des données courantes et mise en place d'un protocole d'échantillonnage par carrés kilométriques' (à paraître).

Libois, R., Schoeckert, V., Lambinet, C., Richet, J., Campos Martinez, I., Levert, A. et Gautherot, J. (2019) 'Trophic niche of three carnivores in southern Belgium: raccoon (*Procyon lotor*), European badger (*Meles meles*) and stone marten (*Martes foina*)'. Disponible sur : <https://orbi.uliege.be/>

Lustrat, P. (1999) 'Estimation de la taille de la population des Grenouilles rousses (*Rana temporaria*) et des Grenouilles agiles (*Rana dalmatina*) en forêt de Fontainebleau'. *La Voix de la forêt*, 1999/1, pp 39-40

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

Manet, B. (2010) *Castor* (*Castor fiber*). Récupéré sur Portail Biodiversité en Wallonie: <https://tinyurl.com/yck75m42>. Consulté le 31/5/2022.

Manet, B. (2022) *Castor canadensis*. Récupéré sur DEMNA-OFFH: <https://tinyurl.com/2p9h6w7s>. Consulté le 21/8/2022.

Mangiafico, S. (2016) *Kruskal-Wallis Test*. Récupéré sur R companion: <https://tinyurl.com/e4k3f8xz>. Consulté le 20/8/2022.

Meyer, A.H., Schmidt, B.R. et Grossenbacher, K. (1998) 'Analysis of three amphibian populations with quarter-century long time-series', *Proceedings of the Royal Society. B, Biological sciences*, 265(1395), pp. 523–528. Disponible sur : <https://doi.org/10.1098/rspb.1998.0326>.

Natagora. (s.d.) *BEC DU FEYL*. Récupéré sur Natagora: <https://tinyurl.com/456hax5j>. Consulté le 15/8/2022.

Neveu, A. (2009) 'Incidence of climate on common frog breeding: Long-term and short-term changes', *Acta Oecologica*, 35(5), pp. 671–678. Disponible sur : <https://doi.org/10.1016/j.actao.2009.06.012>.

Observations.be. (s.d.). Récupéré sur Observations.be: <https://observations.be/>. Consulté le 13/8/2022.

OFFH - DEMNA. (s.d.). Récupéré sur OFFH: <https://tinyurl.com/y3r7rk9u>. Consulté le 12/8/2022.

Oro, D., Genovart, M., Tavecchia, V., Fowler, M.S. et Martinez-Abraín, A. (2013) 'Ecological and evolutionary implications of food subsidies from humans', *Ecology Letters*, 16(12), pp. 1501–1514. Disponible sur: <https://doi.org/10.1111/ele.12187>.

Parker, H., Nummi, P., Hartman, G. et Rosell, F. (2012) 'Invasive North American beaver *Castor canadensis* in Eurasia: A review of potential consequences and a strategy for eradication', *Wildlife Biology*, 18(4), pp. 354–365. Disponible sur: <https://doi.org/10.2981/12-007>.

Pinto, B., Santos, M.J. et Rosell, F. (2009) 'Habitat selection of the Eurasian beaver (*Castor fiber*) near its carrying capacity: an example from Norway', *Canadian Journal of Zoology*, 87(4), pp. 317–325. Disponible sur : <https://doi.org/10.1139/Z09-015>.

Portail Wallonie. (s.d.). Disponible sur Portail Biodiversité en Wallonie: <https://tinyurl.com/42wwhbkd>. Consulté le 12/8/2022.

Portail Wallonie. (2022) *Grenouille rousse (Rana temporaria)*. Disponible sur Portail Biodiversité en Wallonie: <https://tinyurl.com/3wa9k3rk>. Consulté le 19/6/2022.

QGIS Development Team, 2020. 'QGIS Geographic Information System'. *Open-source Geospatial Foundation*. Disponible sur: <http://qgis.org>. Consulté le 14/8/2022.

Reid, N., Dingerkus, S.K., Stone, R.E., Buckley, J., Beebee, T.J.C., Marnell, F. et Wilkinson, J.W. (2014) 'Assessing Historical and Current Threats to Common Frog (*Rana temporaria*) Populations in Ireland', *Journal of herpetology*, 48(1), pp. 13–19. Disponible sur : <https://doi.org/10.1670/12-053>.

Richard, P.B. (1973) 'Le gîte du castor du Rhône (*Castor fiber*) description et comportement constructeur', *Revue d'Ecologie, Terre et Vie*, (1), pp. 3–32. Disponible sur: <https://tinyurl.com/2wxb2zuy>

Romashova, N.B. (2016) 'History of conservation and research activities of the Eurasian beaver (*Castor fiber*) in the Voronezhsky Nature Reserve', *Russian Journal of Theriology*, 15(1), pp. 8–19. Disponible sur: <https://doi.org/10.15298/rusjtheriol.15.1.03>.

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

Rosell, F., Bergan, F. and Parker, H. (1998) 'Scent-marking in the Eurasian beaver (*Castor fiber*) as a means of territory defense', *Journal of Chemical Ecology*, 24(2), pp. 207–219. Disponible sur: <https://doi.org/10.1023/a:1022524223435>.

Rosell, F. et Thomsen, L.R. (2006) 'Sexual dimorphism in territorial scent marking by adult Eurasian beavers (*Castor fiber*)', *Journal of Chemical Ecology*, 32(6), pp. 1301–1315. Disponible sur: <https://doi.org/10.1007/s10886-006-9087-y>.

RStudio Team (2020). 'RStudio: Integrated Development for R', *RStudio*, PBC, Boston, Disponible sur: <http://www.rstudio.com/>. Consulté le 12/8/2022.

Ryelandt, P. (2018) 'Influence des sites à castors sur la reproduction de la grenouille rousse', *Ardenne & Gaume*, n°8, pp20-21. Disponible sur : <https://tinyurl.com/3m2rmbm4>

Ryelandt, P. (2022), 'Evolution divergente du pouvoir reproducteur de la Grenouille rousse sur deux sites à Castors', *Echo des Rainettes* (à paraître).

Ryser, J. (1989) 'Weight loss, reproductive output, and the cost of reproduction in the common frog, *Rana temporaria*', *Oecologia*, 78(2), pp. 264–268. Disponible sur: <https://doi.org/10.1007/BF00377165>.

Sequeiros, L.C.M., Castán, N.P. and Soler, A.P. (2018) 'Effect of fish stocking on alpine populations of European common frog (*Rana temporaria*) in the Pyrénées National Park', *Herpetological Journal*, 28(1), pp. 43–49. Disponible sur: <https://tinyurl.com/2p99es2u>

STHDA. (s.d.)^[a] *Unpaired Two-Samples T-test in R*. Disponible sur STHDA: <https://tinyurl.com/mumw46zz>. Consulté le 12/7/2022.

STHDA. (s.d.)^[b] *One-way ANOVA Test in R*. Disponible sur STHDA: <https://tinyurl.com/4fs56e3k>. Consulté le 12/7/2022.

Stringer, A.P. et Gaywood, M.J. (2016) 'The impacts of beavers *Castor spp.* on biodiversity and the ecological basis for their reintroduction to Scotland, UK', *Mammal Review*, 46(4), pp. 270–283. Disponible sur : <https://doi.org/10.1111/mam.12068>.

Syrůčková, A., Saveljev, A.P., Frosch, C., Durka, W., Savelyev, A.A. et Munclinger, P. (2015) 'Genetic relationships within colonies suggest genetic monogamy in the Eurasian beaver (*Castor fiber*)', *Mammal Research*, 60(2), pp. 139–147. Disponible sur : <https://doi.org/10.1007/s13364-015-0219-z>.

Valerio O., Hagge, J., Gossner, M.M., Müller, J. et Heurich, M. (2022) 'A Biodiversity Boost From the Eurasian Beaver (*Castor fiber*) in Germany's Oldest National Park', *Frontiers in ecology and evolution*, 10. Disponible sur: <https://doi.org/10.3389/fevo.2022.873307>.

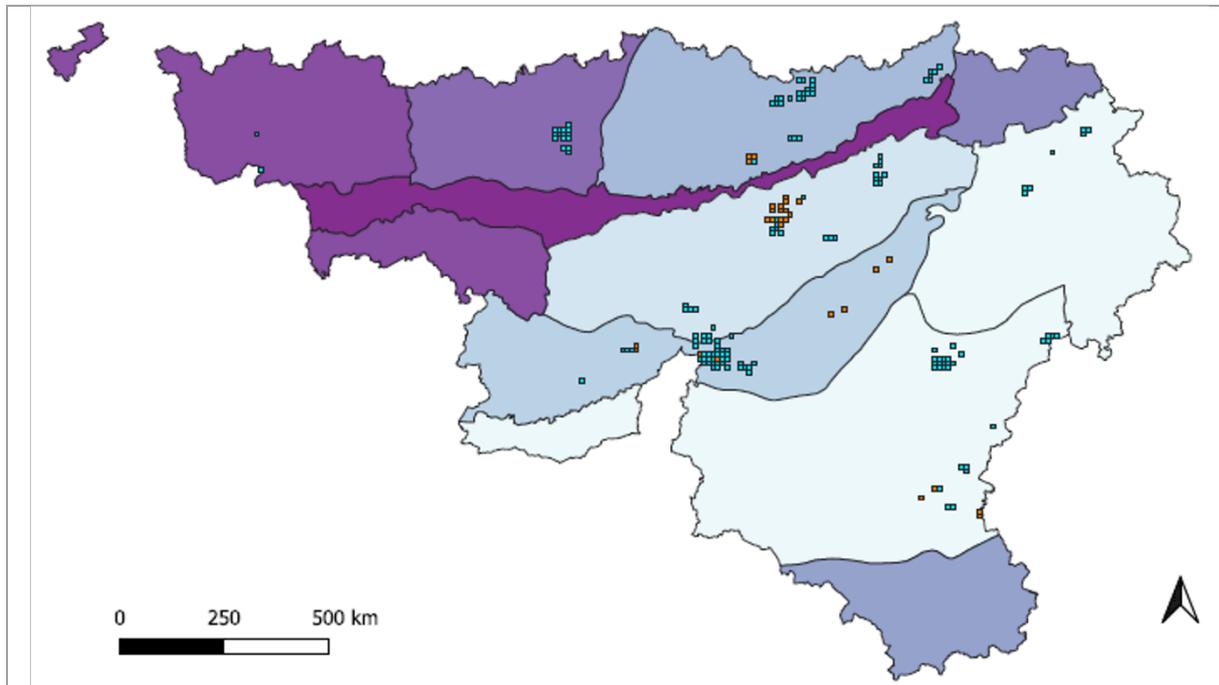
Veron, G. (1992) 'Histoire biogéographique du castor d'Europe, *Castor fiber* (rodentia, mammalia)', *Mammalia*, 56(1), pp. 87–108. Disponible sur: <https://doi.org/10.1515/mamm.1992.56.1.87>.

Wróbel, M. (2020) 'Population of Eurasian beaver (*Castor fiber*) in Europe', *Global Ecology and Conservation*, 23. Disponible sur: <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2020.e01046>.

ANNEXES

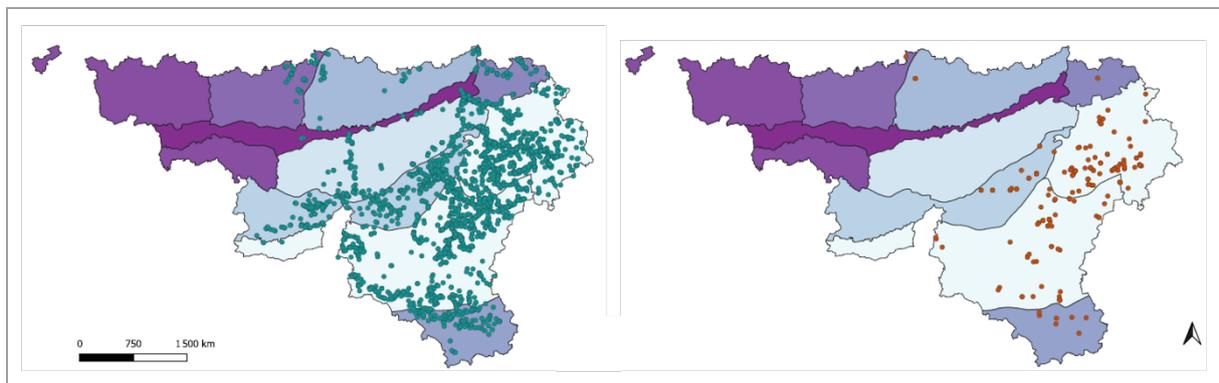
Annexe 1 : répartition géographique des carrés prioritaires

Les carrés prioritaires de Wallonie sont en bleu sur la carte, et ceux choisis pour les analyses concernant l'état des populations de grenouilles rousses sont en orange sur la carte.



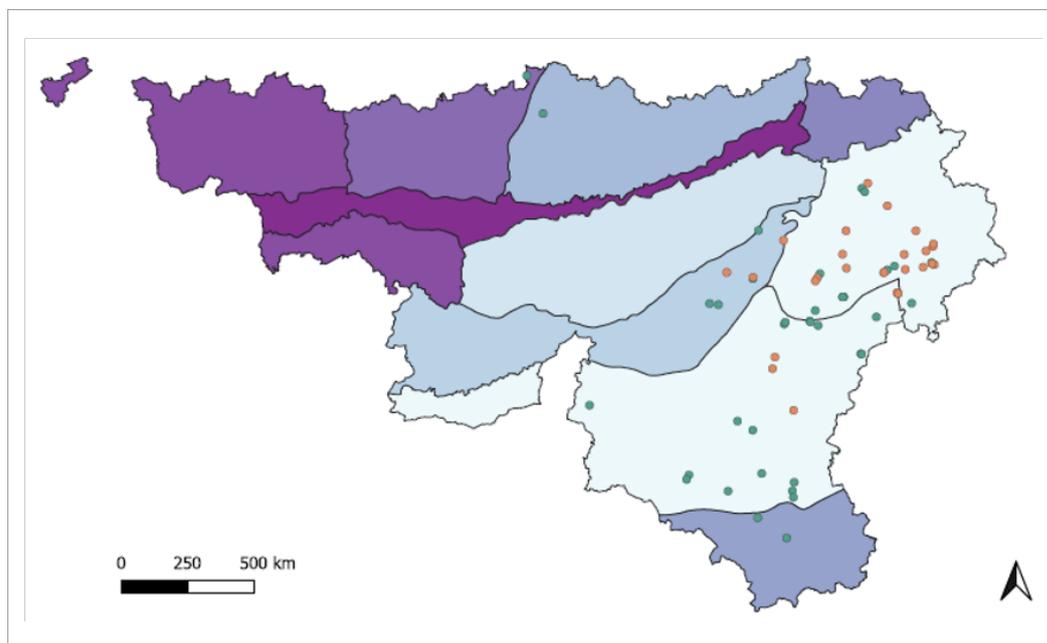
Annexe 2 : sites sélectionnés en Wallonie

À gauche, les sites sélectionnés suite à la recherche manuelle du mot « barrage » dans la table d'attributs. À droite, sites sélectionnés suite à l'application d'un buffer de 50m sur les cours d'eau non navigables de troisième catégorie.



Annexe 3 : sites sélectionnés en Wallonie sur base de l'accessibilité

Les « vieux sites » à castors apparaissent en vert sur la carte, et les jeunes sites à castors apparaissent en orange sur la carte.



Annexe 4 : tableau des dates auxquelles les passages ont été effectués dans les deux régions d'intérêt

Région	Carré	Catégorie	Passage1	Passage2	Passage3
Nassogne	J74313	Vieux	20/3	27/3	8/3
	J74131	Vieux	13/3	25/3	10/4
	J74132	Vieux	13/3	25/3	10/4
	J73313	Vieux	13/3	26/3	13/4
	J72333	Vieux	12/3	23/3	8/3
	J64844	Jeune	13/3	25/3	10/4
	J64822	Jeune	13/3	26/3	6/4
	J73133	Jeune	12/3	25/3 et 26/3	13/4
	J73111	Jeune	12/3	23/3	6/4
	J72331	Jeune	12/3	23/3	6/4
	J74113	Sans	20/3	27/3	8/3
	J74111	Sans	17/3	27/3	8/3
	J73224	Sans	16/3	23/3	8/3
	J73112	Sans	20/3	27/3	10/4
	J72323	Sans	16/3	23/3	8/3
Vielsalm	H84144	Vieux	15/3	28/3	15/4
	H82223	Vieux	18/3 (bas du carré) et 16/3 haut du carré	30/3	14/4

	H82224	Vieux	16/3 et 18/3 haut du carré)	30/3	14/4
	H82514	Vieux	24/3	5/4	16/4
	H82512	Vieux	24/3	4/4	16/4
	H74831	Jeune	21/3	2/4	17/4
	H83242	Jeune	15/3	28/3	15/4
	H82234	Jeune	21/3	2/4	17/4
	H82244	Jeune	18/3	2/4	14/4
	H81521	Jeune	19/3	4/4	16/4
	H74741	Sans	21/3	2/4	17/4
	H84231	Sans	15/3	28/3	15/4
	H83224	Sans	15/3	28/3	15/4
	H83212	Sans	15/3	28/3	15/4
	H82221	Sans	16/3	28/3	14/4

Annexe 5 : géolocalisation au sein d'un carré kilométrique sur Google Maps (via son smartphone)



Annexe 6 : remplissage des champs de l'application iObs concernant le comptage des pontes de grenouilles rouses

The screenshot shows the 'Ajouter' (Add) form in the iObs application. The form is titled 'Ajouter' and has a green header. Below the header, there are three icons: a clock, a location pin, and a key. The form contains several fields and controls:

- Grenouille rousse >**: Species selection.
- 15 ponte(s) présent**: Current count and status.
- Nombre**: A numeric input field with a value of 15, flanked by minus and plus buttons.
- Genre**: A selection field with minus, male (♂), and female (♀) options.
- Apparence**: A dropdown menu currently showing 'ponte(s) >'.
- Activité**: A dropdown menu currently showing 'présent >'.
- Remarques**: A text area containing 'Mare sur site à castors'.
- Certain**: A toggle switch that is currently turned on (green).
- Echappé**: A toggle switch that is currently turned off (grey).
- Comptage**: A dropdown menu currently showing 'estimation >'.
- Méthode**: A dropdown menu currently showing 'vu >'.

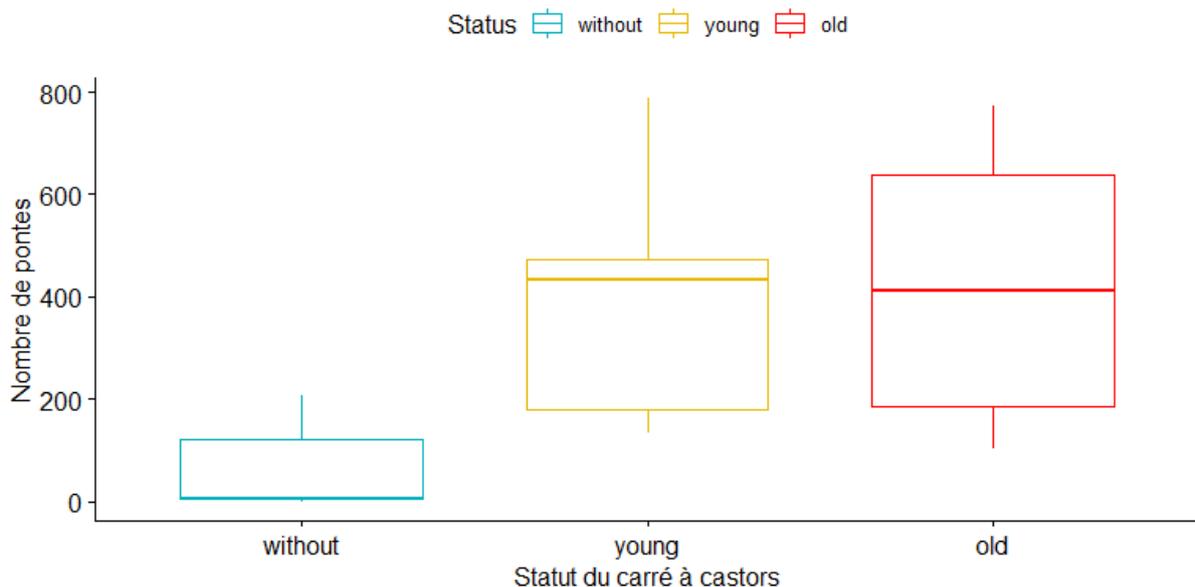
At the bottom of the form, there is a navigation bar with four icons: a blue star, a camera, a list with a plus sign, and a green 'Sauver' (Save) button.

Annexe 7 : aperçu du jeu de données utilisé pour les analyses statistiques visant à identifier le rôle du castor sur les populations de grenouilles rousses

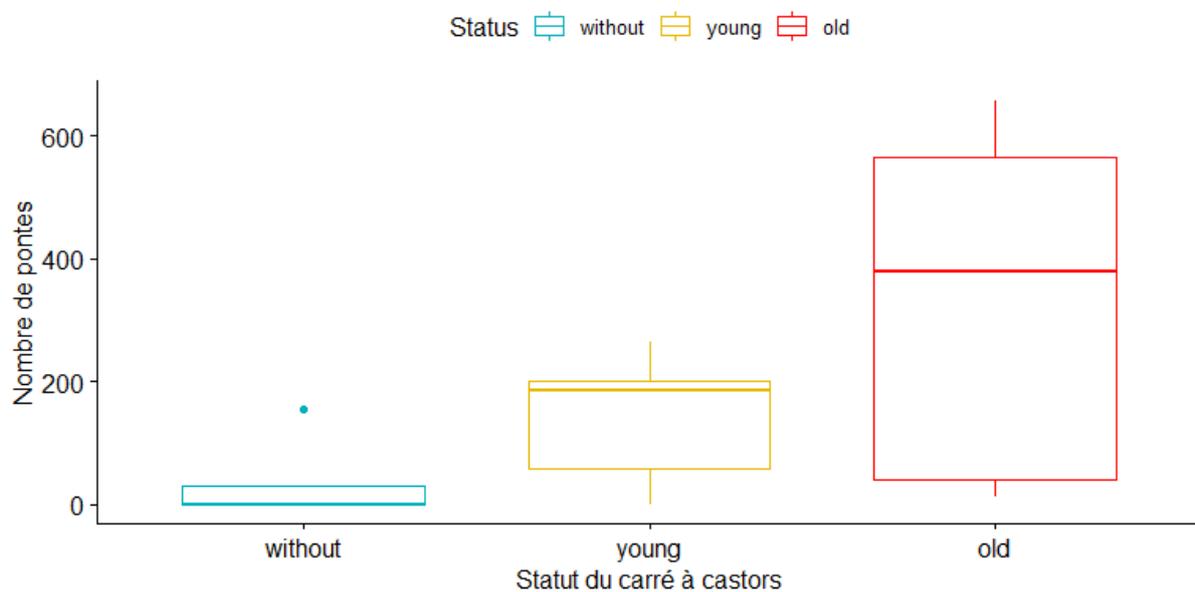
1	IFBL	id	date	number	pontes	lat	lng	local x	local y	Status	Region	
2	J72331	235373990	20220312		3	1	50.131523	5.554076	234744	91826	young	Nassogne
3	J72331	235373991	20220312		0	0	50.126153	5.54896	234388	91223	young	Nassogne
4	J72331	235373992	20220312		0	0	50.126051	5.549095	234398	91211	young	Nassogne
5	J72331	235373993	20220312		0	0	50.125857	5.549006	234392	91190	young	Nassogne
6	J72331	235374010	20220312		0	0	50.126644	5.547684	234296	91276	young	Nassogne
7	J72331	235374011	20220312		0	0	50.126729	5.547601	234290	91285	young	Nassogne
8	J72331	235374013	20220312		0	0	50.125837	5.548225	234336	91187	young	Nassogne
9	J72331	236180223	20220323		3	1	50.131294	5.554197	234753	91800	young	Nassogne
10	J72331	236180224	20220323		100	1	50.131105	5.554427	234770	91780	young	Nassogne
11	J72331	236000280	20220323		0	0	50.125886	5.548412	234349	91192	young	Nassogne
12	J72331	236984786	20220406		0	0	50.131177	5.554813	234798	91788	young	Nassogne
13	J72331	237091171	20220408		0	0	50.125817	5.549109	234399	91185	young	Nassogne
14	J72331	237091172	20220408		0	0	50.125952	5.548916	234385	91200	young	Nassogne
15	J72331	237091174	20220408		25	1	50.125934	5.548878	234383	91198	young	Nassogne
16	J72331	237591358	20220408		2	1	50.12586	5.548271	234339	91189	young	Nassogne
17	J72333	235373995	20220312		0	0	50.12559	5.549414	234422	91161	old	Nassogne
18	J72333	235373996	20220312		0	0	50.125284	5.549482	234427	91127	old	Nassogne
19	J72333	235373997	20220312		0	0	50.125346	5.549638	234438	91134	old	Nassogne
20	J72333	235373998	20220312		0	0	50.123543	5.550967	234536	90935	old	Nassogne
21	J72333	235373999	20220312		0	0	50.123236	5.55076	234522	90900	old	Nassogne
22	J72333	235374000	20220312		0	0	50.12393	5.551021	234539	90978	old	Nassogne
23	J72333	235374001	20220312		0	0	50.124079	5.5498	234452	90993	old	Nassogne

Annexe 8 : outliers identifiés au moyen de boxplots et outliers extrêmes identifiés à l'aide d'une fonction sur R

Boxplots du nombre de pontes par catégorie de carré à Nassogne (aucun outlier n'a été identifié)

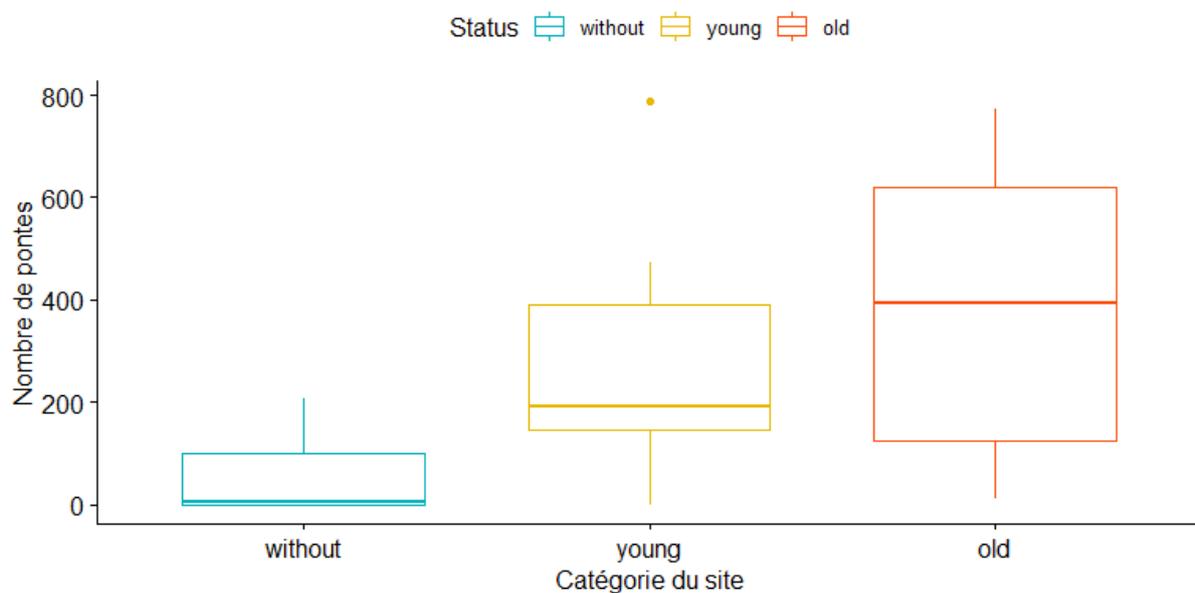


Boxplot du nombre de pontes par catégorie de carré à Vielsalm, et tableau des outliers extrêmes



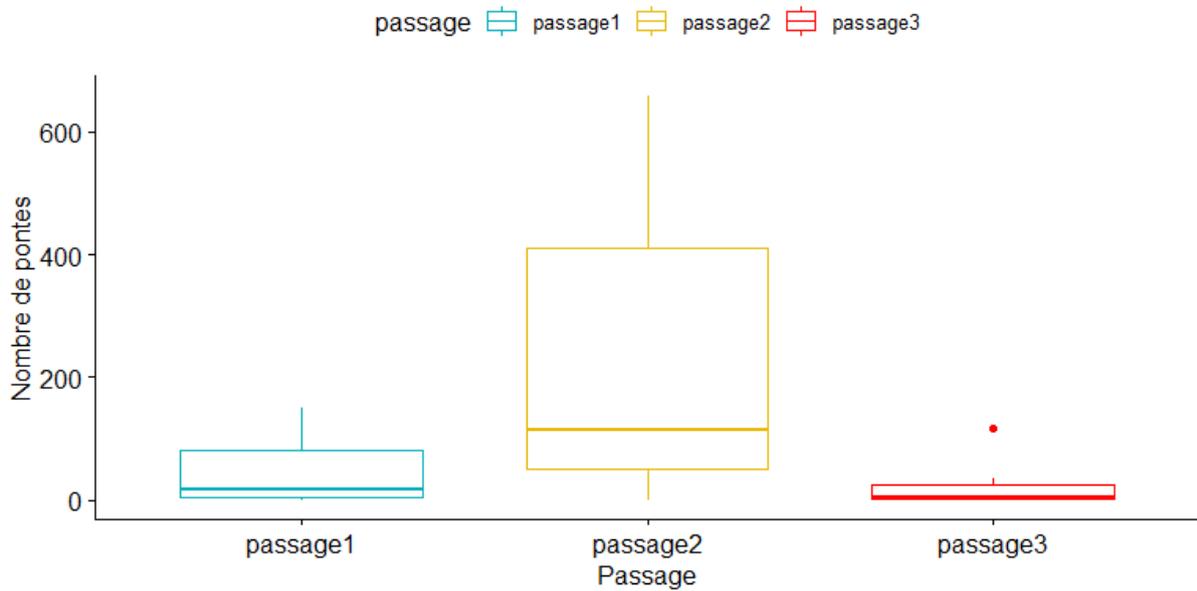
Statut	IFBL	Nombre	Outlier ?	Extreme ?
« Sans »	H83224	155	OUI	NON

Boxplot du nombre de pontes par catégorie de carré indépendamment de la région (la région de Vielsalm et de Nassogne remises ensemble suite à l'application du test de Wilcoxon-Mann-Whitney) et tableau des outliers extrêmes



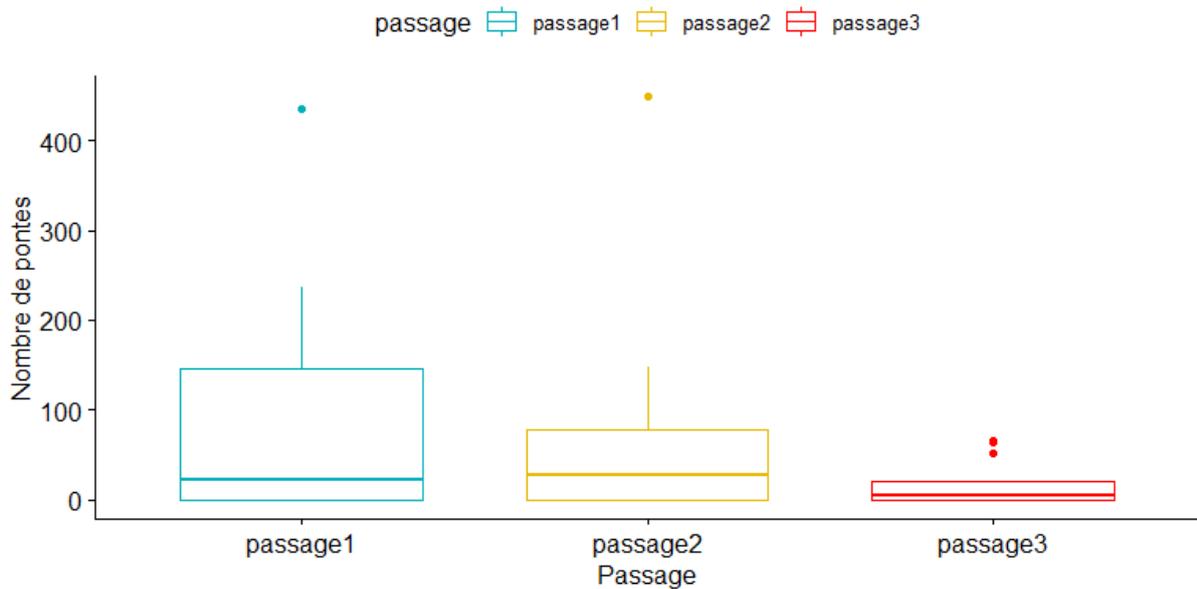
Statut	IFBL	Nombre	Outliers ?	Extrême ?
Jeune	J73133	787	Oui	Non

Boxplot du nombre de pontes trouvées par passage à Nassogne et tableau des extrêmes



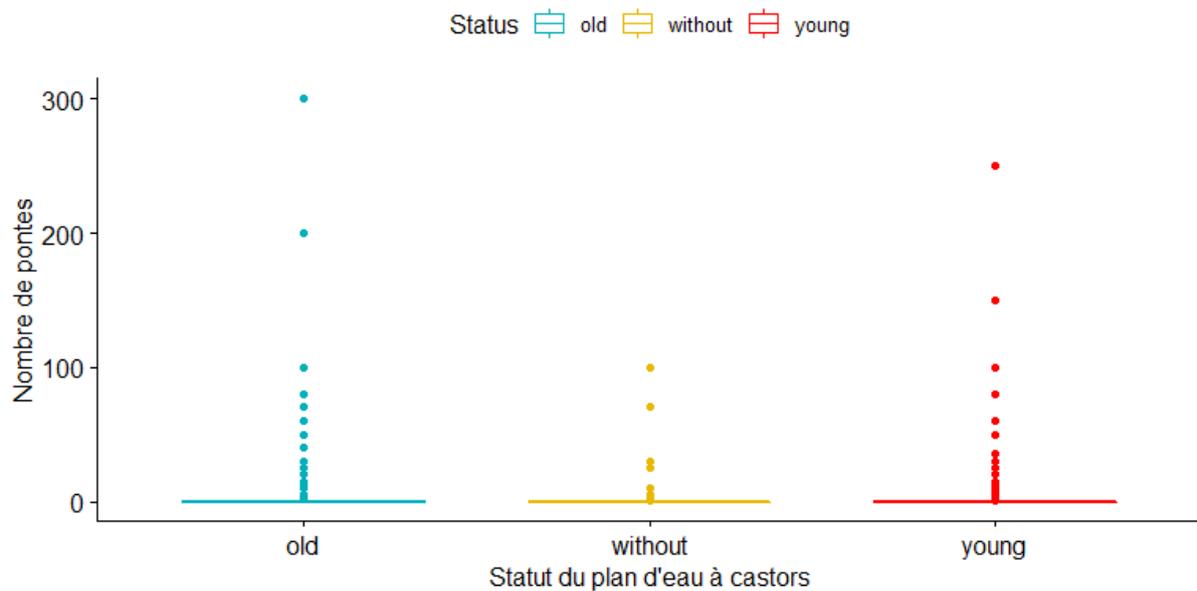
Statut	IFBL	Nombre	Outliers ?	Extrême ?
Passage3	J74132	1	Oui	Oui

Boxplot du nombre de pontes trouvées par passage à Nassogne et tableau des extrêmes

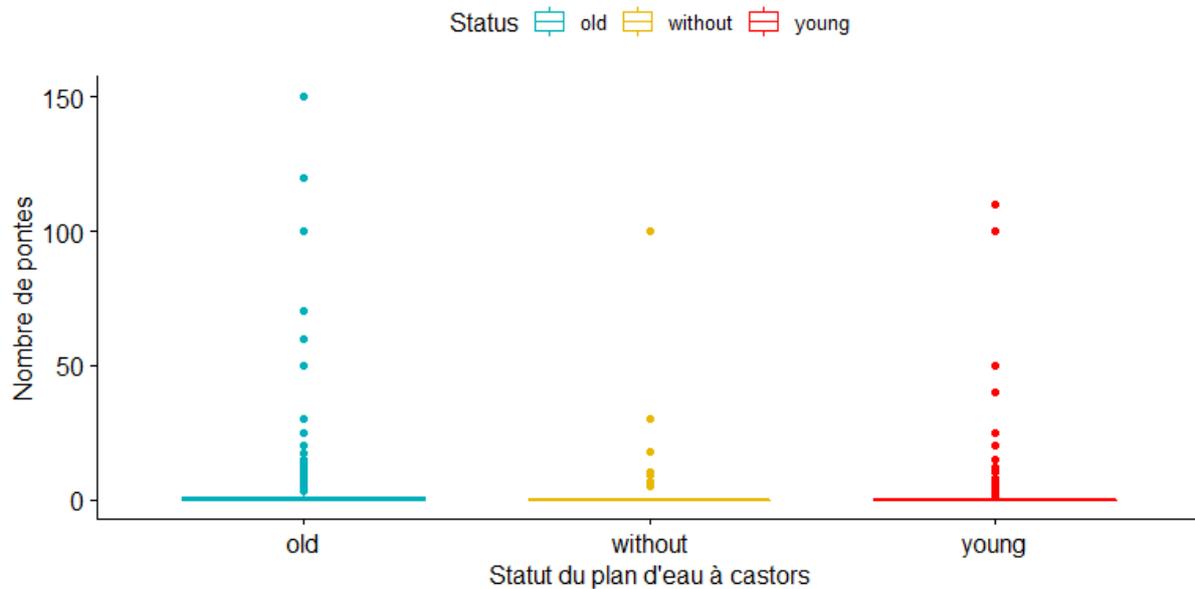


Statut	IFBL	Nombre	Outliers ?	Extrême ?
Passage1	H82512	435	Oui	Non
Passage2	H82224	449	Oui	Oui
Passage3	H83242	63	Oui	Non
Passage3	H82512	51	Oui	Non
Passage3	H82514	65	Oui	Non

Boxplot du nombre de pontes trouvées par plan d'eau dans chaque catégorie de carré à Nassogne



Boxplot du nombre de pontes trouvées par plan d'eau dans chaque catégorie de carré à Vielsalm



Annexe 9 : tableaux récapitulatifs des résultats des GLM

Tableau des résultats du **modèle 1a** :

Variable réponse	Variable explicative	p-valeur	Coefficient
Nombre de pontes de grenouilles rousses/carré kilométrique	Année	$<2*10^{-16}$	-0.154

Tableau des résultats du **modèle 1b** :

Variable réponse	Variables explicatives	p-valeur	Coefficients
Nombre de pontes de grenouilles rousses/carré kilométrique	Année	0.078	-0.076
	Condroz	$8.45*10^{-4}$	- 293.25
	Famenne	$4.47*10^{-7}$	363.40
	Limon	$1.40*10^{-11}$	596.03
	Temps-Condroz	$7.79*10^{-4}$	0.146
	Temps-Famenne	$4.64*10^{-5}$	- 0.179
	Temps-Limon	$1.67*10^{-11}$	-0.294

Tableau des résultats du **modèle 2a** :

Variable réponse	Variable explicative	p-valeur	Coefficient
Données de pontes normalisées/carré kilométrique	Année	0.029	-0.044

Tableau des résultats du **modèle 2b** :

Variable réponse	Variabes explicatives	p-valeur	Coefficients
Données de pontes normalisées/carré kilométrique	Année	0.82	-0.02
	Condroz	0.86	- 37.80
	Famenne	0.72	76.55
	Limon	0.45	190.58
	Temps-Condroz	0.860	0.019
	Temps-Famenne	0.723	- 0.038
	Temps-Limon	0.448	-0.094

Annexe 10 : résultats des tests de normalité et d’homoscédasticité concernant l’évaluation de l’impact du castor sur la grenouille rousse.

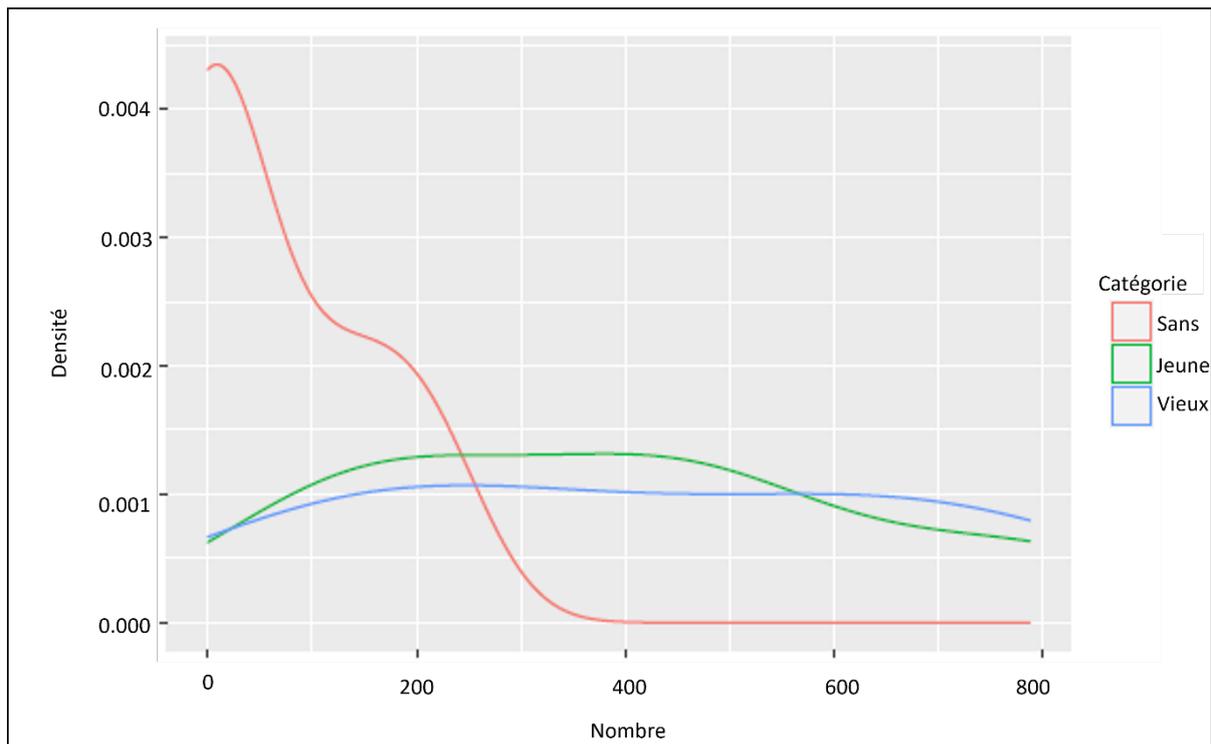
Q1 : Sur quelle catégorie de carré à castors y-avait-t-il le plus de pontes de grenouilles rousses ?

1. Test effectués sur le nombre moyen de pontes trouvées par catégorie de carrés kilométriques

1.1.Nassogne

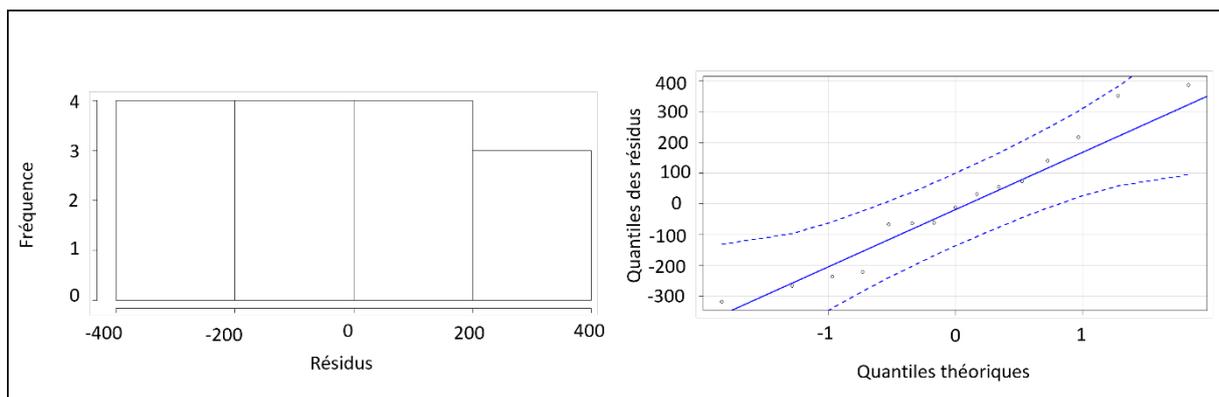
Test de Shapiro-Wilk effectué sur le nombre moyen de pontes trouvées dans chaque catégorie de carré à Nassogne, et représentation graphique, dans le cadre du T-test :

Catégorie du carré	Valeur du test	p-valeur
Vieux	0.94	0.65
Jeune	0.93	0.57
Sans	0.79	0.06



Normalité des résidus du jeu de données de la région de Nassogne, calculée au moyen du test de Shapiro-Wilk, et représentée par un histogramme et un Q-Q plot, dans le cadre de la one-way ANOVA :

Valeur du test	p-valeur
0.63	0.96



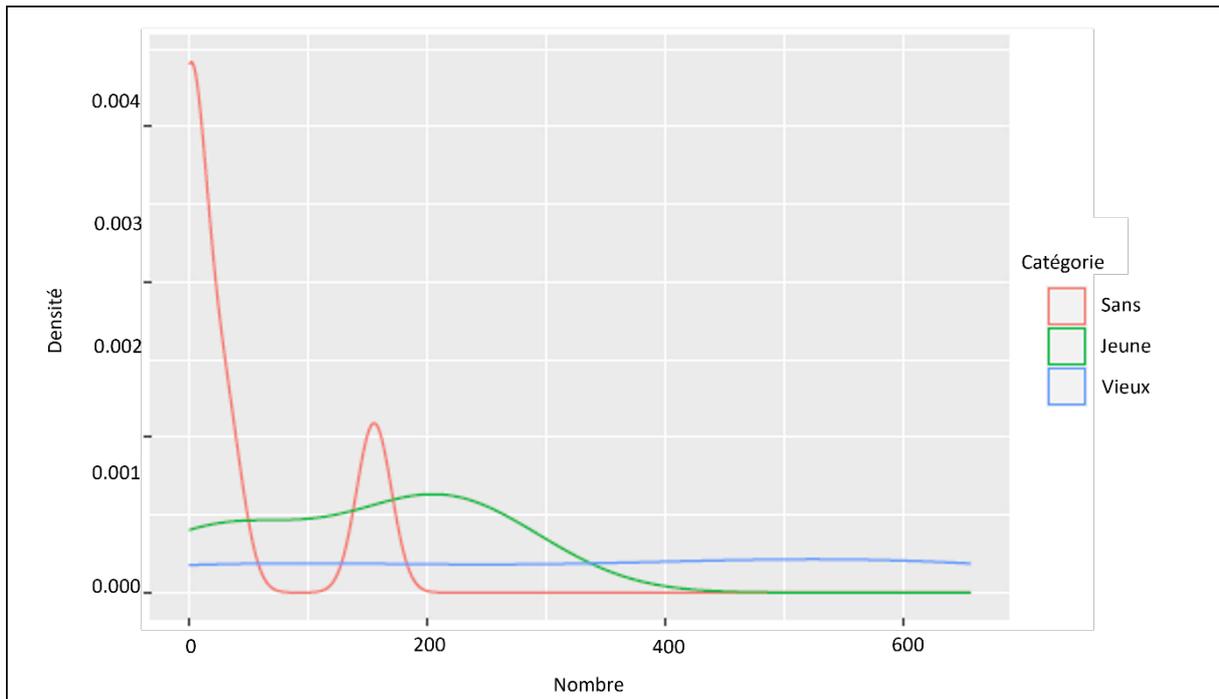
Test de Bartlett effectué dans la région de Nassogne, dans le cadre de la one-way ANOVA :

Valeur du test	p-valeur
3.99	0.14

1.2.Vielsalm

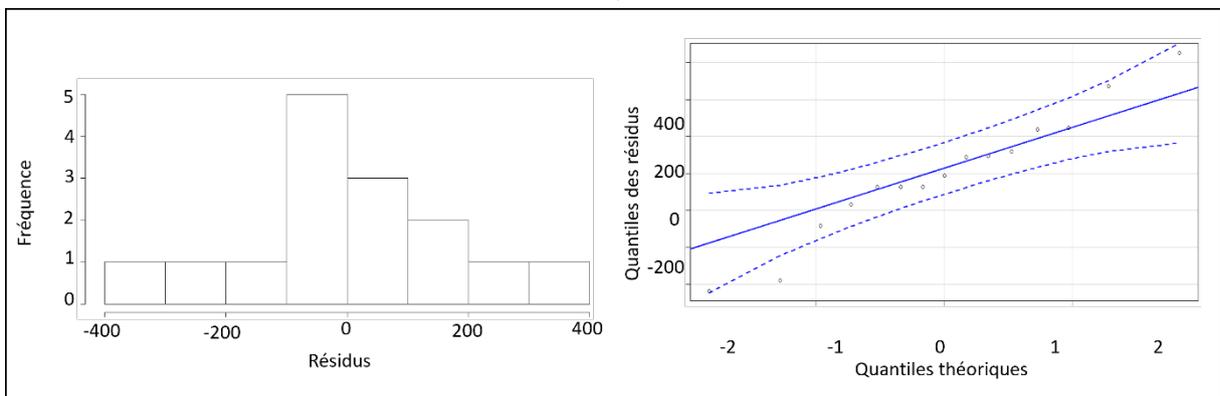
Test de Shapiro-Wilk effectué sur le nombre moyen de pontes trouvées dans chaque catégorie de carrés à Vielsalm, et représentation graphique, dans le cadre du test de Wilcoxon-Mann-Whitney :

Catégorie du carré	Valeur du test	p-valeur
Vieux	0.88	0.32
Jeune	0.93	0.59
Sans	0.67	0.005



Normalité des résidus du jeu de données de la région de Vielsalm, calculée au moyen du test de Shapiro-Wilk, et représentée par un histogramme et un Q-Q plot, dans le cadre du test de Kruskal-Wallis :

Valeur du test	p-valeur
0.97	0.81



Test de Bartlett effectué sur le jeu de données de la région de Vielsalm, dans le cadre du test de Kruskal-Wallis :

Valeur du test	p-valeur

7.82	0.02
------	------

Normalité des résidus et homoscedasticité de la région de Vielsalm, sans les outliers:

Valeur du test	p-valeur
Shapiro-Wilk : 0.97	0.81
Test de Bartlett : 77.07	$< 2*10^{-16}$

1.3. Jeu de données combiné (où les deux régions ont été regroupées)

F-test effectué dans le but de vérifier l'homoscedasticité au sein d'une catégorie, entre les deux régions d'intérêt, dans le cadre du test de Wilcoxon-Mann-Whitney :

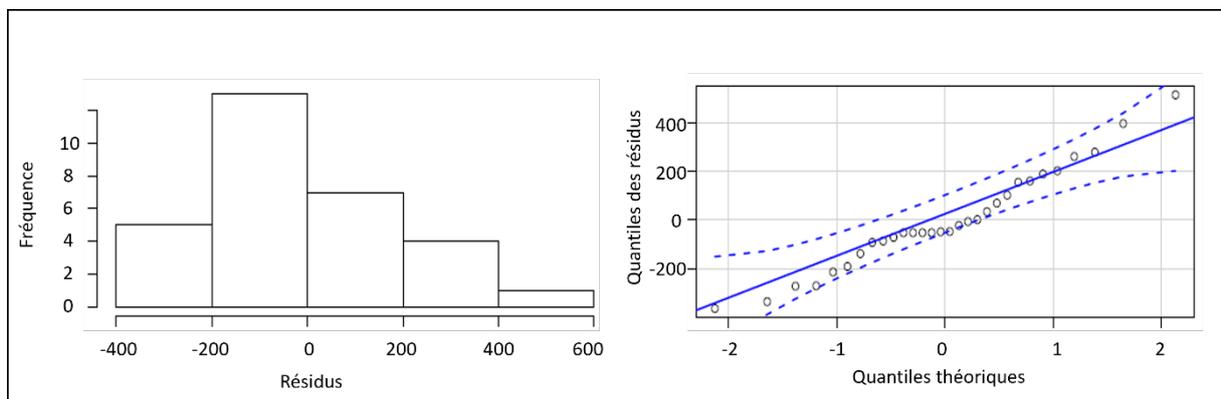
Catégorie du carré	Valeur du test	p-valeur
Vieux	0.94	0.95
Jeune	5.79	0.11
Sans	1.95	0.93

F-test réalisé dans le but de vérifier l'homoscedasticité au sein d'une catégorie, entre les deux régions d'intérêt, sans les outliers, dans le cadre du test de Wilcoxon-Mann-Whitney :

Catégorie du carré	Valeur du test	p-valeur
Vieux	0.94	0.95
Jeune	5.79	0.12
Sans	39.12	0.012

Normalité des résidus du jeu de données global, combinant les deux régions d'intérêt, calculée au moyen du test de Shapiro-Wilk, et représentée par un histogramme et un Q-Q plot, dans le cadre du test de Kruskal-Wallis :

Valeur du test	p-valeur
0.97	0.49



Test de Bartlett effectué sur le jeu de données combinant les deux régions d'intérêt, dans le cadre du test de Kruskal-Wallis :

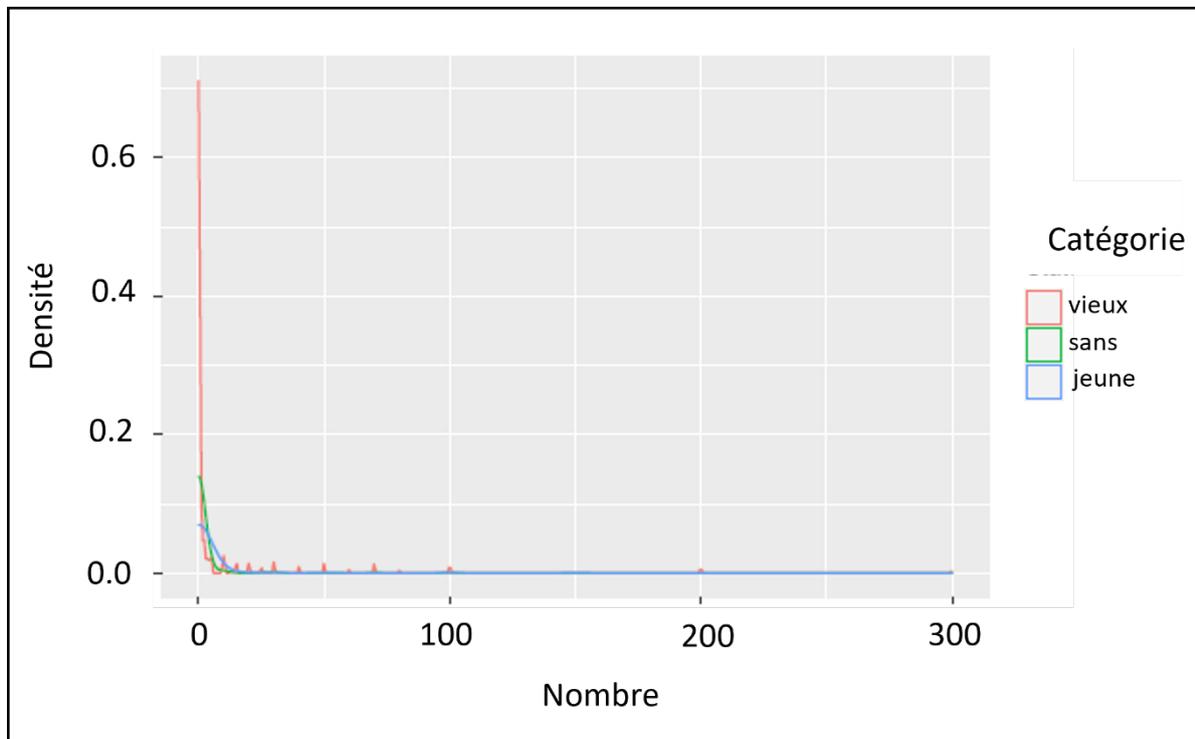
Valeur du test	p-valeur
11.33	$3.46 \cdot 10^{-3}$

2. Test effectués sur le nombre moyen de pontes trouvées par point d'eau au sein des différentes catégories de carrés kilométriques

2.1. Nassogne

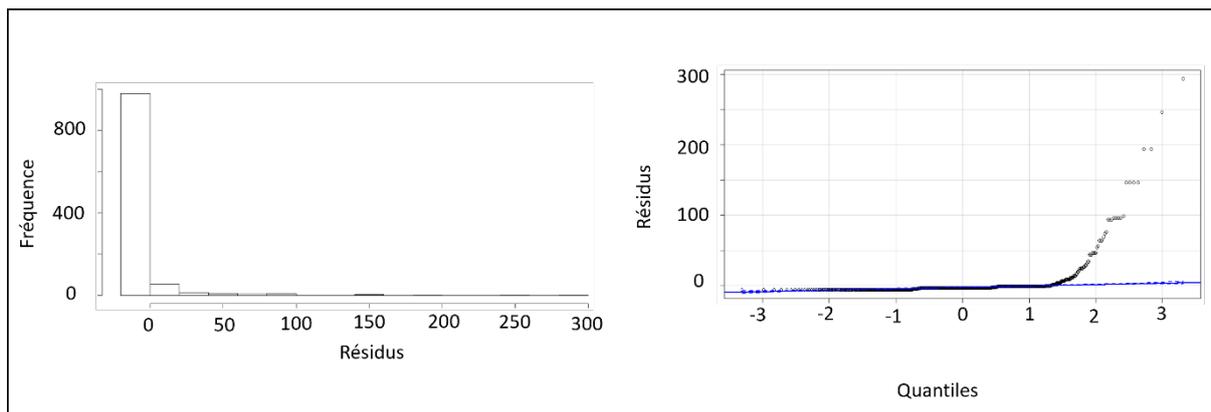
Test de Shapiro-Wilk effectué sur le nombre moyen de pontes trouvées dans les plans d'eau de chaque catégorie de carré à Nassogne, et représentation graphique, dans le cadre du test de Wilcoxon-Mann-Whitney :

Catégorie du carré	Valeur du test	p-valeur
Vieux	0.25	$2 \cdot 10^{-16}$
Jeune	0.19	$2 \cdot 10^{-16}$
Sans	0.16	$2 \cdot 10^{-16}$



Normalité des résidus du jeu de données de Nassogne, calculée au moyen du test de Shapiro-Wilk, et représentée par un histogramme et un Q-Q plot, dans le cadre du test de Kruskal-Wallis :

Valeur du test	p-valeur
0.24	$2 \cdot 10^{-16}$



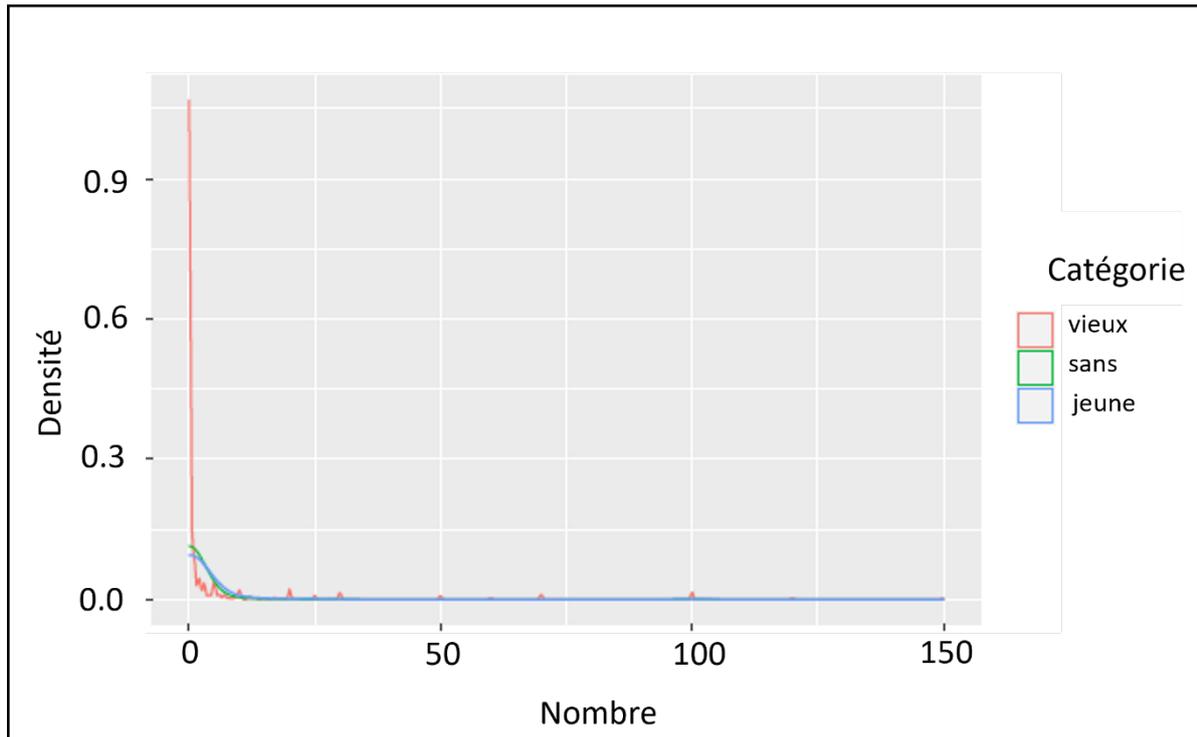
Test de Levene effectué sur le jeu de données de Nassogne, dans le cadre du test de Kruskal-Wallis :

Valeur du test	p-valeur
3.59	0.027

2.2.Vielsalm

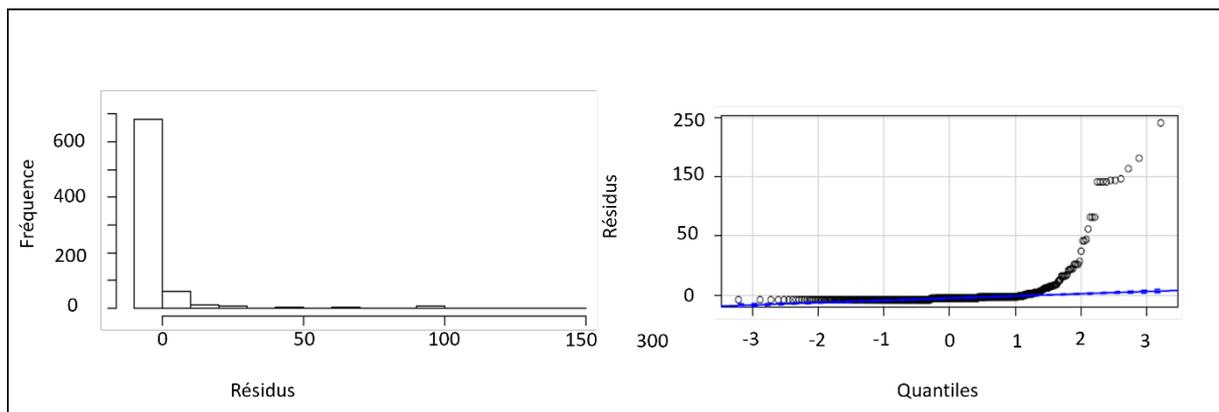
Test de Shapiro-Wilk effectué sur le nombre moyen de pontes trouvées dans les plans d'eau chaque catégorie de carré à Vielsalm, et représentation graphique, dans le cadre du test de Wilcoxon-Mann-Whitney :

Catégorie du carré	Valeur du test	p-valeur
Vieux	0.27	$2 \cdot 10^{-16}$
Jeune	0.23	$2 \cdot 10^{-16}$
Sans	0.14	$2 \cdot 10^{-16}$



Normalité des résidus du jeu de données de Vielsalm, calculée au moyen du test de Shapiro-Wilk, et représentée par un histogramme et un Q-Q plot, dans le cadre du test de Kruskal-Wallis:

Valeur du test	p-valeur
0.27	$2 \cdot 10^{-16}$



Test de Levene effectué sur le jeu de données de Vielsalm, dans le cadre du test de Kruskal-Wallis :

Valeur du test	p-valeur
1.73	0.18

F-test réalisé dans le but de vérifier l'homoscédasticité au sein d'une catégorie, entre les deux régions d'intérêt, sans les outliers, dans le cadre du test de Wilcoxon-Mann-Whitney :

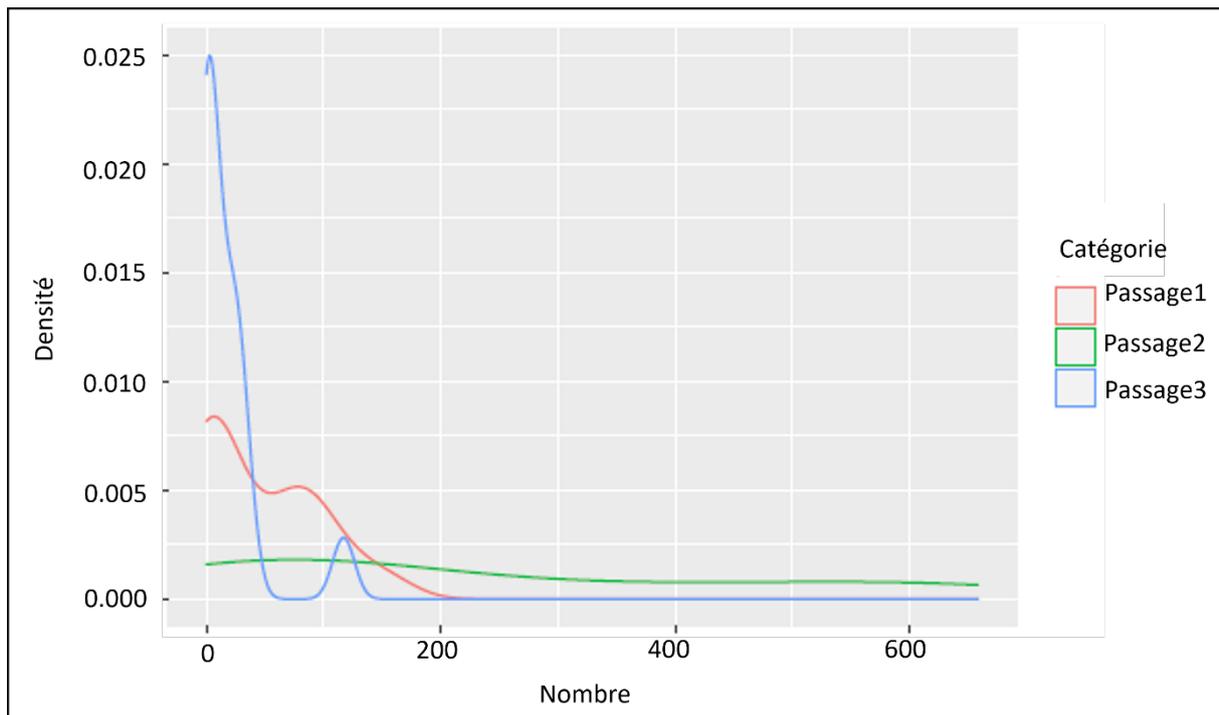
Catégorie du carré	Valeur du test	p-valeur
Vieux-vieux	2.69	$2*10^{-16}$
Jeune-jeune	2.68	$2*10^{-16}$
Sans-sans	0.84	$2*10^{-16}$

Q2 : Trouve-t-on plus ou moins de pontes entre les passages ?

1. Nassogne

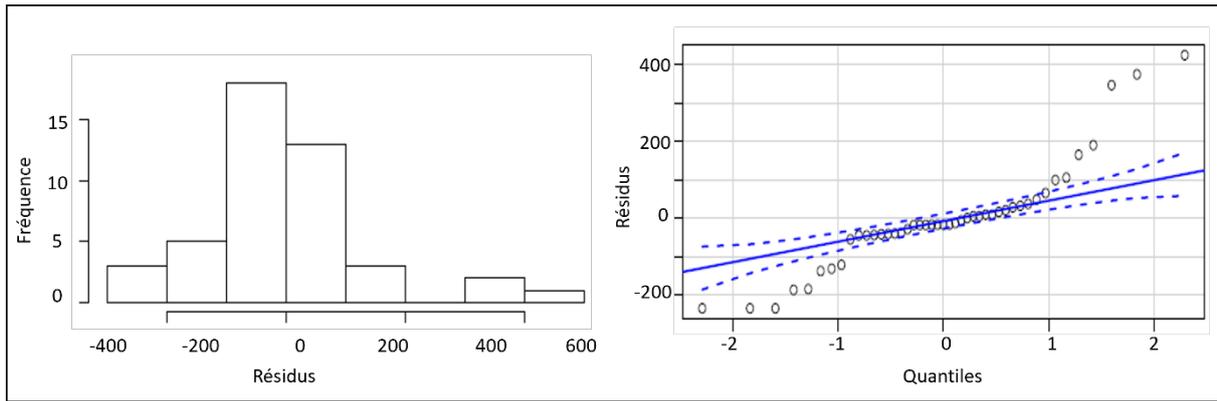
Test de Shapiro-Wilk effectué sur le nombre moyen de pontes trouvées par passage à Nassogne, et représentation graphique, dans le cadre du test de Wilcoxon-Mann-Whitney :

Passage	Valeur du test	p-valeur
Passage 1	0.84	0.02
Passage 2	0.85	0.02
Passage 3	0.62	$3.64*10^{-5}$



Normalité des résidus du jeu de données de la région de Nassogne, calculée au moyen du test de Shapiro-Wilk, et représentée par un histogramme et un Q-Q plot, dans le cadre du test de Kruskal-Wallis :

Valeur du test	p-valeur
0.86	$1.05*10^{-5}$



Test de Levene effectué sur les résidus du jeu de données de Nassogne, dans le cadre du test de Kruskal-Wallis :

Valeur du test	p-valeur
10.32	$2.27 \cdot 10^{-4}$

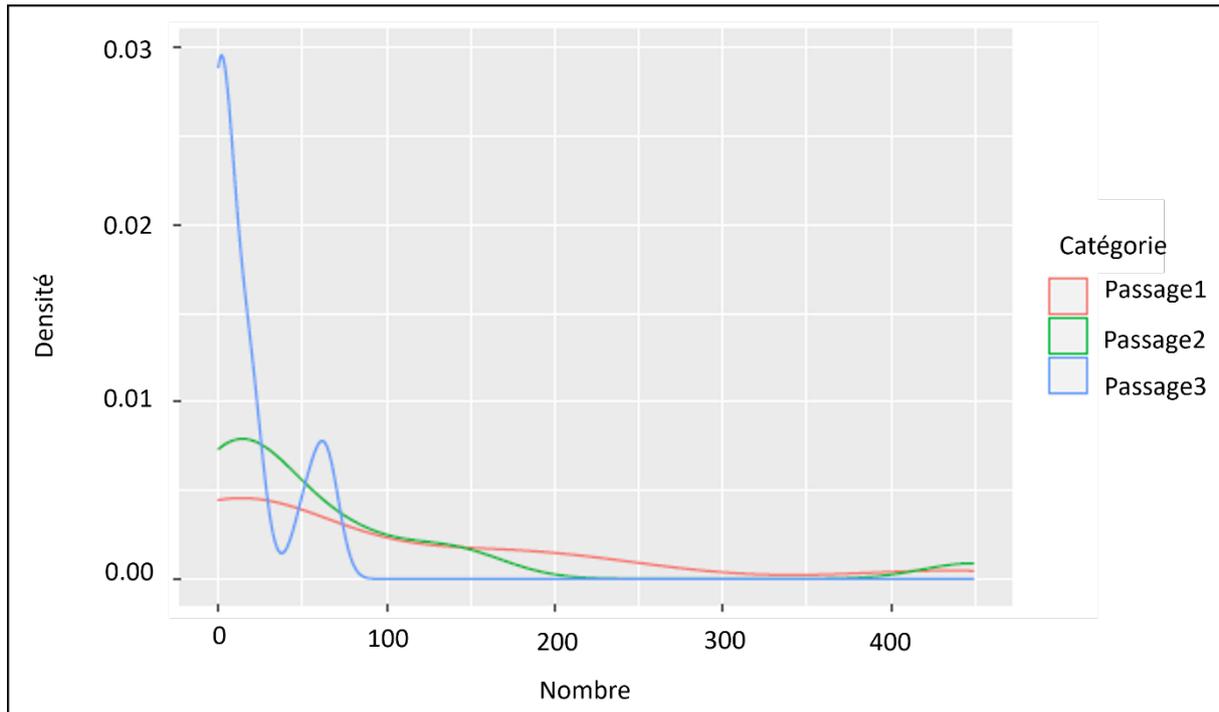
Tests de Shapiro-Wilk et de Levene réalisés sans les outliers à Nassogne, dans le cadre du test de Kruskal-Wallis :

Valeur du test	p-valeur
Shapiro : 0.86	$8.55 \cdot 10^{-5}$
Levene : 10.60	$1.94 \cdot 10^{-4}$

2.Vielsalm

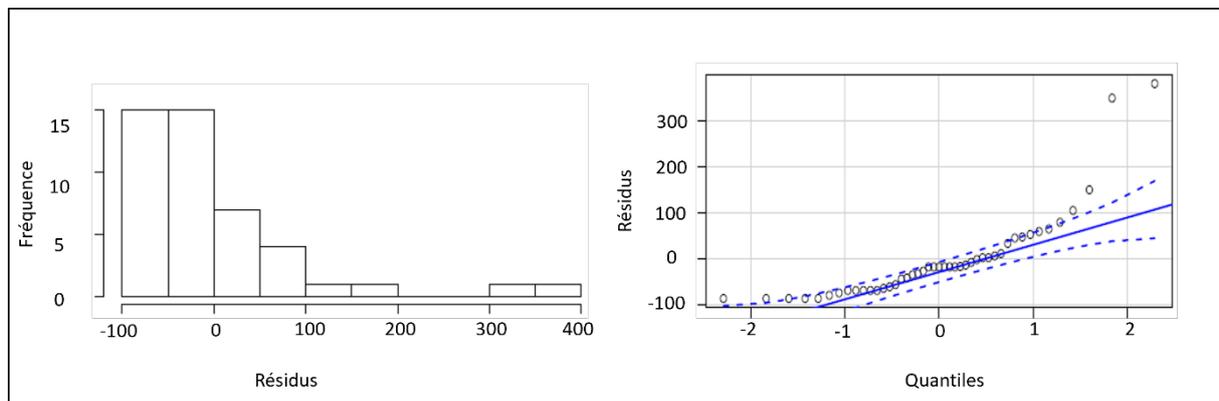
Test de Shapiro-Wilk effectué sur le nombre de pontes trouvées par passage à Vielsalm, et représentation graphique, dans le cadre du test de Wilcoxon-Mann-Whitney :

Passage	Valeur du test	p-valeur
Passage 1	0.73	$6.22 \cdot 10^{-4}$
Passage 2	0.62	$3.83 \cdot 10^{-5}$
Passage 3	0.73	$4.85 \cdot 10^{-4}$



Normalité des résidus du jeu de données de la région de Vielsalm, calculée au moyen du test de Shapiro-Wilk, et représentée par un histogramme et un Q-Q plot, dans le cadre du test de Kruskal-Wallis:

Valeur du test	p-valeur
0.72	$7.50 \cdot 10^{-8}$



Test de Levene effectué sur les résidus du jeu de données de Vielsalm, dans le cadre du test de Kruskal-Wallis :

Valeur du test	p-valeur
2.04	0.14

Tests de Shapiro-Wilk et de Levene réalisés sans les outliers à Vielsalm, dans le cadre du test de Kruskal-Wallis :

Valeur du test	p-valeur

Shapiro : 0.70	$8.49 \cdot 10^{-6}$
Levene : 3.57	0.038

F-test réalisé dans le but de vérifier l'homoscédasticité pour un même passage, entre les deux régions d'intérêt, sans les outliers, dans le cadre du test de Wilcoxon-Mann-Whitney :

Passage	Valeur du test	p-valeur
Passage 1	0.16	$1.29 \cdot 10^{-3}$
Passage 2	4.22	0.01
Passage 3	1.61	0.38

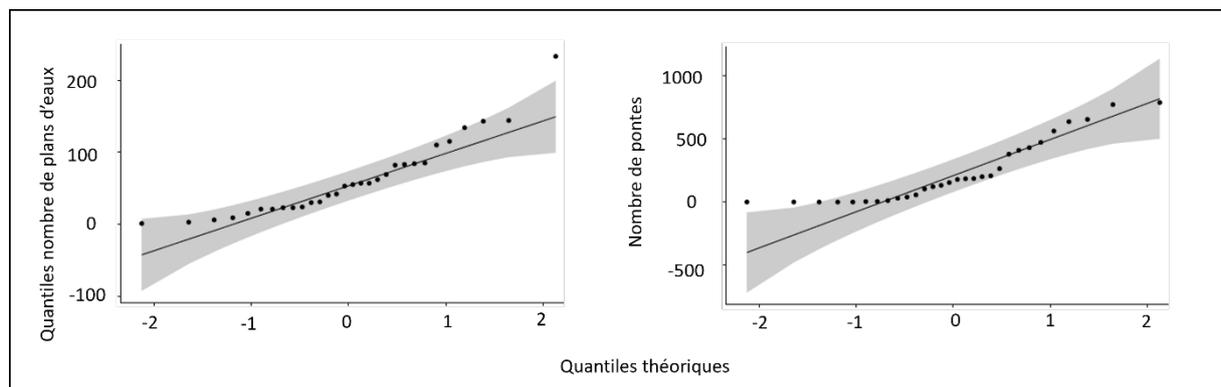
F-test réalisé dans le but de vérifier l'homoscédasticité pour un même passage, entre les deux régions d'intérêt, avec les outliers, dans le cadre du test de Wilcoxon-Mann-Whitney :

Passage	Valeur du test	p-valeur
Passage 1	0.16	$1.29 \cdot 10^{-3}$
Passage 2	23.14	$1.34 \cdot 10^{-6}$
Passage 3	0.28	0.03

Q4 : Existe-t-il une corrélation entre le nombre de plans d'eau et le nombre de pontes ?

Normalité du nombre total de plan d'eau et du nombre total de pontes, indépendamment de la catégorie du carré et de la région, testée au moyen du test de Shapiro-Wilk, et représentée par un Q-Q plot :

Valeur du test	p-valeur
Plan d'eau : 0.88	$3 \cdot 10^{-3}$
Pontes : 0.85	$5.50 \cdot 10^{-4}$



Normalité du nombre total de plan d'eau et du nombre total de pontes, en fonction de la catégorie du carré mais pas de la région, testée au moyen du test de Shapiro-Wilk, et représentée par un Q-Q plot

Catégorie	Valeur du test	p-valeur
Jeune	Plan d'eau : 0.81	0.02
	Pontes : 0.89	0.19
Vieux	Plan d'eau : 0.92	0.37
	Pontes : 0.89	0.19
Sans	Plan d'eau : 0.86	0.08
	Pontes : 0.72	$1 \cdot 10^{-3}$

