

Mémoire

Auteur : Gilon, Charlotte

Promoteur(s) : Houbrechts, Geoffrey; Jonard, François

Faculté : Faculté des Sciences

Diplôme : Master en sciences géographiques, orientation global change, à finalité approfondie

Année académique : 2024-2025

URI/URL : <http://hdl.handle.net/2268.2/23938>

Avertissement à l'attention des usagers :

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

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



Faculté des Sciences

Département de Géographie

Suivi spatio-temporel de l'activité du castor et de ses impacts éco-hydrologiques sur deux sites situés sur la Chavanne (Belgique) par imagerie drone et mesures hydrométriques

Mémoire présenté par : **Charlotte Gilon**

pour l'obtention du titre de

**Master en Sciences géographiques,
orientation Global Change**

Année académique : **2024 – 2025**

Date de défense : **Septembre 2025**

Président de jury : Prof. Xavier FETTWEIS

Promoteur : Prof. Geoffrey HOUBRECHTS

Co-Promoteur : Prof. François JONARD

Jury de lecture : Prof. Serge SCHMITZ et Dr. Jean VAN CAMPENHOUT

REMERCIEMENTS

Au terme de ce mémoire, je tiens tout d'abord à remercier toutes les personnes qui ont contribué à sa réalisation.

Je remercie particulièrement mes promoteurs, Geoffrey Houbrechts et François Jonard, de m'avoir permis de construire un sujet alliant hydrologie et télédétection par drone. Leur accompagnement, leur implication et leurs nombreux conseils ont été essentiels à l'avancement et la qualité de ce travail.

Un merci particulier à Jean Van Campenhout pour son aide, ses conseils et son implication tout au long de ce mémoire. Je souhaite également remercier les membres du Laboratoire d'Hydrographie et Géomorphologie Fluviale (LHGF), Robin, Ellynn et Eve, pour le temps qu'ils ont consacré à ce mémoire, aux sorties de terrain et aux analyses en laboratoire.

Je remercie également Jordan Bates, du Laboratoire *Earth Observation and Ecosystem Modelling* (EOSystM), pour ses conseils techniques et les campagnes drones réalisées à plusieurs reprises.

Je tiens aussi à remercier les membres de la Cellule de Télédétection et Géodonnées (CGT) de l'ISSEP, en particulier Eric Hallot et Coraline Wyard, pour leur intérêt et leur aide dans le cadre de ce mémoire, notamment pour la partie classification automatique et étude de l'occupation du sol.

Merci également à mes camarades de classe pour leur accompagnement sur le terrain, leur soutien et les nombreux conseils échangés.

Finalement, j'aimerais remercier ma famille qui m'a soutenue tout au long de ce travail mais également durant tout mon parcours universitaire. Merci à eux pour leurs conseils et encouragements.

RÉSUMÉ

Le castor européen (*Castor fiber*) a été réintroduit illégalement en Wallonie dans les années 1990. Sa population est croissante, atteignant déjà entre 600 et 1000 individus en 2012 (Natagora, 2012). Les castors étant qualifiés d'ingénieurs de l'écosystème, ils modifient les cours d'eau et le paysage en construisant des barrages, des canaux et des huttes. Ces aménagements engendrent des impacts hydrologiques, géomorphologiques et écologiques encore mal quantifiés et fortement dépendants des conditions locales. Ce mémoire étudie deux systèmes de castor sur la Chavanne, un petit cours d'eau ardennais, affluent de la Lienne (bassin versant de l'Amblève).

Divers types de données ont été récoltés à l'aide de campagnes drones (orthophotos, données LiDAR, imageries multispectrales et thermiques) et de mesures de terrain en rivière (suivi des hauteurs d'eau, jaugeages, granulométrie des sédiments, concentration en matière en suspension). Le drone s'est révélé efficace pour suivre les structures du castor bien que les deux sites aient peu évolué en 10 mois d'étude. Il constitue un outil utile de suivi permettant un relevé rapide, reproductible et non invasif. Les données hydrologiques ont permis de quantifier l'évolution des hauteurs d'eau, permettant de mieux comprendre les interactions entre la rivière et les bassins. Des volumes d'eau ont pu être estimés pour les barrages à l'aide des données topographiques du LiDAR et de relevés de terrain. La caméra thermique montée sur le drone a permis d'illustrer l'hétérogénéité spatiale de la température de la surface dans l'eau des bassins. Les relevés sédimentaires dans les retenues montrent la présence de dépôts fins mis en place par décantation.

Ce travail aboutit à une proposition de protocole de terrain dans le cadre du suivi de l'activité des castors par drone. Une analyse à différentes phases de l'établissement du barrage et lors d'événements spécifiques comme des étiages ou des crues permettrait d'approfondir la connaissance des impacts des castors sur les cours d'eau.

ABSTRACT

The European beaver (*Castor fiber*) was illegally reintroduced in Wallonia in the 1990s. Its population was growing, reaching 600 to 1,000 individuals in Wallonia in 2012 (Natagora, 2012). Beavers are ecosystem engineers. They modify watercourses and landscapes by building dams, canals, and lodges, causing hydrological, geomorphological, and ecological impacts that are still poorly understood and that depend on local conditions. This thesis studies two beaver systems on the Chavanne, a small Ardenne watercourse, a tributary of the Lienne (Amblève watershed).

Various types of data were collected using drones (orthophotos, LiDAR data, multispectral and thermal data) and field measurements in rivers (water level monitoring, gauging, sediment grain size, suspended matter concentration). The drone proved effective in monitoring beaver structures, although the two sites did not show much evolution during the 10 months of monitoring. It is a useful tool for monitoring, allowing for rapid, reproducible, and non-invasive surveys of the sites. Hydrological data made it possible to monitor changes in water levels, providing a better understanding of the interactions between the river and the basins. Water volumes for the dams were estimated using LiDAR topographic data and field surveys. The on-board thermal camera on the drone illustrated the spatial heterogeneity of surface water temperatures in the basins. Sediment surveys in the reservoirs showed thin deposits formed by settling.

This work has resulted in a field protocol for monitoring beaver activity using drones. Monitoring at different stages of dam construction and during specific events such as low water levels or floods would provide a deeper understanding of the impact of beavers on waterways.

TABLE DES MATIÈRES

1	Introduction	12
2	Contexte et état de l'art.....	13
2.1	Le castor européen - <i>Castor fiber</i>	13
2.2	Évolution de la population du castor européen au cours du temps	15
2.3	La complexité des systèmes de castor	17
2.3.1	L'abri principal	17
2.3.2	Les abris secondaires	17
2.3.3	Le barrage	18
2.3.4	Le bassin	18
2.3.5	Les canaux.....	18
2.3.6	Les chemins ou sentiers	19
2.3.7	Les toboggans et rampes	19
2.4	La dynamique fluviale	21
2.5	Les impacts hydrologiques des barrages de castors	22
2.5.1	Création d'un stockage d'eau, bilan hydrique et réduction de la vitesse d'écoulement.....	22
2.5.2	Écrêtement du pic de crue et ruptures de barrages.....	23
2.5.3	Étiage et évaporation.....	25
2.5.4	Température de l'eau	25
2.6	Les impacts géomorphologiques du barrage de castors	26
2.7	Les autres impacts des castors sur l'écosystème	27
2.8	L'utilisation de la télédétection et du drone dans le cadre de l'étude des barrages de castors	28
3	Formulation de la question de recherche.....	30
4	Contexte du lieu d'étude.....	31
4.1	Caractéristiques de la rivière et ses alentours	31
4.2	Localisation du site d'étude.....	33
4.2.1	L'évolution de la population de castors sur la Chavanne	33
4.2.2	Le site « Chalet »	33
4.2.3	Le site « Autoroute ».....	37
5	Méthodologie.....	40
5.1	Acquisition et utilisation d'images drones	40
5.1.1	Matériel utilisé	40
5.1.2	Acquisition des images sur le terrain	42
5.1.3	Traitement des images et exemples de création d'outputs.....	43

5.1.4	Cartographie des sites d'étude et définition des objets cartographiés	48
5.2	Acquisition et utilisation d'autres types d'images.....	49
5.2.1	Acquisition	49
5.2.2	Profil en long du cours d'eau	49
5.2.3	Classifications automatiques	50
5.3	Acquisition et traitement de données hydrologiques.....	52
5.3.1	Étude des débits et comparaison avant et après la colonisation par le castor ...	52
5.3.2	Bilan hydrologique des sites	55
5.3.3	Installation d'une station de référence	57
5.3.4	Courbe de tarage	52
5.3.5	Suivi du niveau d'eau dans les bassins	57
5.3.6	Bathymétrie.....	59
5.3.7	Étude des températures	59
5.4	Acquisition et utilisation de données géomorphologiques.....	60
5.4.1	Matière en suspension.....	60
5.4.2	Prélèvements d'échantillons de vases et analyses.....	61
5.4.3	Image CM de Passega	62
6	Résultats	64
6.1	Cartographie des systèmes de barrages et caractéristiques	64
6.1.1	Septembre 2024.....	64
6.1.2	Novembre 2024.....	67
6.1.3	Mars 2025	70
6.1.4	Juin 2025	73
6.1.5	Évolution de l'occupation du sol	77
6.2	Impacts hydrologiques.....	80
6.2.1	Analyse hydrologique de la Lienne à Trou de Bra	80
6.2.2	Comparaison hydrologique avant et après l'arrivée du castor.....	81
6.2.3	Résultats des jaugeages des sites	86
6.2.4	Courbe de tarage à la station et hydrogramme.....	91
6.2.5	Évolution de la hauteur d'eau dans les bassins et dans la Chavanne.....	93
6.2.6	Bathymétrie et variation du stockage d'eau dans les bassins.....	95
6.2.7	Extension des bassins lors de la crue du 10/01/2025	101
6.2.8	Variations thermiques à l'échelle temporelle et spatiale	103
6.3	Impacts géomorphologiques.....	106
6.3.1	Mise en avant de zones d'accumulation et érosion grâce au LiDAR	106
6.3.2	Matière en suspension.....	108

6.3.3	Passega	110
7	Discussions	112
7.1	Discussion des résultats et critiques	112
7.1.1	Cartographie des sites d'étude	112
7.1.2	Hydrologie	114
7.1.3	Géomorphologie.....	121
8	Perspectives de recherche.....	123
9	Protocole de suivi	125
10	Conclusion.....	126
11	Bibliographie	127
12	Annexes	135
12.1	Annexe 1 : ensemble des photos des barrages « Chalet » par année.....	135
12.2	Annexe 2 : ensemble des photos du site « autoroute » par année	148
12.3	Annexe 3 : code période de tarissement (RStudio)	166
12.4	Annexe 4 : code bathymétrie à l'aide de deux lidars (un avant et un après le castor) en Python sur VSCode	169

TABLE DES FIGURES

Figure 1. Le castor fiber (Masson <i>et al.</i> , 2024)	14
Figure 2. Arbre grignoté par le castor le long de la Chavanne (17/09/2024, coordonnées Lambert 72 : 245332 m, 112244 m)	14
Figure 3. Exemple de hutte sur la Chavanne (barrage « Chalet », 09/02/2025, coordonnées Lambert 72 : 244800 m, 111627 m)	17
Figure 4. Exemple de barrage sur la Chavanne (barrage « Autoroute », 10/01/2025, coordonnées Lambert 72 : 245332 m, 112244 m)	18
Figure 5. Exemple de canal sur la Chavanne (barrage « Chalet », 18/02/2025, coordonnées Lambert 72 : 244800 m, 111627 m)	19
Figure 6. Exemple de chemin sur la Chavanne (barrage « Autoroute », 10/01/2025, coordonnées Lambert 72 : 245332 m, 112244 m)	19
Figure 7. Exemple de rampe sur un petit affluent de la Chavanne (barrage « Chalet », 29/11/2024, coordonnées Lambert 72 : 244800 m, 111627 m)	20
Figure 8. La balance de Lane (Bavard & Malavoi, 2010 d'après Lane, 1995)	21
Figure 9. Définition des dimensions des barrages de castor et représentation schématique des quatre types d'écoulement à travers les barrages de castor (Woo & Waddington, 1990)	22
Figure 10. Localisation des sites d'étude	32
Figure 11. Profil d'altitude longitudinal de la Chavanne depuis sa source jusqu'à la confluence avec la Lienne	32
Figure 12. Les barrages « Chalet » vus par drone (2024)	34
Figure 13. Photos depuis la route du chalet en 2014 (à gauche, M. Facon) et 2015 (à droite, M. Facon)	34
Figure 14. Évolution des barrages « Chalet » entre 2015 et 2017	35
Figure 15. Pertuis du barrage sous la route du chalet avec une vue de l'amont (à gauche, 24/10/2024) et une vue de l'aval (à droite, 18/10/2024)	35
Figure 16. Exemple d'inondation de la route du chalet (LHGF, 2019)	36
Figure 17. Dispositif de protection de pertuis installé au niveau du barrage de la route du chalet (10/01/2025)	36
Figure 18. Bassin principal du site « Autoroute » vu par drone (2024)	37
Figure 19. Barrage dans le pertuis au niveau du site « Autoroute » en 2025 (10/01/2025)	37
Figure 20. Le barrage principal « Autoroute » en 2011 (Facon, 2011)	38
Figure 21. Vue aérienne du barrage « Autoroute » en 2012 (SPW, 2012)	38
Figure 22. Le barrage en 2019 (LHGF, 2019)	39
Figure 23. Rupture du barrage du 21 février 2012 (à gauche) et du 6 juin 2016 (à droite) (Facon, 2012 ; LHGF, 2016)	39
Figure 24. DJI Mavic 3 Entreprise	40
Figure 25. DJI Entreprise Matrice 300 Series	40
Figure 26. Cible de calibration radiométrique	41
Figure 27. Cibles de calibration du capteur thermique	42
Figure 28. Exemple d'orthomosaïque obtenu à partir des images acquises en septembre 2024	44
Figure 29. Exemple d'une partie du nuage de points obtenu à partir de la caméra LiDAR au niveau du site « Chalet » en octobre 2024	44
Figure 30. Résultats obtenus pour le MNS et le MNT, avec version ombragée au niveau du site du chalet en mars 2025	45

Figure 31. Carte des températures obtenues en mars 2025 au niveau du site « Chalet ».....	46
Figure 32. Carte du NDVI au niveau du site « Chalet » en mars 2025	47
Figure 33. Les 9 classes désignées	50
Figure 34. Courbe de tarissement pour la période du 11 au 15 septembre 2005	55
Figure 35. Localisation des Divers et du baromètre.....	57
Figure 36. Montage réalisé pour placer les Divers dans les bassins	58
Figure 37. Localisation des points de prélèvements de la matière en suspension.....	61
Figure 38. Image CM originale de Passega (d'après Passega, 1964 dans Houbrechts <i>et al.</i> , 2013).....	63
Figure 39. Image CM de Passega pour les rivières ardennaises (Houbrechts <i>et al.</i> , 2013) ...	63
Figure 40. Cartographie du site « Chalet » en septembre 2024	65
Figure 41. Cartographie du site « Autoroute » en septembre 2024.....	66
Figure 42. Cartographie du site « Chalet » en novembre 2024.....	68
Figure 43. Cartographie du site « Autoroute » en novembre 2024	69
Figure 44. Cartographie du site « Chalet » en mars 2025	71
Figure 45. Cartographie du site « Autoroute » en mars 2025	72
Figure 46. Cartographie du site « Chalet » en juin 2025.....	74
Figure 47. Cartographie du site « Autoroute » en juin 2025.....	75
Figure 48. Évolution de l'occupation du sol de 2008 à 2025	77
Figure 49. Comparaison de l'extension de la zone d'aléa d'inondation (2016) avec l'occupation du sol (2025).....	78
Figure 50. Évolution du pourcentage de chaque classe dans le temps.....	79
Figure 51. Débit moyen mensuel à la station de Trou de Bra.....	80
Figure 52. Pluviométrie mensuelle pour chaque année sélectionnée.....	81
Figure 53. Température moyenne mensuelle pour chaque année sélectionnée	82
Figure 54. Courbe récurrence-Qmax pour la station de Chevron avant et après le castor.....	84
Figure 55. Courbe récurrence-Qmax pour la station de Lorcé avant et après le castor	84
Figure 56. Hydrogramme à Trou de Bra en avril 2025	86
Figure 57. Schéma topologique de l'hydrographie en amont du site « Chalet » (village).....	87
Figure 58. Schéma topologique de l'hydrographie à la sortie du site « Chalet ».....	88
Figure 59. Schéma topologique de l'hydrographie à la sortie du barrage « Autoroute »	89
Figure 60. Courbe de tarage à la station limnimétrique LHGF de Vaux-Chavanne.....	91
Figure 61. Hydrogramme à la station LHGF	92
Figure 62. Variation des hauteurs d'eau à la station, dans le bassin amont et le bassin chalet	93
Figure 63. Variation des hauteurs d'eau le 3 mai 2025	94
Figure 64. Profondeurs pour chaque bassin du site du « Chalet »	96
Figure 65. Évolution du volume estimé dans les bassins BC1 et BC2	97
Figure 66. Localisation des profils topographiques de 2016.....	97
Figure 67. Profil topographique n°1	98
Figure 68. Profil topographique n°2.....	98
Figure 69. Profil topographique n°3.....	99
Figure 70. Profil topographique n°4.....	99
Figure 71. Profil topographique n°5.....	100
Figure 72. Vue drone du barrage « Autoroute » lors de la crue du 10 janvier 2025 (coordonnées Lambert 72 : 245332 m, 112244 m)	101
Figure 73. Barrage « Autoroute » lors de la crue du 10 janvier 2025 (coordonnées Lambert 72 : 245332 m, 112244 m)	102

Figure 74. Évolution de la température de l'eau à la station limnimétrique, dans le bassin amont et chalet et au baromètre	103
Figure 75. Température de surface (°C) du 28 mars 2025	104
Figure 76. Différence d'élévation entre le MNT de 2013 et celui de juin 2025	106
Figure 77. Différence d'élévation entre le MNT de mars 2025 et celui de juin 2025	107
Figure 78. Hydrogramme pour les crues du 10 octobre 2024 (pic de crue le 10/10/2024 à 4h) et 10 janvier 2025 (pic de crue le 9/01/2025 à 5h) à Trou de Bra	108
Figure 79. Image Cm de Passega pour des prélèvements de vase dans des bassins de castors de la Chavanne (D50 : taille médiane des éléments, D99 : taille du plus gros élément, différentes zones : transition entre suspension gradée et roulage (zone PQ), suspension gradée (zone QR), suspension uniforme (zone RS) ou décantation pélagique (zone T))	110
Figure 80. Image Cm de Passega pour deux carottes de vase dans des bassins de castors de la Chavanne (D50 : taille médiane des éléments, D99 : taille du plus gros élément, différentes zones : transition entre suspension gradée et roulage (zone PQ), suspension gradée (zone QR), suspension uniforme (zone RS) ou décantation pélagique (zone T))	111
Figure 81. Exemple de creusement le long du barrage BC2	118
Figure 82. Essai du suivi des copeaux de bois dans le bassin BC2	120
Figure 83. Granularité des dépôts dans des barrages de castor représentés sur une Image CM de Passega (D50 : taille médiane des éléments, D99 : taille du plus gros élément, différentes zones : transition entre suspension gradée et roulage (zone PQ), suspension gradée (zone QR), suspension uniforme (zone RS) ou décantation pélagique (zone T)) (adapté de Vaessen <i>et al.</i> (2020) d'après Houbrechts <i>et al.</i> (2013))	122

INDEX DES TABLEAUX

Tableau 1. Caractéristiques des vols drone et du processing	42
Tableau 2. Date d'acquisition d'images et types d'images utilisées dans le cadre de ce mémoire.....	43
Tableau 3. Inventaire des orthophotos disponibles en Wallonie sur le Géoportail.....	49
Tableau 4. Caractéristiques des stations limnimétriques de la Lienne.....	53
Tableau 5. Barrages recensés lors de la cartographie de septembre 2024	64
Tableau 6. Caractéristiques des éléments cartographiés	76
Tableau 7. Global accuracy des classifications automatiques.....	79
Tableau 8. Débits caractéristiques de la Lienne à Trou de Bra (L7290).....	80
Tableau 9. Débits caractéristiques pour la période avant et après le castor	82
Tableau 10. Caractéristiques des crues avant et après l'apparition du castor	83
Tableau 11. Coefficients de récession pour les périodes avant et après l'apparition du castor	85
Tableau 12. Résultats des jaugeages du 18 octobre 2024 et 9 avril 2025 au niveau du village	87
Tableau 13. Résultats des jaugeages du 18 octobre 2024 et 9 avril 2025 au niveau de la sortie du site « Chalet »	88
Tableau 14. Résultats des jaugeages du 18 octobre 2024 et 9 avril 2025 au niveau de la sortie du site « Autoroute »	89
Tableau 15. Volumes, surfaces et hauteurs d'eau des bassins du site « Chalet ».....	95
Tableau 16. Températures moyennes des différents bassins selon le vol drone du 28 mars 2025 et du 10 juin 2025	105
Tableau 17. Concentration en matière en suspension lors des crues d'octobre 2024 et janvier 2025	109

1 INTRODUCTION

Le castor européen (*Castor fiber*), après avoir subi un déclin dans sa population à la fin du XX^e siècle en Europe, a été réintroduit de manière illégale dans les cours d'eau de Wallonie dans les années 1990 (Libois, 1982 ; Baguette, 1994 ; Libois, 2006). En 2012, cette espèce, qui est protégée, est estimée entre 600 et 1000 individus en Wallonie (Natagora, 2012).

Cet espèce ingénieur de l'écosystème modifie de manière considérable son environnement et les rivières afin d'y construire son habitat à l'aide de barrages, de canaux, de huttes, etc. Ces aménagements changent profondément les paysages de fond de vallée et leur végétation. De nombreux impacts sont recensés d'un point de vue écologique, hydrologique et géomorphologique (Campbell-Palmer *et al.*, 2016 ; Brazier *et al.*, 2021 ; Larsen *et al.*, 2021). Cependant, ces impacts sont mal quantifiés et très dépendants du contexte local. En Belgique, il existe encore peu d'études sur le sujet et la quantification de ces impacts. Une meilleure compréhension de ces dynamiques est nécessaire pour mieux anticiper cette colonisation dans nos contrées mais aussi parce que la cohabitation avec l'Homme peut être parfois compliquée à cause de conflits d'usage, notamment en zone agricole ou urbanisée (Campbell-Palmer *et al.*, 2016). Bien que souvent perçu par l'Homme comme une espèce nuisible, le castor est néanmoins capable de créer des zones humides qui profitent à d'autres espèces, favorisant ainsi la biodiversité, et nous apportant de précieux services écosystémiques comme la séquestration du carbone (Larsen *et al.*, 2021). De plus, dans le cadre de la restauration écologique des cours d'eau (Directive Cadre sur l'Eau européenne) en Wallonie, il est important de comprendre comment évoluent les populations de castors et leurs impacts sur nos cours d'eau afin d'entreprendre une gestion intégrée de l'espèce face aux impacts négatifs qu'ils peuvent engendrer.

Dans ce contexte, ce mémoire s'intéresse à une compréhension globale de deux sites de castors, situés sur la Chavanne, un petit cours d'eau ardennais appartenant au bassin versant de l'Amblève. L'objectif principal est de comprendre les dynamiques hydrologiques, géomorphologiques et d'aménagements des systèmes générés par les castors. L'utilisation de la télédétection, en particulier par drone, est mise en avant afin de comprendre l'évolution des éléments des barrages. Ce type de données est encore peu utilisé pour l'étude du castor. Les drones pourraient être de bons outils pour suivre la colonisation des sites de castors. De plus, des études sur les débits ont été réalisées afin de mieux comprendre l'impact des castors sur les événements hydrologiques tels que les crues ou les étiages. Un autre objectif est de comprendre les dynamiques de stockage de sédiments des bassins. Des études sur les sédiments ont été réalisées afin de comprendre leur mécanisme de mise en place et de déplacement en cas de crue.

Afin de répondre à ces objectifs, ce travail se divise en différentes parties. La première partie reprend le contexte du sujet d'étude et un état de l'art avec une présentation de l'espèce, un résumé de l'évolution de sa population en Europe ainsi qu'une description des différents éléments qui constituent son lieu de vie. Un résumé des impacts écologiques, hydrologiques et géomorphologiques est également repris. La seconde partie reprend l'ensemble des objectifs de ce travail et est suivie par une caractérisation du lieu d'étude. La partie suivante est dédiée à la méthodologie avec l'acquisition et l'utilisation de données drones, d'orthophotographies aériennes, ainsi que de données hydrologiques et sédimentaires. Les résultats suivront sous forme de trois sections : cartographie et évolution des systèmes de barrages, impacts hydrologiques et impacts géomorphologiques. Finalement, avant d'en venir aux perspectives de cette étude et à une conclusion générale, les résultats seront discutés.

2 CONTEXTE ET ÉTAT DE L'ART

Cette partie reprend un état de l'art concernant les castors, l'évolution de leur population ainsi que les principaux impacts induits par leurs aménagements.

2.1 LE CASTOR EUROPÉEN - *CASTOR FIBER*

Il existe dans la nature deux espèces principales de castors : le castor européen, *Castor fiber*, et le castor américain, *Castor canadensis*. Ceux-ci appartiennent à la famille des Castoridés, du groupe des Sciuromorphes (Baguette, 1994). Les deux espèces sont assez similaires physiquement mais présentent un nombre de chromosomes différent : $2n = 48$ pour *Castor fiber* et $2n = 40$ pour *Castor canadensis* (Baguette, 1994). Les deux espèces sont présentes dans des aires de répartition différentes. Dans les contrées belges, c'est le castor européen qui prédomine (Libois, 2006 ; Campbell-Palmer *et al.*, 2016). Bien que ce soient deux espèces différentes, les impacts résultant de leurs activités et leurs comportements sont similaires (Campbell-Palmer *et al.*, 2016). Le castor canadien est cependant présent dans la vallée de l'Our à la suite d'une fuite d'un parc animalier allemand dans l'Eifel. Le Département de la Nature et des Forêts de Wallonie s'occupe de l'éliminer afin de laisser place au castor européen (Natagora, 2012).

Les caractéristiques physiques du *Castor fiber* sont assez particulières. Il est le plus gros rongeur d'Europe (Duval *et al.*, 2011). L'animal est semi-aquatique : il a une morphologie qui s'adapte à la vie sur terre mais aussi à la vie aquatique. Il pèse aux alentours de 15 à 25 kg (35 kg au maximum) pour une longueur du corps située entre 90 et 130 cm. Il possède une queue plate de 21 à 38 cm (Baguette, 1994) qui lui permet de se diriger lors de sa nage. Les pattes antérieures de l'animal présentent les caractéristiques de mammifères terrestres avec des doigts et des ongles. Au contraire, les membres postérieurs sont palmés, lui facilitant la nage. Sur la terre, il marche sur quatre pattes, à part lorsqu'il transporte de la boue dans ses pattes avant, sur des courtes distances (Campbell-Palmer *et al.*, 2016). Son pelage, brun et dense, est composé de deux couches de poils de différentes longueurs : des poils courts formant le duvet (ou bourre) et des poils plus longs, imperméables appelés jarres (Baguette, 1994 ; Duval *et al.*, 2011). Étant un animal vivant principalement la nuit, il a un odorat et une ouïe très développés alors que ses yeux ne sont pas très bons (Richard, 1967 ; Baguette, 1994 ; Campbell-Palmer *et al.*, 2016). Il est difficile de distinguer les mâles et les femelles. C'est surtout au niveau anatomique interne qu'il est possible de le déterminer (Richard, 1967 ; Duval *et al.*, 2011 ; Campbell-Palmer *et al.*, 2016). Les castors n'hibernent pas mais réduisent leurs activités durant l'hiver (Campbell-Palmer *et al.*, 2016).

Le castor a une espérance de vie entre 7 et 8 ans avec une durée de vie maximale de 20 ans (Duval *et al.*, 2011). Il se reproduit une fois par an entre décembre et février avec une portée de 1 à 5 castorins qui naissent environ 105 jours après la conception (Duval *et al.*, 2011 ; Campbell-Palmer *et al.*, 2016). Les petits restent dans la hutte pendant environ deux mois et sont nourris par le lait de leur mère et des branchages que le reste de la famille apporte (Campbell-Palmer *et al.*, 2016). Les castors vivent en famille : les parents et les jeunes (ceux des deux dernières portées). À partir de deux ans, les castorins commencent à se déplacer pour chercher un lieu où s'établir, principalement par l'eau. C'est à ce moment qu'ils sont en danger car ils courent un risque accru d'être écrasés ou de se battre avec d'autres castors, en raison de leur fort instinct territorial (Campbell-Palmer *et al.*, 2016).

Hormis l'Homme, ses principaux prédateurs sont le loup, le lynx, le renard et l'ours. Certaines espèces peuvent également s'attaquer aux castorins, comme l'aigle (Duval *et al.*, 2011). En Belgique, il n'a donc pas de réel prédateur, mis à part le loup.

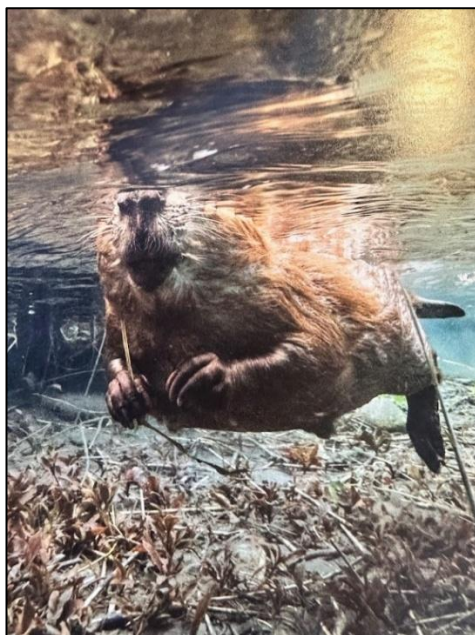


Figure 1. Le castor fiber (Masson *et al.*, 2024)

L'animal est végétarien. Il se nourrit principalement de branchages, plantes herbacées et écorces qu'il trouve dans les forêts environnantes mais aussi de plantes aquatiques. Il a une préférence pour les feuillus, plus particulièrement les saules, les peupliers, les bouleaux ou encore les aulnes. Il n'est pas spécialement intéressé par les conifères. En hiver, il se nourrit principalement d'écorces et de branchages qu'il a immergés sous l'eau, dans une réserve (Baguette, 1994 ; Libois, 2006). Il va utiliser la rivière, les canaux et bassins pour accéder à sa source de nourriture sans sortir de l'eau. L'activité terrestre du castor s'arrête en général à 20 m de l'eau (Campbell-Palmer *et al.*, 2016). Les arbres qu'il entaille permettent de repérer facilement la présence du castor (Figure 2).



Figure 2. Arbre grignoté par le castor le long de la Chavanne (17/09/2024, coordonnées Lambert 72 : 245332 m, 112244 m)

2.2 ÉVOLUTION DE LA POPULATION DU CASTOR EUROPÉEN AU COURS DU TEMPS

Jusqu'au XII^e siècle, le castor était omniprésent dans les cours d'eau européens (Libois, 1982). Cependant, au XX^e siècle, il avait presque totalement disparu (Luglia, 2013). En effet, depuis l'Antiquité, il était chassé pour différentes raisons, ce qui a entraîné une raréfaction de l'espèce dès le Moyen-Âge (Baguette, 1994 ; Libois, 2006).

L'Homme est un prédateur important du castor et a causé son extinction. Tout d'abord, la viande de castor était consommée (Libois, 2006 ; Duval *et al.*, 2011 ; Luglia, 2013). Cependant, la valeur économique du castor a évolué. Il a été chassé pour sa peau afin de confectionner des vêtements (Libois, 2006). Celle-ci a des propriétés intéressantes qui lui confèrent une bonne qualité (Duval *et al.*, 2011).

Une autre raison de son extinction a été l'utilisation du castoréum pour divers secteurs (parfumerie, médicaments) (Blanchet, 1977 ; Libois, 2006). Le castoréum est une sécrétion huileuse produite par une glande située près de l'anus du castor (Blanchet, 1977). L'animal l'utilise pour marquer son territoire, en déposant de petits amas qu'il disperse dans son environnement (Richard, 1967 ; Blanchet, 1977). Chaque castor produit une sécrétion avec une odeur unique, ce qui leur permet de se reconnaître. Cette sécrétion était également recherchée comme médicament au Moyen-Âge (Blanchet, 1977).

Finalement, son comportement destructeur et modificateur des cours d'eau du point de vue de l'Homme lui a valu d'être également chassé (Blanchet, 1977 ; Luglia, 2013).

Dans les années 1950, le castor a été réintroduit par l'Homme en Europe. En Belgique, les premières traces ont été retrouvées dans la vallée de la Roer en 1990 où il est apparu naturellement depuis l'Allemagne (Libois, 2006). Environ 40 individus auraient été réintroduits de manière illégale en Ardenne en 1998, puis 12 autres en 1999 (Halley & Rosell, 2002). Aujourd'hui, les populations ont été réintroduites dans 24 pays en Europe (Halley & Rosell, 2002).

Depuis, le castor ne cesse de coloniser de nouvelles sections de rivières. La population en Wallonie a été estimée en 2012 entre 600 et 1000 individus sur environ 250 territoires (Natagora, 2012).

La colonisation s'établit en plusieurs étapes au cours du temps. Le castor, lorsqu'il est en densité faible et n'a pas beaucoup de concurrence, choisit les lieux les plus adaptés à son mode de vie, sans devoir y construire trop d'aménagements (rivière profonde, lac). Ensuite, après cette phase initiale, les populations s'installent dans des lieux moins favorables où ils seront plus susceptibles de devoir construire des barrages pour relever le niveau d'eau ou dans des lieux anthropisés. C'est à partir de ce moment que l'animal modifie l'environnement qui l'entoure de manière plus prononcée et que les interactions avec l'Homme deviennent plus compliquées (Campbell-Palmer *et al.*, 2016). Natagora (2012) a estimé qu'un quart des sites potentiels d'implantation du castor étaient colonisés en 2012.

Aujourd'hui, le castor est protégé par la loi avec un statut particulier grâce à la Directive européenne 92/43/CEE dite « Directive habitats ». Celle-ci impose la garantie de la protection et conservation de l'espèce et de son habitat. En Wallonie, ce statut a été transposé dans la législation par l'article 2 bis de la Loi sur la Conservation de la Nature du 12 juillet 1973, modifié par le décret du 6 décembre 2001 (SPW, 2015).

Il est donc interdit de capturer, blesser ou tuer le castor mais également de modifier, endommager ou détruire ses barrages et habitats naturels. Il existe cependant des dérogations dans des cas précis, par exemple lorsque l'animal nuit à des activités agricoles ou des infrastructures. La législation permet d'encadrer ces interventions et de nombreux dispositifs pour aider à la cohabitation entre l'Homme et le castor existent (SPW, 2015).

2.3 LA COMPLEXITÉ DES SYSTÈMES DE CASTORS

Les castors sont les auteurs de systèmes de barrages ingénieux. De manière générale, ils recherchent au minimum 60 cm d'eau et une eau calme (Gurnell *et al.*, 2009 ; Plunus, 2009). Ils modifient et utilisent la rivière pour créer un espace de vie qui répond à leurs différents besoins (dormir, se nourrir, se protéger et se reproduire) s'ils n'en trouvent pas (Campbell-Palmer *et al.*, 2016). En effet, construire le barrage leur permet d'aménager un logis mais aussi de relever le niveau d'eau pour pouvoir inonder la plaine et ainsi atteindre leurs zones de nourrissage. Ces bassins leur permettent de se protéger des prédateurs. Finalement, ils ne construisent pas seulement un barrage mais un système complexe qui reprend différents éléments qui seront décrits dans les sections ci-dessous.

2.3.1 L'abri principal

L'abri peut prendre différentes formes. Il peut se trouver dans une berge, être construit entièrement à partir des matériaux environnants comme une hutte ou encore être creusé tel un terrier (Blanchet, 1977 ; Baguette, 1994). Le but de ce lieu est de se réfugier, se loger et se reposer pendant la journée (Richard, 1967). Le castor creuse ou crée un passage depuis le bassin pour créer un refuge, qui n'est pas immergé, mais dont le passage l'est afin de se protéger des prédateurs terrestres (Baguette, 1994). Une cheminée d'aération permet d'avoir de l'air dans l'abri (Blanchet, 1977).



Figure 3. Exemple de hutte sur la Chavanne (barrage « Chalet », 09/02/2025, coordonnées Lambert 72 : 244800 m, 111627 m)

2.3.2 Les abris secondaires

Ces abris sont répartis sur le territoire afin de s'y réfugier en cas de danger (Richard, 1967).

2.3.3 Le barrage

La construction d'un barrage permet d'augmenter le niveau d'eau afin de garder l'entrée de la hutte immergée (Richard, 1967 ; Baguette, 1994 ; Campbell-Palmer *et al.*, 2016). Ce barrage permet également de gérer l'étendue du territoire en contrôlant les zones inondées (Richard, 1967). Le but est de garder un niveau d'eau suffisant pendant toute l'année, y compris pendant les étiages, afin que l'entrée de la hutte soit protégée et d'avoir un accès à des sources de nourriture (Baguette, 1994). En réalité, il s'agit en général de plusieurs barrages en cascade qui régulent ce niveau d'eau (Richard, 1967). La taille du barrage peut varier grandement en fonction du milieu et de la forme de la vallée (Gurnell, 1998). Il est constitué de bois, branches, mais aussi de boue ou d'argile (Blanchet, 1977). Cependant, si les caractéristiques du site lui permettent déjà d'avoir un niveau d'eau satisfaisant, il ne va pas forcément en construire (Gurnell *et al.*, 2009 ; Campbell-Palmer *et al.*, 2016). Par exemple, J. Plunus (2009) a remarqué qu'en Wallonie les cours d'eau d'un ordre de Strahler supérieur à 4 ne nécessitent pas de barrages.

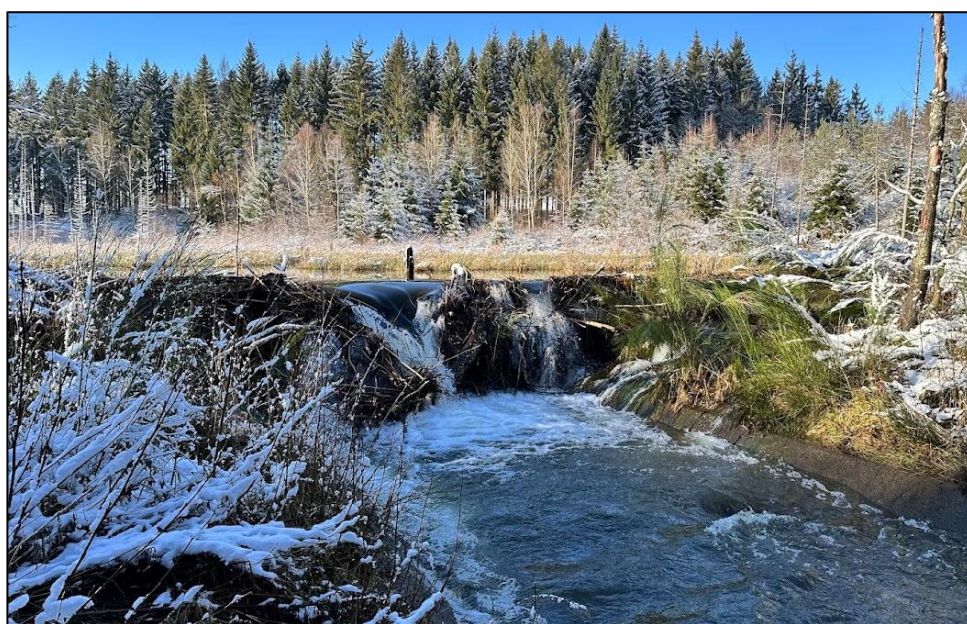


Figure 4. Exemple de barrage sur la Chavanne (barrage « Autoroute », 10/01/2025, coordonnées Lambert 72 : 245332 m, 112244 m)

2.3.4 Le bassin

Les bassins résultent des barrages qui surélèvent le niveau d'eau. L'animal peut circuler en nageant dans son territoire. Le but est d'accéder facilement aux zones de nourriture, de se protéger des prédateurs et de protéger l'abri (Richard, 1967). L'extension du bassin dépend de la hauteur du barrage et de la forme de la vallée.

2.3.5 Les canaux

Les canaux permettent au castor de voyager entre ses sources de nourriture et son logis, sans sortir de l'eau. Ces chenaux l'aident aussi à transporter les bois qu'il utilise pour construire son barrage. Ils sont créés à la suite des passages répétés du castor entraînant l'érosion du substrat mais ils peuvent aussi être creusés délibérément par le castor. La hauteur d'eau dans les canaux dépend du niveau d'eau dans le bassin ou du cours d'eau et de la hauteur du barrage (Richard, 1967).



Figure 5. Exemple de canal sur la Chavanne (barrage « Chalet », 18/02/2025, coordonnées Lambert 72 : 244800 m, 111627 m)

2.3.6 Les chemins ou sentiers

Il est également fréquent d'observer, aux alentours du barrage, des chemins empruntés par le castor, soit par un passage répété soit ayant aplati la végétation en passant avec des matériaux. Les castors se déplacent « au plus court » et leurs chemins sont souvent perpendiculaires à la berge (Richard, 1967).



Figure 6. Exemple de chemin sur la Chavanne (barrage « Autoroute », 10/01/2025, coordonnées Lambert 72 : 245332 m, 112244 m)

2.3.7 Les toboggans et rampes

Les toboggans permettent au castor de glisser dans le cours d'eau depuis la berge. Il existe également des rampes, qui permettent de gravir la berge depuis le cours d'eau. Une rampe consiste en des creux formés suite au passage répété du castor (Richard, 1967).



Figure 7. Exemple de rampe sur un petit affluent de la Chavanne (barrage « Chalet », 29/11/2024, coordonnées Lambert 72 : 244800 m, 111627 m)

2.4 LA DYNAMIQUE FLUVIALE

Avant d'aborder l'état de l'art sur les impacts du castor sur les cours d'eau, il est important de rappeler les principes de base qui régissent ces milieux. En effet, de nombreux facteurs influencent leurs caractéristiques et leur dynamique. Si ces facteurs varient dans le temps, la morphologie du cours d'eau se modifie également en conséquence.

La balance de Lane est un concept qui permet de représenter l'équilibre entre les débits liquides et solides (charge de fond et matière en suspension du cours d'eau). Ces deux paramètres sont des variables de contrôle (« extrinsèques »), c'est-à-dire qu'elles sont imposées au cours d'eau (par des variations du climat par exemple). Il en existe d'autres comme la végétation ou les conditions sédimentologiques du lit et des berges. Ces paramètres varient à différentes échelles temporelles et spatiales, que ce soit à l'échelle du bassin versant, ou dans des zones localisées (tête de bassin, versant, certains tronçons).

Pour s'adapter aux modifications de ces facteurs extrinsèques, le cours d'eau va modifier des variables de réponse, généralement à l'échelle du tronçon (variables « intrinsèques »). Ainsi, la pente locale, la largeur ou encore la sinuosité peuvent être modifiées.

Dans ce contexte, la balance de Lane illustre comment l'énergie hydraulique de la rivière, provenant du débit liquide, permet d'évacuer le débit solide d'une certaine granulométrie. Ce sont les processus d'érosion et de dépôt qui assurent cet ajustement, contribuant ainsi à maintenir l'équilibre du cours d'eau (Malavoi & Bravard, 2010).

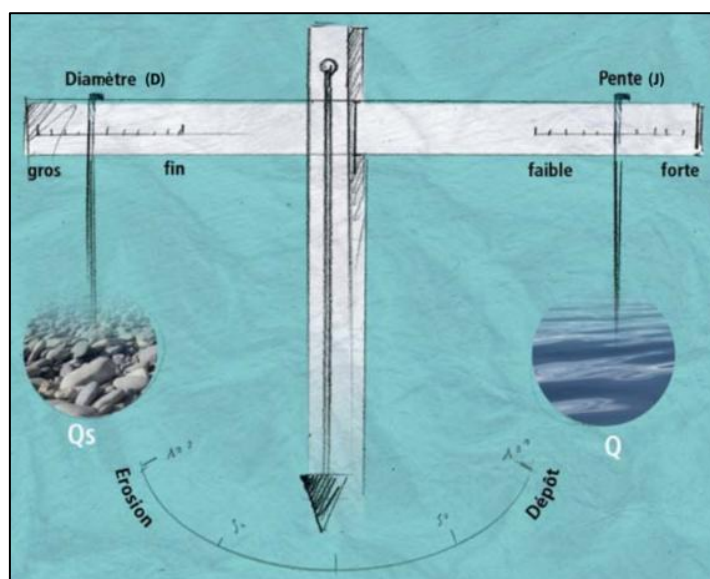


Figure 8. La balance de Lane (Bavard & Malavoi, 2010 d'après Lane, 1995)

Le castor et toutes les installations qu'il implique modifient le cours d'eau. Les différents impacts et changements vont être repris ci-dessous. Les systèmes de barrages de castors varient considérablement selon le contexte, ce qui rend chaque cas unique et entraîne des impacts spécifiques (Puttock *et al.*, 2020). Cependant, de manière générale, de nombreux impacts ont déjà été recensés et étudiés tant d'un point de vue hydrologique que géomorphologique et écologique.

2.5 LES IMPACTS HYDROLOGIQUES DES BARRAGES DE CASTORS

2.5.1 Création d'un stockage d'eau, bilan hydrique et réduction de la vitesse d'écoulement

Le rôle principal d'un barrage est de créer une étendue d'eau afin de permettre aux castors de protéger l'entrée de leur logis. Cela augmente donc la surface d'eau libre ainsi que de zone humide (Johnston & Naiman, 1990b ; Westbrook *et al.*, 2006 ; Hood & Bayley, 2008). Ce stock d'eau modifie la dynamique hydrologique du cours d'eau ainsi que la plaine alluviale. Les barrages contrôlent la position de la nappe phréatique dans la rivière et la plaine alluviale (Westbrook *et al.*, 2006). Ils favorisent également les interactions entre les eaux de surface et les eaux souterraines, en surélevant le niveau de la nappe phréatique (Hill & Duval, 2009 ; Nyssen *et al.*, 2011 ; Majerova *et al.*, 2015). Cela engendre une augmentation du stockage d'eau de surface et souterraine (Larsen *et al.*, 2021).

La capacité de stockage des barrages varie en fonction de la structure du système et du site où ils se trouvent. Les vallées larges et à pente plus faible permettent un stockage plus important par rapport à des vallées encaissées et pentues (Ronnquist & Westbrook, 2021). Quatre types de barrages ont été identifiés par Woo & Waddington (1990) :

- *overflow* : l'eau passe par-dessus ;
- *gapflow* : l'eau passe par une ouverture dans le barrage ;
- *through flow* : l'eau passe par des trous dans le barrage ;
- *under flow* : l'eau passe sous la structure (Figure 9).

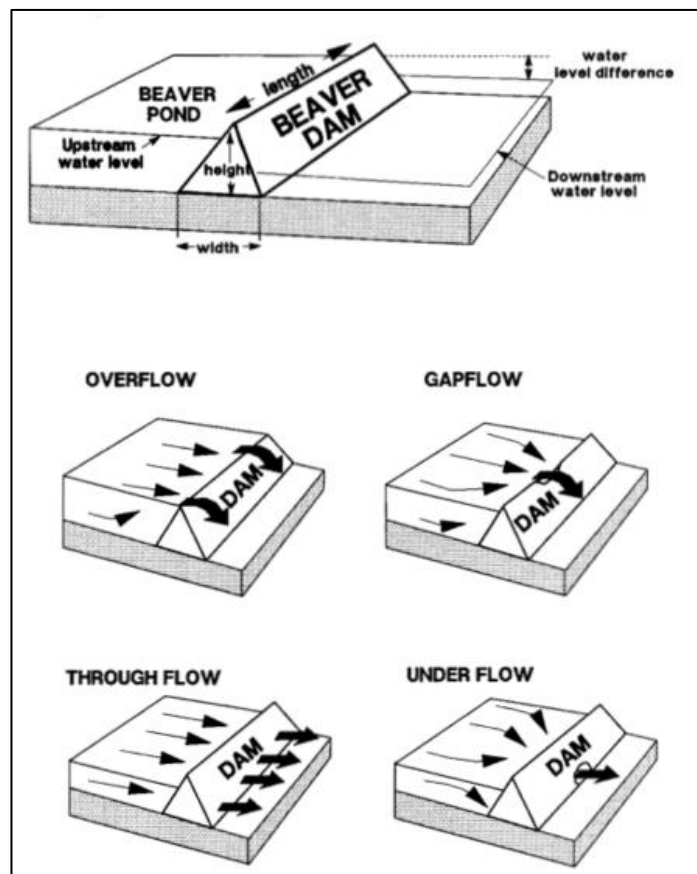


Figure 9. Définition des dimensions des barrages de castor et représentation schématique des quatre types d'écoulement à travers les barrages de castor (Woo & Waddington, 1990)

Le type de barrage influence le stockage d'eau et sa variation saisonnière. Cependant, Ronnquist & Westbrook (2021) ont identifié deux autres types de barrages : *seep dam* et *mixed dam*. Le premier type se produit lorsque l'eau s'infiltre à travers le matériel du barrage et ressort de manière diffuse. Le second correspond aux barrages combinant plusieurs mécanismes en même temps (Ronnquist & Westbrook, 2021). Ce sont principalement les conditions locales qui déterminent le type de barrage, par exemple au niveau topographique ou encore le type de matériau disponible pour la construction (Ronnquist & Westbrook, 2021). La dynamique d'écoulement peut varier en fonction des conditions de débits et donc au cours du temps pour passer d'un type à l'autre (Woo & Waddington, 1990 ; Ronnquist & Westbrook, 2021) mais aussi en fonction de l'âge du barrage et de l'activité du castor (Woo & Waddington, 1990). Les barrages de type *overflow* et *gapflow* ont tendance à mieux conserver l'eau en été, contrairement au type *throughflow* et *underflow* (Woo & Waddington, 1990).

Le bilan hydrique d'un stockage d'eau créé par le castor peut être formulé de la manière suivante :

$$\frac{dS}{dt} = Q_{in} - ET - Q_{out} + P$$

avec dS/dt le changement de quantité d'eau stockée au cours du temps, Q_{in} le débit entrant, ET l'évapotranspiration, Q_{out} le débit sortant et P les précipitations. Ce débit sortant peut être décomposé en plusieurs variables si l'on considère les interactions avec les eaux souterraines : le débit sortant du barrage, l'infiltration dans le sol et l'éventuel débit provenant des eaux souterraines. L'augmentation de la surface d'eau stagnante et la disparition de la végétation par la création d'étang augmentent l'évapotranspiration du cours d'eau. Cet élément doit être pris en compte dans le bilan hydrique (Woo & Waddington, 1990 ; Larsen *et al.*, 2021). La complexité de ce bilan nécessite encore des études afin de mieux le comprendre et permettre la modélisation des barrages de castors dans différents contextes environnementaux (Larsen *et al.*, 2021). Ce stockage peut aussi varier en fonction de l'activité du castor, qui diminue durant l'hiver.

Les barrages réduisent également la vitesse de l'eau localement et produisent donc des régimes d'écoulement moins rapides avec une augmentation du temps de résidence de l'eau dans les retenues (Stout *et al.*, 2017 ; Puttock *et al.*, 2020 ; Larsen *et al.*, 2021) et changent la distribution des profondeurs, des largeurs et des vitesses du cours d'eau (Stout *et al.*, 2017).

2.5.2 Écrêtement du pic de crue et ruptures de barrages

Des études démontrent que les barrages régulent les débits lors des crues et atténuent les pics de crues. Cependant, ces effets et l'ampleur de cette régulation sont encore discutés et dépendent des caractéristiques locales. De plus, la capacité à écrêter une crue dépend du stockage disponible dans le bassin (Larsen *et al.*, 2021 ; Ronnquist & Westbrook, 2021).

Puttock *et al.* (2020) ont étudié les débits de quatre sites pour plus de 1000 événements pluvieux en Angleterre. Les résultats montrent que les barrages de castors altèrent le régime hydrologique et atténuent les débits pendant les périodes plus humides mais aussi après des événements de tempêtes pluvieuses de plus grande ampleur (Puttock *et al.*, 2020).

À l'aide d'un modèle hydrodynamique, Neumayer *et al.* (2020) ont montré que la zone inondée lors d'événements de crues était plus large (>300%) dans le cas de scénarios avec des barrages de castors. Des effets d'atténuation des pics de crues sont notables mais il n'y a pas d'effet remarquable lors d'événements avec une récurrence égale ou supérieure à 2 ans. La

pente et la forme de la vallée impactent les résultats : les cascades en vallées encaissées atténuent peu les débits de pointe, tandis que celles avec de larges plaines inondables réduisent significativement les crues faibles mais ont un impact limité sur les crues plus importantes (Neumayer *et al.*, 2020).

Nyssen *et al.* (2011) ont réalisé une comparaison entre les débits avant et après l'installation du castor sur le Cheval, un affluent de l'Ourthe orientale. Ils ont montré une réduction des pics de crue et un retard de ce pic après l'installation de la famille de castors. Ils ont également observé une diminution de la fréquence d'événements extrêmes (allongement de la récurrence des crues). Les castors ont donc eu un effet de lissage sur l'hydrogramme (Nyssen *et al.*, 2011).

Westbrook *et al.* (2006) ont démontré que la présence de barrages peut augmenter l'étendue, de la durée et de la profondeur de l'inondation de surface et modifier les flux d'eau souterraine. Toutefois, cela peut s'expliquer par une rétention dans la plaine d'inondation en amont du barrage plutôt que dans le barrage lui-même.

De plus, la complexité de la structure des barrages, les processus cumulatifs de cascades de barrages ainsi que les détournements de flux dans la plaine entraînent des difficultés à comprendre et évaluer les effets des barrages sur les crues (Larsen *et al.*, 2021).

Westbrook *et al.* (2020) ont observé des ruptures de barrages lors de larges inondations dans le Kananski Country, situé dans les Rocheuses canadiennes. Bien que la majorité des barrages observés aient résisté à la crue, certains ont cédé, principalement ceux situés le plus en amont, sans ruptures en cascade. La forme de la vallée est déterminante sur la rupture : une vallée plus large permet à l'écoulement de se propager, les barrages y sont donc plus résistants contrairement à une vallée encaissée. En plus de la morphologie de la vallée, le remplissage avant une crue est un élément clé du risque de rupture. En effet, les étangs plus remplis sont moins susceptibles de céder en cascade et de créer une inondation de débordement. Ainsi, les étangs de castors doivent avoir une capacité de rétention au début d'un événement pour fournir une protection contre les inondations et se remplir suffisamment tôt dans l'événement pour minimiser le risque de rupture du barrage. Afin de comprendre la dynamique de rupture des barrages, il faut considérer la succession de barrages comme un système et non une seule entité (Westbrook *et al.*, 2020).

La rupture d'un barrage peut provoquer une onde de crue considérable mais qui ne représente qu'une petite proportion du débit total du bassin versant lors d'une crue de grande ampleur. L'occupation du sol peut aussi jouer un rôle dans l'absorption du pic de crue, par exemple s'il y a un stockage d'eau possible dans une zone humide en aval (Graham, 1998).

De manière générale, ce n'est pas l'ensemble du barrage qui cède, ce sont plutôt des brèches dans le barrage qui vont libérer de l'eau et des sédiments. Le barrage peut donc encore contenir du matériel si la brèche n'est pas très étendue. Ensuite, le matériel qui a été évacué lors de la rupture sera bloqué en aval dans le cours d'eau (Campbell-Palmer *et al.*, 2016 ; Westbrook *et al.*, 2020).

Pour conclure cette partie, il est important de mettre en avant que les effets des barrages sur les crues sont encore peu connus et mal compris. Les ruptures de barrages ne sont pas toujours faciles à recenser et également mal comprises (Brazier *et al.*, 2021).

2.5.3 Étiage et évaporation

Le stockage de l'eau et la création de zones humides pourraient jouer un rôle lors des périodes plus sèches. En effet, les zones humides et bassins créés par le castor persistent même pendant les périodes de sécheresse (Hood & Bayley, 2008). Ces zones d'eau libre sont essentielles pour la survie de certaines espèces pendant les sécheresses ou encore comme zone tampon en cas d'incendie (Hood & Bayley, 2008 ; Fairfax & Whittle, 2020). Ces stockages d'eau maintiennent un débit de base dans le cours d'eau (Puttock *et al.*, 2020). Nyssen *et al.* (2011) ont observé une augmentation du Q_{355} (débit dépassé 355 jours par an) depuis l'arrivée du castor sur un site de la Chevral, affluent de l'Ourthe, avec une remontée de la nappe et création d'une zone humide (Nyssen *et al.*, 2011). De même, Majerova *et al.* (2015) ont constaté une augmentation du débit moyen journalier en aval, attribuée à une hausse du stockage en eau de surface et des eaux souterraines. Cette influence s'amplifie avec le nombre de barrages dans le tronçon étudié. Au contraire, Gischer *et al.* (2012) n'ont pas constaté d'impact visible sur les périodes de tarissement depuis l'apparition du castor (Gischer *et al.*, 2012).

En Allemagne, Smith *et al.* (2020) ont étudié la recherche des niveaux phréatiques en période d'étiage sur 30 ans. Ils ont observé une augmentation progressive des niveaux phréatiques et un allongement du temps de transit de l'eau dans le réseau hydrologique depuis l'arrivée du castor. Cela a conduit à un soutien des débits de base et à la stabilisation du régime hydrologique en période sèche bien que la recharge des nappes reste faible (Smith *et al.*, 2020).

Néanmoins, l'augmentation de la surface d'eau stagnante augmente l'évapotranspiration, ce qui peut contrebalancer les effets de stockage (Fairfax *et al.*, 2018). Le stockage dans le bassin au cours des sécheresses dépend de la structure du barrage et de la façon dont l'eau s'écoule. Par exemple, un barrage à travers la structure (*Through flow*) aura une moins bonne capacité de rétention qu'un barrage où l'eau passe par-dessus la structure (Woo & Waddington, 1990).

Encore une fois, la diversité et la complexité des structures rendent la compréhension et la quantification de ces effets difficiles (Larsen *et al.*, 2021).

2.5.4 Température de l'eau

Les barrages de castor peuvent créer des modifications au niveau de la température de l'eau. Une hausse de la température de l'eau peut résulter d'un temps de résidence plus long et entraîne une plus grande hétérogénéité thermique, ce qui est intéressant pour les habitats d'organismes aquatiques (Majerova *et al.*, 2015 ; Majerovo *et al.*, 2020). En effet, l'animal modifie les propriétés hydrauliques des cours d'eau et crée différentes unités géomorphologiques (zones de remous, bras morts, etc.) dans son lieu de vie présentant des vitesses d'écoulement, des profondeurs, des temps de résidence de l'eau très différents. Cela induit une distribution des températures très variable spatialement et temporellement au sein du barrage et ses annexes (Majerovo *et al.*, 2020). Les variations journalières de température de l'eau peuvent être modérées par la présence de barrages, notamment lors de périodes de faible débit, où le stockage d'eau ainsi que les interactions avec les eaux souterraines peuvent être favorisés (Weber *et al.*, 2017¹).

¹ Weber *et al.*, 2017 : cet article étudie les BDA (*Beaver Dam Analog*) qui sont des structures artificielles imitant les barrages de castors, placés dans des rivières dans un but de restauration écologique.

2.6 LES IMPACTS GÉOMORPHOLOGIQUES DU BARRAGE DE CASTORS

Les barrages sont des obstacles au transport sédimentaire par la réduction de la vitesse de l'eau et la hauteur du barrage. Ils stockent les sédiments à court comme à long terme dans les bassins (Larsen *et al.*, 2021). Cela peut induire un déficit en sédiments fins en aval des barrages (Puttock *et al.*, 2018). Ils perturbent les tendances générales de la distribution des sédiments, introduisant une plus grande hétérogénéité et variabilité spatiale dans le substrat (Stout *et al.*, 2017). Le ralentissement de l'écoulement entraîne une décantation des particules en suspension dans le bassin. Il en résulte une augmentation du stock de sédiments dans la retenue.

La taille des bassins est le facteur principal contrôlant la répartition et la quantité de sédiments retenus (de Visscher *et al.*, 2014 ; Puttock *et al.*, 2018). Le stockage de sédiments à long terme dépendra de la disponibilité et de la composition des sédiments déposés, du régime d'écoulement et de la préservation des structures des barrages ainsi que leur solidité (Butler & Malanson, 2005 ; de Visscher *et al.*, 2014). Les barrages permettent de stabiliser le chenal avec une aggradation des berges et une limitation de la mobilité du chenal (Curran & Cannatelli, 2014). Les sédiments peuvent également être fixés par des plantes qui y poussent (Polvi & Wohl, 2012). Les inondations plus fréquentes et plus longues dans la plaine alluviale favorisent l'aggradation de celle-ci (Stout *et al.*, 2017). Lors d'une rupture de barrage, les sédiments fins accumulés sont relâchés et une incision du lit peut se produire (Butler & Malanson, 2005 ; Curran & Cannatelli, 2014).

Les sédiments sont un mélange de matières minérales et organiques provenant du cours d'eau, de la rupture des berges, de l'excavation de canaux et de terriers, de l'apport de matière organique de la végétation riveraine, de l'importation de matière organique par les castors et de la production primaire à l'intérieur de l'étang. Le matériel s'accumule sur le lit et les taux de sédimentation peuvent être très élevés (Gurnell, 1998). L'occupation du sol joue un rôle crucial sur la quantité de sédiments, notamment la présence de parcelles agricoles (Puttock *et al.*, 2018).

Sur le Cheval, de Visscher *et al.* (2014) ont étudié la dynamique de sédimentation dans deux séquences de barrages de castors. Au total, 1710 m³ de sédiments y ont été estimés avec une épaisseur moyenne de 25,1 cm. La couche de sédiments était la plus épaisse sur le site en amont des barrages de castors. Les sédiments sont majoritairement des sables et des silts avec une petite fraction d'argile. Les éléments les plus grossiers ont tendance à se déposer en aval des barrages, peut-être à la suite de brèches dans ceux-ci. Ils ont également étudié l'évolution de la matière en suspension lors d'une crue dans une des deux séquences de barrages. Ils ont constaté un dépôt lors de la montée de l'eau et une légère érosion lors de la décrue (de Visscher *et al.*, 2014).

J. Plunus (2009) a étudié la sédimentation sur un barrage de la Chavanne dans le cadre de son mémoire. Des mesures de l'épaisseur de la couche de sédiments ont été réalisées dans un barrage situé au niveau d'une section bétonnée du cours d'eau en aval d'un pertuis (le barrage n'existe plus aujourd'hui). Elle y a calculé un volume de 34 m³ en novembre 2008 et de 54 m³ en avril 2009. Cela lui a permis de calculer un taux de sédimentation assez élevé de 6,8 m³/mois depuis l'installation du barrage, 5 mois plus tôt et novembre, et de 5,1 m³/mois entre novembre et avril. Ces résultats confirment la capacité des cours d'eau à piéger une grande quantité de sédiments en peu de temps.

2.7 LES AUTRES IMPACTS DES CASTORS SUR L'ÉCOSYSTÈME

Par la construction des barrages, les castors ont un impact considérable sur la rivière en elle-même, comme expliqué dans les deux sections précédentes. Toutefois, leur influence s'étend également aux milieux environnants, par exemple par les plaines qu'ils inondent, leur régime herbivore ou encore l'utilisation des arbres pour la construction de leurs aménagements.

Ci-dessous, une liste non-exhaustive des impacts principaux sur l'écosystème environnant est reprise. Celle-ci a été réalisée sur base de Larsen *et al.* (2021) qui reprend un résumé de la littérature sur le sujet, ainsi que de Campbell-Palmer *et al.* (2016) :

- création d'une zone humide ;
- création d'une mosaïque d'habitats (aquatiques et terrestres) ;
- augmentation de la biodiversité ;
- disparition de certaines espèces dans la zone ;
- interruption du continuum écologique de la rivière ;
- diminution de la mobilité des poissons et des zones d'eau vive ;
- variabilité importante de température, augmentant la diversité d'habitats ;
- température moins favorable à certaines espèces de poissons d'eau plus froide ;
- réduction de population d'arbres par inondation, nourrissage ou utilisation pour les constructions ;
- augmentation nette de la diversité de l'assemblage végétal à l'échelle du paysage ;
- apparition de végétation aquatique ;
- décalage latéral des différents écosystèmes ;
- facilitation de la propagation d'espèces invasives ;
- inondation de zones urbanisées ou agricoles ;
- modification à court terme de la connectivité, du stockage (eau, sédiments, nutriments) et des flux dans le paysage et les écosystèmes ;
- augmentation du stockage du carbone ;
- modification des cycles biogéochimiques de certains nutriments (C, N, P, etc.) ;
- augmentation de la concentration de potentiels contaminants ;
- etc.

En conclusion, le castor, en tant qu'ingénieur de l'écosystème, modifie profondément son milieu et apporte de nombreux services écosystémiques. Néanmoins, certaines perturbations ne sont pas favorables à certaines espèces et il peut y avoir de potentiels conflits avec l'Homme, qu'il faut prendre en compte dans une gestion intégrée visant la cohabitation du castor, afin d'en préserver les aspects positifs (Campbell-Palmer *et al.*, 2016 ; Larsen *et al.*, 2021).

2.8 L'UTILISATION DE LA TÉLÉDÉTECTION ET DU DRONE DANS LE CADRE DE L'ÉTUDE DES BARRAGES DE CASTORS

L'usage de la télédétection dans le cadre de l'étude des castors s'est largement développée au cours des dernières années.

Une des principales utilisations de la télédétection est le suivi des populations et de leur colonisation au cours du temps. Des indices de la présence des castors, comme les barrages et les huttes, sont visibles depuis des images aériennes, qui sont en général utilisées pour étudier le phénomène et l'évolution des différentes structures (Johnston & Naiman, 1990a ; Johnston & Naiman, 1990b ; Cunningham *et al.*, 2006 ; Hood & Bayley, 2008 ; Butler, 2012 ; Polvi & Wohl, 2012 ; Martin *et al.*, 2013 ; Morrison *et al.*, 2015 ; Pearl *et al.*, 2015 ; Westbrook *et al.*, 2020 ; Kaphegyi *et al.*, 2021 ; McLaren *et al.*, 2022) mais aussi à partir d'images satellitaires, en particulier les zones inondées (Butler, 2002 ; Malison *et al.*, 2014). En Allemagne, des chercheurs ont utilisé la présence de canaux visibles sur des photos aériennes comme indicateur pour le monitoring des castors au cours du temps dans une zone humide et de landes (Kaphegyi *et al.*, 2021). Les images aériennes peuvent également être utilisées pour retracer la recolonisation de barrages abandonnés au cours du temps (Ritter *et al.*, 2020).

Les méthodes d'identification et d'étude automatique ou semi-automatique de complexes de castors, non-invasives, ont été développées afin de monitorer l'évolution des populations sur de plus grandes régions. Les auteurs ont utilisé des images satellites (Graham *et al.*, 2022a ; Fairfax *et al.*, 2023) parfois avec l'aide d'images aériennes (Swift & Kennedy, 2021 ; Fairfax *et al.*, 2023). Des modélisations de capacité écologique du territoire (le nombre maximum de territoires de castors qu'une région peut accueillir) et des futures dynamiques de la population ont également été mises au point grâce au suivi des populations (Graham *et al.*, 2020 ; Graham *et al.*, 2022a). L'évolution des structures, comme la superficie des bassins, peut être étudiée grâce à des algorithmes de classification (Fraser *et al.*, 2024).

Une méthode de suivi des plans d'eau liés à l'activité du castor a été réalisée pour les réserves naturelles de Wallonie grâce à Sentinel-2 et au Modèle Numérique de Terrain (MNT) de 2013-2014 (fourni par le SPW) dans le cadre d'un mémoire par S. Hauptman (2024). Les images Sentinel-2, traitées à l'aide d'un modèle de démixage linéaire, ont permis d'estimer la proportion d'eau par pixel. Ensuite, un modèle de régression basé sur le MNT a été utilisé pour déterminer l'altitude optimale de l'eau. Grâce à une validation à l'aide des orthophotos, il a pu démontrer que les surfaces d'eau détectées étaient souvent plus vastes que dans la réalité. La méthodologie connaît certaines limites à cause de la végétation et de la topographie (Hauptman, 2024).

Des données multispectrales satellitaires permettent d'étudier l'impact des castors et le suivi de la végétation à l'aide d'indices comme le NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*), l'évapotranspiration et/ou l'EVI (*Enhanced Vegetation Index*) (Fairfax & Small, 2018 ; Fesenmyere *et al.*, 2018 ; Fairfax & Whittle, 2020 ; Askam *et al.*, 2022²).

Les drones ou UAVs (*Unmanned Aerial Vehicles*) en anglais sont des aéronefs contrôlés à distance ou de manière autonome. Ils ont été développés au cours du 21^e siècle principalement à des fins militaires. Ensuite, le drone a été commercialisé et devenu accessible au grand public pour des usages professionnels (agriculture, cartographie, surveillance

² Askam *et al.*, 2022 : cet article étudie les BDA (*Beaver Dam Analog*) qui sont des structures artificielles imitant les barrages de castors, placées dans des rivières dans un but de restauration écologique.

environnementale, etc.) mais aussi privés (photos, vidéos personnelles). Aujourd'hui, de nombreux capteurs peuvent être embarqués pour étudier les écosystèmes : caméra RGB, multispectrale, LiDAR, thermique.

Les drones présentent de nombreux avantages. Ils permettent d'avoir une très haute résolution spatiale (de l'ordre du centimètre) par rapport aux avions et satellites. Il est possible de faire des acquisitions rapidement, fréquemment et à la demande. Une fois le drone et le programme de traitement acquis, les coûts sont très faibles.

Cependant, ils ont des limites. Comme pour toute étude de télédétection, la végétation est un facteur limitant dans l'étude des éléments situés en-dessous. Les conditions météorologiques doivent aussi être idéales (sec, vent faible). Les réglementations aériennes peuvent contraindre les vols à certaines zones.

Ces instruments sont de plus en plus utilisés dans le cadre de la gestion et du suivi des cours d'eau. Les différents produits qu'il est possible d'obtenir avec les drones (orthomosaïque, MNT, MNS, données multispectrales, données thermiques, par exemple) permettent de faire des suivis des zones d'accumulation et d'érosion, des modifications apportées au lit et à la plaine alluviale et de l'évolution de la végétation, y compris aquatique (Boon & Tesfamichael, 2017 ; Jing *et al.*, 2017 ; Davis *et al.*, 2021³).

Le drone permet un suivi rapide et efficace des zones humides (Boon & Tesfamichael, 2017 ; Jing *et al.*, 2017 ; Wu, 2023 ; Van Alphen *et al.*, 2024 (zone de mangroves)) dont les zones affectées par le castor (Puttock *et al.*, 2015). Les castors modifient rapidement le paysage. Les structures et zones humides qu'ils construisent peuvent être difficiles d'accès et une étude in situ peut rapidement prendre du temps et être dangereuse. Ainsi, l'utilisation du drone permet de recueillir un large éventail de données de manière efficace et répétée, sans nécessiter de déplacements sur le terrain, et ce, selon la fréquence requise. C'est également un moyen non-invasif d'étudier ces écosystèmes (Puttock *et al.*, 2015 ; Davis *et al.*, 2021). En effet, les éléments principaux peuvent facilement être observés sur les images tels que le barrage, les bassins, les canaux, les chemins, les abris (Puttock *et al.*, 2015). Il est également possible de faire des suivis bathymétriques grâce à des images avant et après l'installation du castor et comparer les profils topographiques (Davis *et al.*, 2021).

³ Davis *et al.*, 2021 : cet article étudie également les BDA.

3 FORMULATION DE LA QUESTION DE RECHERCHE

Les barrages de castors sont des systèmes complexes et en perpétuel changement. Ces ingénieurs de l'écosystème modifient les cours d'eau rapidement. La diversité des structures qu'ils construisent et la diversité des cours d'eau en font des systèmes vastes à étudier, avec de nombreuses variables à prendre en compte pour une compréhension complète de leur fonctionnement et de leurs impacts. De nombreux impacts ont déjà été identifiés dans la littérature. Cependant, leur ampleur et quantification restent mal établies.

Les méthodes traditionnelles de suivi des cours d'eau par télédétection (images satellitaires, campagnes aériennes) sont généralement appliquées à une échelle relativement large, notamment pour l'étude des barrages de castor. Cependant, pour étudier de manière détaillée un complexe, ces techniques ne permettent pas de suivre l'évolution à une résolution temporelle et une résolution spatiale adaptées. L'utilisation des drones, qui commence à être de plus en plus importante dans le cadre de l'étude des cours d'eau et des écosystèmes, pourrait être un bon moyen pour résoudre ces problèmes de résolution.

De nombreuses études se penchent sur les impacts hydrologiques ou bien géomorphologiques des complexes de castors. Cependant, il existe peu d'études complètes sur un seul complexe et intégrant l'ensemble de ces impacts afin de mieux comprendre les dynamiques, encore mal connues, qui régissent ces barrages et bassins. De plus, en Belgique, peu d'études sur le sujet ont été réalisées mis à part l'étude du Chevral (Nyssen *et al.*, 2011 ; De Vischer *et al.*, 2014) et le mémoire de J. Plunus (2009).

Ce mémoire vise à appréhender une vision plus globale du système construit par le castor au travers de l'introduction de drones comme outils de mesure combinée à des mesures classiques de terrain. Ainsi, différents objectifs spécifiques ont été définis :

- suivi de l'évolution du système impacté par les castors et des différents éléments le constituant à l'aide de drones ;
- compréhension de la dynamique hydrologique du système ;
- compréhension de la dynamique de stockage d'eau des barrages ;
- compréhension de l'effet des barrages sur les débits extrêmes (crues et sécheresses) ;
- installation d'une station de référence sur la Chavanne et caractérisation de son régime ;
- compréhension de la dynamique géomorphologique et de stockage de sédiments dans les barrages ;
- étude de la signature granulométrique des sédiments ;
- utilisation expérimentale du drone dans le cadre de l'étude du castor et évaluation de son utilisation ;
- mise en place de protocoles de suivi du castor à court et à long terme à l'aide de drones.

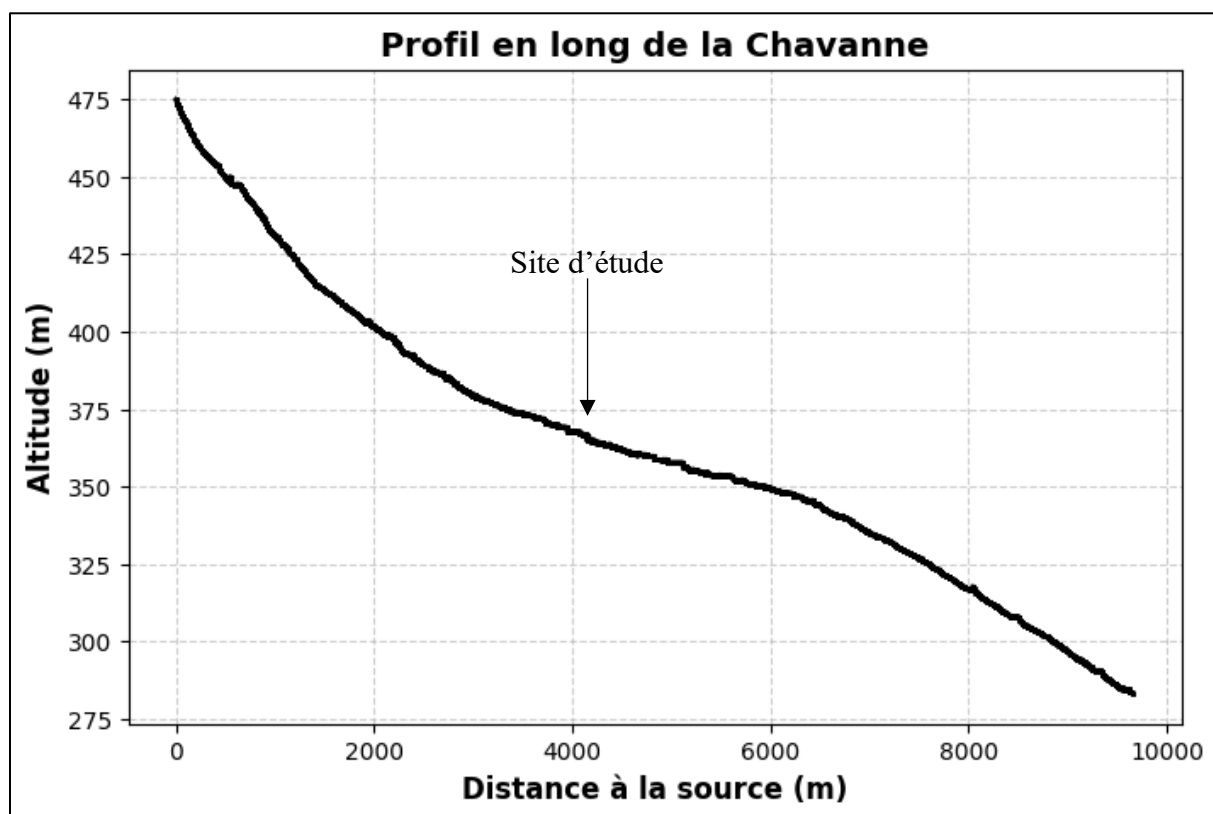
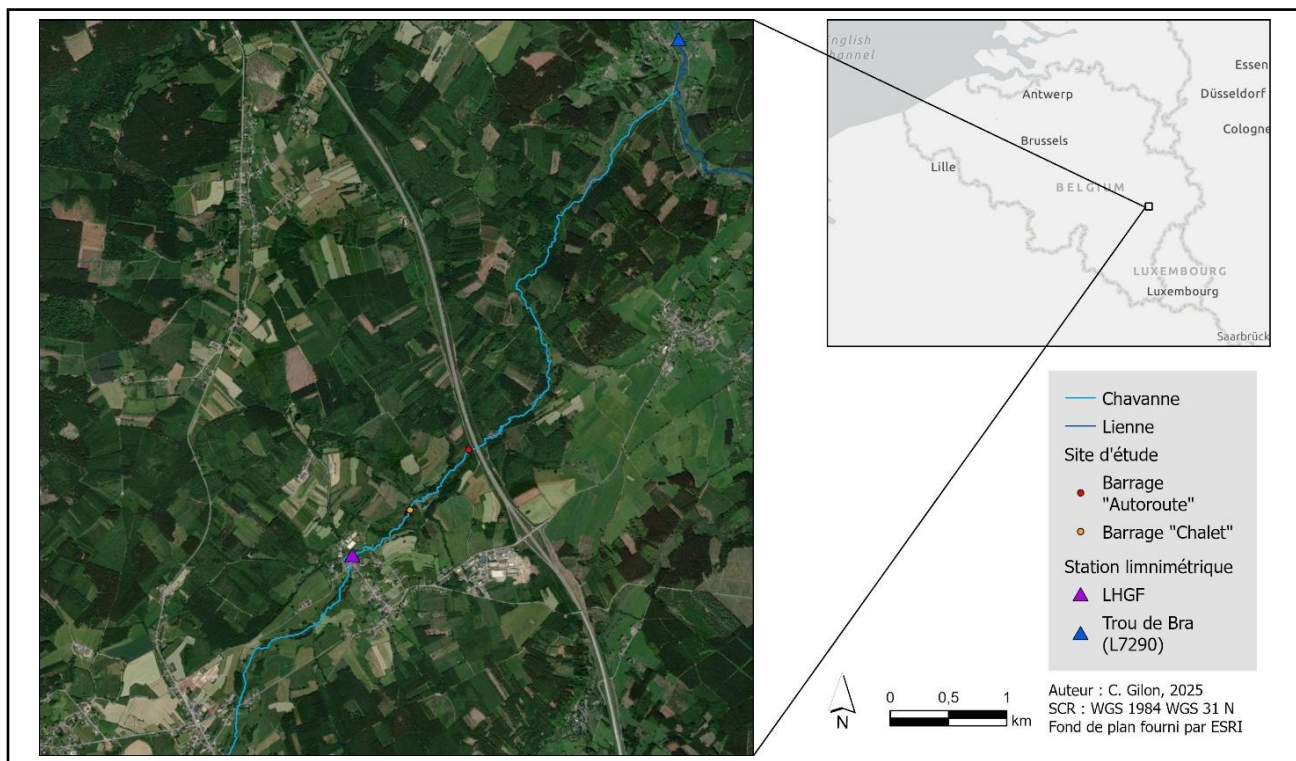
4 CONTEXTE DU LIEU D'ÉTUDE

Dans le cadre de ce mémoire, deux sites ont été étudiés sur la Chavanne, affluent de la Lienne. Les caractéristiques du cours d'eau, ainsi que les deux sites, sont décrits dans cette partie du travail. L'historique des barrages de castors sur la rivière ainsi que les précédentes études réalisées sur les castors de cette zone sont détaillés afin de mieux comprendre le contexte de cette étude.

4.1 CARACTÉRISTIQUES DE LA RIVIÈRE ET SES ALENTOURS

La Chavanne est un petit cours d'eau ardennais, appartenant au bassin versant de l'Amblève. Elle prend sa source à Manhay (475 m) et reçoit une douzaine d'affluents sur son tracé long de 9,7 km. Elle se jette ensuite dans la Lienne sur sa rive gauche, à Trou de Bra dans la commune de Lierneux (283 m). La taille du bassin versant de la Chavanne est d'environ 21 km² (Wallemacq *et al.*, 2011). La pente moyenne du cours d'eau est de 2 %. La première section du cours d'eau présente une pente plus forte jusqu'à l'autoroute E25 au niveau de Vaux-Chavanne, où se situe la rupture de pente (*knickpoint*) de la rivière (Figure 11). Ensuite, la pente devient plus douce. C'est une rivière avec un lit caillouteux grossier, développée sur un substratum imperméable (Petit *et al.*, 2005). Au niveau de l'occupation du sol, le territoire est principalement recouvert de prairies et de forêts. La région est caractérisée par des précipitations annuelles entre 1200 et 1400 mm. Les maximas sont présents en août et décembre. Les températures moyennes mensuelles varient entre 1°C à 17°C dans la région (Institut Royal Météorologique, 2024). Cependant, la Chavanne se trouve dans une dépression lithologique sur la première moitié de son tracé et dans une vallée encaissée sur la seconde moitié. Les températures peuvent dès lors y être plus basses et subir un phénomène d'inversion (Wallemacq *et al.*, 2011). Il n'y a plus de station limnigraphique⁴ sur la Chavanne. En revanche, il y en a trois sur la Lienne : à Trou de Bra (L7290), à Chevron (6804) et à Lorcé (L6240). La station de Trou de Bra est la plus proche de la Chavanne (située en aval de la confluence avec la Lienne) alors que les deux autres se trouvent encore plus en aval.

⁴ Une station avait été installée au niveau du pont de l'autoroute à l'entrée du pertuis fin avril 2006. Elle a fonctionné jusque novembre 2010, rendue inutilisable par l'installation d'un barrage de castors.



4.2 LOCALISATION DU SITE D'ÉTUDE

Dans cette partie, une brève section reprend l'évolution des populations de castors sur la Chavanne. Ensuite, les deux sites principaux étudiés seront décrits ainsi que leur évolution au cours du temps.

4.2.1 L'évolution de la population de castors sur la Chavanne

Les premiers castors ont été recensés dans la Chavanne aux alentours de 2008-2009. J. Plunus (2009) a recensé un site colonisé en 2009 dans le cadre de son mémoire. Il s'agissait d'un barrage qui se trouvait après le pertuis de l'autoroute (Plunus, 2009). Comme expliqué dans l'état de l'art, elle y a étudié le colmatage du lit.

En 2020, lors de son stage au LHGF, T. Cornu a recensé 70 barrages sur la Chavanne et ses affluents. Ces barrages ont été repérés à l'aide d'images satellites en utilisant le NDVI, l'infrarouge et des classifications supervisées pour identifier les bassins. Une vérification sur le terrain a été réalisée. Il a mis en évidence que, sur le tracé complet de la Chavanne, 22 % du linéaire était impacté par le castor.

En 2022, L. Souadi a recensé 26 barrages sur la Chavanne et ses affluents en se rendant sur le terrain. Elle a constaté sur la Chavanne que les barrages n'avaient pas d'influence notable sur les débits faibles. À l'aide de pièges à sédiments, ce rapport met aussi en avant que les barrages retiennent les sédiments et qu'ils réduisent la mobilité des galets.

En presque 15 ans, le castor aura donc colonisé la vallée de la Chavanne de manière conséquente. Cette rivière est donc un cas d'étude intéressant, d'une part car les castors y ont déjà été étudiés à plusieurs reprises et parce que le cours d'eau est largement colonisé par les castors.

4.2.2 Le site « Chalet »

Le premier site de castors étudié se situe sur la Chavanne à environ 4 km de la source, au niveau du chalet « Hazalle » (nom de la rue et du dit chalet), qui se trouve en haut à droite de la Figure 12. Ce site est en réalité une succession de barrages sur plusieurs centaines de mètres. Au total, ce sont deux bassins principaux suivis de trois petits bassins qui ont été créés au fil du temps sur le cours d'eau. Une photo de la hutte principale est reprise ci-avant dans la Figure 3.



Figure 12. Les barrages « Chalet » vus par drone (2024)

Le Laboratoire d'Hydrographie et Géomorphologie fluviale (LHGF) a suivi au cours du temps l'évolution de ce site, ainsi que celui de l'« Autoroute », en aval, qui sera décrit ci-dessous. Ainsi, il est possible d'avoir un historique de son aménagement. L'ensemble des images fournies par le LHGF se trouve en Annexe 1. Les sites ont été également monitorés par Monsieur Facon de Natagora.

Dès 2014, des images des premières infrastructures du castor ont été prises au niveau de la route (Figure 13). Ce sont les premières traces de celui-ci sur cette partie du cours d'eau (alors que la partie amont et aval sont déjà colonisées). La mise à blanc de plusieurs parcelles entre 2009 et 2012 sur le site aurait favorisé le développement d'une végétation favorable aux castors. Le site a évolué vers l'amont, en direction du village. En 2015, le paysage avait déjà fortement changé et a continué à évoluer en 2016 et 2017 (Figure 14).



Figure 13. Photos depuis la route du chalet en 2014 (à gauche, M. Facon) et 2015 (à droite, M. Facon)

Ensuite, à partir de 2017, le site a commencé à prendre la forme qu'il a aujourd'hui.



Figure 14. Évolution des barrages « Chalet » entre 2015 et 2017

Le castor, ayant obstrué le pertuis qui passe sous la route du chalet, a causé des dégâts à plusieurs reprises à cet endroit : destruction de tuyaux qui arrivent à cet endroit (2015 ; 2019), inondations de la route à plusieurs reprises, etc. C'est pourquoi la commune a été appelée plusieurs fois pour détruire le barrage du pertuis. La succession de barrages joue son rôle en permettant de conserver un niveau d'eau correct sur le reste du site.



Figure 15. Pertuis du barrage sous la route du chalet avec une vue de l'amont (à gauche, 24/10/2024) et une vue de l'aval (à droite, 18/10/2024)



Figure 16. Exemple d'inondation de la route du chalet (LHGF, 2019)

Dans le but de suivre l'évolution de cet endroit, il est important de savoir quand ce dernier barrage a été détruit. C'est pourquoi il a été demandé aux personnes vivant juste à côté de noter, si elles en étaient témoins, les dates auxquelles le barrage a été à nouveau détruit. Ces interventions ont été prises en compte à partir du 9 octobre 2024. La semaine du 12 novembre 2024, une intervention a été notée pour la destruction d'un barrage qui inondait la route. Lors de la visite du 10 janvier 2025 sur le terrain, la mise en place d'une cage a été remarquée. L'installation de protection de pertuis de ce type ne nécessite pas d'autorisation préalable (SPW, 2015). Cette cage, suite à une crue survenue le 10 janvier, était recouverte de végétaux, ce qui bloquait à nouveau l'eau (Figure 17).



Figure 17. Dispositif de protection de pertuis installé au niveau du barrage de la route du chalet (10/01/2025)

Cependant, lors de la visite du 8 février 2025, la cage avait été nettoyée. Le petit bassin retenu auparavant s'est donc vidé à nouveau. Lors du vol de drone de juin, cette cage était à nouveau bloquée par la végétation. Le bassin a repris un niveau d'eau similaire à celui avant la destruction du barrage.

4.2.3 Le site « Autoroute »

En aval des barrages « Chalet », un autre système a été construit par le castor en amont du pertuis qui permet à la Chavanne de passer sous l'autoroute E25, au début de la canalisation. Ce site ne présente qu'un seul bassin principal (Figure 18). La hauteur du barrage de ce bassin est d'environ 2 m (Figure 19). En amont, une succession de petits barrages est présente.



Figure 18. Bassin principal du site « Autoroute » vu par drone (2024)

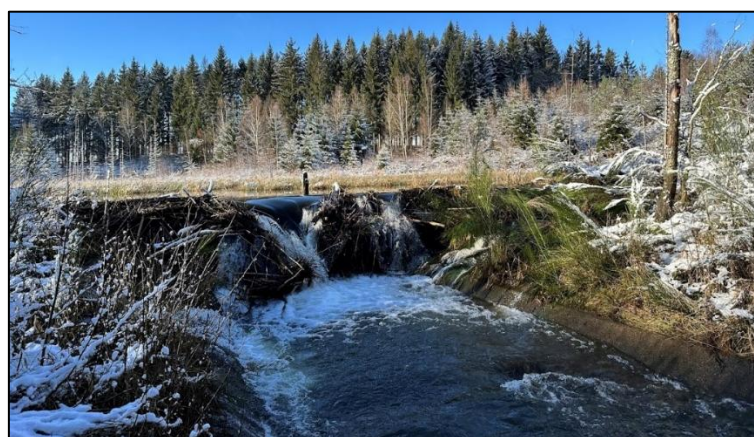


Figure 19. Barrage dans le pertuis au niveau du site « Autoroute » en 2025 (10/01/2025)

Ce barrage a été suivi à partir de 2011 où il avait déjà une hauteur importante (Figure 20).



Figure 20. Le barrage principal « Autoroute » en 2011 (Facon, 2011)

Sur les orthophotos de la Wallonie, les premières traces de castors sont visibles à partir de l'été 2012 sur ce site (SPW, 2025). Le bassin y était d'ailleurs bien développé, à son extension maximale (Figure 21). À cette époque, il a également colonisé l'aval du pertuis, de l'autre côté de l'autoroute. En 2019, le barrage a été avancé de quelques mètres pour vraiment bloquer le pertuis, probablement après une rupture ou un abandon du barrage (Figure 22). En 2022, lors d'une visite de terrain, il semblait abandonné car il n'était pas entretenu. Il a par la suite été recolonisé pour avoir l'aspect qu'il a aujourd'hui.



Figure 21. Vue aérienne du barrage « Autoroute » en 2012 (SPW, 2012)



Figure 22. Le barrage en 2019 (LHGF, 2019)

Depuis, son extension a varié au fil des années. Il a également rompu plusieurs fois : le 12 décembre 2011, le 21 février 2012, le 14 janvier 2015, le 6 juin 2016 (destruction totale) et lors des inondations de juillet 2021.



Figure 23. Rupture du barrage du 21 février 2012 (à gauche) et du 6 juin 2016 (à droite) (Facon, 2012 ; LHGF, 2016)

Les deux sites ont été choisis car ils présentent une extension et un développement importants. Ils vont potentiellement perdurer dans le temps, étant dans des zones protégées, bien que parfois perturbées par l'Homme. En effet, ces deux systèmes de barrages et alentours sont dans une réserve naturelle domaniale et une zone Natura 2000. De plus, ces deux sites se prêtent bien à l'utilisation du drone car ils sont proches et donc permettent en un seul vol de drone de les cartographier.

5 MÉTHODOLOGIE

5.1 ACQUISITION ET UTILISATION D'IMAGES DRONES

5.1.1 Matériel utilisé

Différents drones et capteurs ont été utilisés dans le cadre de ce travail. Le choix du matériel dépend des objectifs de chaque vol : création d'une orthomosaïque, modèle numérique de terrain, imagerie multispectrale, etc.

Deux drones ont été principalement utilisés. Ceux-ci appartiennent au Laboratoire *Earth Observation and Ecosystem Modelling* (EOSysTM, <https://www.eosysm.uliege.be>) de l'unité de Géomatique de l'Université de Liège. Ils ont été pilotés par l'assistant Jordan Bates.

Le drone DJI *Mavic 3 Entreprise* (Figure 24) est un drone de 915 g équipé d'une caméra CMOS 4/3 avec une résolution de 20 MP. Ce drone permet d'acquérir des images RGB (*Red Green Blue*) pour la création d'orthomosaïques géoréférencées. La caméra est composée d'un capteur passif qui capture la lumière réfléchie par les objets sur la surface terrestre. À chaque pixel, la valeur d'intensité lumineuse pour chacune des trois bandes du visible est attribuée.



Figure 24. DJI Mavic 3 Entreprise

Le drone DJI *Entreprise Matrice 300 Series* (Figure 25) est un drone professionnel qui permet d'embarquer différents capteurs tels qu'un capteur LiDAR, un capteur multispectral et un capteur thermique.



Figure 25. DJI Enterprise Matrice 300 Series

Les vols ont été automatisés à l'aide du logiciel de planification DJI Pilot 2. Grâce au GPS RTK intégré dans les deux drones, il n'est pas nécessaire de placer des points de contrôle au sol (GCP) pour garantir un géoréférencement précis.

D'autres vols ont été réalisés à l'aide du drone DJI Mini 4 (drone personnel, 249 g), notamment lors de l'événement de crue de janvier 2025. Ces vols ont permis de récolter des images lors de cette crue ainsi que des vidéos.

Différents capteurs ont été embarqués sur le drone DJI Matrice 300 Series :

- Capteur LiDAR DJI Enterprise Zenmuse L1

Le capteur LiDAR (*Light Detection And Ranging*) repose sur le principe d'un capteur actif. Il va envoyer un signal laser, souvent dans le proche infra-rouge. À partir du temps que met le signal à parcourir le chemin jusqu'à une cible puis revenir, il est possible de calculer la distance à laquelle cette cible se trouve et de recalculer sa position en 3 dimensions. Ainsi, il est possible de reproduire un nuage de points. Ce capteur étant parfois également accompagné d'une caméra RGB, comme celle du Zenmuse L1, il est possible d'obtenir un nuage de points colorisés.

- Capteur multispectral MicaSense RedEdge-P

Ce capteur permet de récolter des données sur cinq bandes spectrales (rouge (668 nm), vert (560 nm), bleu (475 nm), *red edge* (717 nm) et proche infrarouge (842 nm)). Il est alors possible de calculer différents indices de végétation. Il est important de noter qu'il faut calibrer le capteur en prenant une photo d'une cible de calibration radiométrique avec la caméra (Figure 26) avant et après le vol afin de garantir des résultats de qualité.



Figure 26. Cible de calibration radiométrique

- Capteur thermique : FLIR Vue Pro R 640 (Teax heated shutter) - Teax thermal capture 2

Ce dernier capteur est également un capteur qui va mesurer la radiation thermique (rayonnement infrarouge) émise par un objet, qui est fonction de sa température. Il est donc possible de traiter ce signal pour connaître la température de surface réelle de l'objet. Il faut également calibrer le capteur avec une cible (Figure 27). Ici, la cible au sol est composée d'un bac d'eau avec un capteur de température (cible froide) et une zone couverte par un plastique dur noir avec un capteur de température derrière (cible chaude). Connaissant la température réelle de ces deux points, il est possible de calibrer le reste des données.



Figure 27. Cibles de calibration du capteur thermique

Le Tableau 1 reprend un récapitulatif des caractéristiques du matériel utilisé, de la résolution obtenue, du programme utilisé pour réaliser le *processing* et des *outputs* obtenus.

Caméra	Drone	Hauteur de vol (m)	Résolution	Processing	Outputs
<i>Caméra RGB</i>	DJI Mavic 3 Entreprise	100	3 x 3 cm	Pix4D	Orthomosaïque
<i>Caméra LIDAR</i>	DJI Entreprise Matrice 300 Series	50	3 x 3 cm (MNS)	DJI Terra	Nuage de points, MNT, MNS
<i>Caméra Multispectrale</i>	DJI Entreprise Matrice 300 Series	100	6 x 6 cm	Pix4D	5 bandes (R,G, B, <i>Red Edge</i> , IR)
<i>Caméra Thermique</i>	DJI Entreprise Matrice 300 Series	120	15 x 15 cm	Pix4D	Carte de données de températures de surface

Tableau 1. Caractéristiques des vols drone et du processing

5.1.2 Acquisition des images sur le terrain

Plusieurs acquisitions d'images drones ont été réalisées dans le cadre de ce mémoire et à différentes dates (Tableau 2). Le but est de couvrir différentes saisons pour y détecter les éventuels changements au cours du temps.

En septembre 2024, un vol « test » a été réalisé pour faire un repérage sur toute la zone (« Chalet » et « Autoroute ») afin d'avoir une orthomosaïque. Le multispectral a été testé sur la partie « Chalet » pour voir ce que cela donnait.

Le LiDAR a été réalisé sur la partie « Chalet » en octobre 2024.

En novembre 2024, l'orthomosaïque et le LiDAR ont été réalisés à nouveau sur toute la zone.

En mars 2025, toutes les caméras ont été utilisées. Le capteur thermique n'était pas disponible avant. Celui-ci a connu quelques difficultés durant le vol, il n'a donc survolé que les deux zones avec les barrages mais pas la zone entre les deux.

Finalement, une dernière campagne a été réalisée en juin 2025 avec tous les capteurs. Néanmoins, le DJI Mavic 3 Entreprise n'était pas disponible donc l'image RGB a été extraite depuis le LiDAR. Malheureusement, l'image thermique n'a pas donné de bons résultats après le processing. Pendant le vol, la caméra s'est arrêtée à plusieurs reprises.

Date	RGB	Multispectrale	LiDAR	Thermique
17/09/2024	Sites « Chalet » et « Autoroute »	Site « Chalet »	/	/
24/10/2024	/	/	Site « Chalet »	/
29/11/2024	Sites « Chalet » et « Autoroute »	/	Sites « Chalet » et « Autoroute »	/
28/03/2025	Sites « Chalet » et « Autoroute »	Sites « Chalet » et « Autoroute »	Sites « Chalet » et « Autoroute »	Sites « Chalet » et « Autoroute »
10/06/2025	Sites « Chalet » et « Autoroute »	Sites « Chalet » et « Autoroute »	Sites « Chalet » et « Autoroute »	/

Tableau 2. Date d'acquisition d'images et types d'images utilisées dans le cadre de ce mémoire

5.1.3 Traitement des images et exemples de création d'outputs

5.1.3.1 Création d'orthomosaïques géoréférencées

La photogrammétrie est la méthodologie utilisée pour obtenir des informations fiables sur les objets physiques et leur environnement par l'enregistrement, la mesure et l'interprétation d'images photographiques. Elle fournit des données métriques sur la forme, les dimensions et la position des objets dans l'espace, sur la base d'images prises à partir de différents points de vue. La photogrammétrie peut être utilisée sur des images aériennes ou terrestres. Pour la photogrammétrie aérienne, l'objectif est de traiter des images provenant d'un avion ou d'un drone afin d'obtenir de nouveaux produits d'information spatiale pour la cartographie. Cette étape a été réalisée sur Pix4D.

Ainsi, grâce aux nombreuses images drones récoltées et géoréférencées, il est possible de créer une orthomosaïque géoréférencée et d'étudier les caractéristiques des objets constituant le système du castor. Par exemple, la Figure 28 reprend l'orthomosaïque produite après le traitement sur Pix4D pour la zone survolant les deux systèmes de barrages. Les éléments caractéristiques comme les bassins sont visibles à cette échelle. La résolution fine du produit fini permet d'étudier les petits éléments comme les petits canaux, la végétation, etc. Les zones sur les bords de l'orthomosaïque ne sont pas bien définies. Comme ces zones sont moins bien couvertes par les images du drone, il est difficile de les reconstruire. L'idéal est de les retirer pour la suite.



Figure 28. Exemple d'orthomosaïque obtenu à partir des images acquises en septembre 2024

5.1.3.2 Création du MNS et MNT

Le capteur LiDAR, grâce au retour du signal laser, permet de reconstruire, en association avec le capteur photographique, un nuage de points 3D colorisé. Ensuite, il est possible de créer le Modèle Numérique de Surface (MNS) et le Modèle Numérique de Terrain (MNT). Le MNS représente l'altitude de toutes les surfaces visibles, incluant la canopée, les toits et autres éléments en surélévation, tandis que le MNT est obtenu en filtrant uniquement les points correspondant au sol nu.



Figure 29. Exemple d'une partie du nuage de points obtenu à partir de la caméra LiDAR au niveau du site « Chalet » en octobre 2024

La création du nuage de points a été réalisée sur DJI Terra. Le MNS et le MNT ont été extraits sur CloudCompare grâce à une rasterisation. Le MNT a été extrait grâce au *CSF filter* qui extrait les points qui correspondent au relief puis cet ensemble de points a été aussi rasterisé. Il y a une interpolation entre les différents points au sol pour combler les espaces sans point (par exemple, l'eau). La Figure 30 reprend un exemple de MNS et de MNT obtenus. À droite, un exemple de version ombrée, *hillshade*, qui permet de mieux mettre en avant les variations de relief.

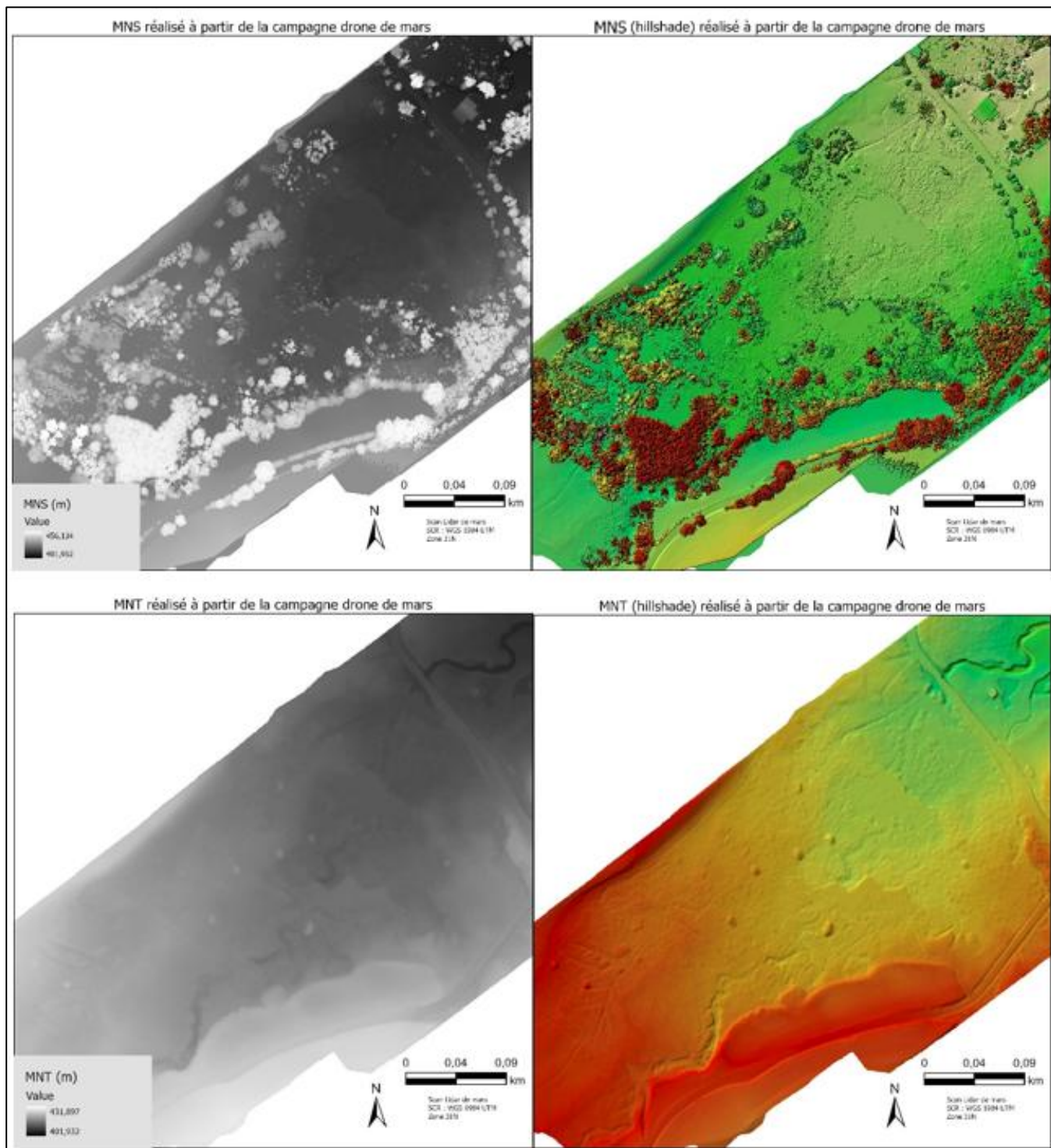


Figure 30. Résultats obtenus pour le MNS et le MNT, avec version ombragée au niveau du site du chalet en mars 2025

5.1.3.3 Création d'une carte de données thermiques

À partir du capteur thermique, il est possible d'extraire la température de surface du sol, calibrée par rapport à la température au niveau de la cible de calibration. Un raster avec une valeur réelle de température pour chaque pixel en ressort alors.

La Figure 31 reprend un exemple du résultat obtenu pour la zone « Chalet ». Il est possible de distinguer les différences de températures au niveau de l'eau, qui est plus froide, de la végétation mais aussi de distinguer les espaces plus chauds, comme le toit du chalet par exemple.

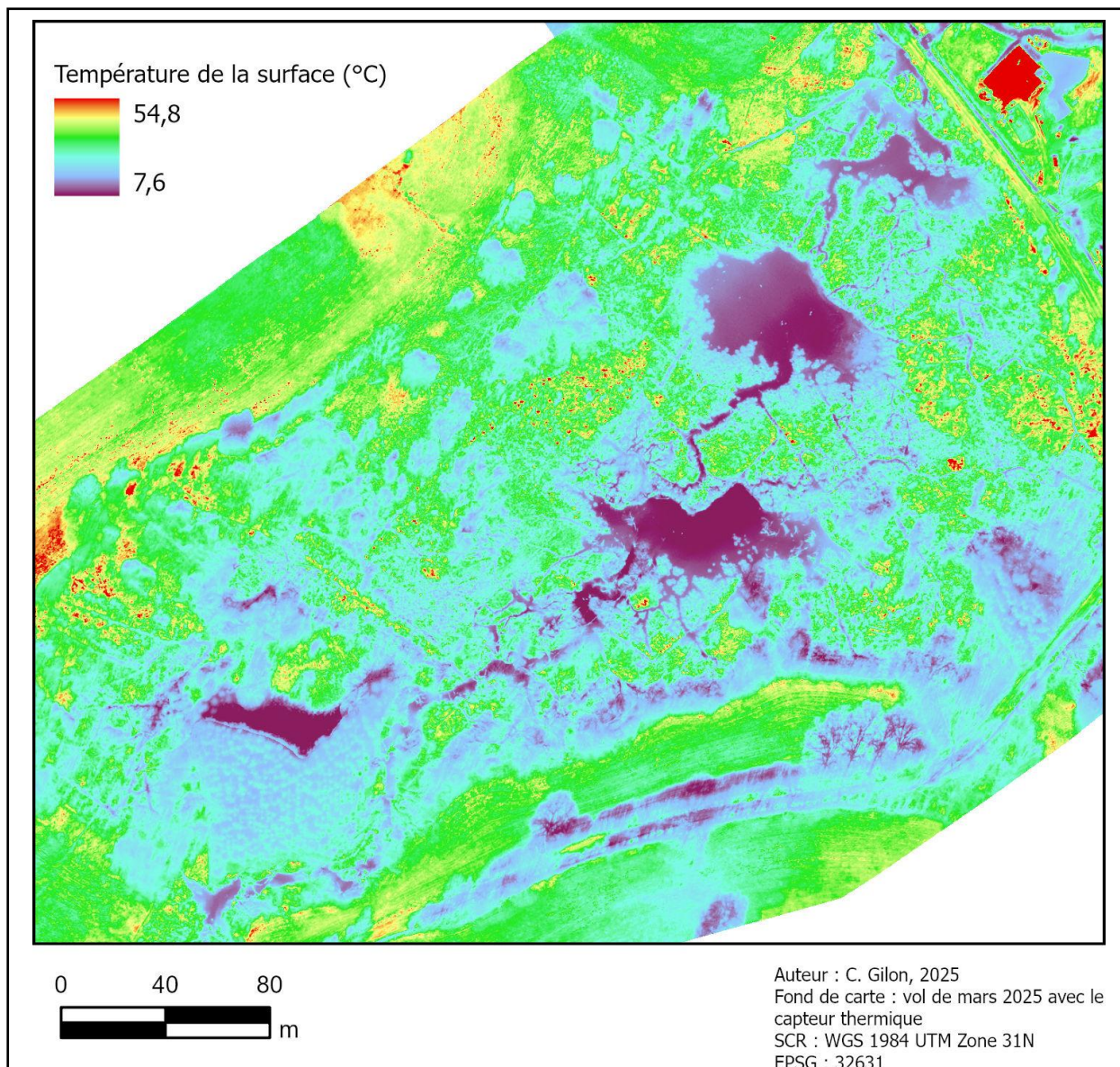


Figure 31. Carte des températures obtenues en mars 2025 au niveau du site « Chalet »

5.1.3.4 Création d'indices multispectraux

Le capteur multispectral permet obtenir des valeurs pour cinq bandes spectrales : Rouge, Vert, Bleu, *Red Edge* et l'Infrarouge. Ces bandes permettent de calculer des indices comme le NDVI notamment. Le NDVI, *Normalized Difference Vegetation Index*, permet d'étudier l'état de la végétation.

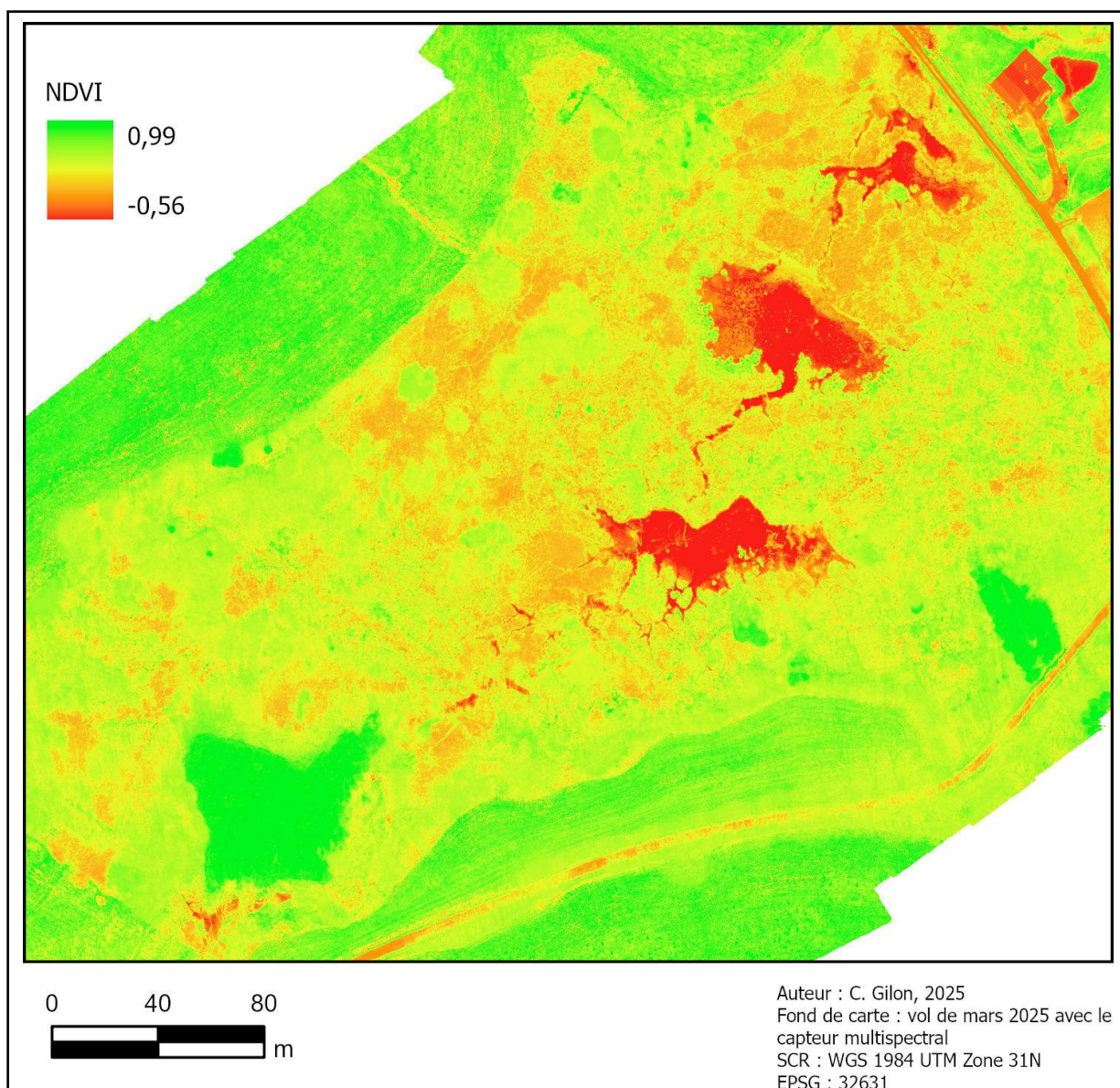


Figure 32. Carte du NDVI au niveau du site « Chalet » en mars 2025

5.1.4 Cartographie des sites d'étude et définition des objets cartographiés

Pour comprendre l'impact du castor, il faut caractériser les différents éléments qu'il crée dans le paysage. Les éléments suivants ont été cartographiés grâce aux images drone :

- Les barrages : chaque barrage a été cartographié. Les données de hauteurs de barrages sont extraites depuis le MNT construit par le LiDAR ou parfois par le MNS construit par photogrammétrie à partir des images de l'orthomosaique en cas d'absence du LiDAR. En prenant l'élévation du niveau d'eau en amont du barrage et en soustrayant l'élévation en aval, il est possible de calculer la hauteur. Cependant, cette hauteur dépend du niveau d'eau car le LiDAR ne traverse pas l'eau.
- Les bassins : les bassins sont définis comme étant des étendues d'eau stagnante retenues par le barrage. Néanmoins, il n'y a pas toujours un bassin clairement identifiable derrière chaque barrage et parfois, il est difficile de faire la différence entre le cours d'eau et la retenue. Ensuite, l'aire de chaque bassin a été calculée.
- Les huttes : les huttes sont cartographiées à l'aide du MNT où elles apparaissent comme des petites collines. Visuellement, elles ressemblent à un amas de bois.
- Les canaux : les canaux principaux ont été cartographiés. La longueur de ceux-ci a été mesurée.
- Les réserves de nourriture : les réserves se trouvent en général près de la hutte dans l'eau. C'est un amas de bois visible sur l'image RGB qui est noyé pour être conservé.
- Les zones marécageuses/humides : en mars, comme la végétation est moins présente, il est possible d'observer des zones humides ou marécageuses. Sur les images, il est possible d'observer ces zones qui présentent une humidité plus importante que les zones aux alentours et montrent la présence d'eau parfois, sans être des bassins.
- Les zones de transition entre les bassins : ces zones ont été cartographiées dans cette classe car ce ne sont pas vraiment des bassins, ni des canaux ni la rivière. L'eau y est ralentie mais s'écoule d'un barrage à l'autre.

Tous ces éléments ont été cartographiés sur ArcGIS Pro, pour chaque campagne drone. Les éléments seront donc caractérisés et comparés entre eux dans les résultats pour voir les évolutions dans ces zones.

5.2 ACQUISITION ET UTILISATION D'AUTRES TYPES D'IMAGES

5.2.1 Acquisition

Des orthophotos issues de vols par avion ont été utilisées dans le cadre de l'analyse de l'occupation du sol. Celles-ci ont été extraites à partir du jeu de données mis à disposition sur le Géoportail de Wallonie (Service Public de Wallonie, 2024). Les orthophotos des années comprises entre 1971 et 2023 ont été extraites (Tableau 3). De plus, le Modèle Numérique de Terrain (MNT) de la Wallonie a été utilisé, en particulier, celui de MNT de 2013 et celui de 2021.

<i>Année</i>	<i>Saison</i>	<i>Nombre de canaux</i>	<i>Résolution (m)</i>	<i>N° planche</i>	<i>Nom du/des fichier(s)</i>
1971	été	1	1	ORTHO 1971 0242 0110	/
1994 - 2000	été	4	0,4	55_35_E	55_35_E
2006 - 2007	printemps	4	0,5	55	55_0122 ; 56_0122
2008 - 2009	été	4	0,25	55	55_0122 ; 56_0122
2009 - 2010	été	4	0,25	55	55_0122 ; 56_0122
2012 - 2013	été	4	0,25	55	55_0122 ; 56_0122
2015	printemps	4	0,25	55	55_0122 ; 56_0122
2016	été	4	0,25	55	55_0122 ; 56_0122
2017	été	4	0,25	55	55_0122 ; 56_0122
2018	été	4	0,25	55	55_0122 ; 56_0122
2019	été	4	0,25	55	55_0122 ; 56_0122
2020	printemps	4	0,25	55	55_0122 ; 56_0122
2021	hiver	4	0,25	55	55_0122 ; 56_0122
2022	printemps	4	0,25	55	55_0122 ; 56_0122
2023	été	4	0,25	55	55_0122 ; 56_0122

Tableau 3. Inventaire des orthophotos disponibles en Wallonie sur le Géoportail

5.2.2 Profil en long du cours d'eau

Le profil en long de la Chavanne a été réalisé en retraçant le cours d'eau à l'aide des orthophotos de la Wallonie de 2023 ainsi que du MNT de 2021. Ensuite, des points ont été créés le long du cours d'eau tous les 50 cm. La valeur d'altitude a été extraite pour chacun des points à partir du MNT de 2021. L'autoroute passe au-dessus du cours d'eau et était présente sur le profil en long. Elle a été lissée pour qu'elle n'apparaisse plus sur le profil.

5.2.3 Classifications automatiques

Afin d'évaluer l'évolution de l'occupation du sol sur la zone étudiée depuis l'arrivée du castor, des classifications automatiques ont été réalisées. Le but est de mettre en avant les zones qui ont subi des modifications de l'occupation du sol et de voir quels types de végétation ont subi des changements. Cependant, uniquement les images durant l'été ou la fin du printemps ont été utilisées pour réaliser les classifications automatiques. En effet, si la végétation n'est pas développée, il est plus difficile pour l'algorithme de la détecter. Les années sélectionnées apparaissent en gras dans le Tableau 3.

Une classification automatique est un processus qui permet d'attribuer une classe d'occupation du sol, grâce à des algorithmes, à un pixel ou un objet d'une image en fonction de sa signature spectrale. Il existe des classifications supervisées (utilisées dans le cadre de ce travail), pour lesquelles les algorithmes vont être entraînés grâce à des polygones d'entraînement déterminés manuellement et des classifications non supervisées qui vont attribuer une classe aux pixels ou objets sans utiliser d'entraînement.

La méthodologie pour les réaliser (mise au point lors de mon stage à l'ISSeP) est détaillée ci-dessous avec toutes les étapes suivies sur ArcGIS Pro.

Une zone d'étude a été définie sur base de l'emprise des images drones survolant les deux sites. Cette zone se trouve entre deux tuiles (55_0122 ; 56_0122) des orthophotos. Différentes étapes ont été réalisées pour créer un nouveau raster reprenant la zone d'intérêt. Premièrement, il a fallu fusionner les deux tuiles avec l'outil *Merge* puis extraire la zone qui a été choisie avec l'outil *Extract by Mask*.

Avant de se lancer dans la classification automatique supervisée, il a été nécessaire de définir au préalable les classes d'occupation du sol à analyser. Afin d'avoir une idée du nombre de classes à définir selon les regroupements spectraux dominants que le logiciel arrivait à détecter, une classification non-supervisée a été réalisée. Celle-ci a été faite sur base des pixels avec l'algorithme ISO Cluster et un maximum de 10 classes possibles. De ce traitement, 8 classes sont ressorties. Au final, 9 classes ont été désignées sur base de cette classification non-supervisée et des observations faites sur les orthophotos, les images drones et le terrain (Figure 33). La classe « Eau » a été créée pour classifier les étendues d'eau des bassins créés par le castor. Deux types de forêts ont été observés : « Forêt de feuillus » et « Forêt de conifères ». La classe « Zone développée » a été créée pour les toitures, les chemins et les routes. Une classe « Prairies » a été désignée car elles sont nombreuses autour du barrage. La classe « Végétation de zone humide » sert à caractériser la végétation qui s'est développée autour des bassins, de type herbacée. Des zones de « Sol nu » sont présentes, notamment dans les zones où les forêts sont défrichées ou lorsque certaines parcelles de cultures sont mises au repos. Il y a donc aussi une classe « Cultures » pour ces parcelles agricoles lorsqu'elles sont en activité. Finalement, les images présentant beaucoup d'ombres, il a été décidé de leur attribuer une classe afin de les isoler des autres classes.

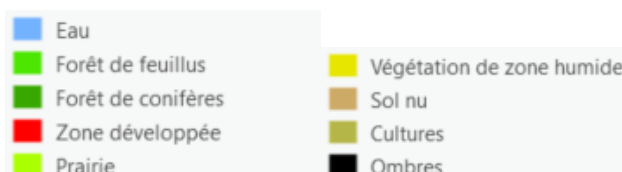


Figure 33. Les 9 classes désignées

L'outil *Training Sample Manager* d'ArcGIS a permis de créer les polygones d'entraînement pour chaque année. Pour chaque polygone créé, la signature spectrale de la zone sondée est alors caractérisée et sera utilisée lors de la classification.

Dans l'outil *Classify*, quatre algorithmes sont disponibles pour une classification supervisée :

- Support Vector Machine : cet algorithme va rechercher « les vecteurs de support et l'hyperplan séparateur pour chaque paire de classes afin d'optimiser la marge entre les classes » (Esri, n.d.).
- K-Nearest Neighbor : avec cet algorithme, un échantillon est attribué à une classe sur base des classes des K points d'entraînement les plus proches dans l'espace (Esri, n.d.).
- Random Trees : cet algorithme va utiliser l'analyse des arbres aléatoires pour créer les classes (Esri, n.d.).
- Maximum Likelihood : cet algorithme est basé sur le théorème de Bayes en supposant que les échantillons de chaque classe suivent une distribution normale. Pour chaque échantillon, il va calculer la probabilité de toutes les classes et va ensuite attribuer la classe présentant la probabilité la plus grande à l'échantillon (Esri, n.d.).

Dans le cadre de mon stage à l'ISSEP, les quatre algorithmes ont été expérimentés et le constat a été fait que le *Support Vector Machine* montrait les résultats avec la meilleure précision. C'est donc cet algorithme qui a été utilisé dans ce mémoire.

Afin d'améliorer les résultats des classifications sur les images drones, dont la résolution est très fine par rapport aux orthophotos, il est nécessaire de segmenter l'orthomosaïque drone afin de réaliser une classification supervisée orientée objet. Ce processus sert à segmenter les pixels qui ont les mêmes caractéristiques en objets plus grand sur base de caractéristiques similaires entre les pixels. Pour ce faire, l'outil *Segmentation* de *Imagery* a été utilisé.

Finalement, une évaluation de la classification a été réalisée à l'aide de polygones de validation qui vont permettre de comparer la classe attribuée par la classification à la classe réelle pour ensuite réaliser une matrice de confusion.

Grâce à cette matrice de confusion, il est possible de calculer différents indicateurs pour évaluer la précision et la sensibilité de ces classifications automatiques. Pour l'exactitude globale (*Global Accuracy*), il faut diviser les Vrais Positifs (VP) par le nombre total de points prospectés :

$$Global Accuracy = \frac{VP}{Total\ des\ observations}$$

5.3 ACQUISITION ET TRAITEMENT DE DONNÉES HYDROLOGIQUES

L'acquisition de données hydrologiques constitue une étape essentielle pour analyser le fonctionnement de la Chavanne et comprendre les interactions entre la rivière et les aménagements réalisés par le castor. Ainsi, différents types de données ont été collectés.

5.3.1 Courbe de tarage

Une courbe de tarage se rapporte à une échelle limnimétrique en particulier. Cette courbe permet de connaître le débit d'un cours d'eau grâce à la lecture de la hauteur d'eau sur l'échelle. Cette courbe est créée à l'aide d'une série de mesures prises à l'échelle limnimétrique et d'un jaugeage au même endroit, pour différents types de hauteurs d'eau. Ainsi, il est possible d'obtenir un graphique qui reprend une courbe de tendance entre le débit et la hauteur d'eau. Une fois cette courbe créée et comportant assez de données, cela permet d'aller sur le terrain, prendre la hauteur d'eau sur l'échelle et en déduire le débit grâce à la relation entre les deux variables. Les jaugeages à cette station ont été réalisés à l'aide de la sonde électromagnétique, dont l'utilisation est décrite dans la section 5.3.2.2.

5.3.2 Étude des débits et comparaison avant et après la colonisation par le castor

Tout d'abord, une analyse hydrologique a été réalisée afin de caractériser et mieux comprendre le régime hydrologique dans la région d'étude. L'idéal aurait été de la réaliser sur la Chavanne directement mais elle ne possède plus de station limnigraphique. La station de la Lienne à Trou de Bra (107 km²) sera alors utilisée comme référence pour étudier la Chavanne. En effet, celle-ci se trouve en aval de la confluence avec la Chavanne et les caractéristiques du bassin versant sont relativement similaires en termes d'occupation du sol, de topographie et de substratum. Cette analyse se fait sur toutes les années disponibles pour cette station soit du 1^{er} janvier 2006 au 5 mai 2025.

Différents débits caractéristiques sont extraits de données de débits horaires :

- le débit moyen sur la période d'étude et le module spécifique (débit moyen normalisé par rapport à la taille du bassin versant) ;
- le débit maximum et minimum de la période ;
- le débit médian et l'écart-type ;
- le débit caractéristique d'étiage (DCE), c'est-à-dire la moyenne, sur plusieurs années, du débit qui n'est pas dépassé pendant les 10 jours les plus secs de chaque année.

Afin de comprendre l'impact du castor sur les débits, que ce soit en période normale, de crue ou d'étiage, il serait idéal de comparer les données hydrologiques de la Chavanne avant et après la colonisation par le castor, comme cela a été réalisé sur le Cheval par Nyssens *et al.* (2011). Cependant, aucune série de données complète directement exploitable n'est disponible pour cette analyse. Il convient de signaler que le LHGF a réalisé un suivi sur la Chavanne du pertuis de l'autoroute de mai 2006 à novembre 2010 à l'aide d'un limnigraphe OTT à mouvement mécanique. À cette époque, le castor était très peu présent et les données auraient pu servir de point de comparaison. Cependant, les données sont principalement conservées sur un support papier et certaines sont encodées dans Excel. Leur traitement nécessiterait un travail conséquent de numérisation et d'exploitation, qui dépasse le cadre de ce mémoire (Houbrechts, 2025 [communication personnelle]). Une autre approche consisterait à comparer la Chavanne avec un cours d'eau similaire en termes de caractéristiques hydrologiques et structurales qui n'est pas colonisé par le castor. Malheureusement, il n'existe pas de cours d'eau sans castor à proximité. Pour réaliser cette comparaison, deux périodes vont alors être étudiées sur les stations de la Lienne, une avant la colonisation du castor et une après.

Au total, il y a trois stations sur la Lienne, d'amont en aval : Trou de Bra (L7290), Chevron Pont (6804) et Lorcé (L6240). Les données de débits horaires ont été récoltées à partir du site *Hydrométrie.be* (SPW, 2025).

Le but est donc d'étudier deux périodes d'environ cinq ans. La station de Trou de Bra ne présente pas une période assez longue d'enregistrement pour avoir une période avant l'arrivée du castor. Uniquement les valeurs pour la période après le castor y ont été calculées afin de les comparer aux autres stations. Un traitement pour ne garder que des années « normales » ou « représentatives » a été réalisé afin que les valeurs aberrantes ne biaisent pas les résultats. Une fois ces séries constituées, des analyses des débits caractéristiques mentionnés ci-dessus ont été réalisées pour les trois stations et les périodes considérées. De plus, certains événements spéciaux (crues, étiages) sont étudiés individuellement et comparés entre les deux périodes.

Station	Trou de Bra	Chevron Pont	Lorcé
Code	L7290	6804	L6240
Bassin versant (km ²)	107	141,82	147
Date de création	2006	1993	1994

Tableau 4. Caractéristiques des stations limnimétriques de la Lienne

5.3.2.1 Choix de deux périodes : une avant le castor et une après

Les données utilisées pour la sélection des données proviennent de l'Institut Royal Météorologique, qui offre la possibilité d'extraire différentes variables telles que les températures moyennes journalières et précipitations journalières à partir des pixels qui contiennent la localisation des deux stations étudiées. Pour les deux variables citées précédemment, les années se trouvant dans une plage de \pm un écart-type autour de la moyenne ont été sélectionnées. Les deux stations se situant sur deux pixels différents, les années communes aux deux ont été sélectionnées. Finalement, seules les années avant l'arrivée du castor et après l'arrivée du castor ont été sélectionnées. Pour valider le choix des années investiguées, des vérifications graphiques des variables ont été faites pour s'assurer qu'aucune anomalie n'était présente au sein des années.

5.3.2.2 Étude des crues - Loi de Gumbel

Pour déterminer l'influence des castors sur les crues, la loi de Gumbel a été utilisée. C'est une loi de probabilité qui permet de calculer la récurrence d'un événement hydrologique et qui est adaptée à la prédiction des fréquences d'événements hydrologiques particuliers tels que les crues.

La première étape consiste à extraire des débits horaires maximums et de les classer par ordre décroissant. Généralement, ce sont les débits maximums annuels qui sont extraits (séries annuelles). Dans le cas de cette étude, ce sont les séries partielles (plusieurs crues extraites par an) qui sont utilisées afin d'avoir davantage de crues pour les deux périodes d'étude.

Ces séries partielles ont été extraites pour les stations pour des crues se produisant 5,5 fois par an en suivant la méthodologie et le code réalisé par J. Van Campenhout *et al.* (2020) sur toute la série de données disponible. Ensuite, différents paramètres statistiques sont calculés pour ajuster la loi de Gumbel pour les crues extraites des périodes étudiées à l'aide de la méthode des moments :

- Q_{moy} : la moyenne des débits maximums Q de la période ;
- σ : l'écart-type ;
- a : le paramètre d'échelle et son inverse $1/a$:

$$\frac{1}{a} = \frac{\sqrt{6}}{\pi} * \sigma = 0,78 * \sigma$$

- Q_0 : le débit de base de la loi de Gumbel :

$$Q_0 = Q_{\text{moy}} - \gamma * \frac{1}{a}$$

avec γ la constante d'Euler qui vaut 0,577.

Finalement, à l'aide de ces paramètres, il est possible de calculer la période de retour (T) des débits de la série partielle :

$$T = \frac{1}{1 - e^{-e^{-a(Q - Q_0)}}}$$

La loi de Gumbel a également été utilisée pour calculer la récurrence des crues du 10 octobre 2024 et du 10 janvier 2025 à la station de Trou de Bra.

5.3.2.3 Étude des étiages - Loi de Maillet

L'étiage peut être défini comme une « période pendant laquelle les débits sont très bas et peu variables parce qu'issus des seules nappes souterraines en voie d'épuisement, de tarissement » (George & Verger, 2000). Afin d'étudier l'impact des castors sur les périodes d'étiage, la loi de Maillet est utilisée pour comparer les coefficients de tarissement avant et après l'arrivée du castor. Ces analyses similaires ont été réalisées dans Gischer *et al.* (2012). Lors de périodes plus sèches (pas de rechargement des nappes aquifères), une phase de décroissance des débits sur l'hydrogramme est caractéristique des récessions. La décroissance est exponentielle et la courbe de récession permet de décrire comment le débit diminue dans le temps lors du tarissement, c'est-à-dire le rythme de vidange des réserves aquifères. La loi de Maillet permet de caractériser cette décroissance :

$$Q(t) = Q_0 e^{-\alpha t}$$

avec $Q(t)$ le débit après un temps t , Q_0 le débit initial de la période de tarissement et α le coefficient de tarissement.

Dans le cadre de ce travail, des périodes de 4 - 5 jours au minimum ont été sélectionnées visuellement à partir de l'hydrogramme, en l'absence des précipitations. La courbe de récession peut se découper en trois périodes caractérisées par trois modes de vidange des réservoirs différents : l'écoulement rapide de crue, le ruissellement de surface et de subsurface et finalement, la vidange des nappes souterraines. Chacune de ces phases représente, sur la courbe, des segments de droite successifs avec des coefficients angulaires différents : α_1 , α_2 et α_3 . La courbe de tarissement correspond au dernier segment de la courbe de récession (α_3) (Gischer *et al.*, 2012 ; Houbrechts, 2022 [Cours d'hydrologie]). Ces coefficients ont été calculés à l'aide d'un code réalisé sur RStudio (Annexe 3). La Figure 34 reprend un exemple réalisé dans le cadre de ce travail où les différents segments sont visibles avec en rouge α_1 , en jaune α_2 et en vert α_3 sur une période de 4 jours du 11 au 15 septembre 2005.

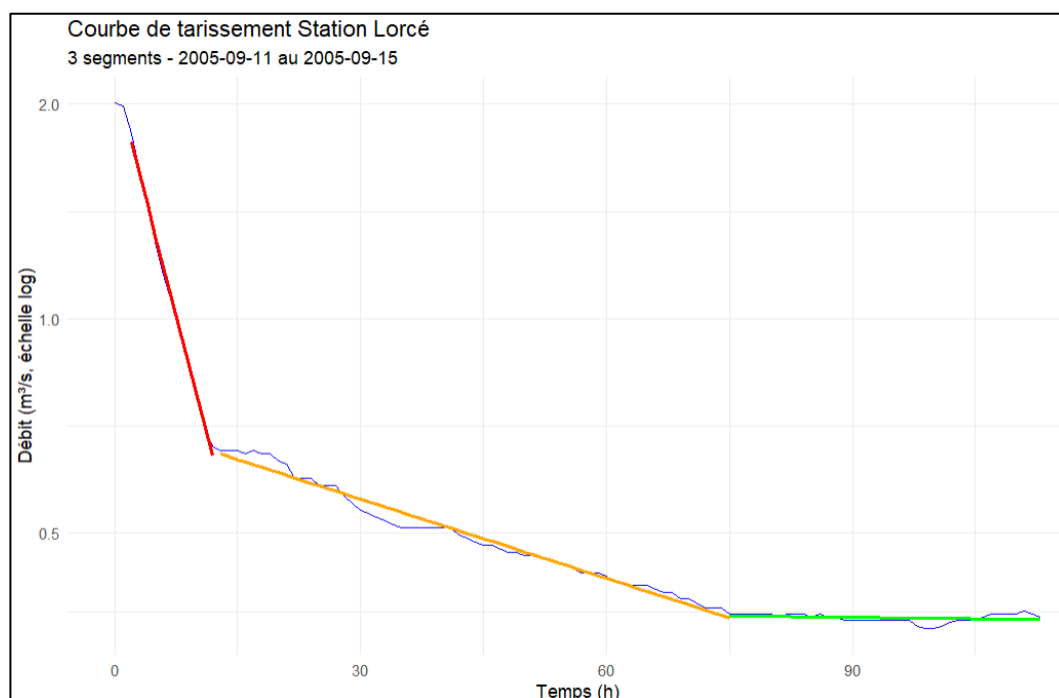


Figure 34. Courbe de tarissement pour la période du 11 au 15 septembre 2005

5.3.3 Bilan hydrologique des sites

Afin de comprendre l'impact des barrages sur les débits et d'avoir un bilan complet des deux systèmes, des jaugeages ont été réalisés. Une première acquisition a eu lieu le 18 octobre 2024 dans le cadre du cours d'Hydrologie dispensé en troisième bachelier par G. Houbrechts. Le but de ce terrain était de montrer aux élèves les différentes techniques de jaugeage possibles, ce pourquoi différents outils ont été utilisés : jaugeage chimique, jaugeage à la sonde électromagnétique et jaugeage au moulinet. Les différentes techniques seront présentées ci-dessous. Une seconde acquisition a été réalisée le 9 avril 2025. Cette fois, les jaugeages ont été réalisés à l'aide des jaugeages chimiques et à la sonde électromagnétique.

Les jaugeages ont été réalisés en amont des bassins, après la sortie du site « Chalet » et après la sortie du site « Autoroute » ainsi que sur les affluents.

5.3.3.1 Jaugeage chimique

Le jaugeage chimique a pour but d'injecter une quantité connue d'une solution dont la concentration en sel est déterminée en un endroit du cours d'eau (point d'injection). En aval de ce point, une sonde reliée à un ordinateur est placée. Cette sonde permet de mesurer la conductivité, la température et la concentration en sel de l'eau toutes les secondes (Houbrechts, 2022 [Cours d'hydrologie]). Ces données, après traitement, permettent de connaître le débit. Le choix du tronçon de mesure est important. Il faut un régime permanent et assez turbulent pour avoir un mélange homogène sans perte de la solution mais il ne faut pas de cellules de contre-courant. Il faut également prendre en compte la végétation qui peut impacter les mesures (Dumas, 1952).

Deux types de jaugeage chimique sont possibles : le jaugeage chimique instantané et continu. Dans le premier cas, le liquide est lâché en une seule fois dans l'eau. Dans le second cas, un vase de Mariotte est utilisé, permettant ainsi de verser de manière continue la solution dans l'eau avec un débit constant (Houbrechts, 2022 [Cours d'hydrologie]). Dans le cadre de cette étude, le jaugeage instantané a été mis en place.

Ainsi, il est possible de trouver le débit à partir de la formule suivante (Dumas, 1952) :

$$Q = \frac{V_e * C_i}{T * C_{moy}}$$

avec :

- Q, le débit recherché en l/s ;
- V_e , le volume écoulé en l ;
- C_i , la concentration initiale dans l'eau en g/l ;
- T, le temps de passage en secondes ;
- C_{moy} , la concentration moyenne mesurée en g/l.

Le volume écoulé V_e peut être défini par :

$$V_e = \frac{M}{(C_{moy} - C_i)}$$

où M est la masse de sel introduite dans le cours d'eau (g).

5.3.3.2 Jaugeage à la sonde électromagnétique

Une sonde électromagnétique mesure des vitesses d'écoulement selon la loi d'induction de Faraday : une tension est induite lorsqu'un conducteur électrique traverse perpendiculairement un champ magnétique. Cette tension est proportionnelle à la vitesse d'écoulement (Musy & Higy, 2004). La sonde se trouve sur une perche graduée, permettant de connaître la profondeur à laquelle elle se trouve.

La sonde Marsh McBirney Inc® Flo-Mate™ (Model 2000, Frederick, Maryland, USA) a été utilisée. Sur le terrain, des mesures sont prises sur cinq verticales de la section étudiée. Les étapes suivantes sont réalisées :

- sélectionner un tronçon représentatif des caractéristiques du cours d'eau ;
- mesurer la largeur du cours d'eau au niveau de cette section, perpendiculairement à la berge ;
- calculer la position de chaque verticale afin d'avoir un écart égal entre elles mais aussi depuis les deux berges ;
- positionner la perche à la verticale avec la sonde vers l'amont, la personne prenant la mesure derrière celle-ci pour ne pas gêner la mesure du courant ;
- sur une même verticale, mesurer les vitesses à différentes profondeurs.

5.3.3.3 Jaugeage au moulinet (OTT C2)

Le moulinet hydrométrique repose également sur la mesure de la vitesse en différents points d'une section. L'outil est composé d'une perche avec une hélice et un petit moteur qui compte le nombre de tours effectués par l'hélice sur 30 secondes. Grâce à la valeur du nombre de tours par seconde et une relation donnée par le constructeur, il est possible d'en déduire la vitesse d'écoulement.

5.3.3.4 Intégration des vitesses

Une fois que les données de vitesses en différents points de la section étudiée sont connues, il faut intégrer les vitesses (V) dans l'espace de la section (S) pour trouver le débit Q :

$$Q = \iint_S V dS$$

5.3.4 Installation d'une station de référence

La Chavanne n'ayant plus de station de référence, il a été décidé de remédier à cette absence. Une échelle limnimétrique et un capteur de pression (voir section 5.3.5.) ont été posés dans la section du cours d'eau située avant le complexe de barrages « Chalet » et après la confluence avec le bief du moulin et le ruisseau de Serine-Fagne (voir Figure 35, coordonnées Lambert 72 : 244385 m, 111354 m). Ce lieu est accessible depuis la maison située au n°9 Bas-Vâ à Vaux-Chavanne. À cet endroit, des jaugeages ont été réalisés afin de créer une courbe de tarage.

5.3.5 Suivi du niveau d'eau dans les bassins

En plus de la station de référence, des capteurs de pression et de température, aussi appelés *Divers*, ont été placés (TD-Diver 10 m, de la société Van Essen Instruments). Ces capteurs permettent de suivre les hauteurs d'eau grâce à la pression de la colonne d'eau au-dessus du capteur.

Ils ont été placés à trois endroits différents (Figure 35) : à la station de référence, dans le bassin amont (appelé dans ce cas bassin amont) et dans le bassin du milieu (appelé dans ce cas bassin chalet) du site « Chalet ». Cela permet un suivi de l'évolution des hauteurs d'eau : comprendre les relations entre le débit du cours d'eau et la hauteur des bassins mais aussi un suivi de l'activité du castor (rehaussement du barrage).

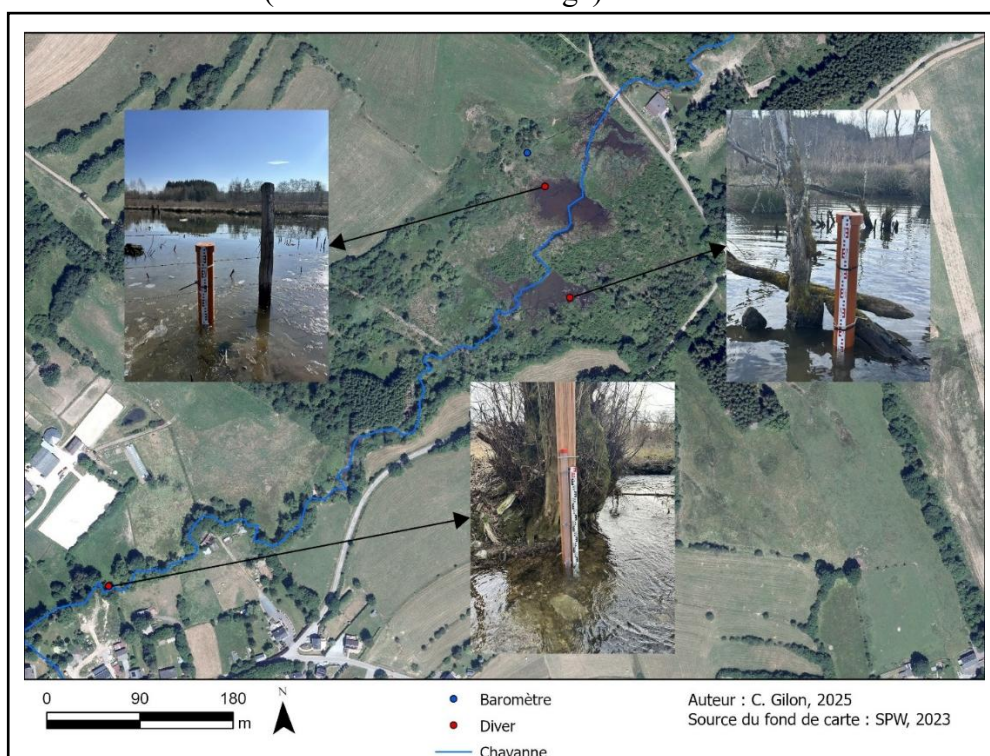


Figure 35. Localisation des Divers et du baromètre

Une structure a été créée pour installer les capteurs dans les deux retenues de castors. En effet, il faut les suspendre à l'aide d'un fil à la verticale. Du ciment à prise rapide a été coulé dans un socle en béton autour d'un tube en PVC afin de le maintenir vertical (Figure 36). Le tube a été percé afin de laisser entrer l'eau mais aussi pour passer une tige afin de suspendre le *Diver* à l'intérieur. Une échelle limnimétrique a aussi été ajoutée afin de permettre la lecture de la hauteur d'eau et de calibrer les données. Des chaînes ont été placées dans le socle et coulées en partie dans le béton afin de faciliter le transport de la structure. Le *Diver* à la station de référence, lui, a seulement été glissé dans l'échelle limnimétrique et

suspendu à un clou placé au-dessus de cette échelle. De plus, un baromètre est nécessaire afin de soustraire la pression atmosphérique aux pressions enregistrées. Celui-ci a été caché près du deuxième bassin, le long d'une barrière, à l'ombre. L'ensemble du système a été placé le 8 février 2025. Un relevé des *Divers* a été réalisé le 11 juin 2025. Ils ont ensuite été remplacés pour continuer le suivi.



Figure 36. Montage réalisé pour placer les *Divers* dans les bassins

Afin de convertir les données de pression en hauteur d'eau, il faut utiliser la formule suivante :

$$P_H = P_0 * e^{\frac{-M*g*H}{R*T}}$$

avec :

- P_H = pression atmosphérique à hauteur H (données du baromètre) ;
- P_0 = pression atmosphérique à hauteur d'eau ;
- $M = 28,8 \times 10^{-3}$ kg/mol (masse moléculaire de l'air) ;
- H = hauteur en mètres ;
- $R = 8,314$ J/mol/K (constante des gaz parfaits) ;
- T = température en Kelvin ;
- $g = 9,81$ m/s² (accélération de chute standard).

Une fois qu'on connaît la pression P_0 , le *Diver* mesure la pression relative de l'eau, il faut donc soustraire la pression atmosphérique :

$$WC = 9806,65 * \frac{(P_{diver} - P_0)}{\rho * g}$$

avec :

- WC = colonne d'eau en mètres ;
- P_{diver} = pression mesurée par le *Diver* ;
- P_{atm} = pression atmosphérique mesurée par le baromètre ;
- ρ = masse volumique de l'eau.

Les données ont également été pondérées par rapport à la différence d'altitude entre le capteur et le baromètre et calibrées grâce aux observations de hauteurs d'eau réalisées à

différentes dates. Les données de hauteurs d'eau à la station ont ensuite été converties en débit grâce à la courbe de tarage.

5.3.6 Bathymétrie

Des estimations des hauteurs d'eau ainsi que des volumes d'eau ont été réalisées pour la partie des barrages « Chalet » en soustrayant les valeurs du LiDAR de juin 2013 où les castors n'avaient pas encore colonisé le site à celles du LiDAR de 2025. Cela a été réalisé à l'aide d'un code Python (Annexe 4).

Pour la partie « Autoroute », le castor était déjà présent en 2013, avec un grand bassin. L'utilisation du LiDAR n'est donc pas possible pour estimer le fond du bassin. L'estimation des profondeurs et du volume a été réalisée sur base de profils topographiques réalisés en 2016 par le LHGF lors de la rupture de barrage de juillet.

5.3.7 Étude des températures

En plus d'étudier les températures à l'aide des images du drone, les données de températures mesurées par les *Divers* ont été utilisées pour voir l'évolution dans le temps de la température de l'eau et de l'air. Une moyenne glissante sur plusieurs jours a été réalisée pour suivre l'évolution générale des températures.

5.4 ACQUISITION ET UTILISATION DE DONNÉES GÉOMORPHOLOGIQUES

5.4.1 Matière en suspension

À deux reprises, le niveau d'eau a augmenté à la suite d'événements météorologiques exceptionnels : les 9 et 10 octobre 2024 et le 10 janvier 2025. Ainsi, des analyses de matière en suspension ont pu être réalisées afin de comparer la quantité de sédiments transportés par le cours d'eau en amont, entre, et en aval des deux sites étudiés. Le but de cette manipulation est de comprendre la dynamique de transport des sédiments et de sédimentation ainsi que de voir si le barrage permet la décantation.

Sur le terrain, le matériel suivant est nécessaire pour faire le prélèvement : corde, seau, entonnoir et bidons vides (ici 5 litres).

Le protocole suivant a été suivi :

- à l'aide de la corde, lancer le seau au milieu du cours d'eau depuis, si possible, un pont ou un endroit stable qui permet de le récupérer et le ramener sans perdre d'eau ;
- verser le contenu dans le bidon à l'aide de l'entonnoir ;
- si, quand toute l'eau est versée, il reste des particules dans le seau, verser une petite quantité d'eau du bidon, mélanger pour remettre les particules en solution et verser à nouveau dans le bidon ;
- bien le fermer et le conserver au réfrigérateur le temps de faire les analyses afin que des algues ne se développent pas.

Les prélèvements ont été réalisés à trois endroits différents (Figure 37):

- en amont de tout le système, au niveau du pont de Vaux-Chavanne, près de la station de référence ;
- en aval du barrage du système de barrages « Chalet » au niveau de la route, avant la confluence avec les petits cours d'eau ;
- en aval du barrage « Autoroute ».

Ensuite, les échantillons ont été analysés au laboratoire. Ces analyses reposent sur la filtration de l'échantillon à l'aide d'une pompe à vide et d'un filtre (type : Whatman GF/C 110 mm ; 1,2 μ m, fibre de verre ; pouvoir de rétention de 98 %). Une fois tout l'échantillon filtré, il faut placer le filtre à l'étuve jusqu'à séchage à 105°C. L'échantillon sec est pesé pour obtenir la masse de matière en suspension (en soustrayant le poids du filtre). En connaissant le volume d'eau prélevé, il est possible d'obtenir la concentration en matière en suspension.

De plus, une perte au feu (voir section 5.4.2.3) a été réalisée afin de connaître la proportion de matière organique de l'échantillon et donc la concentration en sédiments du prélèvement.

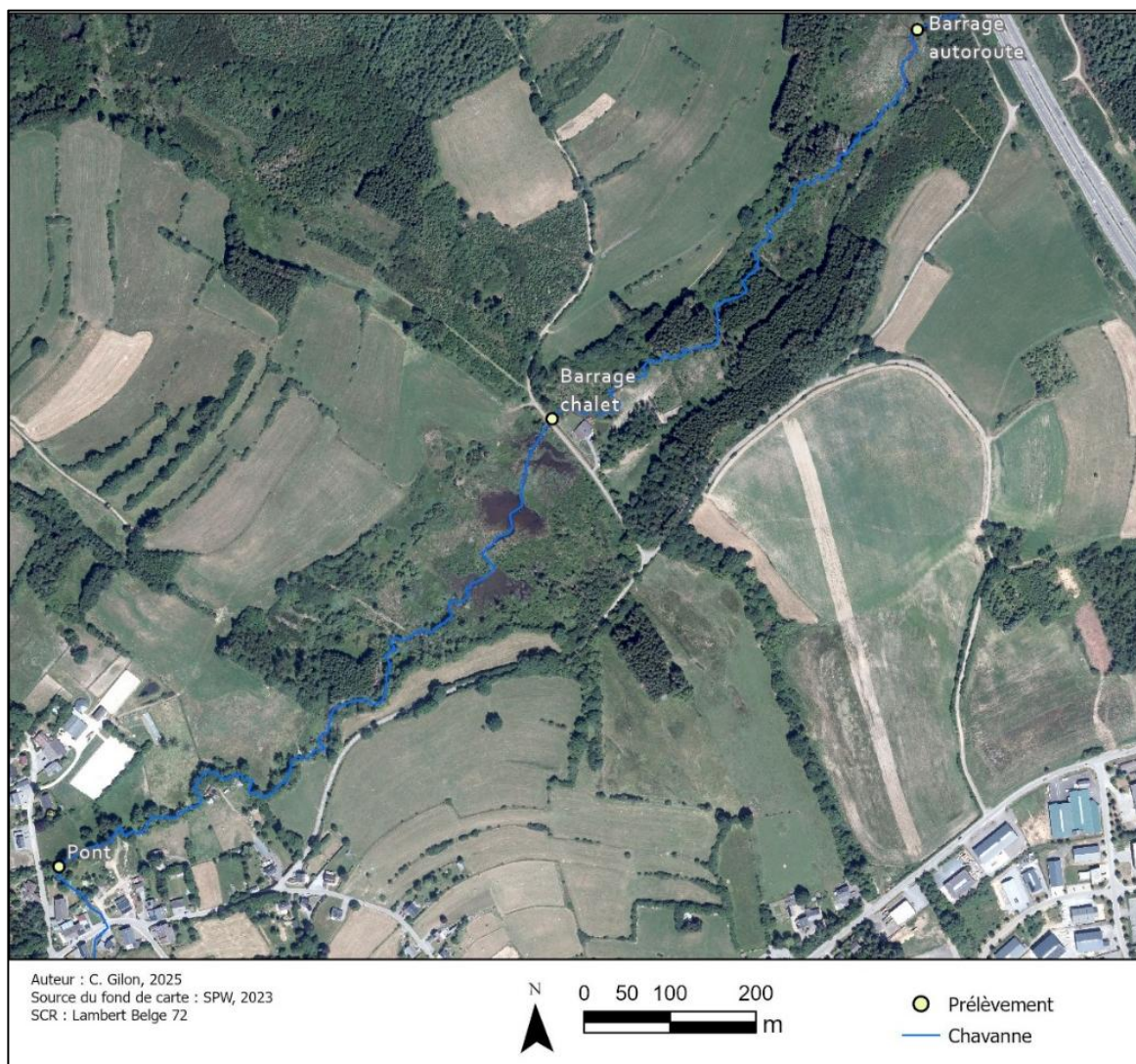


Figure 37. Localisation des points de prélèvements de la matière en suspension

5.4.2 Prélèvements d'échantillons de vases et analyses

Dans le but de faire une analyse granulométrique des dépôts présents dans le barrage de castors et de caractériser leur signature sédimentologique, des prélèvements de sédiments sur la couche superficielle de dépôts de vase des bassins ont été réalisés.

À chaque endroit, deux échantillons ont été prélevés. Le premier sert à passer l'échantillon au granulomètre *Mastersizer 3000*. Une partie sera prélevée pour subir ensuite une attaque à l'acide puis sera repassée au granulomètre pour observer l'échantillon sans la matière organique. Le second échantillon est utilisé pour une perte au feu afin de connaître la proportion de matière organique dans le prélèvement.

De plus, deux carottes de vase ont été prélevées dans le bassin BC1 à l'aide d'une tarière. Des analyses granulométriques ont été réalisées tous les 10 cm de ces carottes avec et sans matière organique (après attaque à l'acide). L'objectif est de voir s'il est possible d'observer des différences granulométriques dans la couche de vase.

5.4.2.1 Granulomètre Malvern Mastersizer 3000

Le Mastersizer 3000 est un granulomètre laser. Ce granulomètre se trouve au laboratoire de chimie *GreenMat* de l'Université de Liège. Cet appareil permet d'étudier la distribution granulométrique d'un échantillon de particules solides. Une analyse par voie humide (eau

déminéralisée) a été réalisée pour les échantillons de sédiments prélevés dans les bassins du système. Ce granulomètre est composé d'une pompe qui va envoyer dans une cellule l'échantillon afin d'être mesuré à l'aide du laser. Des capteurs mesurent les angles et l'intensité de la lumière du laser diffractée par les particules. L'appareil a été réglé pour réaliser trois mesures de l'échantillon à chaque fois. Les échantillons ont été mesurés une première fois avec la matière organique et une seconde fois sans.

5.4.2.2 Attaque à l'acide

L'attaque à l'acide permet de dégrader la matière organique de l'échantillon afin d'étudier la granulométrie des sédiments uniquement. Cette méthode ne permet pas de quantifier la quantité de matière organique, contrairement à la perte au feu qui est réalisée pour cela.

Pour réaliser l'attaque, une partie de l'échantillon (environ deux à trois cuillères à café) est versée dans des béchers avec de l'eau pour éviter que l'échantillon ne brûle. Ces béchers sont posés sur une plaque chauffante (103°C) afin d'accélérer le processus de dégradation. De l'eau oxygénée (peroxyde d'hydrogène) est utilisée pour attaquer les échantillons. Une fois la réaction terminée, il faut rincer l'échantillon. Pour cela, il faut ajouter de l'eau dans le bécher, attendre que cela décante puis verser le surplus (à répéter plusieurs fois) pour éliminer les déchets de l'attaque et ne garder que le sédiment au fond du bécher. Avant de le jeter dans l'évier, il est important de vérifier le pH de la solution.

5.4.2.3 Perte au feu

La perte au feu permet de connaître le pourcentage de matière organique contenue dans un échantillon. L'échantillon, après être passé à l'étuve à 105°C pour être sec, est pesé. Il est ensuite placé au four à 500°C pendant 24 heures. Cela permet d'éliminer les particules organiques. L'échantillon est à nouveau pesé. La soustraction entre l'échantillon avant le passage au four et après permet de connaître la masse des particules organiques qui ont été éliminées.

5.4.3 Image CM de Passega

Les résultats des granulométries permettent de comprendre, de manière théorique, les processus de mise en place d'un dépôt sédimentaire grâce à l'image de Passega. L'image CM de Passega est un diagramme développé par Passega qui reprend en axe x la valeur du D_{50} (noté M) et en axe y la valeur du D_{99} des sédiments mesurés au granulomètre (noté C).

Le D_{50} représente la taille médiane de la distribution granulométrique alors que le D_{99} correspond à la valeur du plus gros élément mesuré.

Les deux valeurs caractéristiques sont reportées sur un graphique en double échelle logarithmique. Ce graphique permet de comprendre dans quelles conditions les sédiments se mettent en place dans les milieux fluviaux et marins (Houbrechts *et al.*, 2013). L'image présente plusieurs régions qui permettent d'identifier si les éléments ont été transportés par roulement (zone NO), suspension de fond et roulement (zone OP), transition entre suspension gradée et roulement (zone PQ), suspension gradée (zone QR), suspension uniforme (zone RS) ou décantation pélagique (zone T) en fonction de la localisation des points ajoutés sur le diagramme. Le but est de délimiter une zone du graphique qui correspond à des dépôts de retenues de barrages de castors.

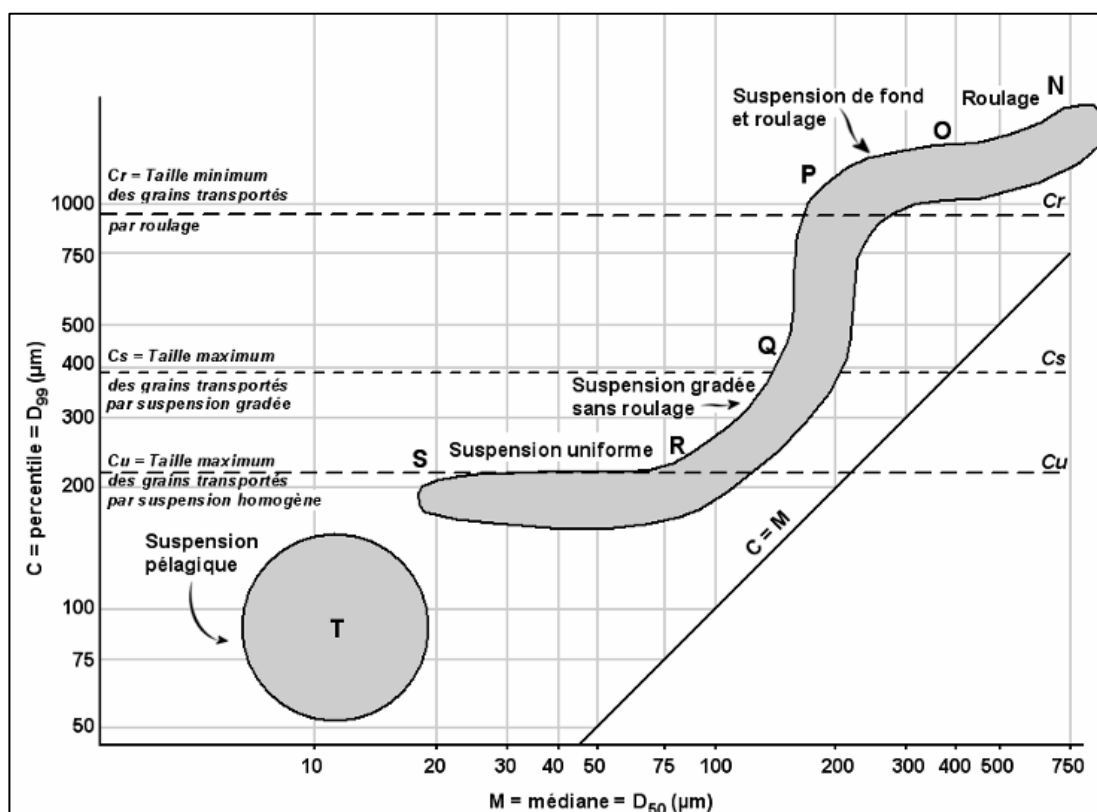


Figure 38. Image CM originale de Passega (d'après Passega, 1964 dans Houbrechts et al., 2013)

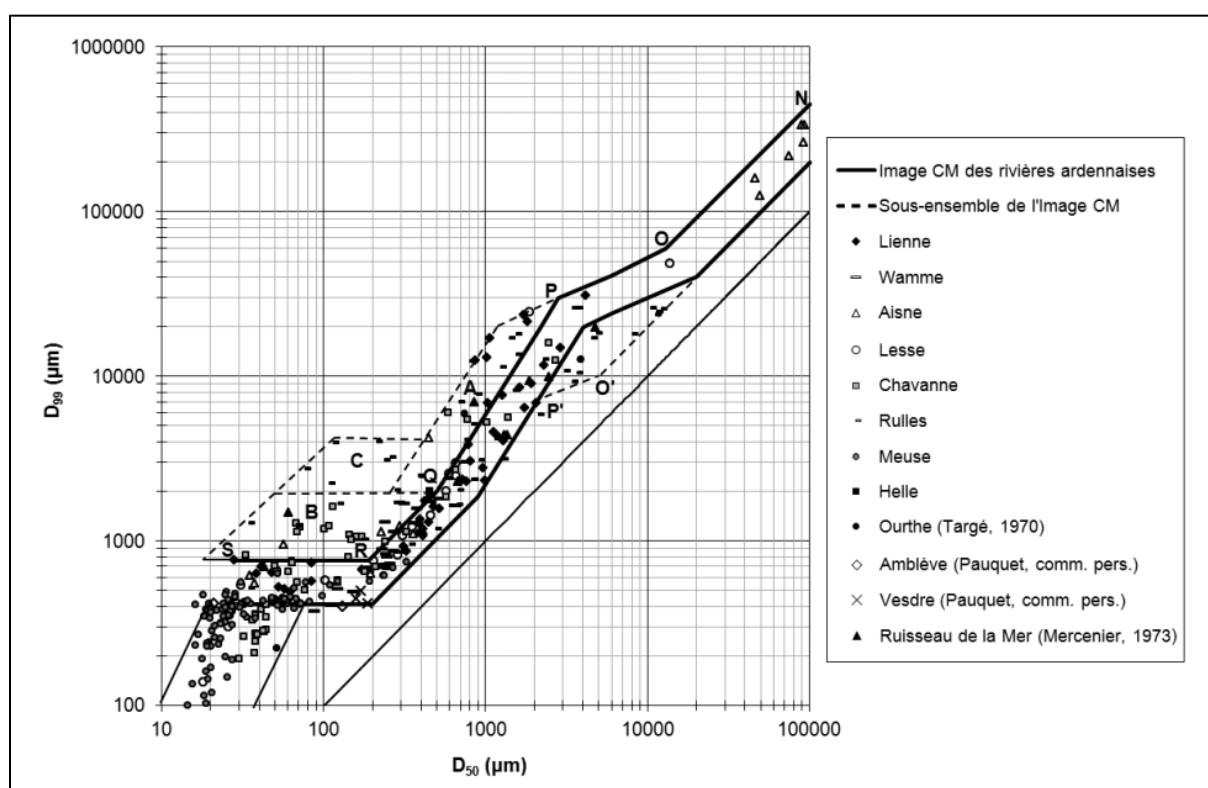


Figure 39. Image CM de Passega pour les rivières ardennaises (Houbrechts et al., 2013)

6 RÉSULTATS

6.1 CARTOGRAPHIE DES SYSTÈMES DE BARRAGES ET CARACTÉRISTIQUES

Chaque campagne drone a permis de cartographier le système de barrages de chaque site d'étude. Une carte a été réalisée pour le site « Chalet » et une pour le site « Autoroute » avec les éléments cartographiés et l'orthomosaïque. Le Tableau 6, situé à la fin de cette section, reprend les caractéristiques des éléments étudiés.

6.1.1 Septembre 2024

En septembre 2024, 12 barrages ont été recensés sur la zone d'étude, entre le village et l'autoroute (Tableau 5). D'amont en aval, ils ont été nommés par leur localisation : V pour le côté village, C pour le site « Chalet » et A pour le côté « Autoroute ».

Nom du barrage	Localisation	Coordonnées X (Lambert 72 en m)	Coordonnées Y (Lambert 72 en m)
BV1	Barrage situé près du village	244637	111495
BC1	Barrage amont du site « Chalet »	244833	111649
BC2	Barrage du second bassin « Chalet »	244856	111733
BC3	Barrage du troisième bassin « Chalet »	244903	111792
BC4.G BC4.D	Barrage gauche et barrage droit de l'avant-dernier barrage « Chalet »	244900	111813
BC5	Barrage situé dans le pertuis au niveau de la route du chalet	244898	111827
BA1	Après le chalet	245002	111873
BA2		245070	111911
BA3		245173	112057
BA4		245252	112140
BA5		245303	112192
BA6	Barrage avant le pertuis sous l'autoroute	245337	112285

Tableau 5. Barrages recensés lors de la cartographie de septembre 2024

La hauteur de chaque barrage est reprise dans le Tableau 6. Lorsqu'il y a une retenue développée en amont du barrage, sa superficie est reprise également. Le barrage le plus haut dans le site « Chalet » est le barrage BC1 avec une hauteur de 1,34 m. Les autres barrages varient entre 0,43 et 0,72 m. Du côté « Autoroute », le barrage le plus haut mesure 1,74 m (BA6). Les autres varient entre 0,1 m et 1,19 m. Les retenues sont de tailles variables. Le plus grand bassin est le BC2 avec une superficie de 2436 m² suivi de BC1 avec 2292 m². La retenue du barrage BA6 du site « Autoroute » a une superficie de 595 m². Quatre huttes ont été

repérées sur le site « Chalet ». La hutte principale se trouve au niveau du bassin BC1. Elle est accompagnée d'une réserve de nourriture noyée dans le bassin. Une seule hutte a été recensée au niveau du site « Autoroute », également accompagnée d'une réserve de nourriture. Au total, 118 canaux ont été cartographiés avec une longueur moyenne de 22,5 m. Cela représente environ 2,5 km de canaux.

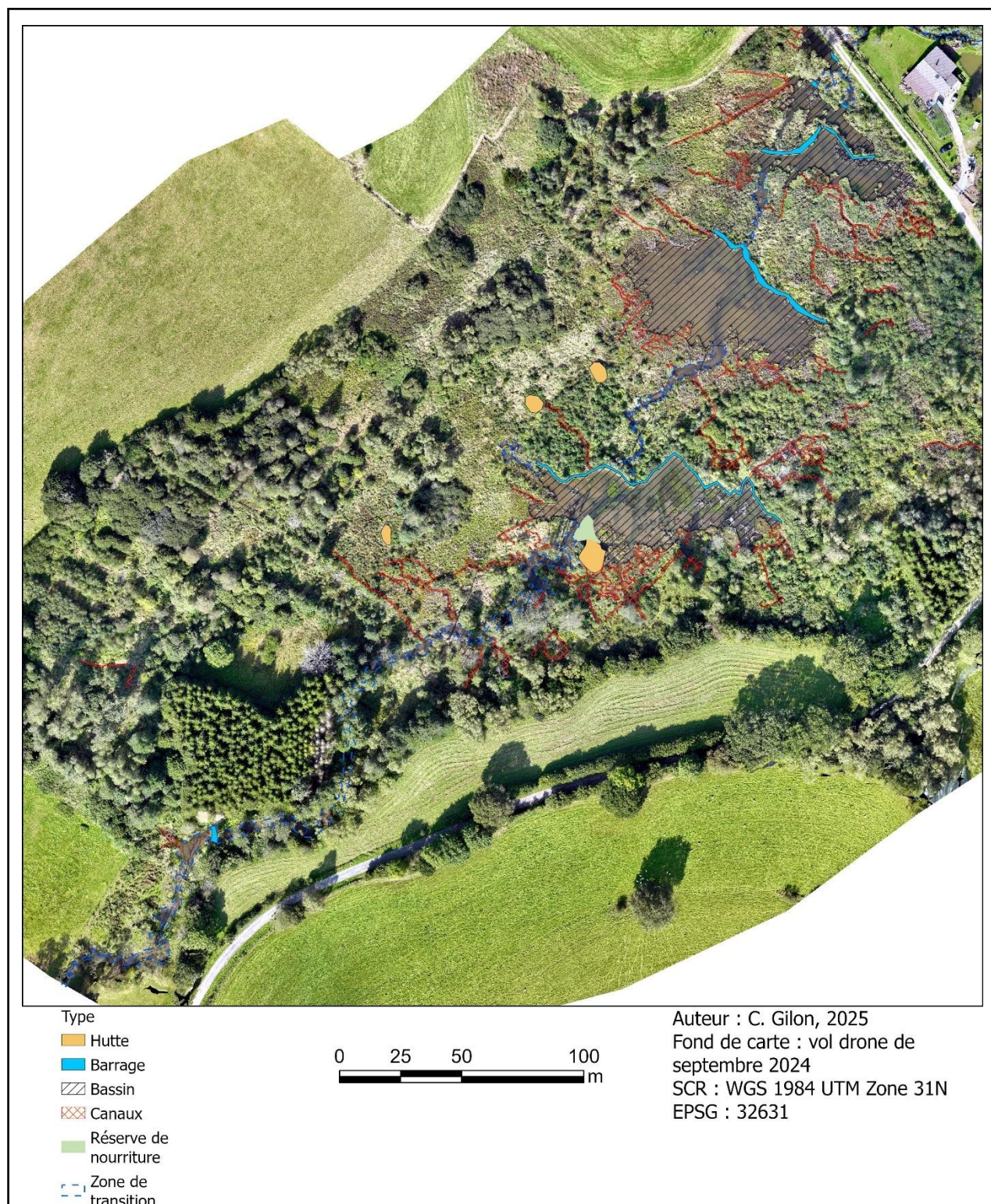


Figure 40. Cartographie du site « Chalet » en septembre 2024

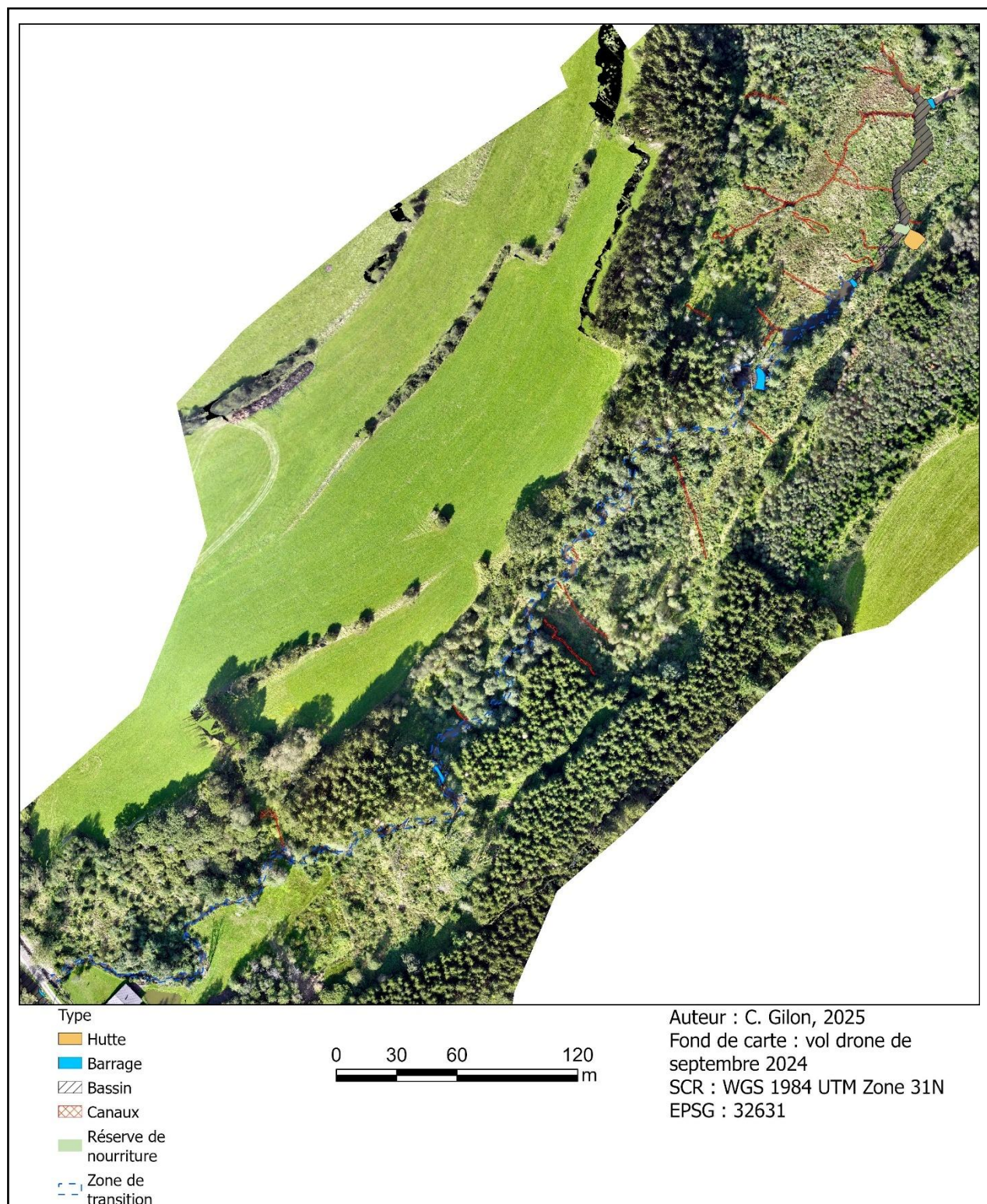
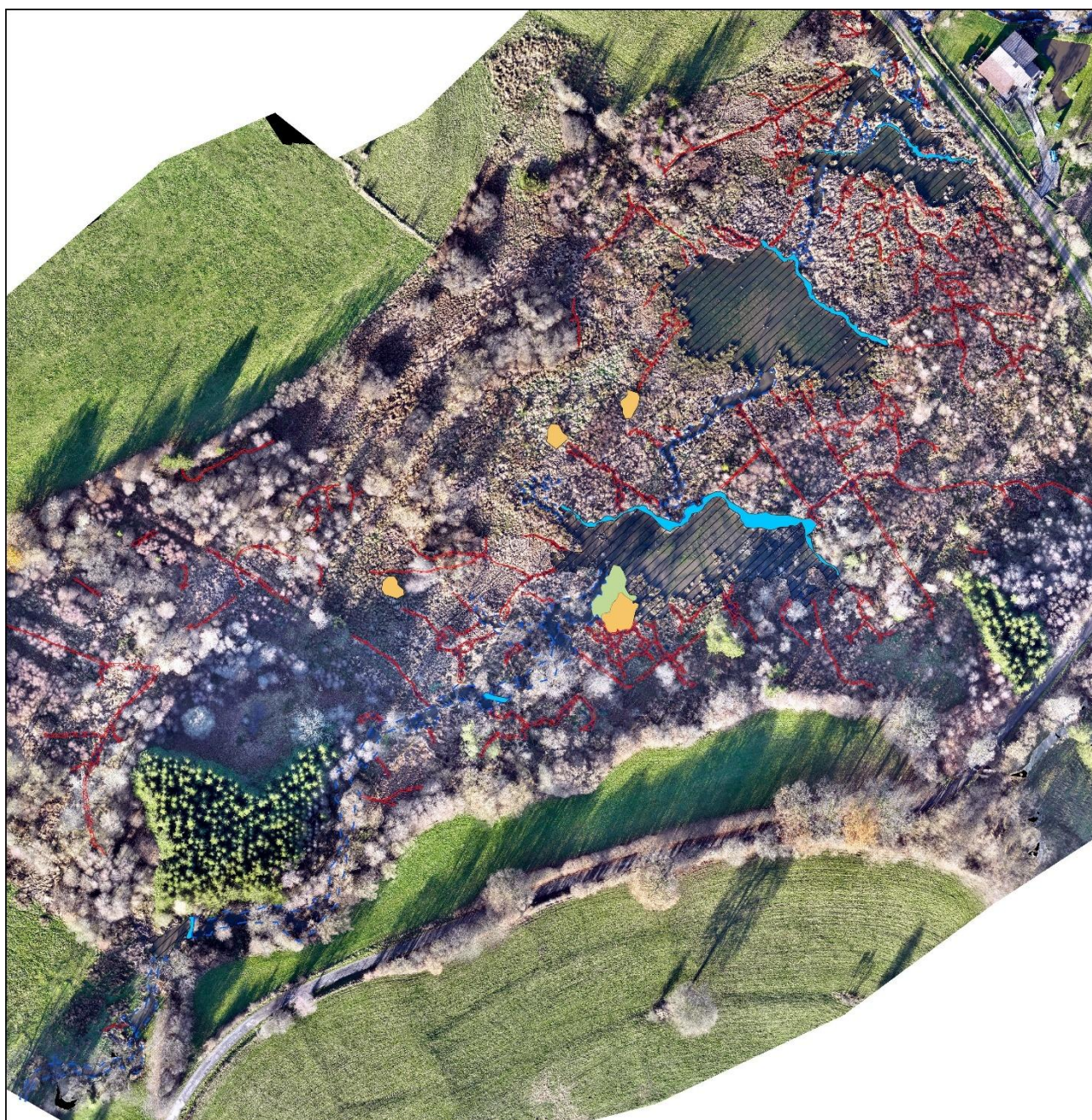


Figure 41. Cartographie du site « Autoroute » en septembre 2024

6.1.2 Novembre 2024

En novembre 2024, les caractéristiques observées restent semblables. La superficie des bassins BC3, BC4 et BA6 a augmenté. La végétation étant plus faible, la cartographie a été plus facile. Le barrage BV2 a été repéré, alors qu'il n'était pas visible en septembre 2024, entre BV1 et BC1. Les hauteurs de barrage varient pour certains d'entre eux (augmentation ou diminution), sans tendance. Les huttes, quant à elles, n'ont pas évolué et les réserves de nourriture non plus. Au total, 5 km de canaux ont été cartographiés. Le nombre de canaux a augmenté à 233 avec une longueur moyenne de 21 m.



Type

 Hutte

 Barrage

 Bassin

 Canaux

 Réserve de nourriture

 Zone de transition

0 25 50 100
m

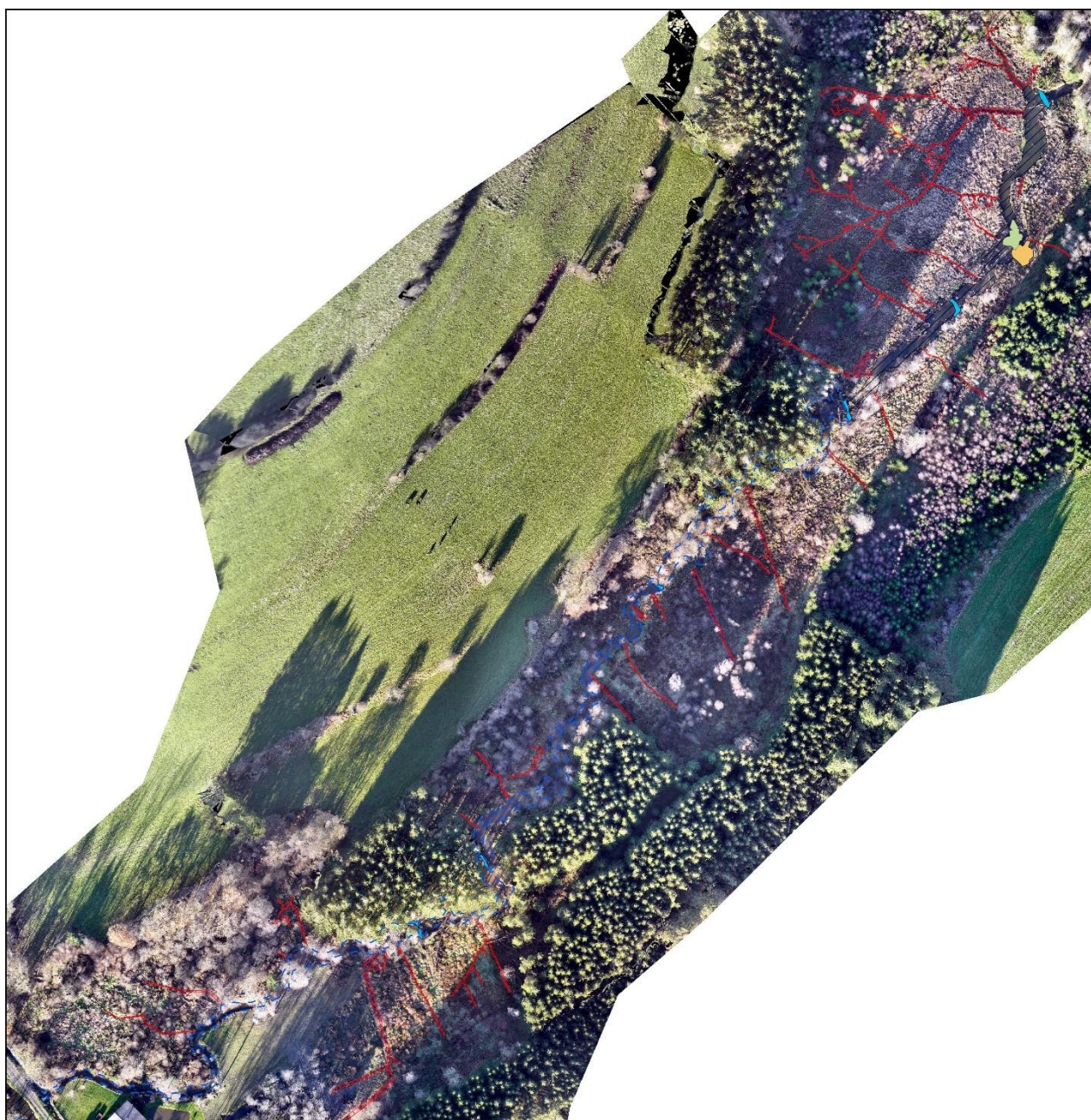
Auteur : C. Gilon, 2025

Fond de carte : vol drone de novembre 2024

SCR : WGS 1984 UTM Zone 31N

EPSG : 32631

Figure 42. Cartographie du site « Chalet » en novembre 2024



Type

Hutte

Barrage

Bassin

Canaux

Réserve de nourriture

Zone de transition

0 30 60 120
m

Auteur : C. Gilon, 2025

Fond de carte : vol drone de novembre 2024

SCR : WGS 1984 UTM Zone 31N

EPSG : 32631

Figure 43. Cartographie du site « Autoroute » en novembre 2024

6.1.3 Mars 2025

En mars 2025, certains barrages ont diminué en hauteur. Ces observations sont possibles en comparant les hauteurs calculées pour les barrages à chaque campagne à l'aide des MNT ou MNS. Les superficies restent inchangées pour la majorité des bassins sauf l'extension du barrage BA6 qui a augmenté. Sa hauteur a aussi augmenté de 17 cm par rapport à novembre. De plus, le barrage du pertuis sous la route du chalet (BA5) ayant été détruit, le barrage ne retient quasiment plus rien. La superficie de cette retenue a chuté à 48 m².

En mars 2025, la végétation a subi l'hiver et n'a donc pas encore repris. Tous les éléments sont bien visibles, y compris les chemins même s'ils n'ont pas été cartographiés. De plus, au niveau du bassin « Autoroute », toute une zone d'épicéas a été rasée (cercle mauve). 223 canaux ont été cartographiés, avec un total de 5 km de longueur et une longueur moyenne de 22,4 m.

Des zones humides ont été mises en avant à l'aide de cette campagne drone. La combinaison entre le vol thermique sur un sol dépourvu de végétation et un sol privé de précipitations pendant plusieurs jours permet de mettre en avant des zones avec des températures plus faibles qu'aux alentours et une couleur plus foncée sur l'orthomosaïque. Au niveau du site « Chalet », ce sont 30 zones qui ont été repérées, de tailles variables. Elles se situent principalement autour des bassins ou entre, mais aussi plus loin, toujours en connexion avec des canaux. Une zone se trouve tout autour du bassin principal BC6 du site « Autoroute ».



Type

- Hutte
- Barrage
- Bassin
- Canaux
- Réserve de nourriture
- Zone humide
- Zone de transition

0 25 50 100 m

Auteur : C. Gilon, 2025
 Fond de carte : vol drone de mars 2025
 SCR : WGS 1984 UTM Zone 31N
 EPSG : 32631

Figure 44. Cartographie du site « Chalet » en mars 2025

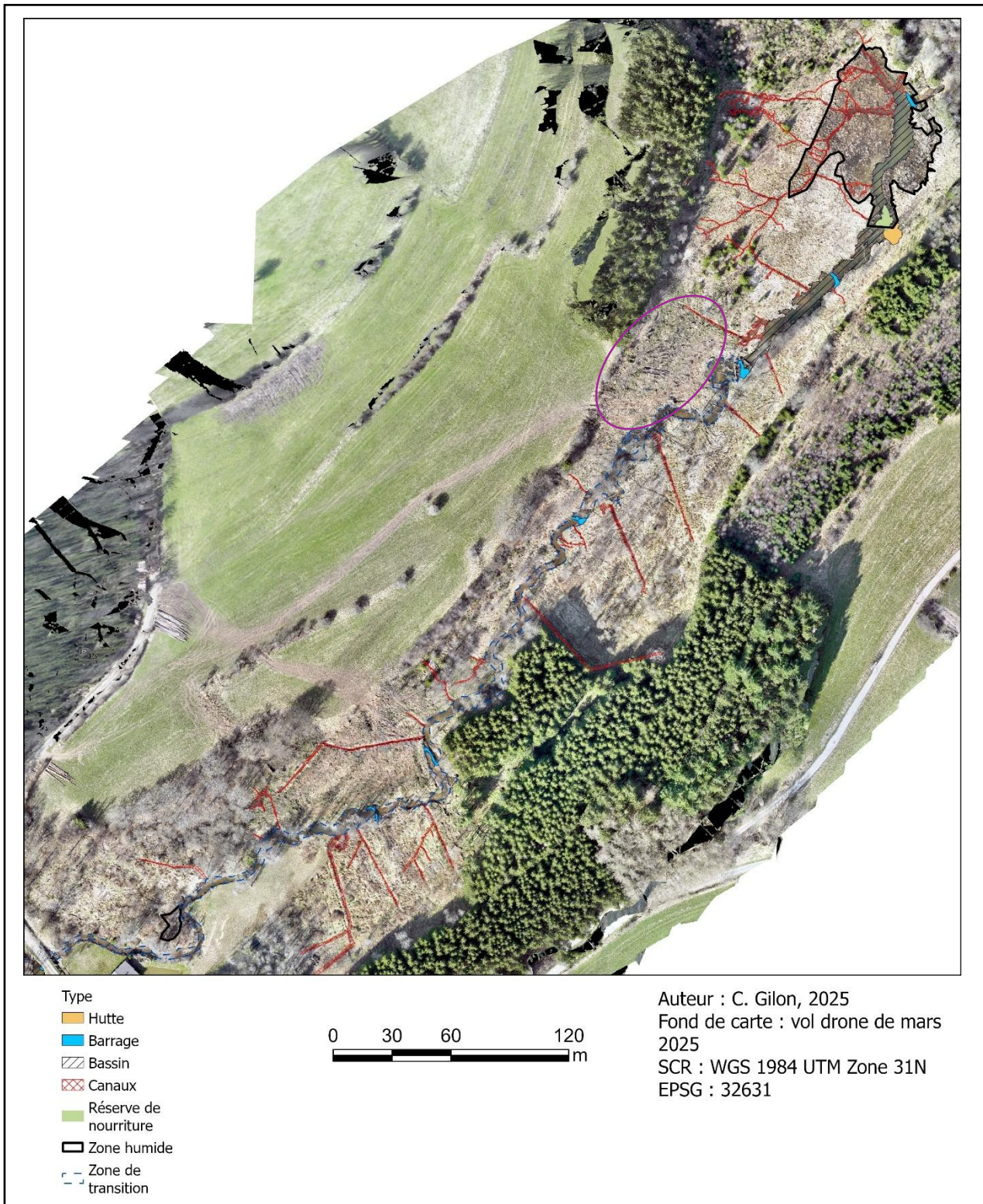


Figure 45. Cartographie du site « Autoroute » en mars 2025

6.1.4 Juin 2025

En juin 2025, la végétation est réapparue et s'est densifiée. La cartographie ne montre pas d'évolution majeure du côté « Chalet ». La seule évolution notable est le barrage du pertuis, BC5, qui, depuis que la cage a été installée, se remplit à nouveau car des branchages y sont coincés. Le changement majeur est l'extension du barrage BA6 au niveau du site « Autoroute » qui a augmenté en passant de 865 à 2962 m². De plus, un nouveau barrage, BA0, situé après le chalet et en amont de BA1 a été repéré. Aucune nouvelle hutte n'a été repérée. Des tas de branchages sont cependant parfois visibles, liés à la coupe d'arbres dans la zone par la commune. Avec une longueur moyenne de 21,5 m, 200 canaux ont été repérés pour un total de 4 km de linéaire.

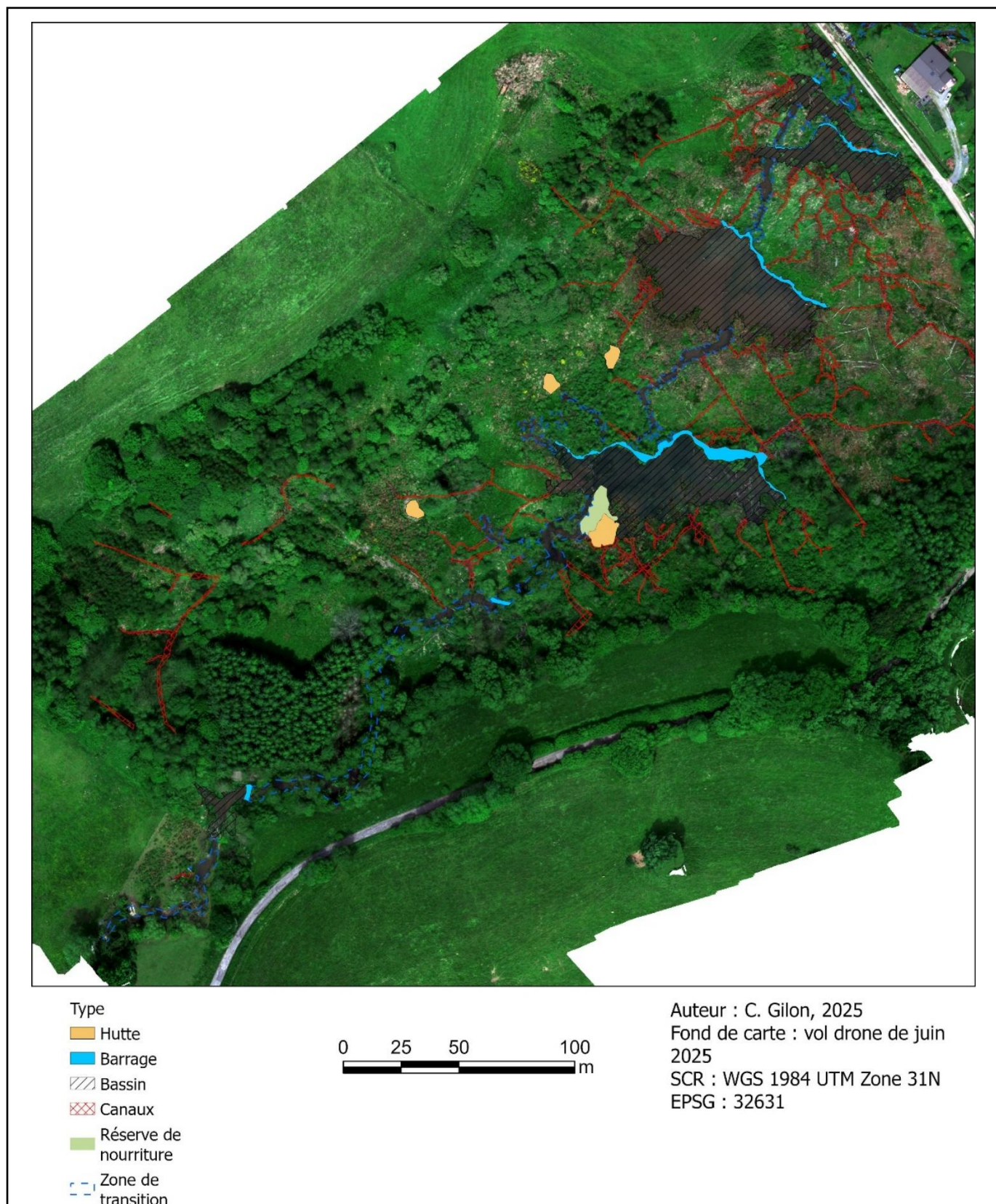


Figure 46. Cartographie du site « Chalet » en juin 2025

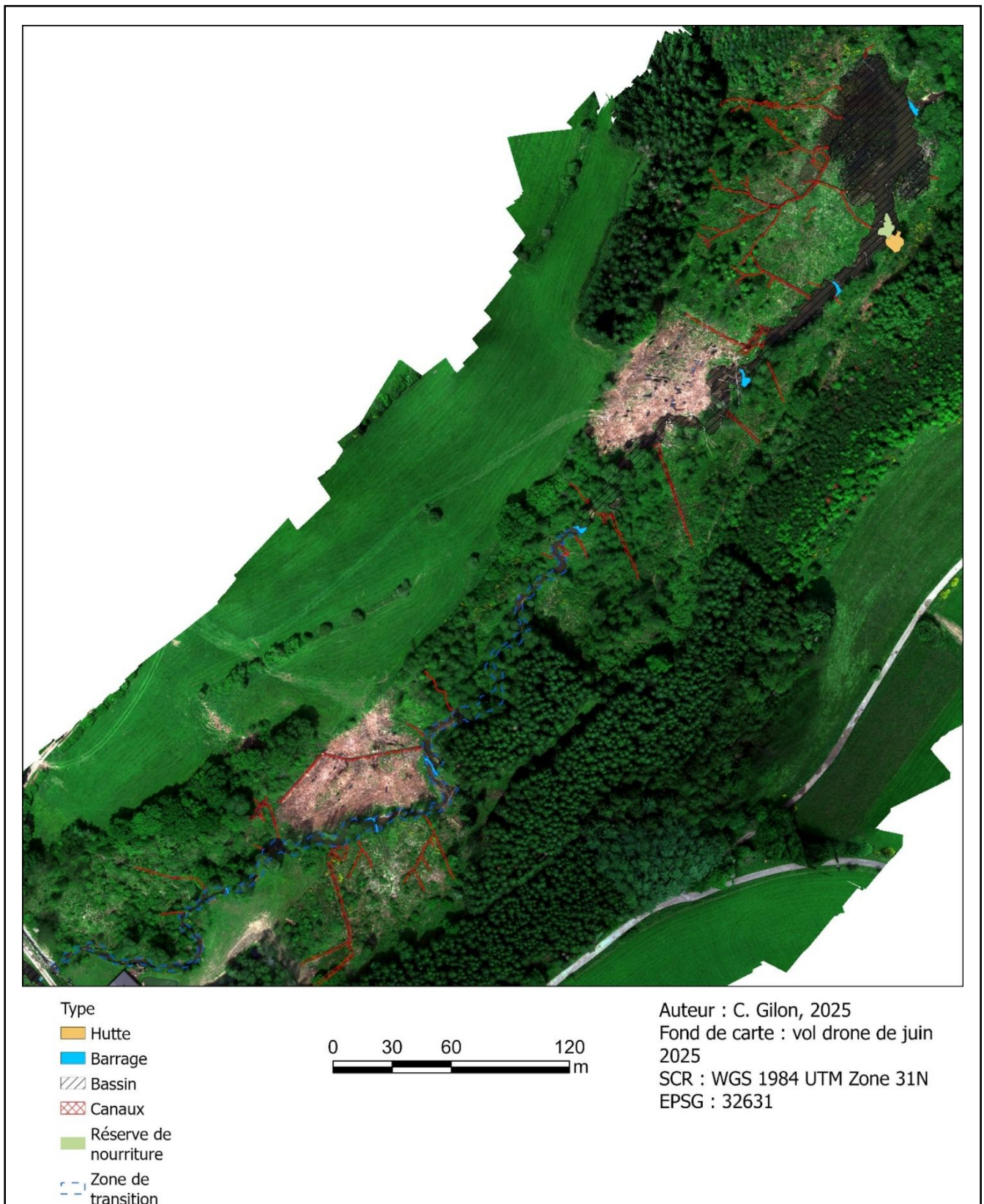


Figure 47. Cartographie du site « Autoroute » en juin 2025

	Septembre 2024		Novembre 2024		Mars 2025		Juin 2025	
Barrages	Hauteur (m)	Superficie (m²)	Hauteur (m)	Superficie (m²)	Hauteur (m)	Superficie (m²)	Hauteur (m)	Superficie (m²)
BV1	0,61		0,69		0,56		0,62	
BV2	pas repéré	pas repéré	1,00		0,74		0,75	
BC1	1,34	2292	1,50	2292	1,42	2278	1,49	2278
BC2	0,72	2433	0,71	2433	0,77	2433	0,62	2433
BC3	0,43	787	0,28	837	0,39	837	0,47	837
BC4.G	0,63	353	0,68	425	0,92	425	0,31	425
BC4.D	0,61		0,67		0,89		0,32	
BC5	/	116	/	136	/	48	/	113
BA0	/		/		/		0,39	
BA1	1,19		0,80		0,91		0,85	
BA2	0,56		0,64		0,29		0,22	
BA3	0,10		0,09		0,16		0,46	
BA4	0,38		0,69		0,37		0,38	
BA5	0,46		0,21		0,41		0,38	
BA6	1,72	595	1,70	779	1,87	865	1,83	2962
	Nombre	Longueur moyenne (m)	Nombre	Longueur moyenne (m)	Nombre	Longueur moyenne (m)	Nombre	Longueur moyenne (m)
Canaux	118	22,5	233	21	223	22,4	200	21,5

Tableau 6. Caractéristiques des éléments cartographiés

6.1.5 Évolution de l'occupation du sol

Les classifications automatiques permettent de mettre en avant l'évolution de l'occupation du sol sur les deux sites.

Avant l'arrivée du castor dans la zone d'étude, en 2011, les deux sites étaient principalement recouverts de sapinières et de forêts de conifères. En 2013, une mise à blanc a été réalisée au niveau des barrages « Chalet » alors que le barrage principal « Autoroute » était très étendu. Des changements dans la végétation commencent déjà avec de la végétation de zone humide, herbacée, qui se développe. Les bassins du côté « Chalet » ne sont pas encore visibles. En 2016, l'extension du bassin « Autoroute » a disparu, à la suite d'une rupture de barrage. Le bassin amont du côté « Chalet » commence à s'étendre. À partir de 2017, les autres bassins de cette zone apparaissent et restent constants jusqu'à aujourd'hui. La forêt sur ce site a tendance à disparaître pour laisser place à de la végétation de zone humide ou du sol nu. Le bassin du côté du site « Autoroute » réapparaît bien entre 2019 et 2025. Les terres agricoles montrent une alternance entre prairies et cultures selon les années.

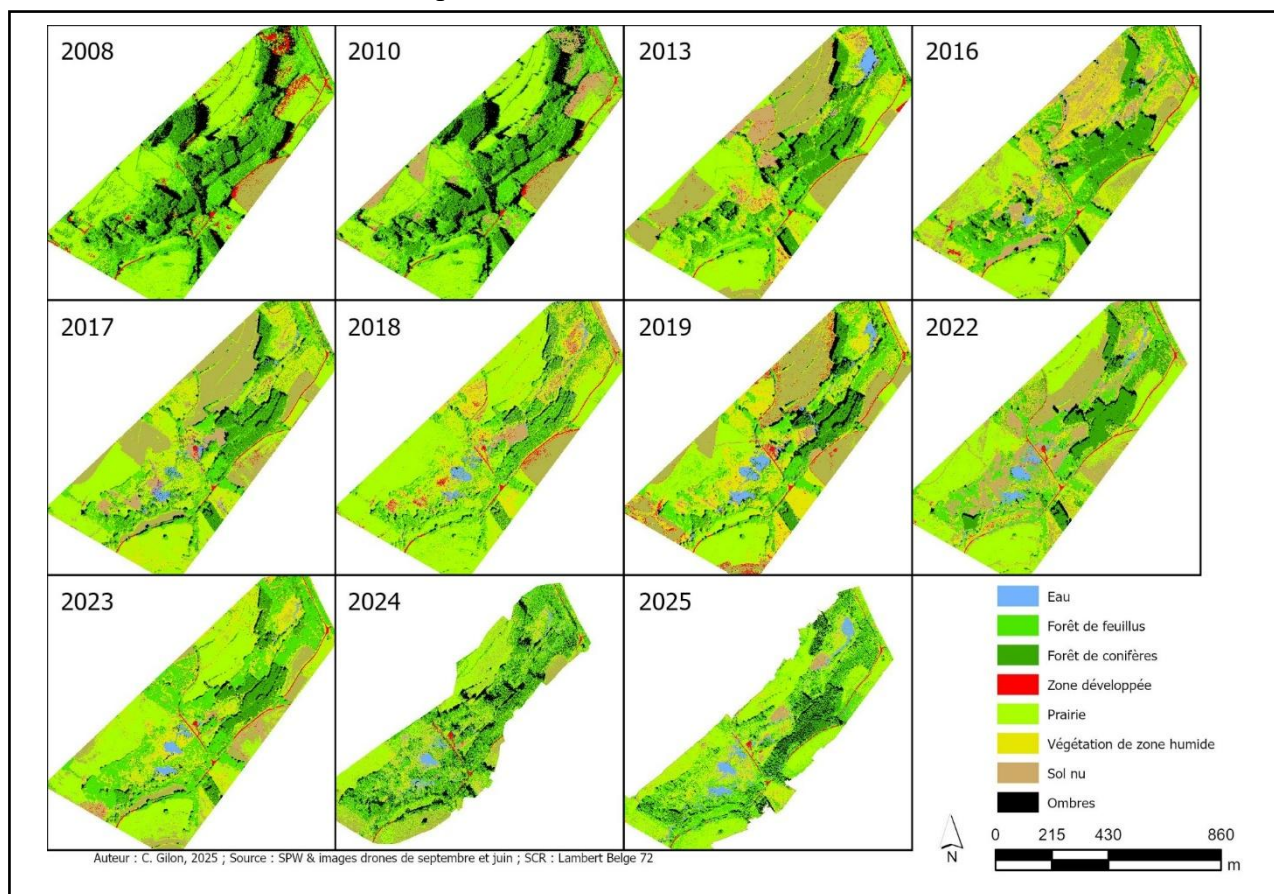


Figure 48. Évolution de l'occupation du sol de 2008 à 2025

De plus, lorsque l'on compare avec la classification automatique de juin 2025 avec la zone d'aléa d'inondation, qui peut être reprise comme référence pour la délimitation de la plaine alluviale, il est possible d'observer que le castor a modifié au-delà de cette zone en élargissant ses bassins. Il est possible d'affirmer que les castors modifient le paysage au-delà de la plaine alluviale.

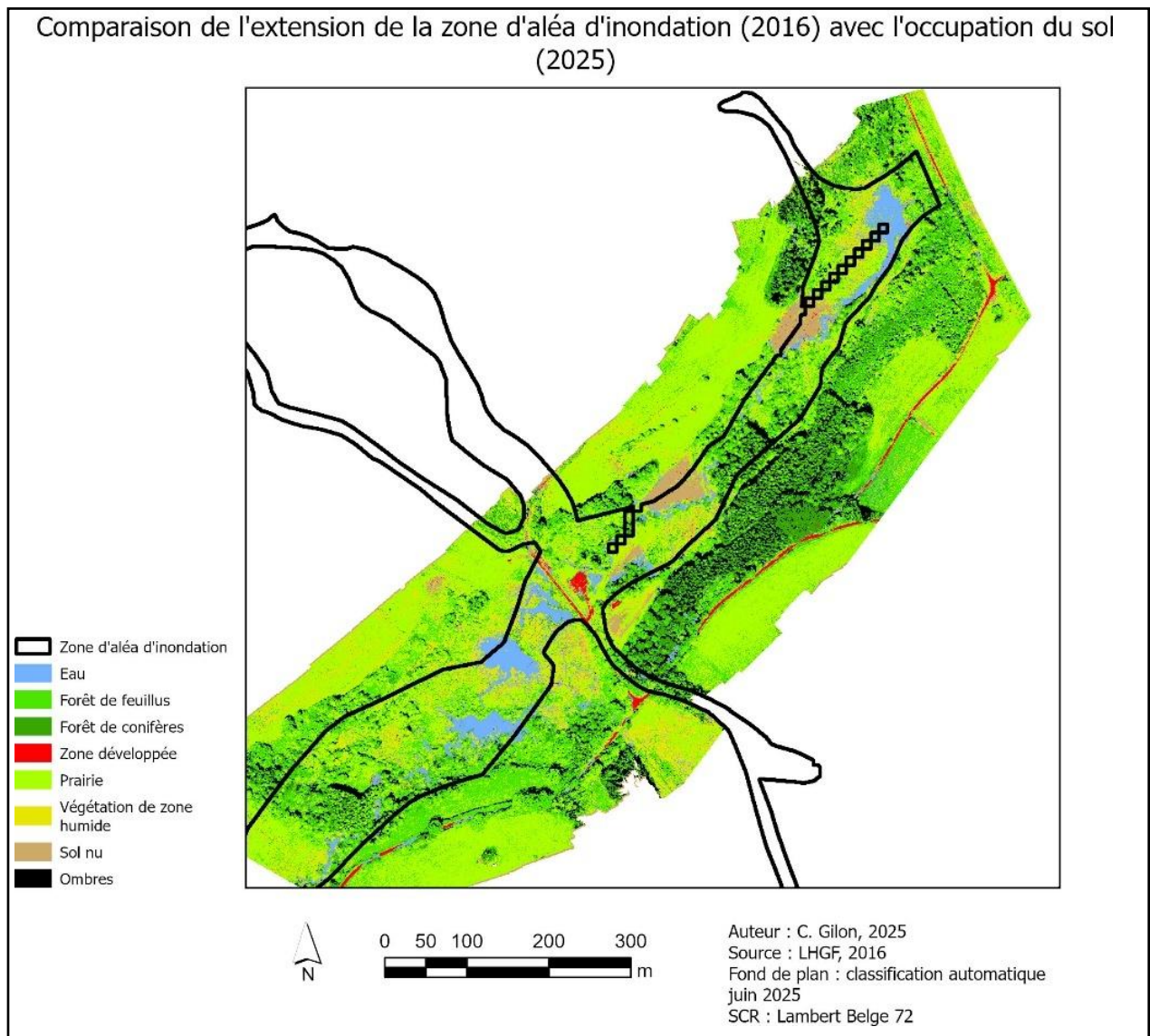


Figure 49. Comparaison de l'extension de la zone d'aléa d'inondation (2016) avec l'occupation du sol (2025)

Le graphique suivant met en avant l'évolution du pourcentage d'occupation du sol de chaque classe intéressante à étudier dans le cadre du castor de 2008 à juin 2025. Les prairies sont dominantes dans la zone avec une diminution jusqu'en 2016 pour ensuite réaugmenter. Un pic au niveau des prairies est visible en 2018. Les conifères sont en déclin constant avec des mises à blanc régulières, dont la dernière en 2025. Les feuillus, eux, augmentent progressivement. La végétation de zone humide est absente jusqu'en 2013 et augmente ensuite pour être aux alentours des 10 % depuis l'installation du castor. L'eau augmente en 2013 avec le barrage « Autoroute » et puis gagne un certain équilibre en termes de surface jusqu'en juin 2025 lorsque le barrage s'est étendu au niveau du site « Autoroute » pour atteindre 5 % de la surface totale.

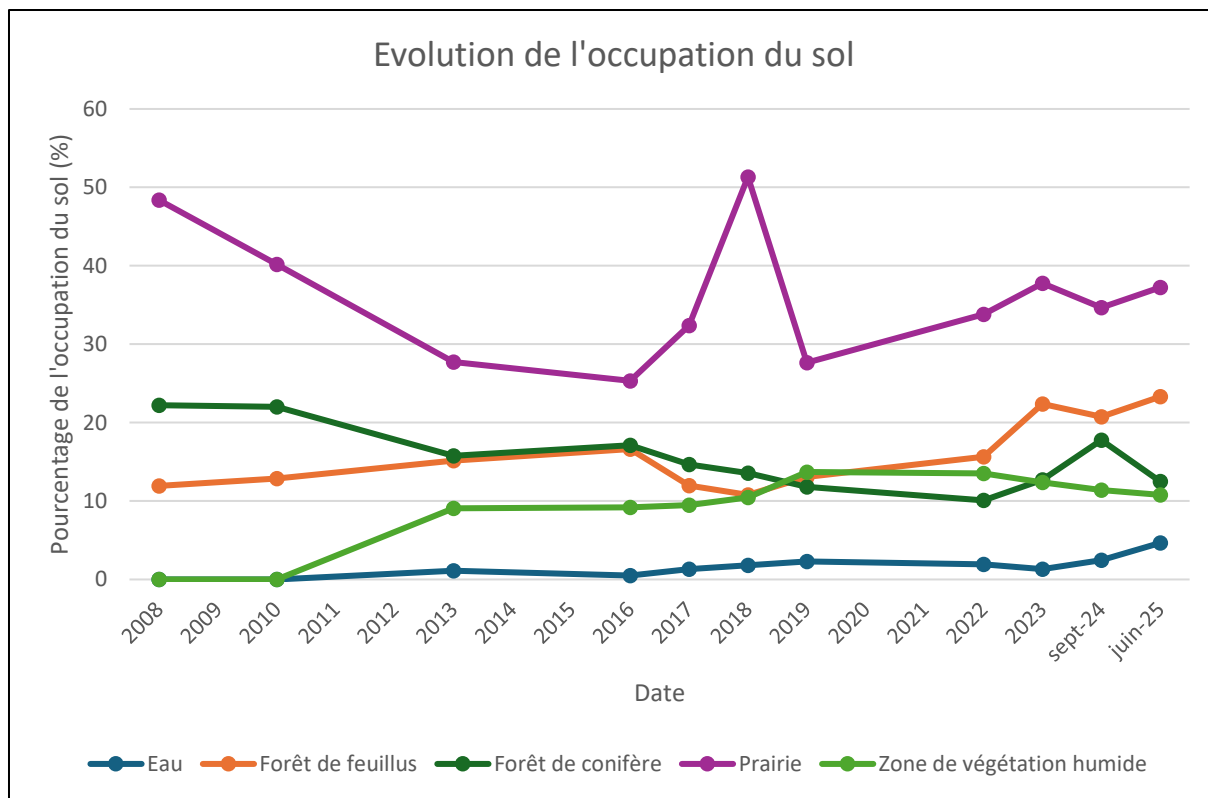


Figure 50. Évolution du pourcentage de chaque classe dans le temps

Le taux de classification correct global est en moyenne de 79 %. Les classifications réalisées sur les images drones ont une moins bonne précision. Cela est certainement dû à la résolution des images drones qui est meilleure. Les pixels ont plus de chance d’être confondus. Pour septembre, c’est avec l’image segmentée que la classification est meilleure, alors qu’en juin, elle est meilleure sans segmentation.

Année	Précision globale
2008	0,82
2010	0,78
2013	0,84
2016	0,76
2017	0,85
2018	0,75
2019	0,84
2022	0,86
2023	0,81
2024 septembre avec segmentation	0,73
2025 juin	0,68
Moyenne	0,79

Tableau 7. Global accuracy des classifications automatiques

6.2 IMPACTS HYDROLOGIQUES

6.2.1 Analyse hydrologique de la Lienne à Trou de Bra

Afin de contextualiser la suite des analyses, il est important de caractériser brièvement le débit du cours d'eau à la station la plus proche sur la Lienne (Trou de Bra, 104,38 km²). Cette analyse a été réalisée sur la totalité de la période couverte par les données de cette station (2006 à 2024). Les caractéristiques hydrologiques calculées sur la Lienne sont reprises dans le Tableau 8 ci-dessous. Le débit moyen annuel est de 1,74 m³/s et le module spécifique de 0,017 m³.s⁻¹.km⁻². Le débit médian est de 1,09 m³/s, indiquant une distribution asymétrique vers les débits plus faibles. L'écart-type, de 2,01 m³/s témoigne d'une forte variabilité intra-annuelle des débits. Le débit maximum enregistré est de 42,47 m³/s, soit 24 fois le débit moyen annuel. Le débit caractéristique d'étiage (DCE), débit non-dépassé 10 jours par an, est de 0,2 m³/s. La Figure 51 reprend le débit moyen mensuel calculé pour chaque mois de la période 2006 - 2024. Les mois de novembre à mars sont caractérisés par des débits plus importants en moyenne par rapport aux mois d'avril à octobre.

Débit moyen (m³/s)	1,74
Module spécifique (m³.s⁻¹.km⁻²)	0,017
Débit maximum (m³/s)	42,47
Débit minimum (m³/s)	0,07
Écart-type (m³/s)	2,01
Débit médian (m³/s)	1,09
DCE (m³/s)	0,20

Tableau 8. Débits caractéristiques de la Lienne à Trou de Bra (L7290)

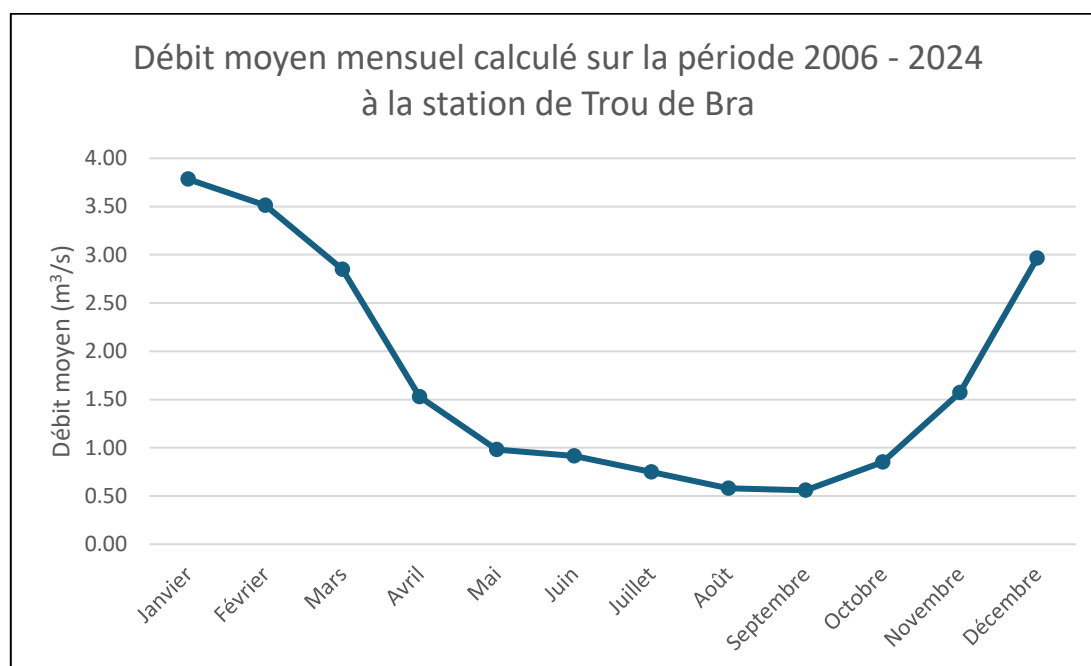


Figure 51. Débit moyen mensuel à la station de Trou de Bra

6.2.2 Comparaison hydrologique avant et après l'arrivée du castor

6.2.2.1 Sélection d'années « caractéristiques »

Afin de sélectionner des années dites « normales » en termes de conditions météorologiques, c'est-à-dire n'ayant pas connu de grands déficits ou excès pluviométriques et ayant connu des températures normales. Les années suivantes ont été sélectionnées :

- pour la période avant l'arrivée du castor : 1994, 1998, 2000, 2003 et 2005 ;
- pour la période après l'arrivée du castor : 2012, 2013, 2016, 2017 et 2019.

Les graphiques suivants reprennent la pluviométrie mensuelle ainsi que la température moyenne mensuelle pour chaque station et année sélectionnée. Malgré des stations sur un même bassin, les précipitations peuvent varier considérablement entre les deux stations. Les précipitations marquent également une plus grande variabilité entre les mois de l'année, sans saison qui ne se dessine entre les années. Les courbes de températures pour les différentes années se suivent relativement bien.

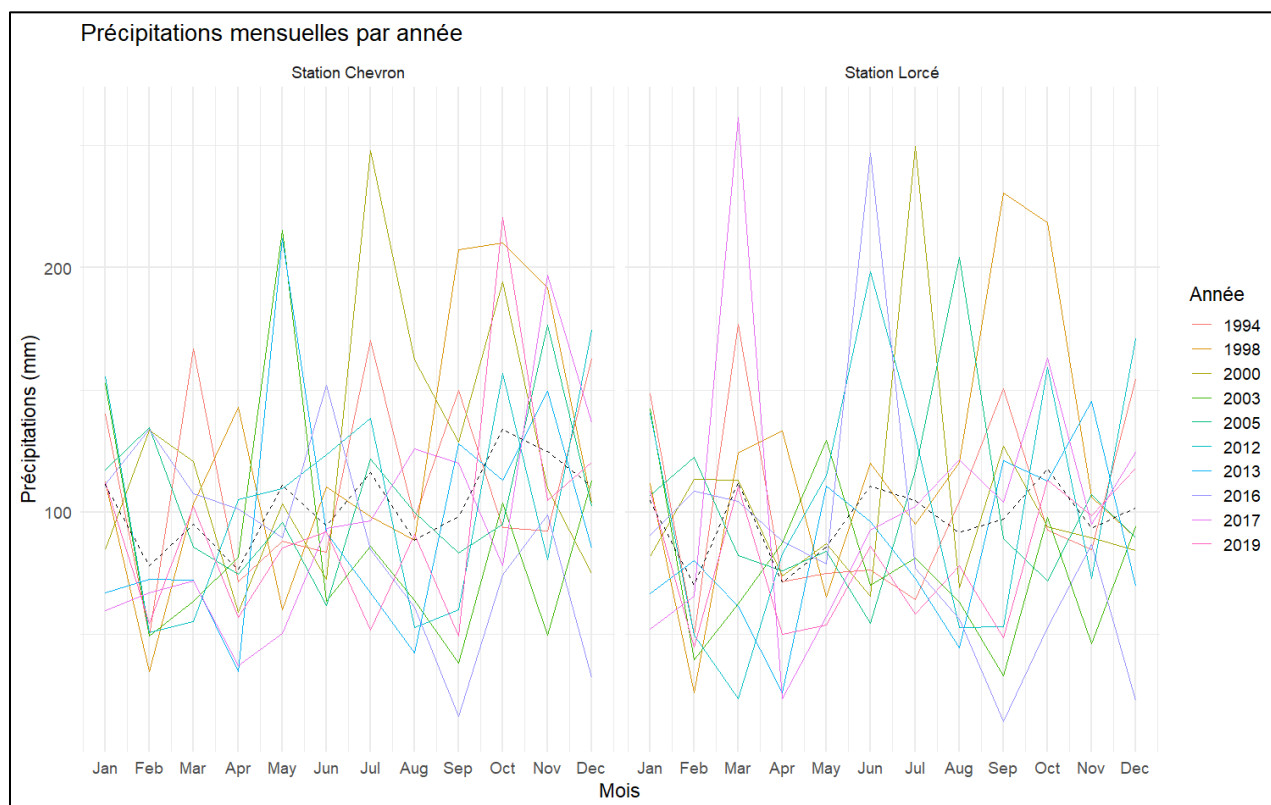


Figure 52. Pluviométrie mensuelle pour chaque année sélectionnée

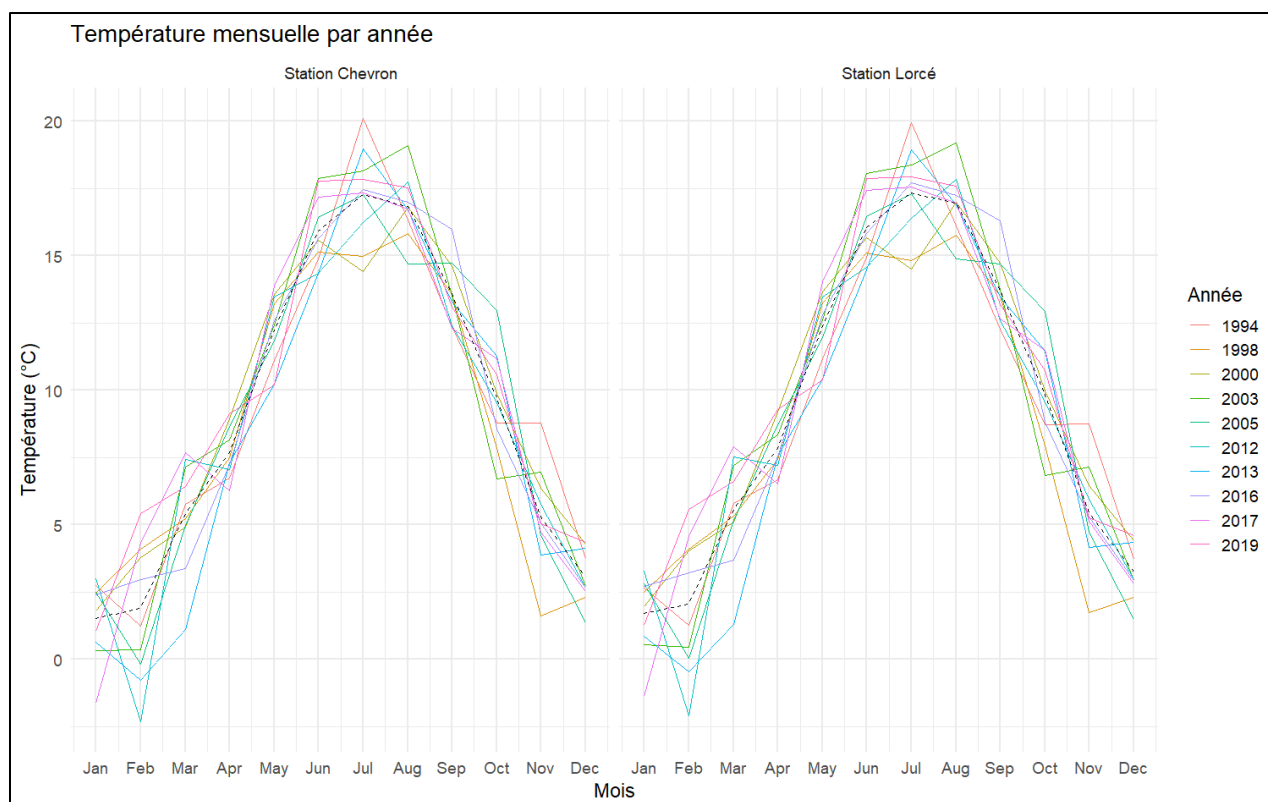


Figure 53. Température moyenne mensuelle pour chaque année sélectionnée

6.2.2.2 Caractéristiques générales des débits

Des débits caractéristiques ont été extraits depuis les deux séries de données de débits des stations pour les périodes d'intérêt. Ces débits ont été divisés par la taille du bassin versant pour être normalisés. De manière générale, les valeurs entre les deux périodes sont très semblables que ce soit pour les valeurs moyennes, extrêmes ou percentiles. L'arrivée du castor n'a pas modifié le régime hydrologique global du cours d'eau. Le volume global écoulé reste le même. Le DCE ne montre aucune évolution notable. Les caractéristiques à Trou de Bra sont semblables aux deux autres stations.

	Chevron		Lorcé		Trou de Bra	
Débit (m ³ /s.km ²)	Avant castor	Après castor	Avant castor	Après castor	Avant castor	Après castor
Débit moyen	0,017	0,018	0,015	0,015	/	0,017
Débit maximum	0,216	0,261	0,200	0,217	/	0,221
Débit minimum	0,001	0,001	0,001	0,001	/	0,001
Q10	0,003	0,002	0,002	0,002	/	0,002
Q25	0,004	0,005	0,004	0,004	/	0,004
Débit médian	0,011	0,010	0,010	0,009	/	0,010
Q75	0,022	0,021	0,021	0,020	/	0,020
Q90	0,038	0,045	0,033	0,035	/	0,041
DCE	0,002	0,002	0,003	0,002	/	0,002

Tableau 9. Débits caractéristiques pour la période avant et après le castor

6.2.2.3 En période de crues

Si le castor n'a pas d'impact sur l'écoulement global, il pourrait avoir un impact sur les crues. La loi de Gumbel permet de caractériser les crues avant et après l'arrivée du castor.

À Chevron, 39 crues ont été recensées avant le castor et 14 après. Les valeurs du débit moyen et du Q_0 ont légèrement augmenté après l'apparition du castor. La durée moyenne de la crue augmente également en passant de 1,18 jour à 1,67 jour. Les crues s'intensifient donc, cependant moins de crues ont été identifiées sur la période après le castor. La tendance est inverse à Lorcé où tous les paramètres diminuent légèrement à la deuxième période. 24 crues ont été identifiées avant le castor et 28 après. A Trou de Bra, 40 crues ont été recensées après l'arrivée du castor. Le débit moyen de crue est légèrement inférieur par rapport aux deux autres stations, ainsi que le Q_0 . Les crues sont en moyenne moins longues. Au niveau de la récurrence, les graphiques en Figures 54 et 55 reprennent les débits maximaux des séries partielles et leur récurrence pour les deux stations. A Chevron, les périodes de retour pour un même débits ont légèrement diminué entre avant et après le castor. Pour Lorcé, les récurrences n'ont pas évolué de manière significative d'une période à l'autre. La fréquence pour une crue de même débit ne change pas entre la période avant et après le castor.

	Chevron		Lorcé		Trou de Bra	
	Avant le castor	Après le castor	Avant le castor	Après le castor	Avant le castor	Après le castor
Nombre de crues	39	14	24	28	/	40
s (m³/s)	4,69	5,31	5,09	4,56	/	3,21
Q_m (m³/s)	14,63	16,20	13,79	12,76	/	10,50
1/a	3,66	4,14	3,97	3,56	/	2,50
a	0,27	0,24	0,25	0,28	/	0,40
Q₀ (m³/s)	12,52	13,81	11,50	10,71	/	9,06
Durée moyenne (jour)	1,18	1,67	1,28	0,89	/	0,68

Tableau 10. Caractéristiques des crues avant et après l'apparition du castor

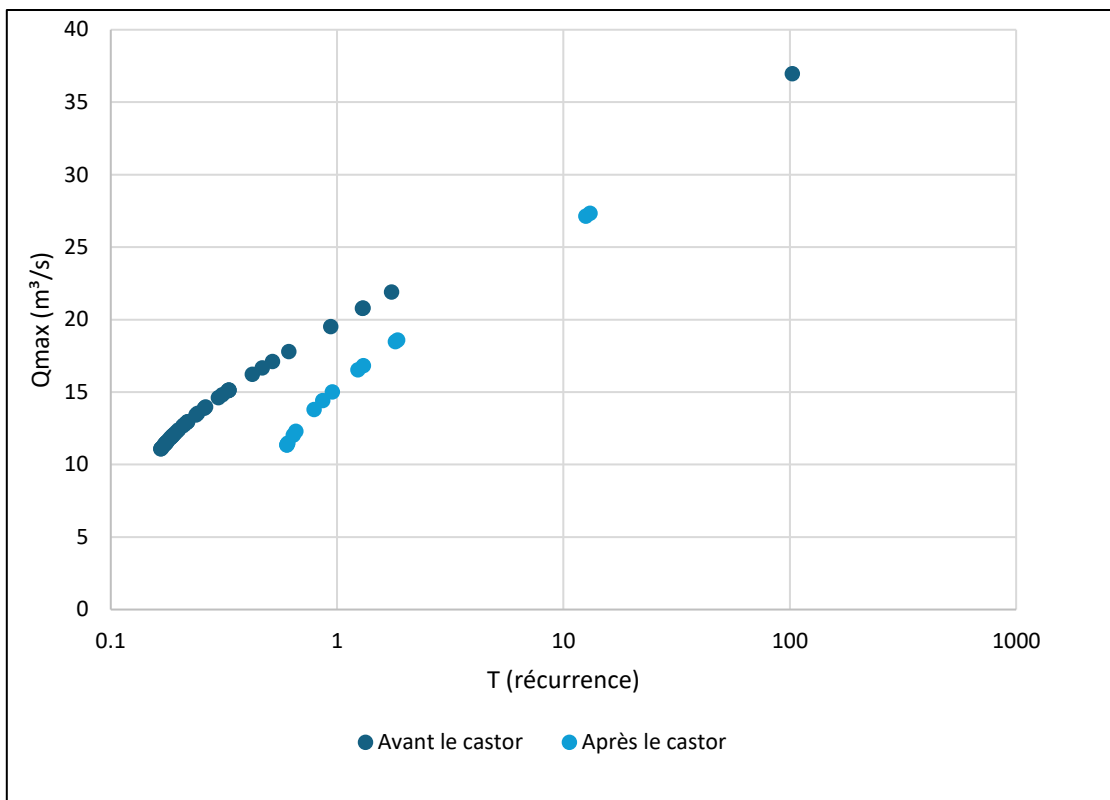


Figure 54. Courbe récurrence- Q_{max} pour la station de Chevron avant et après le castor

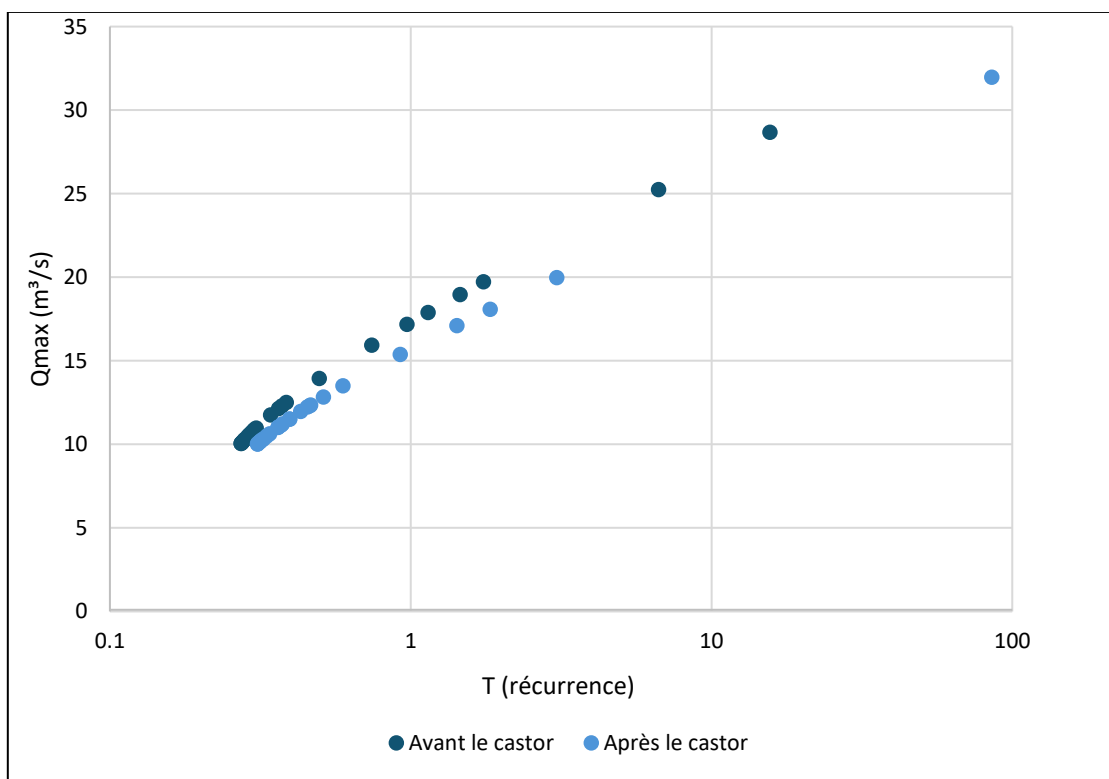


Figure 55. Courbe récurrence- Q_{max} pour la station de Lorcé avant et après le castor

6.2.2.4 En période d'étiage

L'analyse des coefficients de tarissement (Tableau 11) permet de mettre en évidence à quel rythme se vidangent les nappes avant et après l'apparition du castor. Si le castor a un impact sur ce rythme, le coefficient de tarissement devrait diminuer depuis son arrivée : cela signifierait que les nappes se videraient moins vite. Une quinzaine d'événements par période ont été relevés, toutes pendant la période entre avril et octobre, étant donné que cette période présente des débits plus faibles, comme constaté dans la Figure 51.

A Chevron, le α_3 diminue légèrement après l'arrivée du castor en passant de 0,0023 à 0,0019. Cette diminution très faible suggérerait un léger ralentissement du rythme de vidange de la nappe. A l'inverse, à Lorcé, ce coefficient augmente en passant de 0,0017 à 0,0031. Cela correspond à une vidange plus rapide des réserves depuis l'apparition du castor. Cette analyse met donc en évidence deux tendances inverses. A Trou de Bra, le α_3 est de 0,0023 après l'arrivée du castor. Cette valeur se rapproche de celle de Chevron, ne montrant pas de grand écart entre les stations.

Station	Chevron		Lorcé		Trou de Bra	
Coefficient de tarissement (j^{-1})	Avant castor	Après castor	Avant castor	Après castor	Avant castor	Après castor
α_1	0,0628	0,0725	0,0676	0,0600	/	0,0883
α_2	0,0070	0,0098	0,0105	0,0081	/	0,0070
α_3	0,0023	0,0019	0,0017	0,0031	/	0,0023

Tableau 11. Coefficients de récession pour les périodes avant et après l'apparition du castor

6.2.3 Résultats des jaugeages des sites

Les jaugeages ont été réalisés en trois secteurs : secteur amont du barrage (au niveau du village de Vaux-Chavanne), à la sortie du barrage « Chalet » et à la sortie du barrage « Autoroute ». Les valeurs des débits sont données en valeurs brutes puis normalisées par rapport à la taille du bassin versant au point de mesure afin de permettre des comparaisons. La majorité des débits ont été mesurés au jaugeage chimique. Lorsque des mesures complémentaires ont été réalisées à la sonde électromagnétique ou au moulinet, les résultats sont entre parenthèses dans les tableaux. Deux campagnes de mesures ont été réalisées. Lors des jaugeages du 18 octobre 2024, le débit a varié entre 2,5 et 2,7 m³/s à la station de Trou de Bra pendant la période de mesure.

Le 9 avril, le débit horaire est resté aux alentours de 0,75 m³/s à Trou de Bra. Il n'y a pas eu de variation notable du débit pendant la période de mesure. Les conditions hydrologiques étaient caractéristiques d'une période de tarissement (Figure 56).

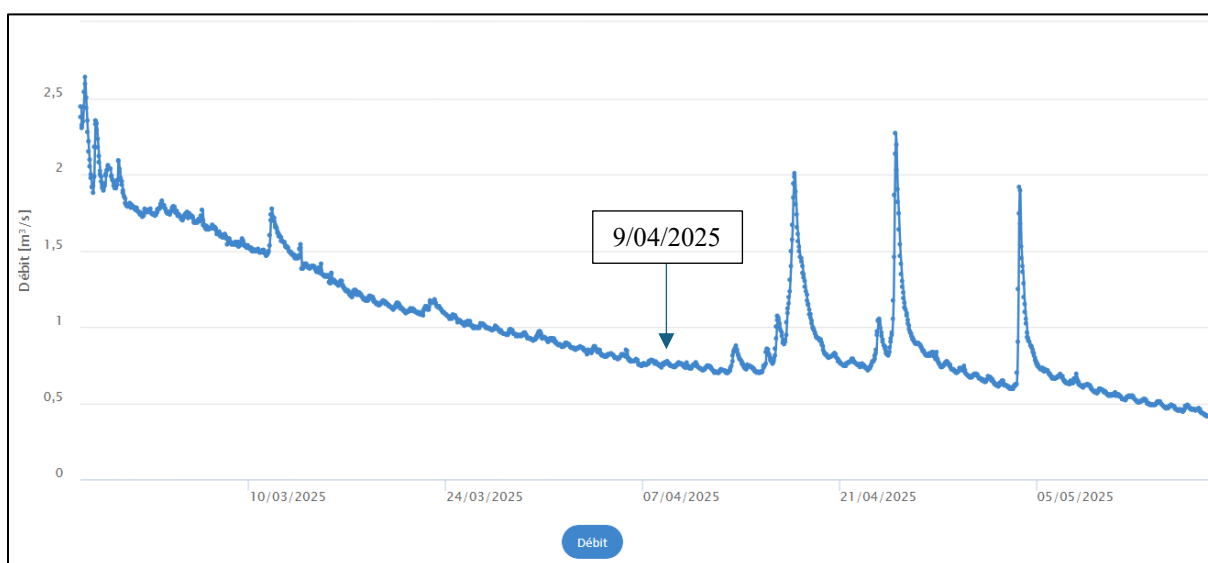


Figure 56. Hydrogramme à Trou de Bra en avril 2025

Le premier secteur, en amont des barrages « Chalet », est à la confluence entre le ruisseau de Sérine Fagne (point A), le bief d'un moulin qui est prélevé de la Chavanne (point B) en amont et la Chavanne (C) (Figure 57). Ces trois cours d'eau se rejoignent pour former la section D de la Chavanne, qui se dirige vers le site « Chalet ». Entre cette section amont et le site « Chalet », la Chavanne ne reçoit plus d'affluent. Il est donc possible de considérer que le débit mesuré en D est celui qui entre dans le site des barrages « Chalet ».

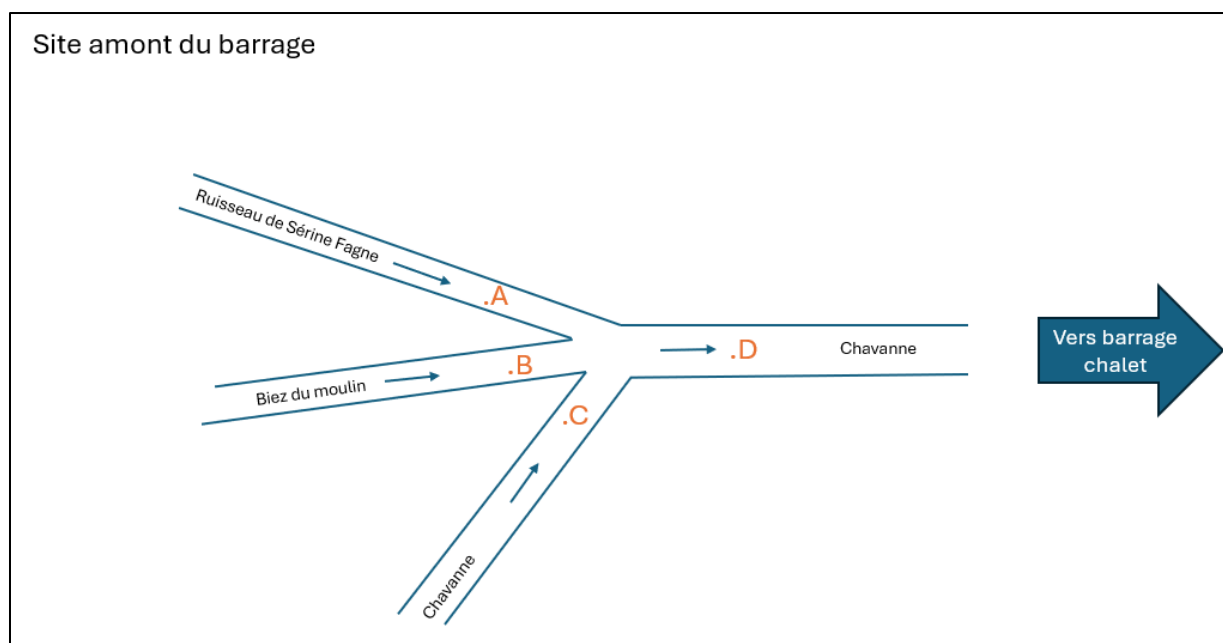


Figure 57. Schéma topologique de l'hydrographie en amont du site « Chalet » (village)

En octobre, la somme des débits mesurés en A (46 l/s), B (15 l/s) et C (88 l/s) donne un total de 149 l/s ce qui correspond au débit mesuré en D (150 l/s). Cela permet de confirmer la fiabilité des données. En avril, les débits mesurés sont plus faibles et le bief du moulin n'était pas actif, donc le débit n'y a pas été mesuré. Au point A, un débit de 12,5 l/s a été mesuré et en C, 9,1 l/s. Au total, cela résulte à un débit de 21,6 l/s. En D, le débit mesuré au jaugeage chimique donne une valeur de 33,1 l/s, ce qui est plus élevé que la somme des deux débits en A et C. Néanmoins, à la sonde électromagnétique, la valeur est de 23,4 l/s, ce qui est plus cohérent par rapport à A et C.

	<i>Données brutes</i>		<i>Données normalisées</i>	
	18 octobre 2024 (l/s)	9 avril 2025 (l/s)	18 octobre 2024 (l.s ⁻¹ .km ²)	9 avril 2025 (l.s ⁻¹ .km ²)
A	46	12,5	19,41	5,27
B	15	0	3,59	0
C	88	9,1	21,05	2,18
A + B + C	149	21,6	22,75	3,30
D	150	33,1 (23,4 à la sonde)	22,90	5,05 (3,57)

Tableau 12. Résultats des jaugeages du 18 octobre 2024 et 9 avril 2025 au niveau du village

Le deuxième secteur mesuré se trouve à la sortie du site « Chalet », au niveau du pertuis qui passe sous la route. Les mesures ont été réalisées après ce pertuis, sauf au point F, où la mesure a été faite dans la section qui passe à travers le pertuis. Plusieurs affluents arrivent à cet endroit pour se jeter dans la Chavanne : le ruisseau du Coignelot en rive gauche (G) et le ruisseau du Bati des Boussines en rive droite (H). Une canalisation (E) arrive également dans le dernier bassin. En octobre, le débit sortant de celle-ci n'a pas pu être mesuré car la canalisation était sous eau. En avril, le débit a pu y être mesuré car le niveau d'eau du bassin avait baissé à la suite de la destruction du barrage du pertuis. L'ensemble forme le secteur I qui se dirige vers le site « Autoroute ».

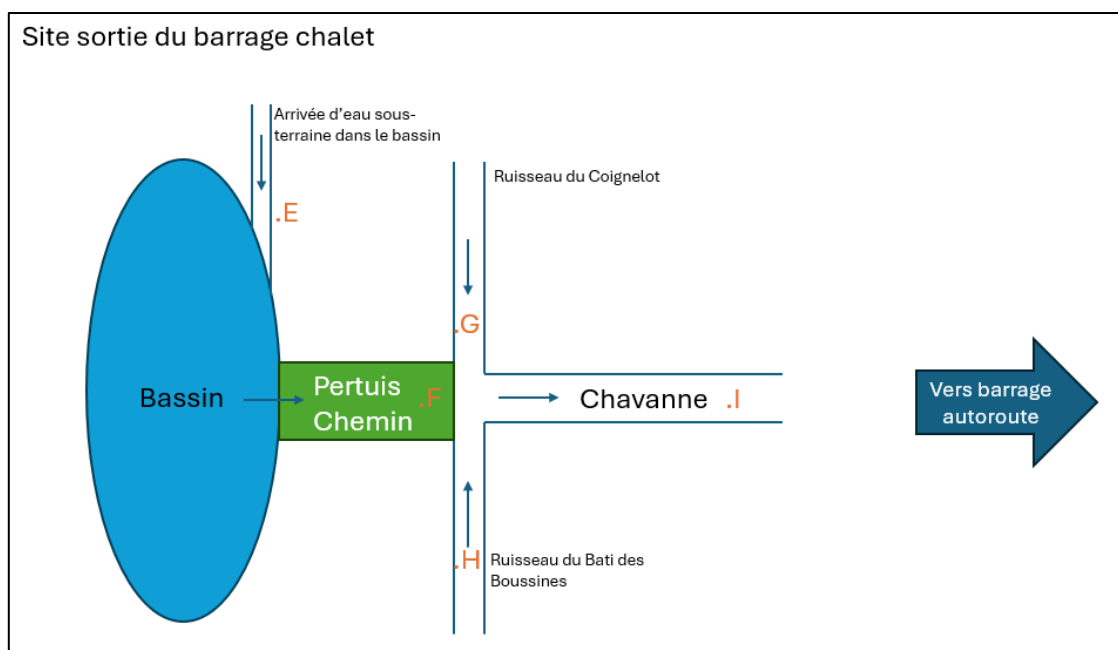


Figure 58. Schéma topologique de l'hydrographie à la sortie du site « Chalet »

En octobre, la somme des débits mesurés en F, G et H (281 l/s) correspond au débit mesuré en I (282 l/s au jaugeage chimique et 287 l/s au moulinet). En avril, la somme de F, G et H vaut 40 l/s alors que le débit mesuré en I est de 59,5 l/s au jaugeage chimique et 50,5 l/s à la sonde électromagnétique. Si on soustrait E à F, il est possible d'obtenir la valeur exacte de ce qui sort du barrage : 18,2 l/s ($2,33 \text{ l.s}^{-1}.\text{km}^2$).

	18 octobre 2024 (l/s)	9 avril 2025 (l/s)	18 octobre 2024 ($\text{l.s}^{-1}.\text{km}^2$)	9 avril 2025 ($\text{l.s}^{-1}.\text{km}^2$)
E	/ (sous eau)	4,1	/ (sous eau)	0,00
F	217	22,3	27,86	2,86
G	43	9,5	18,45	4,08
H	21	8,2	21,00	8,2
F + G + H	281	40	27,60	3,93
I	282 (287)	59,5 (50,5)	27,70 (28,2)	5,84 (4,96)

Tableau 13. Résultats des jaugeages du 18 octobre 2024 et 9 avril 2025 au niveau de la sortie du site « Chalet »

Le dernier secteur étudié est à la sortie du barrage « Autoroute », au niveau du pertuis qui passe sous celui-ci. À cet endroit, le débit a été mesuré soit à la sortie du barrage (point J) soit à la sortie du pertuis, de l'autre côté de l'autoroute (L). Une canalisation arrive juste avant l'entrée du pertuis (K). Celle-ci était à sec le 9 avril, le débit y était donc nul et le débit a été mesuré seulement au point L à l'aide de la sonde électromagnétique. Le jaugeage chimique n'a pas fonctionné à cet endroit.

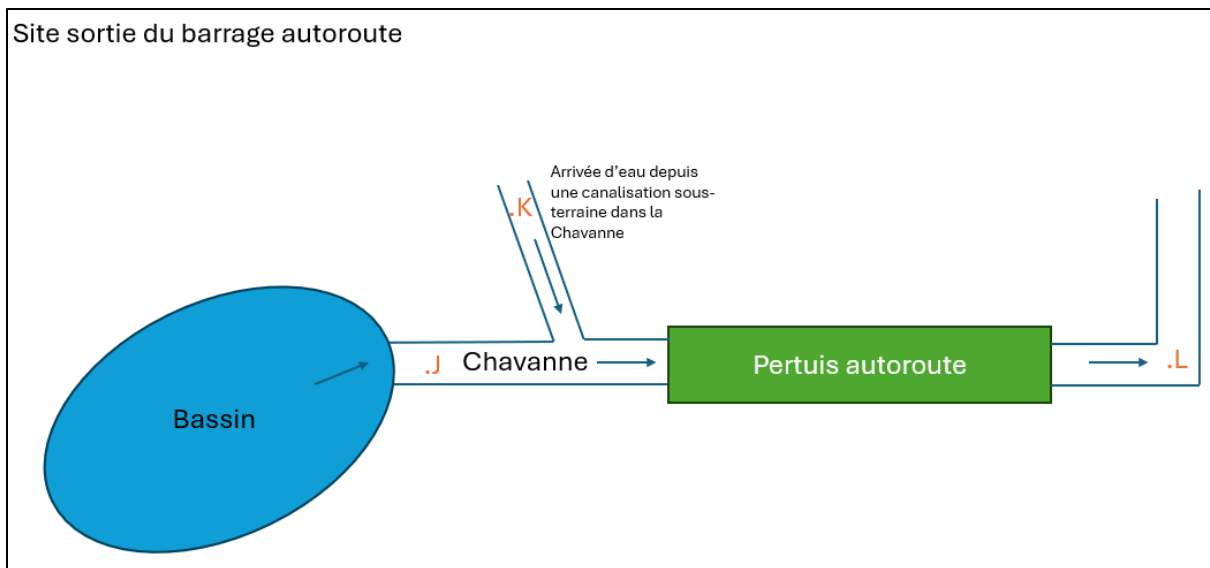


Figure 59. Schéma topologique de l'hydrographie à la sortie du barrage « Autoroute »

En octobre, un débit de 157 l/s a été mesuré au point J et 3 l/s au point K. À la sortie du pertuis (L), le débit a été mesuré à 180 l/s au jaugeage chimique, 190 au moulinet et 165 à la sonde électromagnétique (contre 160 l/s en additionnant K et J). En avril, le débit mesuré à la sonde en J donne une valeur de 28,8 l/s.

	18 octobre 2024 (l/s)	9 avril 2025 (l/s)	18 octobre 2024 (l.s ⁻¹ .km ²)	9 avril 2025 (l.s ⁻¹ .km ²)
J	157	/	13	/
K	3	0	3	/
J+K	160	/	13,3	/
L	180 (190 ; 165)	pas fonctionné (28,8 à la sonde)	15 (15,8 ; 13,7)	/(2,39)

Tableau 14. Résultats des jaugeages du 18 octobre 2024 et 9 avril 2025 au niveau de la sortie du site « Autoroute »

Toutes ces données sont utiles dans la compréhension du système hydrologique des barrages. De plus, les débits d'avril sont faibles par rapport à octobre. Par exemple, au point I, le débit d'avril vaut seulement environ 21 % du débit d'octobre et 16 % au point L. Cela permet d'avoir des données pour deux périodes hydrologiques différentes. En ce qui concerne les affluents, il y a un apport important d'eau en aval du site « Chalet » par le ruisseau du Coignelot et le ruisseau du Bati des Boussines. En octobre, ces deux affluents apportent 23 % du débit de la Chavanne au point I et 35 % en avril (en considérant le débit de 59 l/s). La proportion de l'apport des affluents est plus importante en période de tarissement. Cela souligne l'importance des petits affluents lors des périodes sèches.

Si l'on considère que le débit D est le débit qui entre dans le site « Chalet » et F, celui qui en sort, alors en octobre, il y a une différence d'environ 67 l/s entre l'entrée (150 l/s) et la sortie (217 l/s). En avril, le débit entrant est de 33,1 l/s (ou 23,4 l/ à la sonde) et le sortant de 22,3 l/s (18,2 sans prendre en compte E). Malgré une légère diminution en aval, ils semblent cohérents. Au niveau du site « Autoroute », si le débit I est celui qui entre (282 l/s ou 287 à la sonde en octobre et entre 50 et 60 l/s en avril selon la méthode) et le débit J celui qui en sort (157 l/s en octobre et 28,8 en avril), alors, cela représenterait un excès de 125 l/s en octobre et

30 l/s en avril, soit respectivement environ 11 000 m³/jour et 2 600 m³/jour. Ces valeurs semblent aberrantes et seront discutées plus tard.

Les valeurs normalisées des débits permettent de comparer les débits entre différents points de mesure en prenant en compte la taille du bassin versant. Entre octobre et avril, les débits étant plus faibles, ces valeurs diminuent en chaque point. Avant d'arriver au site « Chalet », la valeur normalisée du débit est de 22,9 l.s⁻¹.km² en octobre et 5,05 l.s⁻¹.km² en avril. À la sortie du site « Chalet », au point F, elle atteint 27,86 l.s⁻¹.km² et 2,86 l.s⁻¹.km² en avril alors qu'au point I, après les deux affluents, la valeur atteint 27,7 l.s⁻¹.km² en octobre et 5,84 l.s⁻¹.km² en avril. Cela permet de mettre à nouveau en avant l'importance des affluents dans le débit en période de tarissement. À la sortie du barrage « Autoroute », la valeur normalisée descend à environ 15 l.s⁻¹.km² en octobre et 2,39 l.s⁻¹.km² en avril. En effet, comme il n'y a pas d'affluent depuis le point I, en plus de la diminution du débit observée en aval, les valeurs diminuent.

6.2.4 Courbe de tarage à la station et hydrogramme

Les mesures de débit réalisées à différentes hauteurs d'eau permettent de réaliser une courbe de tarage (Figure 60). Il est possible, à partir de cette courbe, de déduire une relation entre la hauteur d'eau et le débit. Une équation polynomiale d'ordre 2 contrainte à passer par l'origine (0;0) a été choisie. Le coefficient de détermination R^2 pour cette relation est de 0,99. Cette équation permet une bonne représentation de la relation non linéaire entre la hauteur d'eau et le débit. Il est cependant important de rappeler que la qualité de cette relation dépend du nombre de jaugeages réalisés et que les extrapolations vers des débits extrêmes peuvent introduire des incertitudes. Dans le cas de cette courbe, une plage variée de hauteurs d'eau a été mesurée, ce qui permet de réduire les incertitudes liées aux extrapolations.

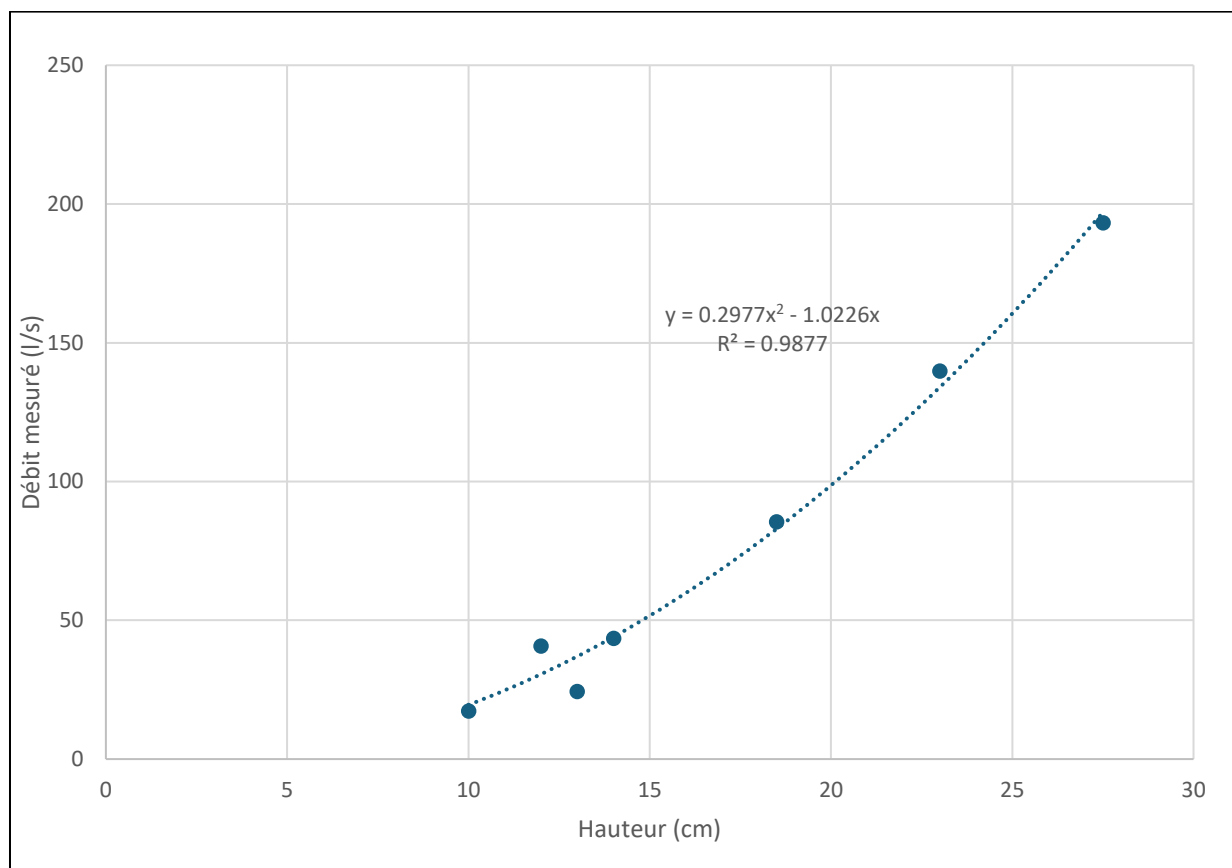


Figure 60. Courbe de tarage à la station limnimétrique LHGF de Vaux-Chavanne

Cette relation permet de réaliser un hydrogramme à partir des hauteurs d'eau mesurées par le *Diver* de la station installée (Figure 61) avec un pas de temps de 5 minutes. Cet hydrogramme s'étend du 8 février 2025 au 11 juin 2025. Sur cette période, le débit a oscillé entre 15 l/s (minimum atteint le 24 mai 2025) et 368 l/s (maximum atteint le 3 mai 2025). Le débit moyen est de 53 l/s, ce qui représente 3 % du débit moyen enregistré à la station de Trou de Bra. Ce débit est donc petit par rapport à celui de la Lienne et montre la nécessité d'avoir une station sur la Chavanne. De plus, une dizaine de pics sont visibles sur l'hydrogramme, montrant une réponse relativement rapide aux précipitations, caractéristique des petits bassins versants (6,5 km² à la station).

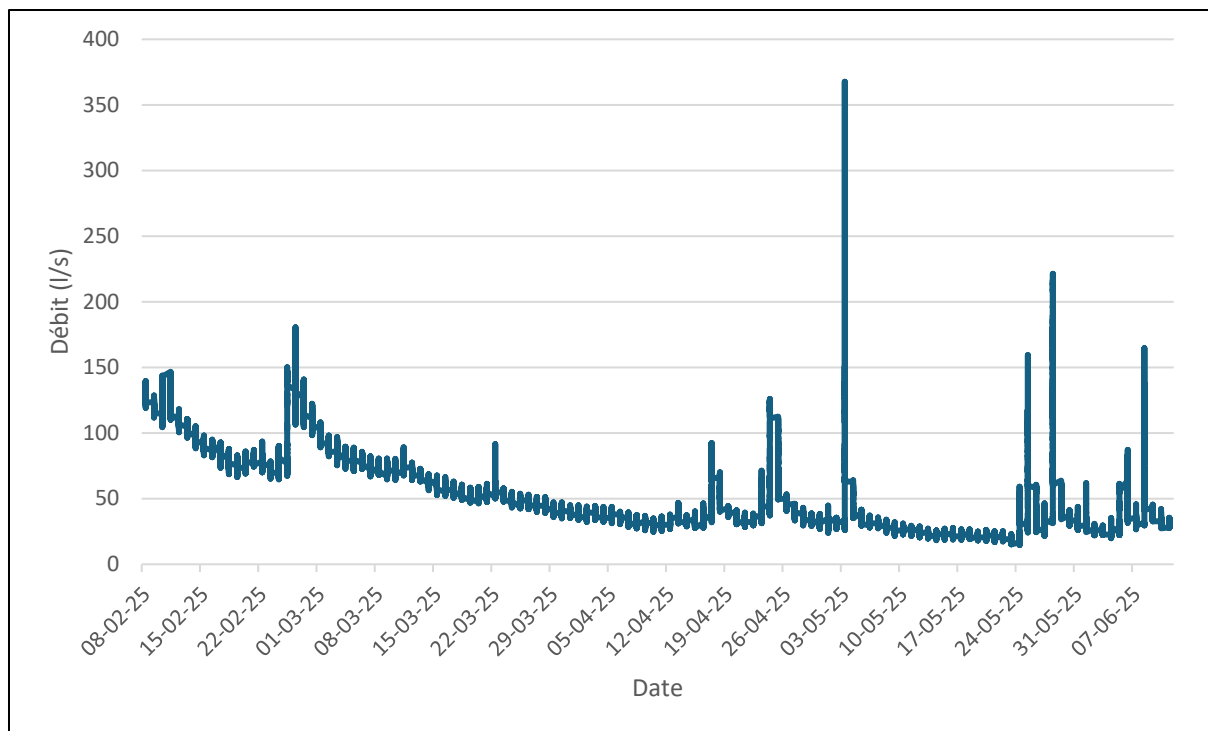


Figure 61. Hydrogramme à la station LHGF

6.2.5 Évolution de la hauteur d'eau dans les bassins et dans la Chavanne

Grâce aux *Divers*, il est possible d'étudier l'évolution des hauteurs d'eau dans deux retenues du site « Chalet » (BC1 = bassin amont et BC2 = bassin chalet) et de les mettre en relation avec la hauteur d'eau dans le cours d'eau. Plusieurs observations peuvent être mises en avant à partir de la Figure 62.

Premièrement, les deux bassins ne réagissent pas de la même manière. Le bassin le plus en amont a une hauteur d'eau très stable dans le temps, sans pic important contrairement au bassin côté chalet. En effet, le niveau d'eau dans le bassin amont varie entre 30,6 et 35 cm avec en moyenne une hauteur d'eau de 33 cm alors que le niveau dans le barrage côté chalet oscille entre 38 et 54 cm avec une moyenne de 47 cm. Bien que ces deux bassins soient très proches en distance, les deux bassins ont des dynamiques de remplissage très différentes.

Deuxièmement, une période de tarissement est visible au niveau de la Chavanne entre fin février et mi-avril. Cependant, sur les deux retenues, aucune diminution de la hauteur n'est visible. Il y a même une légère augmentation du niveau d'eau sur le barrage chalet entre le 2 et 22 mars. Cela pourrait s'expliquer par une activité du castor qui a renforcé le barrage, qui se remplirait. Dans ce cas, si le barrage se remplit, on peut s'attendre à une diminution du débit en aval. Ensuite, des diminutions notables du niveau sont apparues comme entre fin mars et mi-avril ou pendant le mois de mai par exemple, fournissant certainement un supplément d'eau à la rivière, qui peut soutenir le débit en période plus sèche.

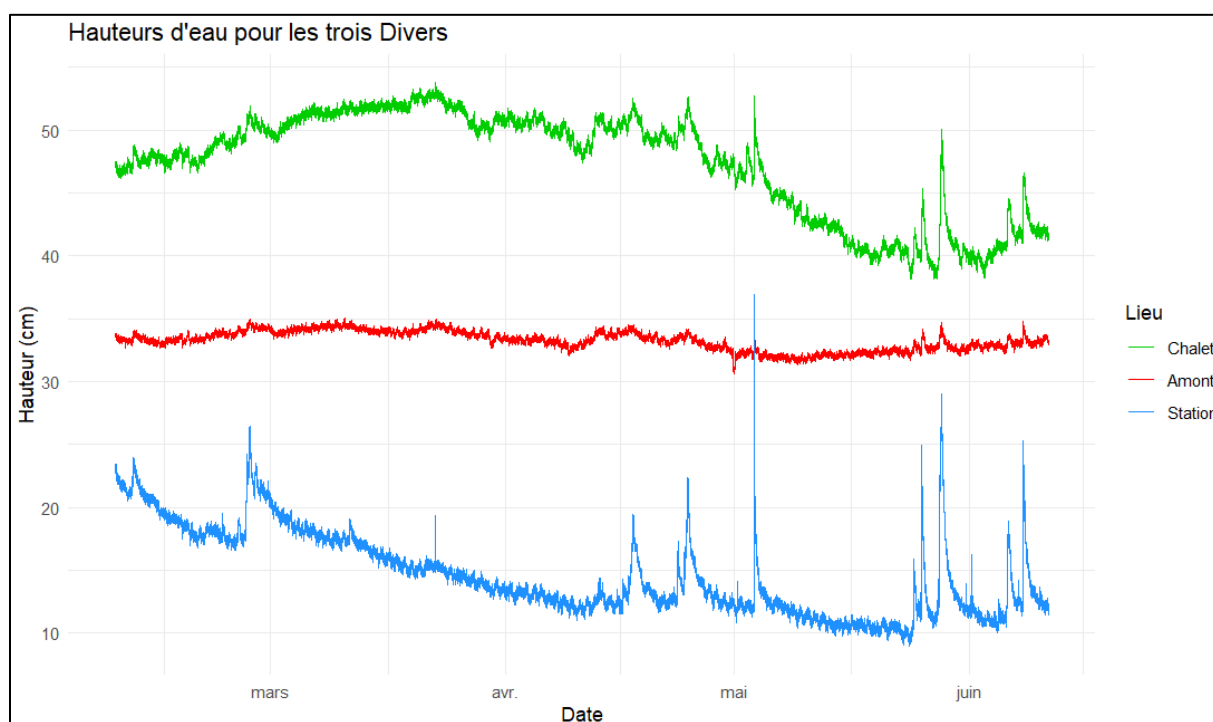


Figure 62. Variation des hauteurs d'eau à la station, dans le bassin amont et le bassin chalet

Troisièmement, les pics sont plus marqués sur le bassin du chalet à partir du mois de mai. Le bassin étant plus bas, il a plus de stockage disponible. La hauteur d'eau, y compris pendant des pics, ne dépasse jamais 54 cm. Ce serait la hauteur d'eau maximum que le barrage peut contenir. Au-delà, l'eau traverse la retenue sans être stockée. Quelques légers pics sont marqués en mai et juin sur le barrage amont, qui a vu son niveau baisser de quelques centimètres et pourrait donc stocker une certaine quantité d'eau. Vu les réactions rapides du barrage chalet,

il est intéressant de comparer les heures de pics de crue à la station et dans le bassin. Par exemple, lors le pic du 26 février 2025, les hauteurs d'eau maximales à la station et dans le bassin chalet se produisent en même temps (7 h du matin). Cela signifie que le bassin réagit aux précipitations et pas au débit transmis par le cours d'eau. A l'inverse, le petit pic du 22 mars 2025 qui est visible sur la station n'est pas clairement visible sur les deux bassins, qui sont déjà remplis. Les retenues ne permettaient pas de capacité de stockage supplémentaire. Après une période plus sèche, un pic a été enregistré le 17 avril. Les deux hauteurs d'eau maximales apparaissent toutes les deux vers 17h pour la station et le bassin. Cette dynamique de pic simultané se produit également pour le pic du 24-25 avril. Le 3 mai a eu lieu le plus gros pic enregistré à la station avec une hauteur d'eau passant de 12 à 37 cm à la station à 15h30. Cependant, comme le montre la Figure 63, le barrage du chalet ne réagit qu'environ 50 minutes (16h20) après la station, ce qui pourrait indiquer une averse en amont des bassins qui ont alors un effet d'écêtement lié au remplissage du bassin. Ce décalage temporel est supérieur au pas de temps d'enregistrement qui est de 5 minutes, ce qui garantit une précision suffisante pour détecter une telle différence. La station et ce barrage sont distants de 700 m environ. Le barrage pourrait donc jouer un rôle régulateur pour des événements intenses, si le bassin ne se remplit pas en même temps de précipitations. Cependant, il est intéressant de constater que le barrage amont, situé entre la station et le chalet ne réagit que très peu avec une augmentation du niveau de 2 cm. Cette faible variation peut s'expliquer soit le fait que l'eau par-dessus le barrage car la retenue est pleine et donc continue de s'écouler sans stockage soit par le fait que l'eau pourrait inonder latéralement la vallée. En ce qui concerne le pic du 25 mai, le bassin chalet se remplit en même temps que l'eau monte à la station. A l'inverse, le pic du 28 mai au niveau du chalet présente un retard par rapport à la station d'environ une heure, comme cela s'est passé pour le 3 mai. Ces différents comportements illustrent la diversité des dynamiques de stockage et leur complexité selon le remplissage, le barrage et les précipitations.

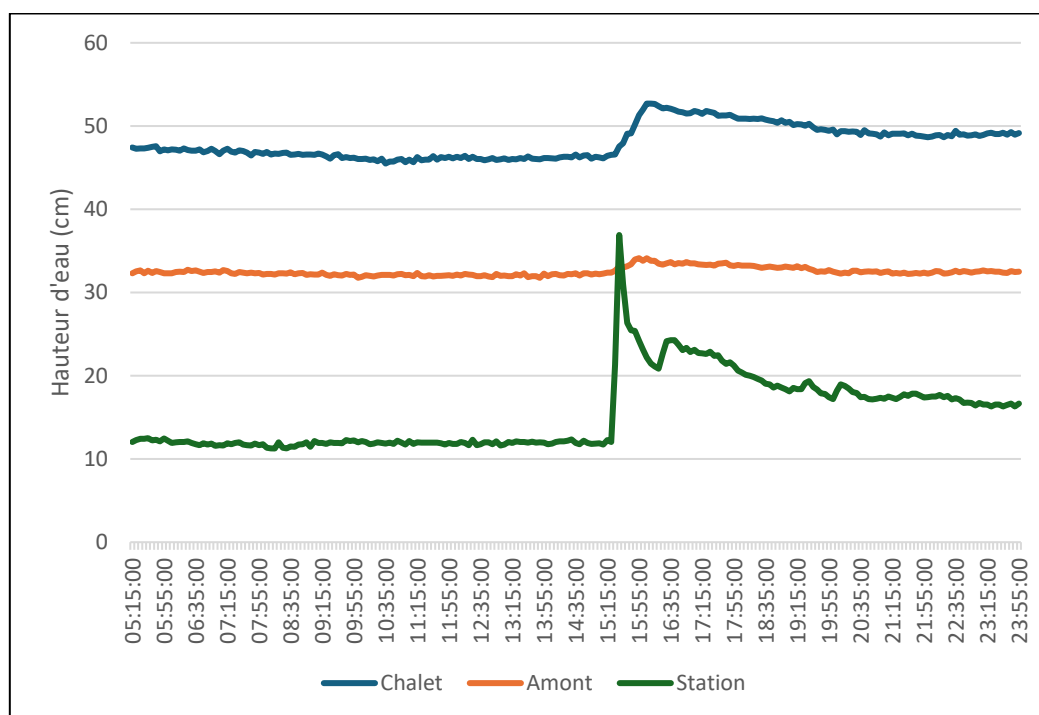


Figure 63. Variation des hauteurs d'eau le 3 mai 2025

6.2.6 Bathymétrie et variation du stockage d'eau dans les bassins

Deux modèles numériques de terrain LiDAR, un avant le castor (2013) et un après (juin 2025), permettent d'estimer la profondeur des retenues. En soustrayant le MNT avant le castor, qui représente le fond du bassin au MNT après le castor, représentant la surface de l'eau, il est possible de cartographier et quantifier les hauteurs d'eau des bassins. Ainsi, il est aussi possible de calculer les volumes stockés dans chaque bassin.

Le Tableau 15 reprend les résultats pour chaque bassin du site « Chalet », d'amont en aval. Il reprend le volume, la surface, la hauteur d'eau moyenne, minimum et maximum. Trois bassins se distinguent par des volumes conséquents :

- Le bassin BC1 a une surface de 2278 m² et un volume de 988 m³. La hauteur d'eau moyenne est de 0,57 m avec une profondeur maximale de 1,74 m. Celle-ci se produit dans l'ancien chenal de la Chavanne (Figure 64). Des canaux plus profonds sont aussi visibles. Ce sont d'anciens canaux de drainage qui ont été immergés.
- Le bassin BC2 a une surface de 2433 m² et retient 715 m³ d'eau. La profondeur moyenne est de 0,36 m. La profondeur maximale est de 0,91 m. Les profondeurs maximales se trouvent également dans l'ancien chenal.
- Le bassin BC3 est plus petit avec 260 m³ pour 837 m². La profondeur moyenne est de 0,41 m avec un maximum de 0,93 m.

Les deux derniers bassins sont plus petits avec seulement 39 m³ pour 426 m² au niveau de BC4 et 3 m³ pour BC5. BC5 a subi des modifications au cours du temps à cause de la destruction du barrage par la commune et l'installation de la cage. Son volume devait être plus conséquent dans le passé.

Pour tous les bassins, les valeurs de hauteur minimum sont négatives. Cela peut être dû à des zones où le castor a creusé par exemple ou des artefacts des données LiDAR qui peut rencontrer des difficultés à détecter l'eau.

	Volume (m³)	Surface (m²)	Hauteur moyenne (m)	Hauteur minimum (m)	Hauteur maximum (m)
BC1	988	2278	0,57	-0,08	1,74
BC2	715	2433	0,36	-0,19	0,91
BC3	260	837	0,41	-0,02	0,93
BC4	39	426	0,12	-0,17	0,47
BC5	3	103	0,04	-0,48	0,57

Tableau 15. Volumes, surfaces et hauteurs d'eau des bassins du site « Chalet »

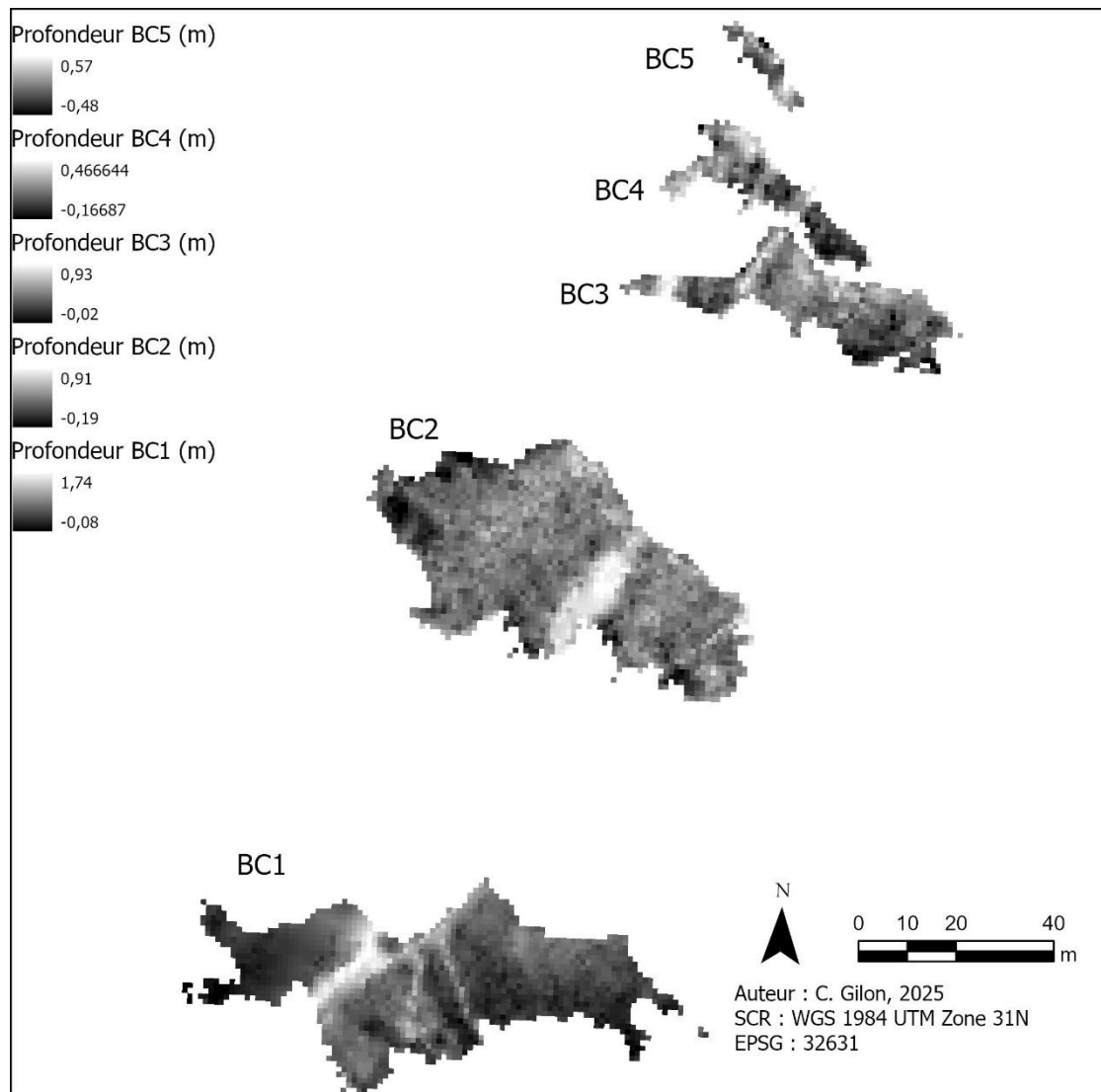


Figure 64. Profondeurs pour chaque bassin du site du « Chalet »

Étant donné que la variation de la hauteur d'eau est connue pour les deux bassins BC1 (bassin amont) et BC2 (bassin chalet), il est possible d'estimer les volumes d'eau stockés en multipliant cette hauteur d'eau par la surface du bassin. Pour le bassin amont, la hauteur d'eau varie entre 30,6 et 35 cm, soit une amplitude maximale de 4,4 cm. En multipliant cette variation avec la surface de ce bassin (2278 m²), le volume obtenu est de 100 m³. Pour le bassin du chalet, ce volume atteint 389 m³ avec une amplitude de 16 cm entre le niveau d'eau minimum et maximum et une surface de 2433 m².

Ces valeurs représentent donc le volume maximum théorique que chaque retenue pourrait stocker si elle passe de son niveau d'eau minimum à son niveau maximum. Il ne s'agit pas nécessaire du volume mobilisé lors d'une crue, surtout pour le bassin dont les variations sont plus faibles et moins clairement corrélées aux épisodes de pluies. Néanmoins, cette estimation permet d'évaluer le potentiel stockage des retenues lorsqu'elles sont à leur niveau minimum.

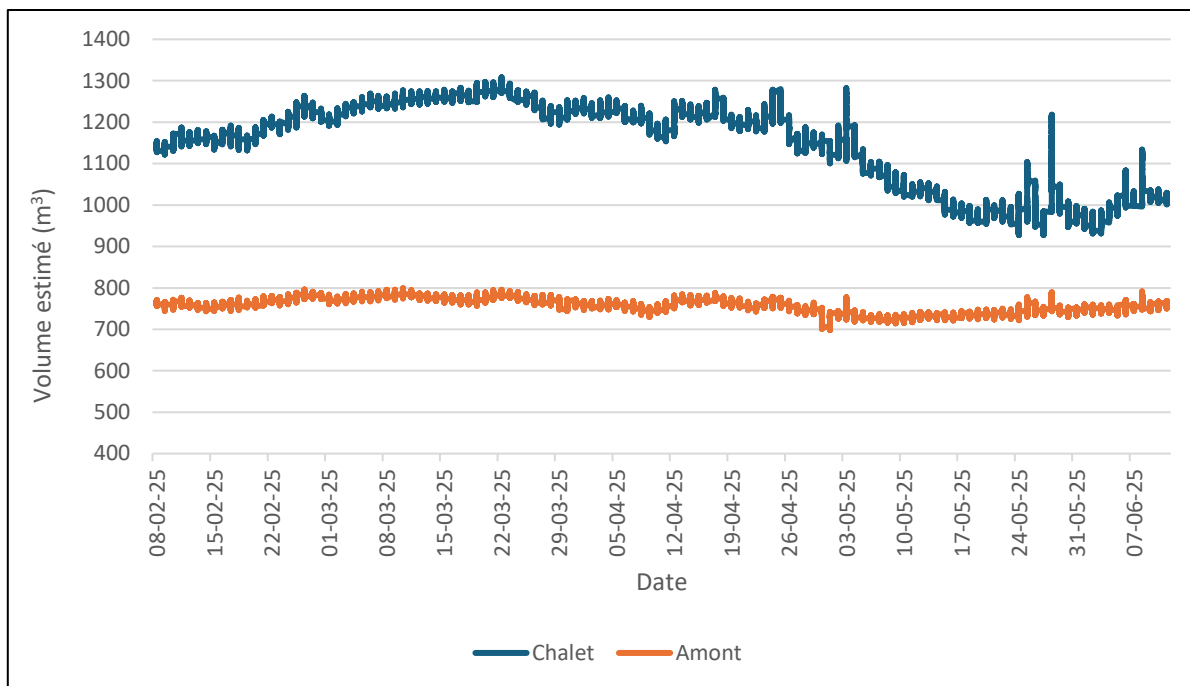


Figure 65. Évolution du volume estimé dans les bassins BC1 et BC2

Pour le site « Autoroute », la démarche est différente car il n'y a pas de MNT disponible avant l'arrivée du castor qui était déjà présent en 2013. Il est cependant possible de comparer le MNT de juin 2025 avec les profils topographiques réalisés en 2016 par le LHGF à la suite d'une crue dévastatrice. Le bassin était donc à sec. Il est donc possible d'estimer une hauteur d'eau en comparant les altitudes de 2016 et 2025. La Figure 66 reprend la localisation de chaque profil. La valeur du MNT de 2025 a été extraite exactement à la localisation de chaque point pour comparer l'altitude.

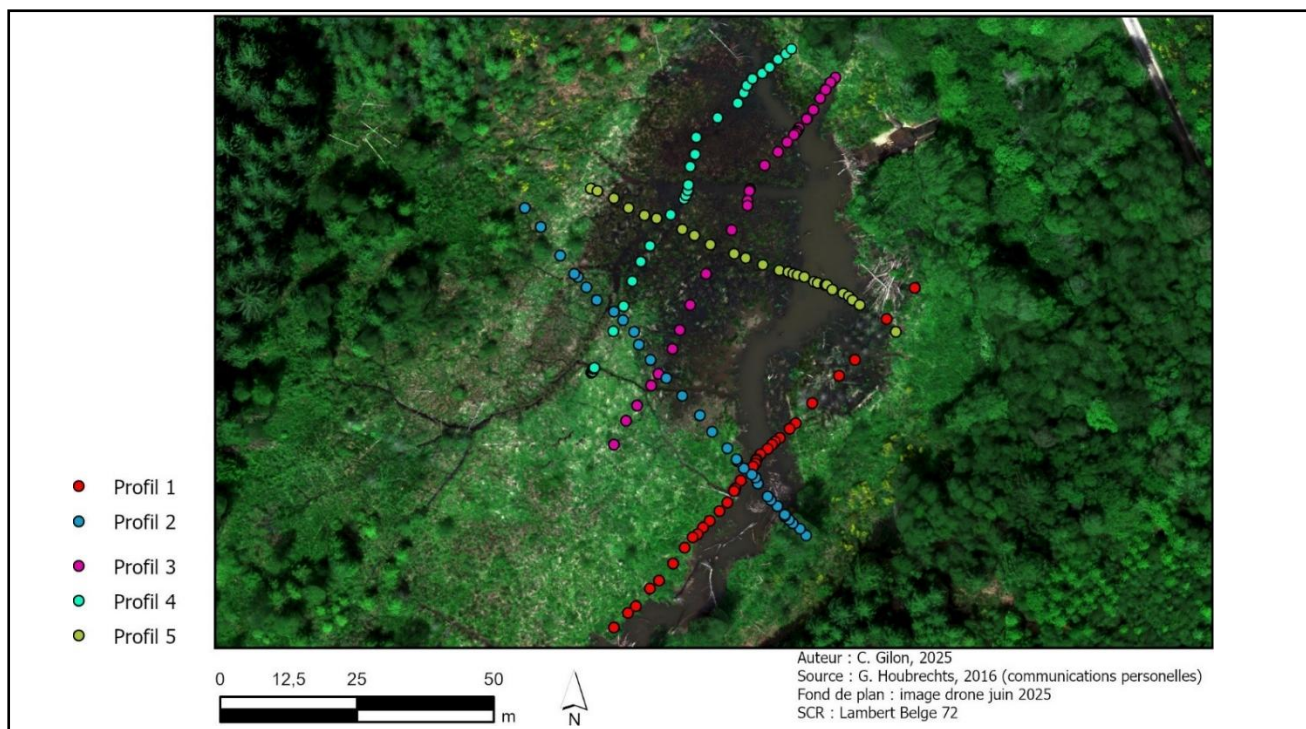


Figure 66. Localisation des profils topographiques de 2016

Le premier profil, de la rive gauche à la rive droite, montre une élévation du sol entre 2016 et 2025 puis le passage d'un petit canal pour ensuite arriver dans le chenal principal. La profondeur moyenne de ce chenal principal est de 0,64 m avec un maximum à 1,3 m. En rive droite, le niveau a augmenté car la zone est maintenant immergée.

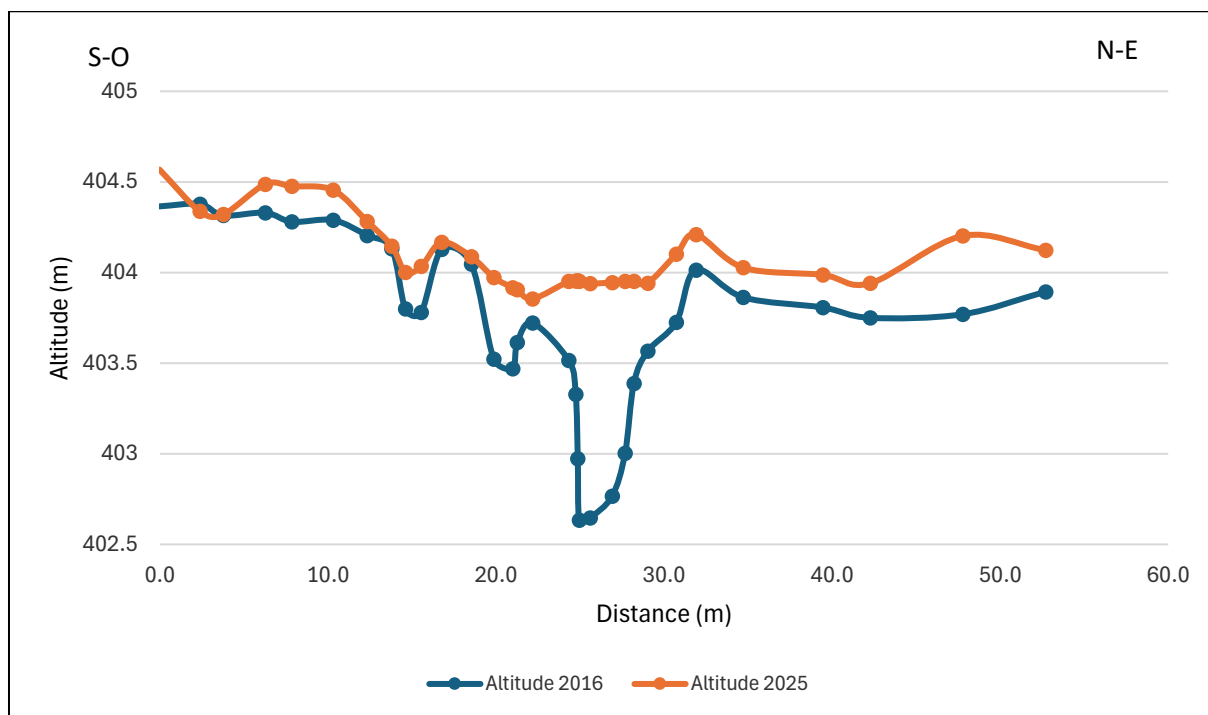


Figure 67. Profil topographique n°1

Le second profil montre une légère élévation du sol en rive gauche. Pour le chenal, la profondeur maximale atteinte est de 1,3 m et la profondeur moyenne est de 0,68 m.

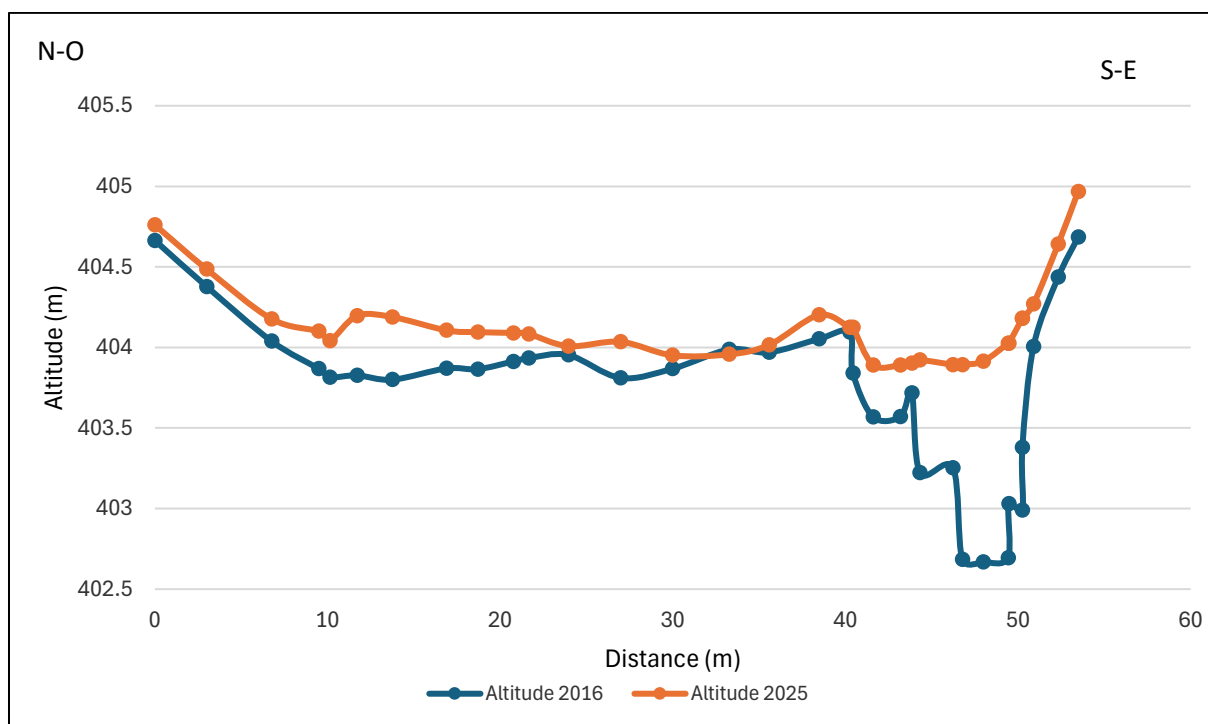


Figure 68. Profil topographique n°2

Sur le profil n°3, en le suivant du sud-ouest au nord-est, il est possible d'apercevoir un premier canal qui a une profondeur de 40 cm. Ensuite, un deuxième canal plus profond, qui est une extension vers le nord de la retenue, apparaît avec une profondeur moyenne de 0,42 m et un maximum à 1,1 m. La zone entre les deux canaux est couverte d'eau.

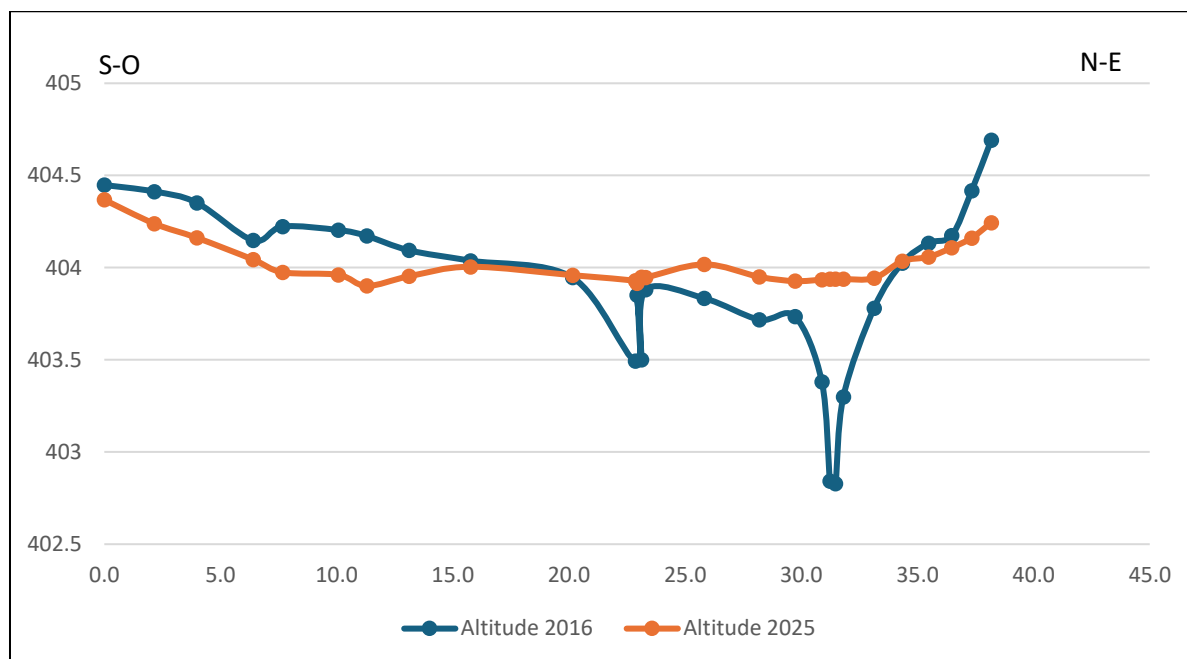


Figure 69. Profil topographique n°3

Le quatrième profil, du sud-ouest vers le nord-est, montre en premier lieu un tassement du sol. Cette zone était un talus avant, qui s'est tassé au fil du temps. Le profil traverse ensuite un petit canal pour finalement arriver à l'extension nord de la retenue avec une profondeur moyenne de 0,2 m.

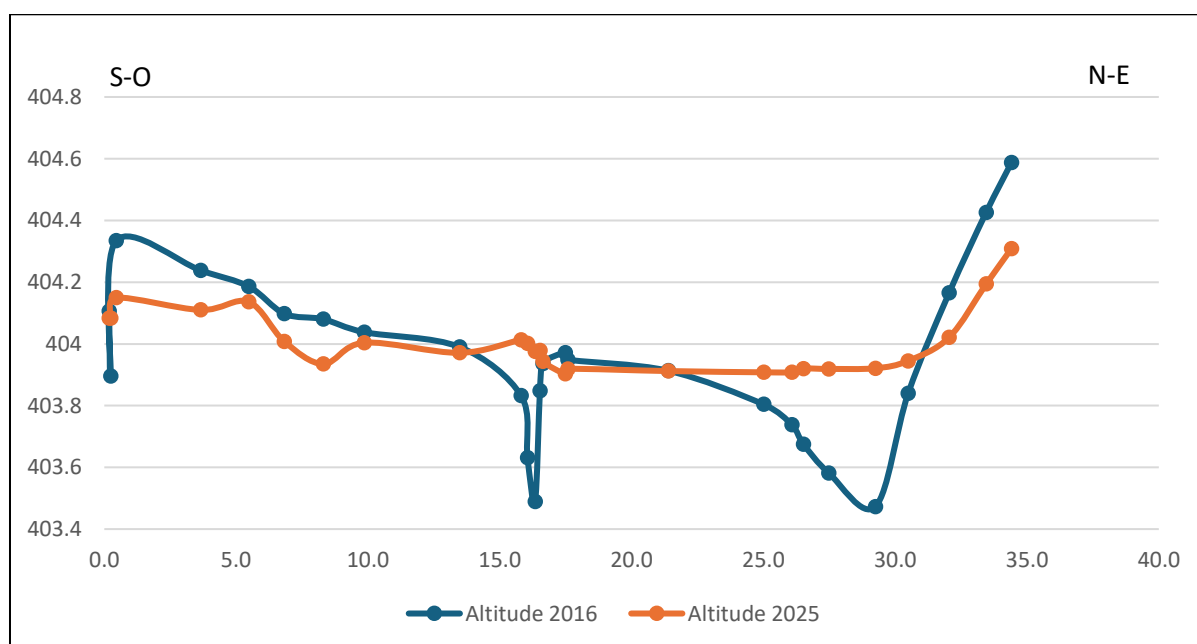


Figure 70. Profil topographique n°4

Finalement, pour le dernier profil, les altitudes de 2016 et 2025 correspondent jusqu'à arriver dans le chenal, qui a une profondeur moyenne de 0,76 m et une profondeur maximale de 1,6 m.

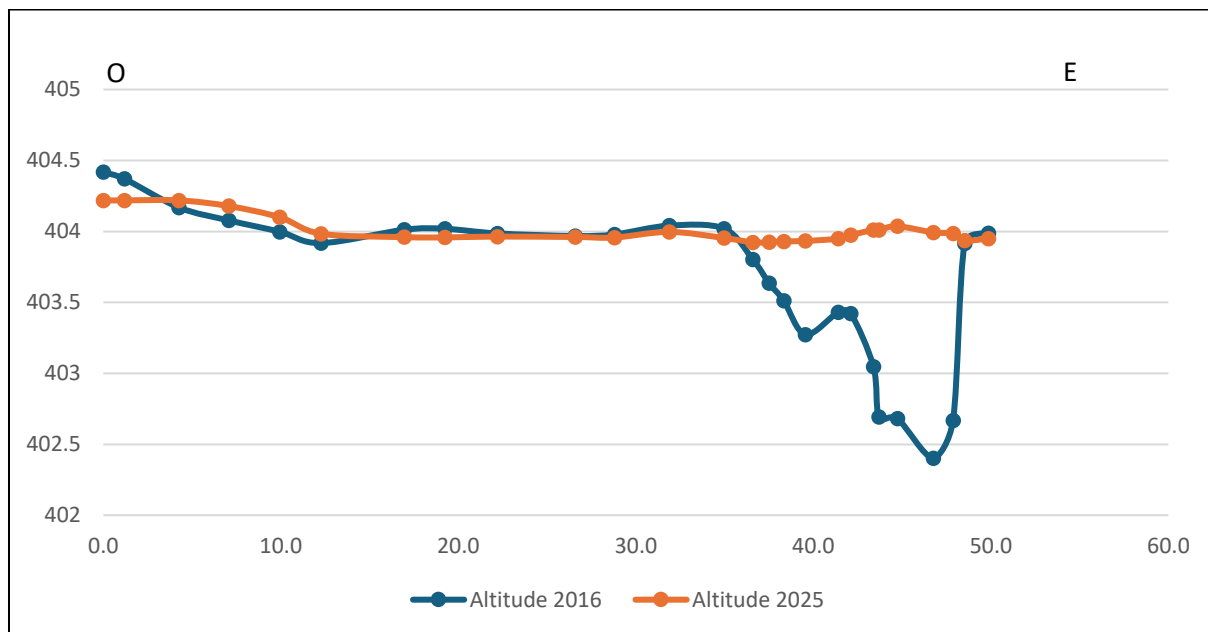


Figure 71. Profil topographique n°5

Grâce à ces profils, il est possible d'obtenir une estimation de la profondeur de la retenue. Si l'on considère uniquement la retenue dans l'ancien chenal principal (865 m²) (la hauteur d'eau de la zone inondée autour est minime) et l'extension vers le nord de la retenue (76 m²) avec une profondeur moyenne respective de 0,7 m et 0,31 m, le volume total d'eau retenu d'eau est de 629 m³.

6.2.7 Extension des bassins lors de la crue du 10/01/2025

Lors de la crue du 10 janvier 2025, un vol drone a été réalisé pour comprendre le comportement des bassins en cas de crue. Cette crue, mesurée à la station de Trou de Bra, est estimée avec une récurrence de 1,4 an. Cependant, comme la Chavanne est un plus petit cours d'eau que la Lienne et plus réactif aux précipitations, il se pourrait que la crue ait une récurrence plus élevée pour la Chavanne.

Au site « Chalet », les observations au drone ont montré que les bassins n'avaient ni cédé, ni été entendus latéralement par une inondation de la plaine. Pour le site « Autoroute », le cas est différent. La zone a été inondée. Une grande zone humide est visible sur la Figure 72 grâce à la neige. L'eau sort à travers et par-dessus le barrage mais aussi par tous les côtés (flèches sur les Figures 72 et 73). Le barrage a résisté, sans casse ni brèche.



Figure 72. Vue drone du barrage « Autoroute » lors de la crue du 10 janvier 2025 (coordonnées Lambert 72 : 245332 m, 112244 m)



Figure 73. Barrage « Autoroute » lors de la crue du 10 janvier 2025 (coordonnées Lambert 72 : 245332 m, 112244 m)

6.2.8 Variations thermiques à l'échelle temporelle et spatiale

Afin d'évaluer l'évolution de la température au cours du temps, les mesures de température acquises par les *Divers* ont été étudiées. La Figure 74 reprend la température de l'air (baromètre), la température de l'eau au niveau de la station, du bassin amont et du bassin chalet avec un pas de temps de 5 minutes (courbes fines). En gras, la moyenne glissante sur 5 jours de chaque localisation est reprise, ce qui permet de lisser les variations journalières tout en conservant la tendance générale de la température.

Entre février et juin 2025, la température de l'eau aux 3 points a augmenté progressivement de manière générale, ce qui est cohérent avec le réchauffement printanier et la température de l'air. Au départ, la température de la station et du bassin amont se superposent parfaitement et presque aussi pour le bassin chalet, avec des températures légèrement plus chaudes. Elles oscillent aux alentours de 5 à 7 °C. À partir du 20 mars 2025 environ les courbes ont commencé à s'écarter. La station a la température la plus basse puis le bassin amont et finalement, c'est le bassin du chalet qui a la température la plus élevée. À cette période, les écarts ne sont que d'un degré environ maximum entre les trois points. Cependant, au cours du temps, ceux-ci s'agrandissent, en particulier entre les bassins et la station. L'écart maximal entre la station et le chalet est de 6,3°C (11 mai) et l'amont et la station de 4,7°C (30 mai). L'écart maximal entre les deux bassins est de 4,3°C le 11 mai. Plus l'eau avance dans les bassins, plus elle se réchauffe, car le temps de résidence augmente.

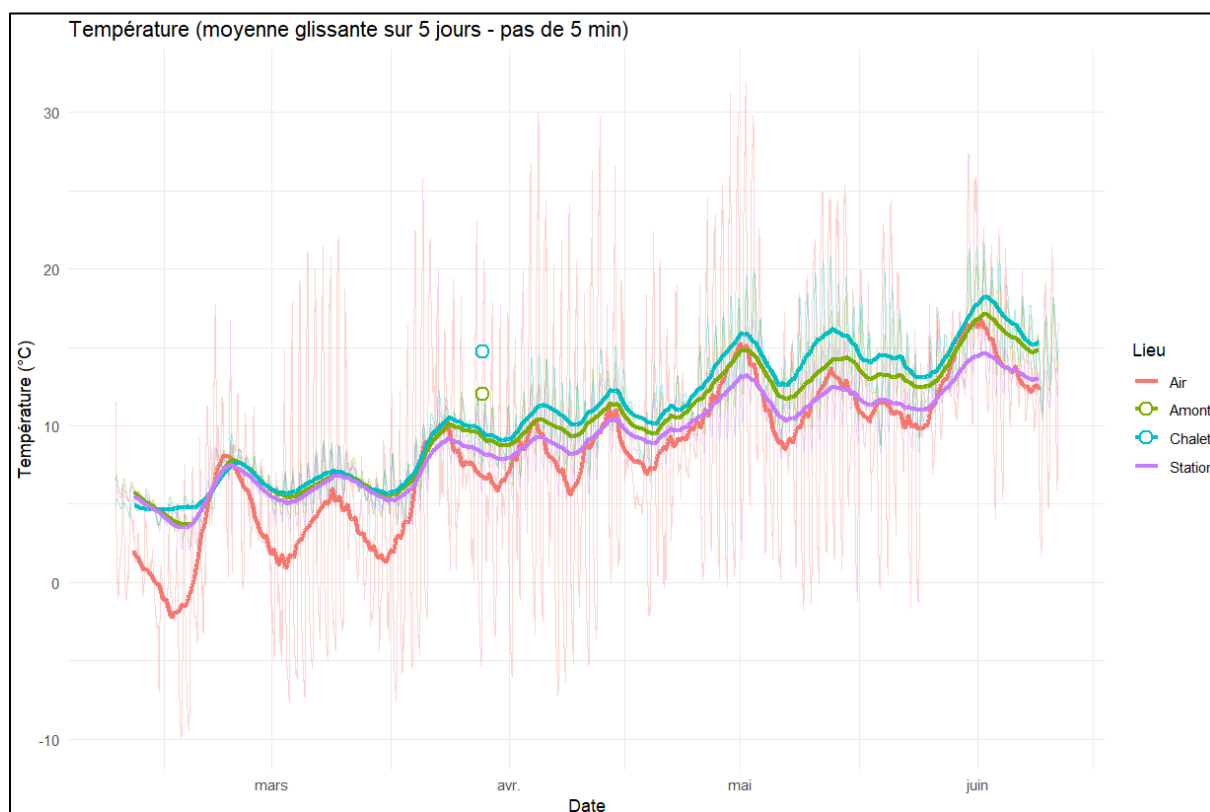


Figure 74. Évolution de la température de l'eau à la station limnimétrique, dans le bassin amont et chalet et au baromètre

La Figure 75 reprend le résultat du vol à la caméra thermique du 28 mars 2025, mettant en avant la température de surface pour chaque pixel. Cette carte permet d'étudier la répartition de la température dans les différents bassins et canaux. En ce qui concerne la partie « Chalet », la température augmente au fur et à mesure du passage de barrages. Les températures moyennes de chaque bassin sont reprises dans le Tableau 16. En effet, le bassin amont (BC1) présente une température de 12,74°C alors BC4 est à 14,75°C. Il y a donc une différence 2°C entre le premier et quatrième bassin, ce qui confirme les observations faites à l'aide des *Divers*. Cette augmentation s'explique certainement par l'allongement du temps de résidence de l'eau, la stagnation et l'exposition prolongée au soleil. Cependant, au niveau du bassin BC5, juste avant le pertuis, la température diminue. Cela peut être dû à la canalisation qui se déverse dans cette partie ou à une eau qui est davantage brassée. De plus, au sein même des bassins il y a des variations. Par exemple, au niveau de BC2, la température varie de 12°C à 15°C dans sa partie la moins profonde. Cela suggère que l'eau de la retenue est stagnante à certains endroits mais peut être renouvelée à certains endroits. Les températures des canaux sont de manière générale plus élevées avec des températures pouvant atteindre 18°C. Au niveau des barrages « Autoroute », il n'y a pas vraiment de tendance. Le bassin BA4 a une température moyenne de 14,35°C, le bassin BA5 de 13°C et le dernier, de 13,42°C. Sur la Figure 75, la zone plus froide du bassin BA5 est bien visible en bleu/mauve plus foncé. Cela suggère un brassage de l'eau lors des passages des barrages. Comme il y a une stratification thermique verticale, lorsque l'eau passe ces barrages, elle est mélangée et donc l'eau plus froide remonte en surface. En arrivant au barrage BA6, l'eau se réchauffe à nouveau, atteignant parfois jusqu'à 17°C dans la partie nord de la retenue. À la sortie du barrage, l'eau est à nouveau plus froide (12,65°C), témoignant de cette stratification verticale de la température dans la retenue.

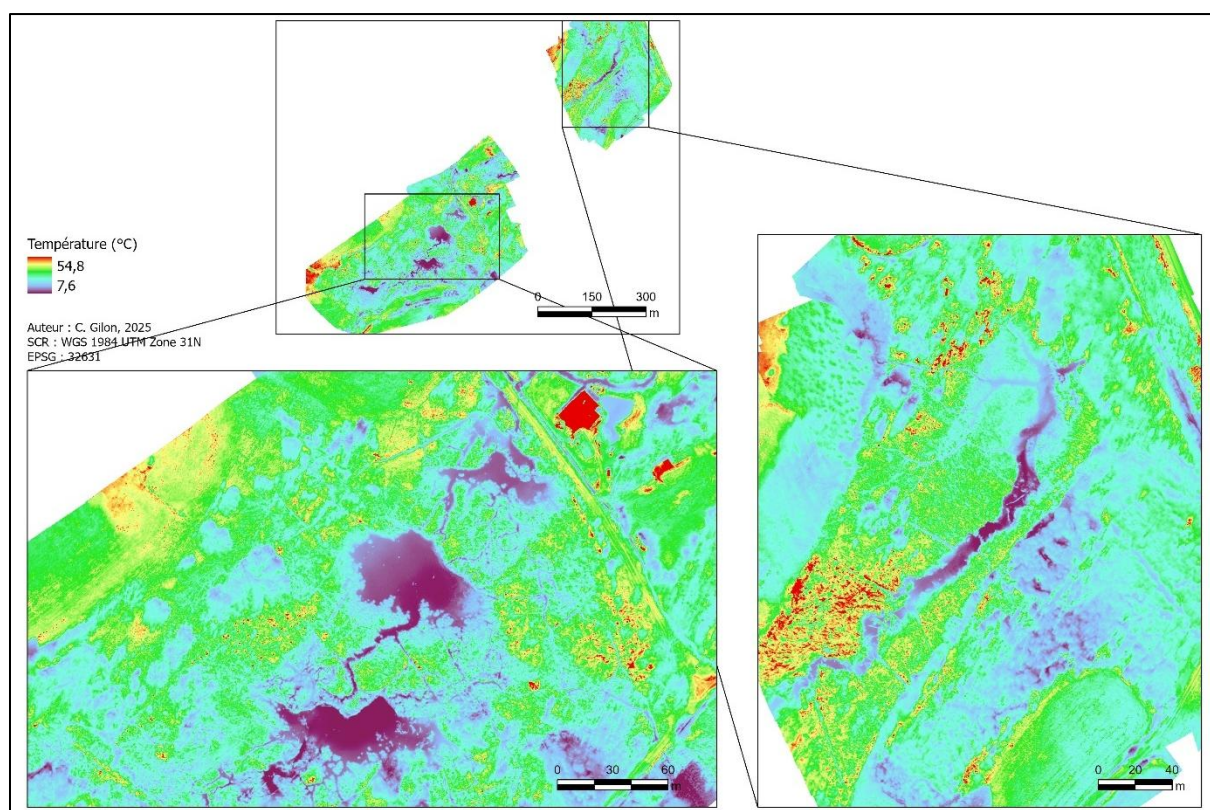


Figure 75. Température de surface (°C) du 28 mars 2025

Site	Bassin	Température moyenne mars (°C)
Site « Chalet »	BC1	12,74
	BC2	13,03
	BC3	13,86
	BC4	14,75
	BC5	13,69
Site « Autoroute »	BA4	14,35
	BA5	13,00
	BA6	13,42

Tableau 16. Températures moyennes des différents bassins selon le vol drone du 28 mars 2025 et du 10 juin 2025

Finalement, sur le graphique de température de la Figure 74, il est possible de constater que le vol drone de mars (points marqués) surestime la valeur de température au niveau du chalet alors que la valeur du bassin chalet alors la valeur du bassin amont est cohérente.

6.3 IMPACTS GÉOMORPHOLOGIQUES

6.3.1 Mise en avant de zones d'accumulation et érosion grâce au LiDAR

L'objectif de cette partie est de mettre en avant l'intérêt du LiDAR dans le cadre de l'étude des castors. En effet, ils modifient le paysage en créant des canaux, barrages, huttes, etc. Ils creusent, reforment des dépôts avec l'extraction de la terre et créent donc des zones d'érosion et des zones d'accumulation. En soustrayant un LiDAR réalisé avant l'apparition du castor à un LiDAR après sa colonisation, il devrait être possible d'observer des évolutions dans la topographie.

Une première carte (Figure 76) a été réalisée avec la différence entre le MNT de 2013 (résolution de 1 m) et le MNT de juin 2025, qui a dû être dégradé pour obtenir une résolution équivalente à celle de 2013.

Un des principaux éléments visibles sur cette carte est l'augmentation du niveau de l'eau dans le chenal du côté du site « Chalet », traduisant le remplissage progressif des bassins (flèches bleues). Au niveau du bassin « Autoroute », c'est l'inverse puisque le barrage était plus étendu et plus haut qu'en 2025. Au niveau du site « Chalet », la création de différentes huttes (entourées en mauve) peut être mise en avant. Il est difficile de distinguer d'autres éléments précisément. La résolution de 1 m ne permet pas de distinguer les canaux en particulier, qui sont souvent moins larges. Les marques rouges remarquées sur la carte avec les différences d'élévation correspondent à de la végétation ou à des tas de végétation qui n'ont pas été traités correctement lors de la création du MNT.

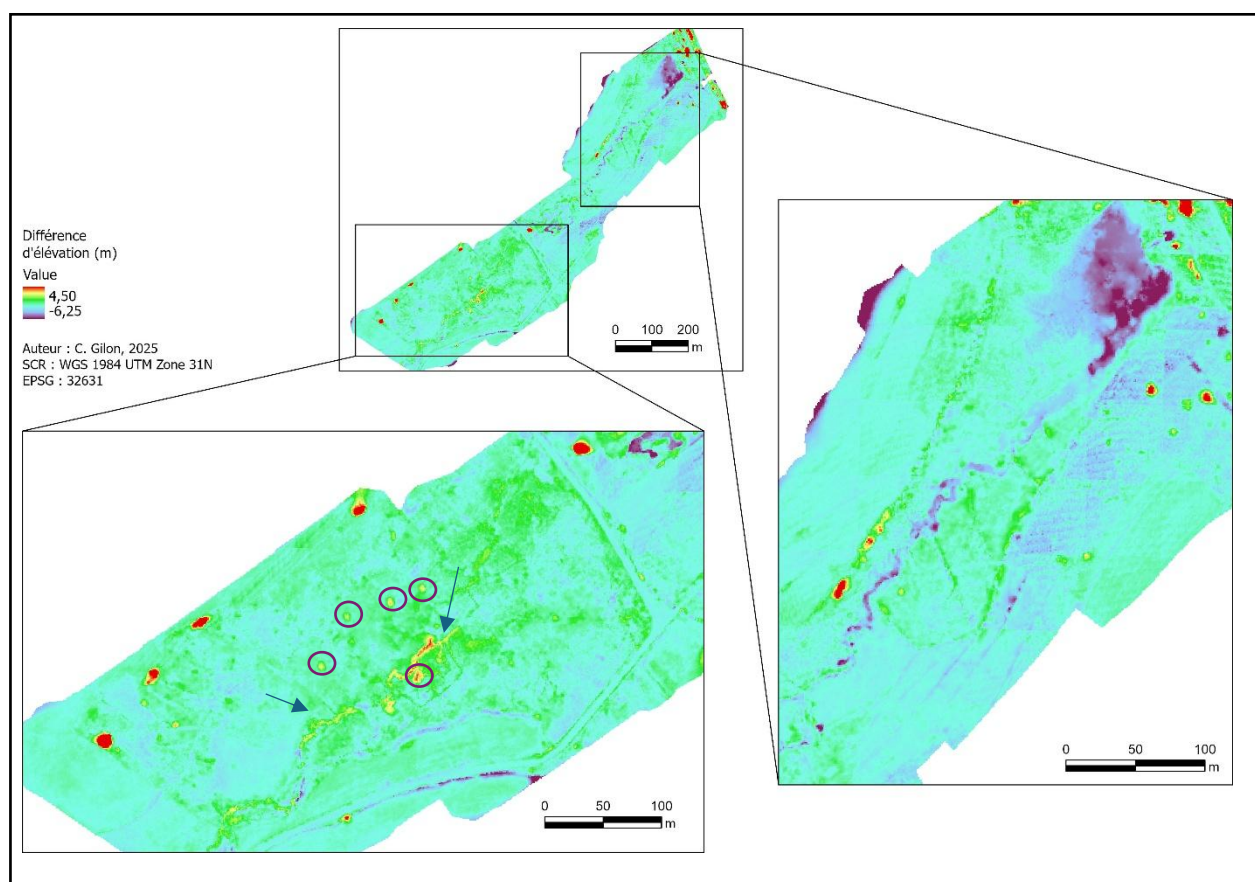


Figure 76. Différence d'élévation entre le MNT de 2013 et celui de juin 2025

Une deuxième carte a été réalisée avec le MNT de mars 2025 et de juin 2025 (Figure 77). Ce sont les deux seules campagnes LiDAR réalisées sur l'entièreté de la zone, ce pourquoi ces deux dates ont été choisies. Malgré une meilleure résolution des données, peu d'éléments ont évolué. Un canal est visible avec une diminution de l'élévation (flèche rouge). Le bassin BC2 (chalet) est également marqué par une diminution de 30 cm environ. Comme vu lors de l'exploitation des données de hauteurs d'eau, la différence maximale de hauteur observée est de 16 cm, ce n'est donc pas réaliste. Le LiDAR ne traverse pas l'eau et donc prend la surface. Cependant, le signal n'est pas toujours bien retourné. L'utilisation du LiDAR pour évaluer la hauteur d'eau n'est pas toujours efficace. Finalement, la hutte principale du site « Chalet » a augmenté de 1,15 m. La végétation a repris et le castor a certainement fait des renforcements de la hutte pendant cette période. En ce qui concerne le site « Autoroute », peu de changements sont visibles mis à part des marques rouges qui correspondent à des tas de végétation.

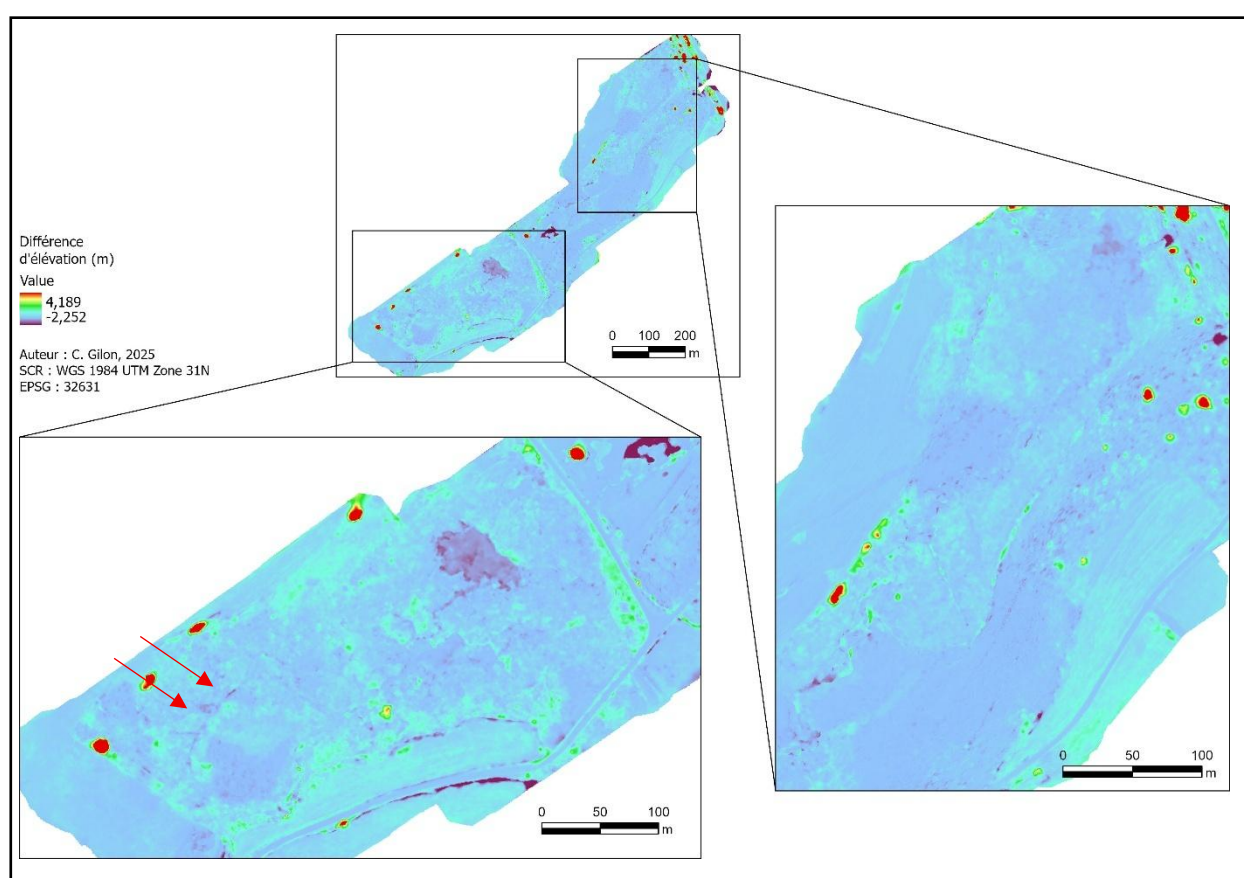


Figure 77. Différence d'élévation entre le MNT de mars 2025 et celui de juin 2025

6.3.2 Matière en suspension

Des mesures de concentration en matière en suspension (MES) ont été réalisées lors des deux épisodes de crue, le 10 octobre 2024 (entre 14h30 et 15h30) et le 10 janvier 2025 (entre 10h30 et 11h30). Ces deux crues ont été calculées, respectivement, avec une récurrence de 1,4 an et de 1,3 an à la station de Trou de Bra sur la Lienne. Il s'agit donc de crues de faible intensité et non-débordante. De plus, les prélèvements ont été réalisés en phase de décrue. En octobre, le prélèvement a été réalisé environ 10 h après le pic de crue (pic le 10/10/2024 à 5h00) à Trou de Bra et en janvier 29 h après (pic le 9/01/2025 à 5h00). En regardant l'hydrogramme ci-dessous, il est possible de constater qu'en octobre, le prélèvement a été réalisé plus tôt mais la décrue a été plus rapide alors qu'en janvier, l'arrivée sur le terrain a été plus tardive mais la décrue moins rapide (sur la station de Trou de Bra du moins, il faut se rappeler que ce n'est pas sur la Chavanne).

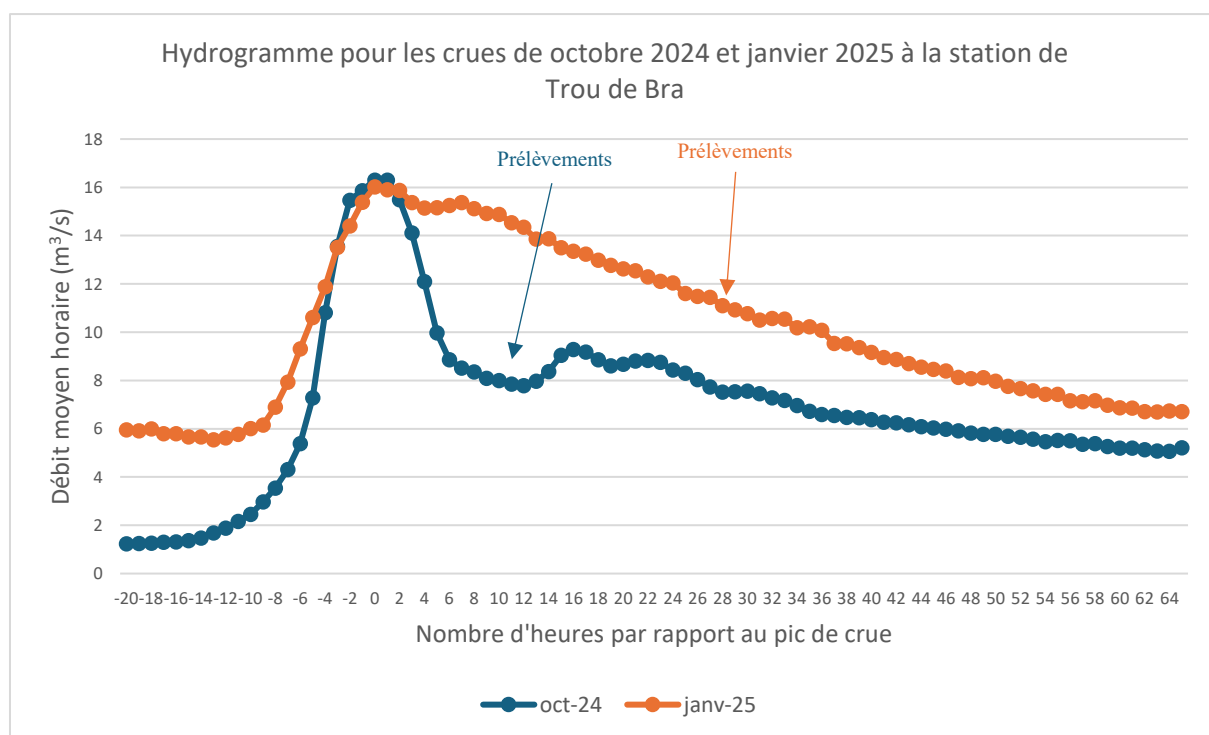


Figure 78. Hydrogramme pour les crues du 10 octobre 2024 (pic de crue le 10/10/2024 à 4h) et 10 janvier 2025 (pic de crue le 9/01/2025 à 5h) à Trou de Bra

Ces concentrations ont été mesurées en amont du système de barrage, à la sortie du système de barrages « Chalet » et à la sortie du barrage « Autoroute ». L'objectif est de déterminer si les sédiments fins sont piégés dans les barrages en période de crue ou si la crue remet en suspension des sédiments déposés dans les bassins. Les résultats sont repris dans la Tableau 17.

Les données pour le 10 octobre 2024 montrent que la concentration en matière en suspension ne varie pas de manière significative entre les différents lieux de prélèvements, variant de 15,77 mg/l en amont à 16,47 mg/l en aval du barrage « Autoroute ». Pour les deux premiers sites, les échantillons présentaient une concentration en matière organique plus importante. Les concentrations sans MO augmentent dans le sens de l'écoulement avec 4,56 mg/l en amont, 6,71 mg/l en aval du barrage « Chalet », et 11,04 mg/l en aval du barrage « Autoroute ».

En revanche, lors de la crue du 10 janvier 2025, il est possible d'observer une diminution de la concentration après le passage du premier site (passage de 32,64 mg/l en amont à 11,47 mg/l) et après celui de deuxième site avec une concentration de 7,81 mg/l. Les valeurs avec ou sans matière organique sont très semblables. Ce sont donc principalement des sédiments fins qui ont été transportés.

Ces données mettent en avant des observations différentes pour deux crues d'une même ampleur. En octobre, les barrages n'ont pas joué un rôle sur la concentration en MES alors qu'en janvier, les barrages ont probablement joué un rôle de rétention avec une concentration de MES bien plus élevée en amont qu'en aval.

<i>Date</i>	10-10-24			10-01-25		
<i>Lieu</i>	Amont barrages	Aval barrage «Chalet»	Aval barrage «Autoroute»	Amont barrages	Aval barrage «Chalet»	Aval barrage «Autoroute»
<i>Concentration MES avec MO [mg/l]</i>	15,77	16,31	16,47	32,64	11,47	7,81
<i>Concentration MES sans MO [mg/l]</i>	4,56	6,71	11,04	30,83	11,14	7,62

Tableau 17. Concentration en matière en suspension lors des crues d'octobre 2024 et janvier 2025

6.3.3 Passega

Le premier graphique de l'image de Passega ci-dessous reprend les données d'échantillons de vases prélevés en surface des dépôts dans deux des bassins de la partie « Chalet » (BC1 et BC2, les deux plus grands). Au total, 15 échantillons ont été analysés. Le D_{50} de ces dépôts, avec matière organique, est de l'ordre de 40 μm et le D_{99} de l'ordre de 360 μm . Sans matière organique, la valeur du D_{50} reste globalement la même mais le D_{99} diminue pour être de l'ordre de 270 μm . La concentration moyenne de matière organique dans les échantillons est de 16,5 % (écart-type de 1,8 %). L'image de Passega permet de déterminer que ces dépôts sont mis en place par décantation (zone T) et au début de la suspension homogène (zone SR). Il est important de rappeler que certains échantillons peuvent avoir été remaniés localement, notamment par le piétinement ou le passage du castor, ce qui peut provoquer le mélange de dépôts de décantation avec des dépôts antérieurs mis en place par suspension homogène.

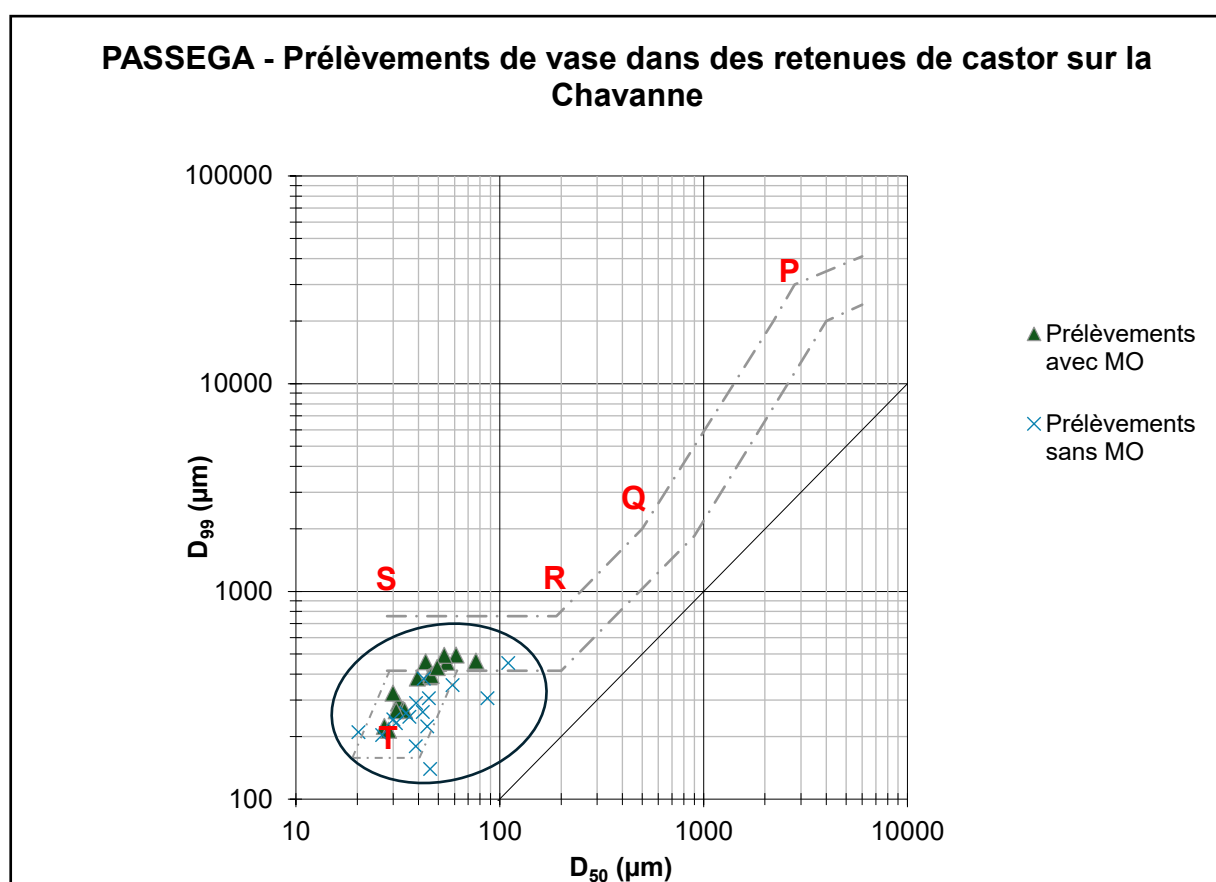


Figure 79. Image Cm de Passega pour des prélèvements de vase dans des bassins de castors de la Chavanne (D_{50} : taille médiane des éléments, D_{99} : taille du plus gros élément, différentes zones : transition entre suspension gradée et roulage (zone PQ), suspension gradée (zone QR), suspension uniforme (zone RS) ou décantation pélagique (zone T))

Deux carottes de vases ont été également prélevées dans le bassin BC1 afin d'observer une potentielle stratification dans les dépôts de vase. Chaque carotte mesurait 50 cm de long et un prélèvement a été réalisé tous les 10 cm. Au total, 10 échantillons ont été passés au granulomètre laser. Le graphique 80 reprend les résultats. Les conclusions sont similaires à celles des prélèvements de vase avec une mise en place par suspension homogène sur toute l'épaisseur de vase. Les D_{99} sont comparables à toutes les profondeurs, ce qui suggère l'absence de stratification granulométrique marquée au sein du dépôt.

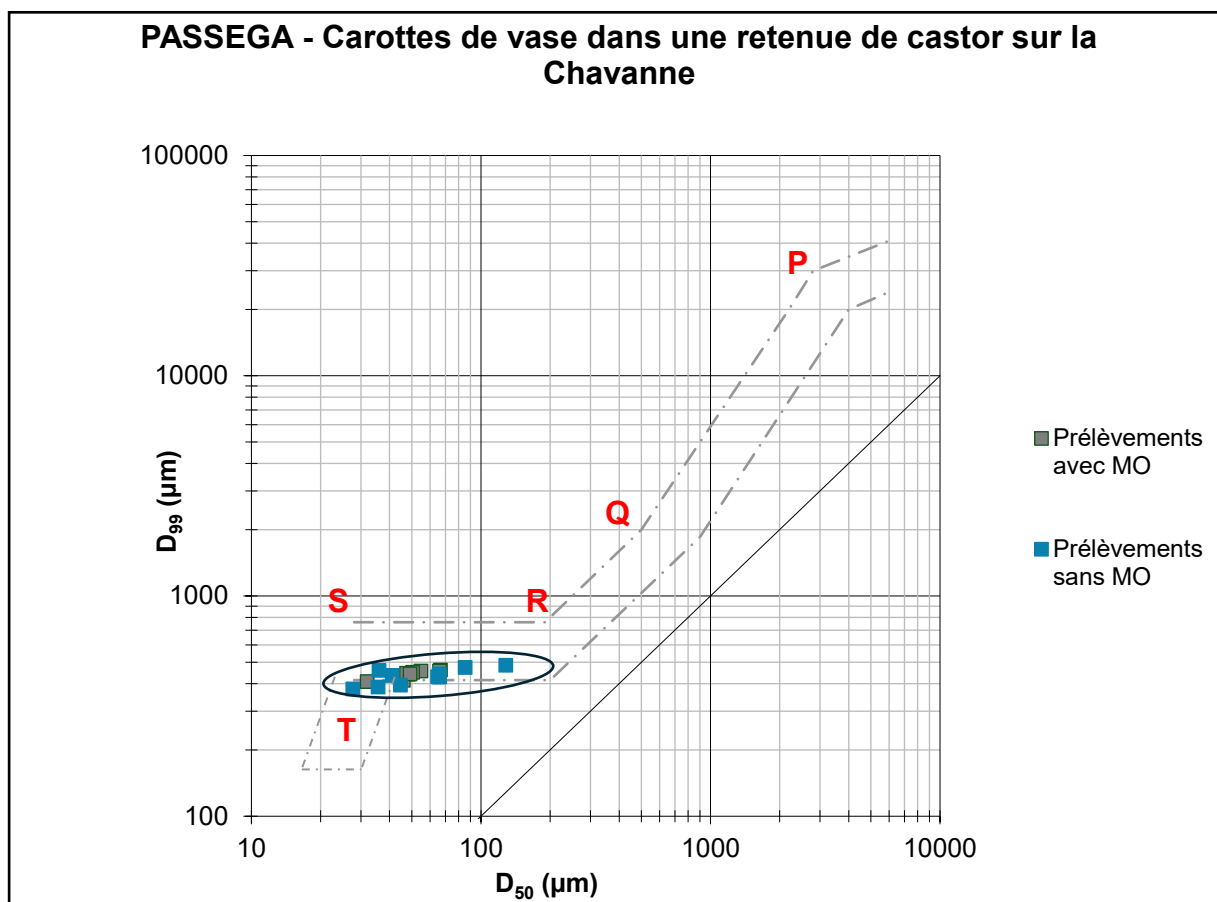


Figure 80. Image Cm de Passega pour deux carottes de vase dans des bassins de castors de la Chavanne (D_{50} : taille médiane des éléments, D_{99} : taille du plus gros élément, différentes zones : transition entre suspension gradée et roulage (zone PQ), suspension gradée (zone QR), suspension uniforme (zone RS) ou décantation pélagique (zone T))

7 DISCUSSIONS

7.1 DISCUSSION DES RÉSULTATS ET CRITIQUES

7.1.1 Cartographie des sites d'étude

Les différentes campagnes par drone réalisées en septembre et novembre 2024 et en mars et juin 2025 ont permis de cartographier les deux sites d'étude de manière précise afin d'évaluer les évolutions visibles sur ces sites au cours du temps. Les éléments cartographiés sont les suivants : les barrages, les huttes, les canaux, les réserves de nourriture ainsi que les zones humides (uniquement identifiables au mois de mars 2025).

Au total, 14 barrages ont été recensés sur la zone survolée par drone. En septembre 2024, seulement 12 ont été repérés. Toutefois, le barrage BV2 a été identifié en novembre 2024 et le barrage BA0 en juin 2025. Il est difficile de dire si ces barrages ont été construits plus tard ou si leur identification n'était pas possible à cause de la visibilité (végétation, mauvaise reconstruction de l'image, zone d'ombre). Les hauteurs de barrage présentent de nombreuses variations au cours du temps. Ces changements ne traduisent pas systématiquement un changement physique dans la hauteur. En effet, les données de hauteurs sont extraites depuis le MNT construit par le LiDAR ou parfois par le MNS construit par photogrammétrie à partir des images RGB (pour certaines campagnes, le LiDAR n'a pas collecté des données sur l'ensemble de la zone mais uniquement sur les sites principaux). Le LiDAR détecte difficilement les surfaces d'eau, ce qui peut dégrader la qualité de l'information. La végétation peut rendre difficile la construction du MNS par photogrammétrie. De plus, comme le LiDAR ne détecte pas l'élévation du fond du lit mais celle du niveau de la surface de l'eau, les hauteurs mesurées sont relatives et dépendantes du niveau d'eau.

Les retenues ou bassins ont été cartographiés mais uniquement pour les barrages principaux. En effet, il est difficile, pour des petits barrages sans bassin distinct, de faire la différence entre la rivière et la retenue. La superficie de ces bassins a été calculée et varie au cours de l'année. Les évolutions les plus notables sont l'extension du bassin du pertuis de l'autoroute qui a augmenté à la suite d'un rehaussement du barrage et les variations dans le bassin BA5. La destruction de ce barrage par la commune puis la construction d'une cage autour du pertuis ont modifié le niveau d'eau et donc l'extension de la retenue. Cependant, cette cage s'obstrue à cause de branchages. Le niveau d'eau remonte alors comme c'était le cas en juin 2025.

Les huttes sont visibles sur les orthomosaïques comme des petits tas de branches mais surtout sur le MNT où une variation de l'altitude est visible. Les huttes sont restées stables au cours du temps. La hutte principale est reconnaissable par la présence de la réserve de nourriture à son entrée. Il se pourrait cependant que les huttes secondaires soient des huttes de rats musqués (Olivier Kints [communication personnelle], 2025). Cependant, il est impossible de le confirmer uniquement à l'aide des images drone.

Le nombre de canaux cartographiés varie d'une campagne à l'autre, passant de 118 en septembre 2024, à 223 en novembre 2024 pour arriver à 200 en juin 2025. Ces nombres n'indiquent pas spécialement l'apparition de nouveaux canaux ou le remblayage d'autres mais une différence dans la détectabilité de ceux-ci selon la couverture végétale. Le réseau de canaux peut être estimé à environ 5 km de linéaire au total. Généralement, les canaux partent

perpendiculairement des retenues ou de la rivière pour aller jusqu'à des zones de végétation de feuillus. Il est important de noter qu'avant l'apparition du castor sur ce secteur, certaines zones étaient recouvertes de conifères. Ces zones sont marquées par la présence de canaux de drainage, qui sont toujours présents aujourd'hui et certainement utilisés par le castor.

En mars 2025, des zones humides ont pu être mises en évidence. Elles apparaissent plus froides que les alentours et montrent un sol marécageux.

De manière générale, peu d'évolutions ont été mises en évidence à l'aide de ces résultats. Le castor étant établi dans la zone depuis une dizaine d'années, son territoire est déjà vaste et construit à sa guise. Bien qu'il s'agisse d'une réserve naturelle, l'Homme a tout de même un impact sur ces zones. Ces impacts sont visibles sur les images comme des mises à blanc de forêts de conifères et les traces de passage des machines.

Au-delà de la cartographie précise des sites, le drone est utile pour appréhender la zone avant de l'explorer sur le terrain. Il permet d'identifier les zones d'intérêt et d'anticiper les difficultés d'accès.

Les classifications automatiques permettent d'illustrer l'évolution de l'occupation du sol. Cela met en évidence la création de zone de végétation humide autour des sites et la diminution des forêts de conifères qui sont mises à blanc au fil du temps. Une augmentation des feuillus est visible. Les bassins se sont progressivement développés depuis 2013, augmentant la surface d'eau libre. Des variations de ces surfaces sont visibles au fil du temps. Cela peut être mis en relation avec les ruptures du barrage au niveau « Autoroute ». Par exemple, il est bien développé en 2013 alors qu'en 2016, l'extension de celui-ci est très faible. Entre temps, deux ruptures de barrages ont été recensées : le 14 janvier 2015 et le 6 juin 2016. C'est également le cas entre 2019 et 2022 où le barrage a cédé lors des inondations de juillet 2021. Enfin, les changements observés dépassent la zone d'aléa d'inondation, montrant que le castor modifie le paysage au-delà de la plaine alluviale.

Plusieurs limites ont été rencontrées lors de la réalisation de ces classifications automatiques. La précision globale des classifications, bien qu'en moyenne de 79 %, varie fortement selon les années, avec des résultats moins bons pour celles réalisées sur base des données drone, ce qui peut sembler contre-intuitif. La haute résolution des images entraîne une grande hétérogénéité dans les classes, ce qui complique la tâche de l'algorithme. De plus, la segmentation peut être efficace pour améliorer la qualité de la représentation mais ce n'est pas systématiquement le cas, comme l'illustrent les résultats obtenus pour les deux images issues du drone. Le but de la démarche est d'évaluer d'une manière reproductible l'évolution de l'occupation du sol et sur une série temporelle étendue. Cependant, elle reste sensible à différents éléments : période de collecte des images, les zones d'ombrage, les conditions de luminosité, la disponibilité d'éléments d'échantillonnage pour chaque classe, en particulier, pour les petites classes comme l'eau ou les zones humides. Tous ces éléments entrent en compte et peuvent parfois être responsables de la mauvaise attribution d'une classe à un pixel. Certaines classes sont souvent confondues comme l'eau et les ombres, les cultures et les sols nus (à la suite notamment d'une coupe forestière) ou encore les bois morts et les zones urbanisées. Une reclassification manuelle pour améliorer la qualité a été envisagée mais est chronophage et n'ajoute pas de réelle plus-value par rapport à l'objectif attendu. Ces analyses ont tout de même permis de mettre en évidence la modification du paysage qu'induit le castor.

7.1.2 Hydrologie

Les analyses et comparaisons hydrologiques réalisées sur la Lienne, avant et après l'apparition du castor ne permettent pas de tirer de conclusion quant à l'impact du castor sur l'écoulement, que ce soit de manière générale, en période de crue ou en étiage. Pour l'écoulement global, la comparaison des débits caractéristiques ne met pas en avant de différences claires entre la période avant et après le castor. Il semble donc que le castor n'aurait pas d'influence sur le volume total écoulé dans le bassin. Néanmoins, la stabilité des débits caractéristiques entre les deux périodes permet de confirmer que les périodes choisies sont similaires en temps normal et qu'il n'y pas d'extrêmes biaisant les données. En ce qui concerne les crues, l'impact varie également selon le site : à Chevron (6804), elles deviennent légèrement plus longues et intenses alors qu'à Lorcé (L6240), elles semblent moins marquées et plus faibles après l'arrivée du castor. Les deux stations sont très proches, que ce soient en termes de distance mais aussi de caractéristiques. Pourtant, les analyses donnent des informations contradictoires. De plus, ces observations montrent des changements légers, il est difficile d'en tirer des conclusions claires. L'étude des périodes de tarissement met en avant un léger ralentissement de la vidange au niveau de la station de Chevron depuis l'arrivée du castor alors que la tendance inverse est observée à Lorcé. Le DCE calculé avant et après le castor ne montre aucune évolution. Les valeurs calculées pour la période après le castor à Trou de Bra ne montrent pas de grande variation par rapport aux deux autres stations.

Cette méthodologie présente des limites. Tout d'abord, les stations de mesure se trouvent en fin de bassin versant. Or, les castors, et les sites étudiés en particulier, se trouvent bien plus en amont et sur des affluents de la Lienne. Des stations sur des plus petits cours d'eau en tête de bassin pourraient mettre en évidence un effet du castor plus marqué sur le débit mais ces endroits sont moins souvent dotés d'une station. Ensuite, les périodes ne sont composées que de cinq années, ce qui limite la plage d'analyse. Cependant, prendre plus d'années risquerait d'inclure des années avec des anomalies. De plus, les bruits de fond qui pourraient impacter l'écoulement ne sont pas pris en compte dans cette analyse comme le changement d'occupation du sol, des prélèvements et rejets d'eau dans les rivières ou encore le changement climatique. L'application de la loi de Gumbel aux données peut être biaisée par le faible nombre de crues. Étant une loi de probabilité, plus elle a de données, plus elle sera précise. Pour chacune des stations, il y a une crue plus extrême que les autres qui est estimée avec une récurrence élevée, certainement surestimée. Au-delà des observations et limites présentées, ces analyses montrent la difficulté de la quantification d'un impact sur une rivière.

L'étude sur le Chevril de Nyssen *et al.* (2011) présente une méthodologie similaire à celle développée dans notre étude. Ils ont observé une réduction et un retardement du pic de crue depuis l'installation des castors sur le cours d'eau. De plus, ils ont mis en évidence que les crues maximales présentent une période de retour plus longue, surtout pour les crues extrêmes. Il est difficile dans le cas de ce mémoire de comparer les crues les plus extrêmes, car elles n'ont pas été prises en compte dans le jeu de données lors de la sélection des années. Seules 4 années après l'installation du castor ont été prises en compte dans l'étude de Nyssen *et al.* (2011), sans tenir compte de la météorologie dans la période d'étude. De plus, à l'inverse de Nyssen *et al.* (2011), Neumayer *et al.* (2020) ont mis en avant que pour les crues supérieures à deux ans de récurrence, le castor n'avait aucun effet.

En ce qui concerne les étiages, Nyssen *et al.* (2011) ont observé une augmentation du DCE depuis l'arrivée du castor sur un site du Chevril. Néanmoins, Gischer *et al.* (2012) avaient

déjà essayé de mettre en avant un effet des castors sur les périodes de tarissement au niveau de la Lienne, en particulier en étudiant le DCE. Les résultats n'ont pas permis de mettre en avant une influence du castor sur les étiages, ce qui est cohérent avec les résultats de ce travail.

À une échelle de temps plus réduite, les campagnes de jaugeages réalisées le 18 octobre 2024 et le 9 avril 2025, permettent d'avoir un bilan hydrologique à deux périodes hydrologiques différentes. Cependant, ces valeurs de débits ne sont pas vraiment cohérentes entre elles. Au niveau du site « Chalet », le débit entrant est inférieur au débit sortant en octobre. En avril, les débits peuvent être considérés comme équivalents. À l'inverse, au niveau du barrage « Autoroute », le débit entrant dans le barrage est supérieur au débit sortant, et ce en octobre et en avril. Cela représenterait un excès de 125 l/s en octobre et 30 l/s en avril, soit respectivement environ 11 000 m³/jour et 2 600 m³/jour qui devraient être stockés dans la zone. Ces valeurs aberrantes ne sont pas réalistes, sachant que le volume de la retenue a été calculé à 623 m³.

Une étude similaire a été réalisée en continu pendant 7 jours au niveau du Cheval. Le résultat montre que le débit entrant dans le barrage est inférieur au débit sortant, mis à part en cas de précipitations où le barrage stocke de l'eau (Nyssen *et al.*, 2021).

Les valeurs aberrantes obtenues sont certainement le résultat d'erreurs de mesure. En effet, le jaugeage chimique repose sur une seule mesure à un instant *t*. Il nécessite également des conditions particulières : un régime permanent qui permet de brasser le nuage de sel et essayer d'éviter les zones de remous. Il faut que toute la quantité de sel passe dans la section où la sonde est placée. Des erreurs peuvent être aussi liées à la non-homogénéité de la solution. Parfois, le sel n'est pas toujours bien dissout et un dépôt se crée dans le fond du seau à lancer (Dumas, 1952). Il faut bien remélanger ce dépôt avec l'eau et le relancer au plus vite pour avoir la bonne quantité de sel dans le cours d'eau. Finalement, il est difficile d'estimer la quantité de sel à injecter dans le cours d'eau pour avoir la mesure la plus précise (André, 1960 ; Van Campenhout, 2023 [communication personnelle]). Ces quantités sont choisies en fonction du débit qui passe (et qui doit être mesuré). Il faut donc d'abord faire une estimation préalable pour choisir la quantité. Parfois, la sonde ne capte rien et il faut recommencer. Par exemple, le jaugeage n'a pas bien fonctionné au point L en avril. Cela n'a pas été remarqué sur le terrain donc le jaugeage n'a pas pu être refait. Les données réalisées au moulinet et à la sonde électromagnétique montrent certaines différences par rapport au jaugeage chimique. Pour un même tronçon, les débits sont différents selon les méthodes. Le jaugeage instantané est certainement moins précis car il repose sur une seule mesure contrairement aux autres techniques qui reposent sur des mesures le long d'une section perpendiculaire au cours d'eau.

La réalisation de la courbe de tarage permet de déduire le débit à la station LHGF à partir de la hauteur d'eau qui y est mesurée. La relation entre les deux variables présente un excellent ajustement mais des incertitudes subsistent toujours au niveau des débits extrêmes, que ce soient des débits faibles ou de crues. Pour améliorer cela, il faut continuer la récolte de mesures dans le temps pour compléter la plage jaugée de hauteurs. Les erreurs de mesures lors du jaugeage peuvent également introduire des incertitudes dans cette conversion. L'hydrogramme réalisé à la station met en avant l'importance d'avoir une station sur la Chavanne car il ne représente que 3 % du débit de la Lienne à Trou de Bra.

Les mesures de hauteurs effectuées dans la Chavanne et dans deux bassins situés sur le site « Chalet » mettent en évidence des dynamiques de variations du niveau très contrastées alors même que ces bassins sont géographiquement proches et disposés de manière successive.

Le bassin amont présente un niveau très stable au cours du temps et réagit peu aux précipitations. À l'inverse, le second bassin, à l'aval, présente des réactions plus marquées avec des pics de hauteurs clairement visibles. Ces différences pourraient s'expliquer par le type de barrage présent et leur étanchéité. Le barrage amont (BC1) serait un barrage de type *Overflow*, avec l'eau qui passe par au-dessus du barrage, qui est étanche. En cas de précipitations ou d'onde de crue, l'eau s'écoule par au-dessus, sans être stockée. La grande longueur du barrage répartit le volume d'eau qui arrive sur une vaste surface, limitant la montée de l'eau. Au contraire, le barrage chalet (BC2), en aval, laisserait passer partiellement l'eau à travers sa structure et serait donc moins étanche. Le bassin aurait une capacité de stockage plus variable jusqu'à atteindre un seuil. Ce seuil est représenté par la hauteur maximum du barrage, lorsque l'eau commence à s'écouler par au-dessus du barrage. Le niveau dans le bassin n'augmente donc plus. Cela rejoint les observations de Woo & Waddington (1990) et Ronnquist & Westbrook (2021) qui ont mis en avant des changements de types d'écoulement dans les barrages selon le débit.

Lorsque le niveau d'eau augmente au niveau de la station, les réactions au niveau du bassin du chalet peuvent varier. Le pic au chalet peut être synchrone à celui de la station. Cela signifie que le niveau augmente par réaction aux précipitations tandis qu'il peut y avoir un temps de réaction pour observer le pic au niveau du bassin du chalet. Le bassin servirait alors de stockage et permettrait l'écrêtement du pic de débit. La capacité de stockage lors d'un pic dépend des conditions de hauteur d'eau avant l'arrivée du flux, comme cela a déjà été observé par d'autres auteurs (Woo & Waddington, 1990 ; Ronnquist & Westbrook, 2021). Cela signifie que si les précipitations tombent sur la station et le bassin en même temps, cela réduit le stockage et l'écrêtement.

De plus, pendant la période de décroissance du niveau d'eau à la station LHGF, les hauteurs d'eau sont restées stables pendant quelques semaines, voire ont augmenté. Cela pourrait être dû à l'activité du castor qui pourrait renforcer son barrage et l'entretenir pour maintenir le niveau d'eau. De plus, cette période correspond avec la reprise d'une activité plus intense du castor après l'hiver. De manière générale, même en période de tarissement dans le cours d'eau, il y a toujours un niveau d'eau maintenu dans les retenues. Néanmoins, la structure du barrage peut avoir un impact sur la capacité de rétention des bassins (Woo & Waddington, 1990). Par exemple, le bassin chalet, où l'eau passe à travers la structure, pourrait voir son niveau baisser davantage en cas de plus longues périodes de sécheresse.

Finalement, il est intéressant de mettre en évidence que la hutte principale du castor se trouve sur le bassin amont, avec le niveau le plus stable. Cela interroge sur un possible choix stratégique du castor : fait-il en sorte de garder cette stabilité dans le bassin en l'entretenant plus afin d'éviter des inondations ou des dommages dans sa hutte ? La question se pose aussi pour les périodes de sécheresse : essaie-t-il de maintenir un niveau constant pour éviter que l'entrée de sa hutte ne soit plus sous eau ?

L'idéal aurait été d'avoir une période de mesures plus longue incluant des débits extrêmes comme des crues importantes ou des périodes de sécheresse plus longues. Les capteurs ont donc été remplacés pour continuer le suivi.

La comparaison entre le LiDAR avant (2013-2014) et après l'apparition du castor (juin 2025) a permis d'estimer les profondeurs des bassins situés dans le site « Chalet » ainsi que les volumes d'eau qui y sont stockés. Sur ce site, les trois bassins principaux ont un volume

atteignant presque 2000 m³ à eux trois (BC1, BC2 et BC3). La profondeur maximale estimée est de 1,74 m dans le barrage BC1. Les zones les plus profondes sont situées dans l'ancien chenal. Étant donné qu'il est possible de connaître la différence de hauteurs entre le niveau le plus bas et le plus haut des bassins BC1 et BC2 grâce aux *Divers*, le stockage potentiellement disponible dans ces retenues a été calculé. Le bassin BC2, qui montre le plus de variations de niveau d'eau, peut stocker jusqu'à 389 m³ entre son niveau le plus bas et son niveau maximum alors que le bassin BC1, uniquement 100 m³.

Sur le site « Autoroute », la zone était déjà vastement inondée en 2013. L'analyse a été faite autrement, à l'aide de profils topographiques réalisés en 2016 lorsque le barrage était à sec à la suite de sa rupture. Ces profils, comparés à la topographie de juin 2025, ont permis de calculer une profondeur moyenne dans la retenue et d'estimer le volume de la retenue principale à 623 m³. Ces analyses permettent d'estimer le volume d'eau qui pourrait potentiellement s'échapper si un barrage cédait.

La méthode utilisée, bien qu'efficace pour estimer les volumes d'eau, présente des limites et inconvénients. Tout d'abord, la résolution est imposée par l'image de 2013, de 1 m, ce qui réduit la qualité et précision des résultats. Des anomalies ont été remarquées notamment avec des profondeurs négatives. Ensuite, des imprécisions sont aussi liées au fait que le castor creuse dans le bassin, notamment le long du barrage, pour l'entretenir comme cela est visible sur la Figure 81 (cercle noir). Cette sous-estimation est peut être compensée par la sédimentation à certains endroits du barrage ou le gonflement du sol lié à la saturation en eau. De plus, il n'y a pas de validation des résultats. L'idéal aurait été d'utiliser un échosondeur pour réaliser une bathymétrie. Cependant, la vase, présente en épaisse couche, n'aurait pas permis une estimation correcte de la profondeur et de la quantité d'eau. La seule comparaison possible est avec les niveaux d'eau aux *Divers*. Au niveau du bassin BC1, la hauteur moyenne estimée est de 0,33 m contre 0,35 m mesurée par le capteur, ce qui est relativement proche. Par contre, au bassin BC2, la valeur estimée est de 0,25 m contre 0,47 m mesuré par le capteur. Il y a donc une sous-estimation à ce point-ci du niveau d'eau, ce qui affecte la valeur du volume estimé dans la Figure 65.

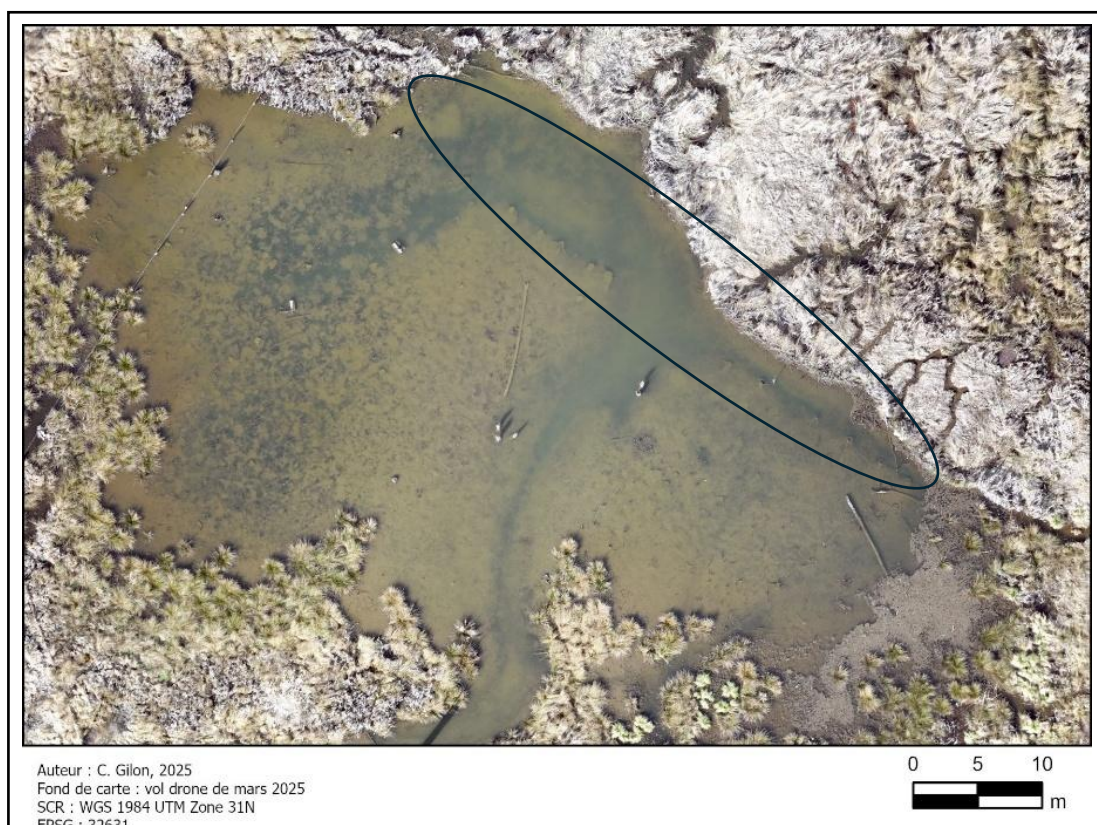


Figure 81. Exemple de creusement le long du barrage BC2

Le vol de drone du 10 janvier 2025 a permis de voir l'inondation dans la plaine du barrage « Autoroute » et de constater qu'il n'y avait pas d'inondation du côté « Chalet ». Aucun barrage n'a été endommagé pour cette crue calculée avec une récurrence de 1,4 an à la station de Trou de Bra.

Néanmoins, dans son passé, le barrage principal du site « Autoroute » a rompu à plusieurs reprises, comme expliqué dans le contexte de celui-ci :

- 12 décembre 2011 (pas de pic de crue à Trou de Bra ou récurrence inférieure à 0,2) ;
- 21 février 2012 (pic de crue à Trou de Bra le 19 février, 0,25 an récurrence avec pic à 8 m³/s) ;
- 14 janvier 2015 (pic de crue à Trou de Bra le 10 janvier, 0,4 an de récurrence, pic à 11 m³/s) ;
- 6 juin 2016 (pic de crue à Trou de Bra le 7 juin) ;
- 14 ou 15 juillet 2021 (crue centennale, pic enregistré à 42 m³/s).

Il est possible de constater que des ruptures se sont produites à plusieurs reprises, pour des récurrences inférieures à celle de janvier 2025. Cela peut être dû à plusieurs facteurs, notamment la position du barrage dans le pertuis de l'autoroute, qui a bougé à plusieurs reprises (Annexe 2). En effet, en 2011, il était proche de sa position actuelle mais dans le béton, quelques mètres avant l'entrée du pertuis, ce qui le rendait plus fragile. En 2012 et 2015, il était toujours à cet emplacement. Les ruptures n'étaient que partielles, le barrage était donc reconstruit au même endroit. Cependant, en 2016, le barrage a été totalement détruit. Il a ensuite été reconstruit à l'entrée du pertuis, presque à l'intérieur. Après 2021, il a été reconstruit plus en amont après avoir été laissé à l'abandon pendant quelques temps, avec une accroche du bas du barrage dans le sol, afin de prendre la forme qu'il a aujourd'hui.

Des précautions sont à prendre par rapport au calcul des récurrences des crues car elles se basent sur le débit de la Lienne. Or, comme cela a déjà été remarqué à plusieurs reprises, la Chavanne a un plus petit bassin et est plus réactif aux précipitations. Le cours d'eau peut réagir plus rapidement et plus fort. Certaines crues ne sont d'ailleurs même pas visibles sur la Lienne car les orages peuvent être très localisés (IRM, 2018). Par exemple, la rupture du barrage du 6 juin 2016 a été provoquée par un orage localisé sur les communes d'Erezée et de Manhay, générant une crue torrentielle dans la Chavanne (jusqu'à 45 l/m² tombés à Vaux-Chavanne (TV Lux, 2016)). Ces constats renforcent la nécessité de suivre les conditions hydrologiques dans la Chavanne.

Finalement, l'étude des températures a mis en évidence une hausse progressive des températures en lien avec l'augmentation des températures de l'air. Au fil du temps, des écarts se sont creusés entre les différents points de température. La température augmente d'amont en aval, au passage successif des bassins. Ce réchauffement est lié au temps de résidence de l'eau, sa stagnation et son exposition au soleil. Le vol thermique du 28 mars 2025 a confirmé ces observations au niveau du site « Chalet » : la différence de température entre le premier et le dernier bassin est de 2°C. De plus, il existe des variations internes des températures au sein des bassins ainsi qu'une stratification verticale. Le brassage de l'eau pourrait jouer un rôle dans le mélange des températures de certains barrages, comme au niveau de BA5 où la température est plus froide qu'en amont. Il serait intéressant de mettre ces variations au sein des bassins en lien avec l'écoulement. Les zones les plus froides sont-elles celles localisées au niveau d'écoulement plus rapide ?

Ces résultats rejoignent des observations déjà faites dans la littérature à l'aide de capteurs de température. Les castors créent une grande diversité de températures au sein de la zone et induisent des conditions d'habitats différentes (vitesse, profondeur, température) qui sont favorables à la biodiversité (Majerova *et al.*, 2015 ; Majeravo *et al.*, 2020).

Pour conclure la partie température, la comparaison des données des capteurs et celles du vol thermique est cohérente pour le bassin amont (BC1) mais présente une surestimation de la température du vol au bassin du chalet. Cette différence peut être liée à la profondeur d'installation du capteur et de l'effet de la stratification thermique verticale ou d'une mauvaise calibration des températures de surface obtenues par la caméra thermique embarquée sur drone.

Dans le cadre de ce mémoire, un essai de suivi des zones d'écoulement a été réalisé. Cette technique visait à identifier les zones de courants dans une des retenues et les zones stagnantes afin de mieux comprendre l'hydrodynamique du barrage. L'idée était aussi de voir comment le passage de l'eau se déroulait à travers le barrage pour mieux le caractériser. La méthode consiste à déposer des copeaux de quelques centimètres à l'entrée de la retenue et de suivre l'avancement des copeaux à l'aide du drone avec des captures vidéos ou des photos à intervalles réguliers. Le test a été réalisé sur le barrage BC2 en avril. Malheureusement, les résultats n'ont pas été concluants. Les copeaux ont été emportés par le vent ou ont coulé, probablement à cause de l'extrême lenteur du courant (Figure 82). L'idéal serait de recommencer dans des conditions hydrologiques plus actives. L'automatisation du largage des copeaux pourrait être envisagée à l'aide du drone et d'une structure adaptée pour faciliter la mise en place des copeaux et améliorer la sécurité.

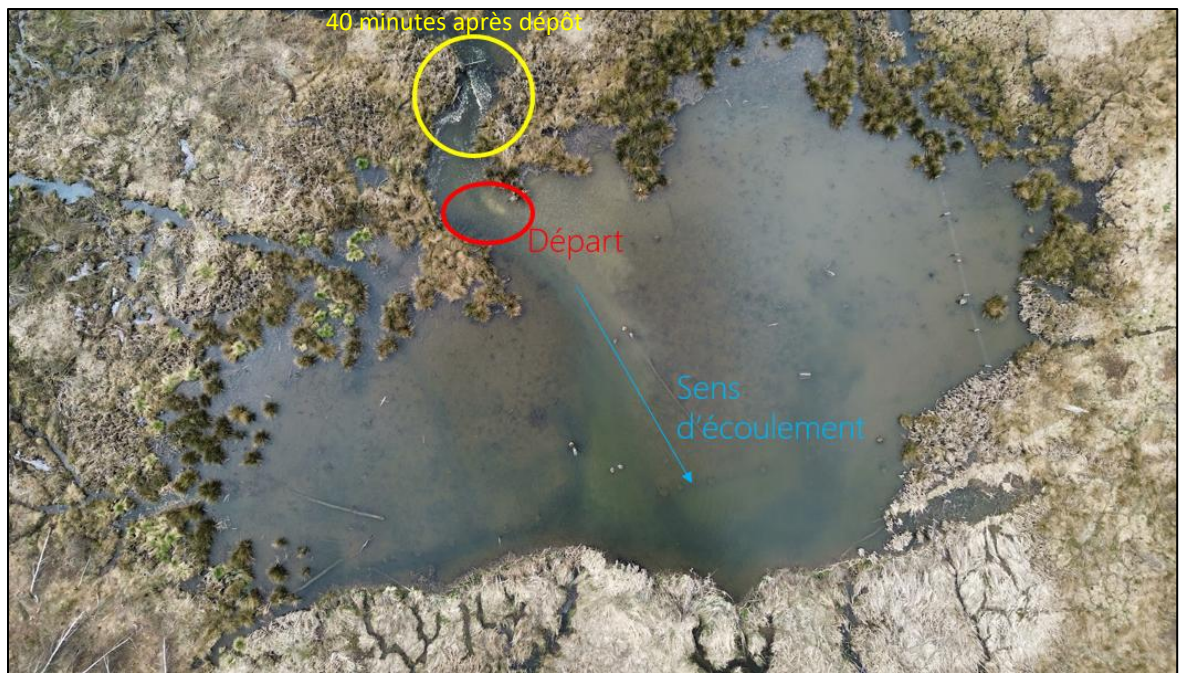


Figure 82. Essai du suivi des copeaux de bois dans le bassin BC2

7.1.3 Géomorphologie

L'analyse réalisée grâce aux données LiDAR montre certaines modifications topographiques liées à l'activité du castor dans la zone, notamment l'élévation du niveau de l'eau à certains endroits, des traces de creusement de canaux, une élévation de la hutte principale, que ce soit pour la comparaison entre 2013 et 2025 ou pour celle entre mars et juin 2025.

Toutefois, la résolution de 2013 limite la détection de changements de structures fines comme les canaux. La période entre mars et juin 2025 n'est, elle, pas assez longue pour montrer de changements majeurs. Cette partie était avant tout exploratoire afin de confirmer le potentiel de la technique dans le suivi des changements topographiques des zones impactées par le castor. L'acquisition de données LiDAR à haute résolution dès le début de la colonisation d'un site de castor permettrait de suivre les évolutions les plus importantes. Un suivi régulier au début de l'installation sur le site pourrait également mettre en avant des changements. Comme cela a été remarqué sur les sites étudiés, un barrage établi depuis longtemps ne présente pas beaucoup de changements structurels. Par après, un suivi annuel pourrait être suffisant.

Des mesures de concentration en matière en suspension ont été réalisées lors de deux crues de récurrence comparable à Trou de Bra le 10 octobre 2024 et le 10 janvier 2025. Des prélèvements en amont, en aval du site « Chalet » et en aval du site « Autoroute » ont été réalisés. Les résultats montrent des dynamiques contrastées : lors de la crue d'octobre, les concentrations sont relativement similaires entre les sites sans changement entre amont et aval, alors qu'en janvier, les valeurs de MES montrent une diminution des concentrations au fur et à mesure du passage des barrages. Ces résultats de janvier suggèrent que les barrages ont un rôle sur le piégeage des sédiments.

Cette différence pourrait s'expliquer par le moment du prélèvement. En octobre, la mesure a été prise 10 h après le pic de crue et lors d'une décrue rapide. En janvier, la mesure a été réalisée 29 h après le pic mais lors d'une décrue plus lente. Il est important de rappeler que cette analyse est faite par rapport à la station de Trou de Bra, le pic pourrait s'être produit à un autre moment sur la Chavanne. Il est également difficile de se rendre sur le terrain au bon moment sans savoir exactement quand est le pic de crue, d'autant plus lorsque la rivière n'est pas dotée d'une station avec des mesures en direct. En plus du ralentissement de l'écoulement, l'état de remplissage et la structure du bassin pourrait aussi avoir un impact sur le rôle de filtration des barrages. Un suivi continu des concentrations de MES ainsi qu'une meilleure évaluation du pic de crue sur la Chavanne permettrait de mieux comprendre la dynamique du transport des sédiments en suspension.

Les analyses granulométriques des dépôts de vase dans les bassins de castors BC1 et BC2 indiquent des dépôts principalement mis en place par décantation (zone T) et quelques dépôts par suspension homogène (SR) mettant en avant des milieux de faibles énergies et des dépôts facilement remobilisables. Les analyses similaires réalisées sur deux carottes prélevées dans BC1 confirment ces résultats et ne montrent aucune stratification mais une structure homogène sur toute l'épaisseur de la carotte. Les conditions de dépôts semblent avoir été stables dans le temps.

Ces résultats sont similaires à des observations déjà réalisées par Houbrechts *et al.* (2013) pour la Chavanne et la Lienne (Figure 83) où les sédiments présentent un D_{50} compris entre 20 et 40 μm et un D_{99} inférieur à 500 μm pour des éléments non-attaqués à l'acide (Houbrechts *et al.*, 2013 ; Vaessen *et al.*, 2020). Les points des échantillons analysés dans ce

mémoire (non-attaqués) ont été ajoutés au graphique (carré vert). Le D_{50} a tendance à être légèrement plus élevé dans ces échantillons.

L'intérêt principal de caractériser la granularité des dépôts actuels est aussi de pouvoir, à terme, détecter dans des plaines alluviales anciennes des dépôts mis en place dans un contexte sédimentaire similaire et donc confirmer la présence de barrages de castors dans le passé avec des dépôts de sédiments fins piégés.

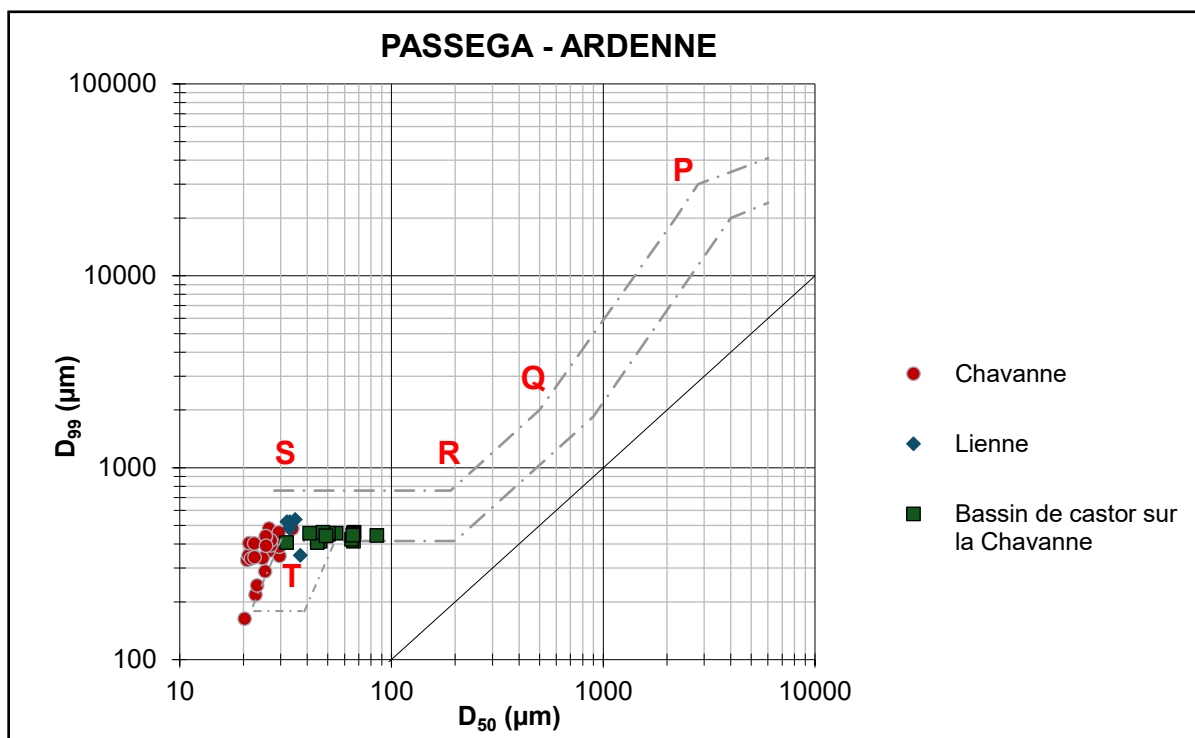


Figure 83. Granularité des dépôts dans des barrages de castor représentés sur une Image CM de Passega (D_{50} : taille médiane des éléments, D_{99} : taille du plus gros élément, différentes zones : transition entre suspension gradée et roulage (zone PQ), suspension gradée (zone QR), suspension uniforme (zone RS) ou décantation pélagique (zone T)) (adapté de Vaessen et al. (2020) d'après Houbrechts et al. (2013))

8 PERSPECTIVES DE RECHERCHE

Durant ce travail, de nombreuses idées de recherches à entreprendre sont apparues. Il existe en effet de nombreuses perspectives d'études pour continuer d'explorer le potentiel de l'utilisation des drones, continuer le suivi dans le cadre de l'étude de l'activité des castors et améliorer la connaissance des impacts qu'elle induit.

Si peu d'évolutions ont été remarquées entre les différentes campagnes drone, c'est avant tout dû à l'ancienneté des sites. Il pourrait être intéressant de suivre l'évolution de la colonisation d'un site lors de l'arrivée d'un castor sur un nouveau territoire. Cela permettrait de mettre en avant sa dynamique d'expansion dans la rivière, le rythme auquel il construit ses infrastructures, ce qu'il construit en premier, etc. Cela permettrait aussi d'anticiper des dégâts qu'il pourrait causer. Cependant, il est important de noter que les nouveaux sites colonisés ne sont pas toujours dépourvus de végétations hautes, ce qui complique la distinction des différents éléments du barrage. Suivre l'abandon d'un barrage pourrait aussi permettre de comprendre la dynamique qui se met en place lorsqu'il n'entretient plus les infrastructures. Disparaissent-elles au bout d'un certain temps ? La zone revient-elle à son état de départ après un certain temps ou est-ce que le territoire est recolonisé par après ?

La cartographie manuelle des éléments construits par le castor est particulièrement chronophage. Un outil de détection automatique des différents éléments pourrait être intéressant à créer dans le cadre du monitoring d'un site. Cela réduirait le temps de cartographie. La combinaison des différents types d'images (RGB, MNS, données thermiques) permettrait de pouvoir distinguer les différents éléments comme les bassins, les canaux, les différents types de végétations.

D'un point de vue hydrologique, plusieurs points pourraient être approfondis. Tout d'abord, l'installation de *Divers* supplémentaires, en particulier en aval du site « Autoroute », permettrait de mieux comprendre la dynamique de stockage dans les bassins, les impacts sur les crues et les étiages. Un autre axe qui pourrait être investigué est un bilan hydrique complet du site avec un suivi des débits mais aussi un bac évaporatoire pour estimer les pertes par évapotranspiration. La réalisation de modèles hydrodynamiques, permettant de simuler les remplissages des barrages, selon le type de barrages, pourrait aider à la compréhension des variations de niveau d'eau. En Suisse, un modèle d'inondation des plaines alluviales en fonction de la hauteur du barrage a été mis en place (Denis *et al.*, 2024). À l'aide des algorithmes développés dans ce cadre et d'un MNT, il pourrait être possible de l'appliquer sur nos sites, voire même à l'échelle de la Wallonie. De plus, le volume stocké par les barrages pourrait être modélisé ainsi que son évolution en fonction du débit. À l'échelle du bassin versant, il est difficile de quantifier l'impact du castor sur les débits extrêmes, en particulier sur les petits bassins versants qui ne disposent pas de station limnimétrique. Des modèles hydrauliques pourraient permettre de résoudre ce problème en simulant l'écoulement avec et sans les barrages.

Le recours à l'échosondeur ou à une caméra LiDAR bathymétrique pourrait permettre de faciliter la quantification des volumes d'eau. Toutefois, la vase reste une obstruction au signal. Un vol drone en cas de rupture de barrage ou de conditions de très basses eaux permettrait de réaliser la topographie du fond du bassin.

La spatialisation dans toute la zone des températures à l'aide du vol thermique est un point intéressant qui pourrait également être développé. Dans la littérature, des analyses similaires ont été réalisées à l'aide de capteurs de températures localisés en certains points des structures mais sans une spatialisation continue. Le drone permet une quantification rapide des différences de températures. Couplé avec les données de températures des capteurs, cela permettrait une analyse temporelle et spatiale intéressante. Réaliser des vols à différentes dates et saisons permettrait de mieux comprendre la répartition des températures de l'eau. Les températures pourraient également être alors mises en relation avec les conditions d'ensoleillement.

Au sein du bassin, il n'a pas été possible de mettre en avant d'hydrodynamique à l'aide du test des copeaux de bois et du drone. Cette piste serait tout de même intéressante à mettre en place dans des bassins avec une plus forte dynamique pour voir si la méthode fonctionne et si elle est applicable à d'autres sites. Les dynamiques observées pourraient être mises en relation avec les variations spatiales de températures.

Des bilans sédimentaires pourraient également être réalisés pour comprendre la dynamique d'érosion et d'accumulation en quantifiant le volume de sédiments piégés dans les bassins. Un suivi continu des concentrations en matière en suspension apporterait davantage de réponses à la question du transport des sédiments en cas de crues et de leur remise en suspension. La quantification du volume de sédiments excavés par le creusement des canaux pourrait être investiguée en connaissant les paramètres de largeurs, longueurs et profondeurs.

Dans le cadre de ce mémoire, l'évolution de la végétation n'a pas été étudiée. De plus, les images multispectrales n'ont pas vraiment été exploitées. L'étude du NDVI aurait pu être réalisée. Cependant, les images ont été prises à différentes saisons, dont pendant l'hiver. En outre, l'activité de l'Homme a été remarquée sur les deux sites par des défrichements, ce qui aurait un impact sur les résultats. Néanmoins, la quantification de l'impact du castor sur la végétation à l'aide d'images drone reste une piste à exploiter dans le cadre de travaux futurs.

De manière générale, les analyses ont été réalisées à une échelle très réduite. Étendre les analyses à divers sites dans le bassin versant serait intéressant pour comprendre la dynamique de colonisation des castors sur la Chavanne, voir si les éléments et les caractéristiques des éléments des territoires varient dans le bassin versant en fonction du contexte local. Réaliser des jaugeages sur d'autres sites ou les équiper de *Divers* permettrait de comparer les sites entre eux et peut être en déduire une dynamique générale. Un suivi sur plusieurs années et de sites à différents stades de colonisation pourrait apporter davantage d'observations. Finalement, réaliser ces analyses sur d'autres bassins versants pourrait permettre d'évaluer l'impact du castor dans d'autres contextes géographiques.

9 PROTOCOLE DE SUIVI

L'objectif de ce mémoire est également de mettre en place un protocole de suivi des territoires de castors par drone. Ce protocole est divisé selon les événements rencontrés.

1. En cas de nouvelle colonisation d'un site de castor

Objectifs : établir un état de référence et suivre les premières modifications.

Données à récolter :

- cartographie dès les premiers signes du castor (orthophotos) ;
- topographie du site (vol LiDAR).

Suivi régulier (tous les 1 à 2 mois) avec le drone en RGB et LiDAR si beaucoup de changements.

2. En cas de territoire établi depuis plusieurs années et bien développé

Objectifs : suivi des modifications apportées au barrage, suivi de l'évolution du paysage, caractérisation des températures de l'eau.

Données à récolter :

- relevé drone RGB ;
- topographie du site (vol LiDAR) pour comparer avec la topographie pré-castor si possible ;
- vol thermique ;
- vol multispectral (dans le cas d'un suivi de la végétation).

Les vols drone peuvent être effectués tous les ans ou en cas de changements importants remarqués. Le vol thermique peut être fait dans différentes conditions météorologiques et hydrologiques pour comprendre les dynamiques de températures de surface.

3. En cas de crue

Objectifs : évaluer la résistance du barrage, observations des zones inondées, évaluation du niveau d'eau.

Données à récolter :

- relevé rapide par drone pour observer le niveau d'eau et inspection des dégâts ;
- en cas de rupture de barrage : vol LiDAR pour avoir une topographie du fond du bassin ;
- si destruction importante : suivi de la recolonisation du site.

4. En cas d'étiage

Objectifs : en cas de niveau très bas dans le bassin, topographie du bassin.

Données à récolter :

- vol LiDAR.

10 CONCLUSION

Ce travail visait à suivre l'évolution de deux territoires de castors situés sur la Chavanne afin de mieux comprendre les impacts paysagers, hydrologiques et géomorphologiques qu'ils peuvent engendrer. En outre, l'objectif était d'évaluer le potentiel de l'utilisation du drone dans ce même cadre. Différentes méthodes ont été utilisées pour apporter des éléments de réponse aux objectifs définis au début de ce travail.

Tout d'abord, le suivi de l'évolution des deux sites à l'aide du drone se révèle pertinent. Le drone permet de cartographier de façon aisée les différents éléments que construisent les castors : les barrages, les huttes, les canaux, etc. Sur presque une année de suivi, peu de changements ont été observés mis à part l'extension du bassin situé au pied de l'autoroute. Néanmoins, l'imagerie drone est un outil de suivi efficace, rapide et reproductible. Les classifications automatiques sur des orthophotographies aériennes ont permis de suivre l'évolution de l'occupation du sol à plus long terme.

D'un point de vue hydrologique, les données récoltées sur les stations limnimétriques de la Lienne n'ont pas permis de mettre en évidence une modification importante de l'écoulement global, ni pendant des épisodes de crues ou des périodes de sécheresse. L'installation d'une station de référence permet de récolter des données sur ce petit cours d'eau. Les données de niveaux d'eau dans les bassins comparées à celles de la Chavanne ont permis d'améliorer la compréhension de stockage dans deux des bassins du site « Chalet » avec des dynamiques très différentes pour deux bassins très proches. Leurs comportements face aux précipitations ont été également mis en avant. Les bathymétries ont permis d'évaluer les volumes d'eau stockés dans les retenues. Cela permet d'appréhender la quantité d'eau potentiellement relâchée en cas de rupture de barrage. Une grande diversité des températures de surface de l'eau a été mise en avant, résultant de la réduction de la vitesse d'écoulement par les barrages et des différentes structures présentes.

Les données LiDAR permettent de mettre en avant des changements topographiques tels que les canaux ou les changements de niveau d'eau. Toutefois, les observations peuvent être limitées par l'utilisation d'un LiDAR aérien à plus faible résolution. La courte période entre mars et juin n'a pas permis de mettre en avant de modifications importantes de la topographie malgré une meilleure résolution. Les concentrations en matière en suspension lors de deux crues n'ont pas permis de souligner une tendance quant au piégeage ou à la remobilisation des sédiments. Le diagramme de Passega montre que les dépôts des retenues sont mis en place par décantation et sont facilement remobilisables. Cela témoigne de la capacité des barrages à piéger les sédiments.

Finalement, cette étude a débouché sur un protocole de suivi à l'aide du drone pour différentes situations : nouvelle colonisation, territoire établi, crue, étiage. Ce protocole, qui est reproductible et adaptable, pourrait être un outil pour le suivi du castor par les gestionnaires.

Pour conclure, ce mémoire rassemble une série de techniques et analyses afin d'améliorer la connaissance autour de ces ingénieurs de l'écosystème et de mieux appréhender leurs impacts. Il met en avant la complexité des interactions entre le castor et son environnement et souligne l'intérêt de coupler des approches innovantes de télédétection à des méthodes de terrain plus classiques pour avoir un suivi complet d'un site de castors. De nombreuses perspectives de recherche ont été mises en avant pour poursuivre et améliorer ce suivi.

11 BIBLIOGRAPHIE

- André, H. (1960). Méthode chimique de dissolution. Procédé par intégration. *La Houille Blanche*, 46(2), 833 - 843. <https://doi.org/10.1051/lhb/1960015>.
- Askam, E., Nagisetty, R. M., Crowley, J., Bobst, A. L., Shaw, G. & Fortune, J. (2022). Satellite and sUAS Multispectral Remote Sensing Analysis of Vegetation Response to Beaver Mimicry Restoration on Blacktail Creek, Southwest Montana. *Remote Sensing*, 14 (24), 6199, 20 p. <https://doi.org/10.3390/rs14246199>.
- Baguette, T., (1994). Le castor : 1. Définition des caractéristiques de son habitat en Europe. *Cahiers d'éthologie*, 14(4), 357 – 380. <https://popups.uliege.be/2984-0317/index.php?id=433>. Consulté le 30 octobre 2024.
- Baguette, T. (1995). Le castor : un instrument de gestion pour les fonds de vallée en Belgique. 2. Étude des potentialités d'accueil du castor dans deux systèmes hydrographiques fagnards : la vallée de la Roer et l'amphithéâtre des sources de la Vesdre. *Cahiers d'éthologie*, 15(1), 47 – 70. <https://popups.uliege.be/2984-0317/index.php?id=330>. Consulté le 30 octobre 2024.
- Blanchet, M. (1977). *Le castor et son royaume (Le roman de Bièvre) : le castor du Rhône chez lui et la réintroduction en Suisse d'une espèce disparue*. Bâle : Ligue suisse pour la protection de la nature [L.S.P.N.]. 242 p.
- Brazier, R. E., Puttock, A., Graham, H. A., Auster, R. E., Davies, K. H. & Brown, C. M. (2021). Beaver: Nature's ecosystem engineers. *WIREs Water*, 8, e1494. <https://doi.org/10.1002/wat2.1494>.
- Butler, D. R. (2002). Visualizing animal impacts on the landscape: Remote sensing in the geography classroom. *Geocarto International*, 17 (4), 69 – 76. <https://doi.org/10.1080/10106040208542255>.
- Butler, D. R. & Malanson, G. P. (2005). The geomorphic influences of beaver dams and failures of beaver dams. *Geomorphology*, 71, 48 – 60. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2004.08.016>.
- Butler, D. R. (2012). Characteristics of beaver ponds on deltas in a mountain environment. *Earth Surface Processes and Landforms*, 37, 876 – 882. <https://doi.org/10.1002/esp.3218>.
- Boon, M. A. & Tesfamichael, S. (2017). Determination of the present vegetation state of a wetland with UAV RGB imagery. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*. XLII-3/W2, 37 – 41. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-3-W2-37-2017>.
- Campbell-Palmer, R., Gow, D., Campbell, R., Dickinson, H., Girling, S., Gurnell, J., Halley, D., Jones, S., Lisle, S., Parker, H., Schwab, G. & Rosell, F (2016). *The Eurasian Beaver Handbook: Ecology and Management of Castor fiber*. Exeter : Pelagic Publishing, 202 p.
- Cornu, T. (2020). *L'impact des barrages de castors sur les hydrosystèmes. Rapport de stage Pratique de l'Ingénierie*. Laboratoire d'Hydrographie et de Géomorphologie Fluviale (LHGF) – Université de Liège.
- Cunningham, J. M., Calhoun, A. J. K. & Glanz, W. E. (2006). Patterns of beaver colonization and wetland change in Acadia National Park. *Northeastern Naturalist*, 13 (4), 583 – 596. [https://doi.org/10.1656/1092-6194\(2006\)13\[583:POBCAW\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1656/1092-6194(2006)13[583:POBCAW]2.0.CO;2).

- Curran, J. C. & Cannatelli, K. M. (2014). The impact of beaver dams on the morphology of a river in the eastern United States with implications for river restoration. *Earth Surface Processes and Landforms*, 39, 1236 – 1244. <https://doi.org/10.1002/esp.3576>.
- Davis, J., Lautz L., Kelleher, C., Vidon, P., Russoniello, C. & Pearce, C. (2021). Evaluating the geomorphic channel response to beaver dam analog installation using unoccupied aerial vehicles. *Earth Surface Processes and Landforms*, 46 (12), 2349 – 2364. <https://doi.org/10.1002/esp.5180>.
- Denis, D., Angst, C., Larsen, J., Rey, E. & Larsen A. (2024). A national scale floodplain model revealing channel gradient as a key determinant of beaver dam occurrence and inundation potential can anticipate land-use based opportunities and conflicts for river restoration. *Global Ecology and Conservation*, 56, e03304, 17 p. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2024.e03304>.
- de Visscher, M., Nyssen, J., Pontzele, J., Billi, P. & Frankl, A. (2014). Spatio-temporal sedimentation patterns in beaver ponds along the Chevral river, Ardennes, Belgium. *Hydrological Processes*, 28, 1602 – 1612. <https://doi.org/10.1002/hyp.9702>.
- Dumas, H. (1952). La méthode chimique pour la mesure des débits des cours d'eau. *La Houille Blanche*, 38 (5), 690 – 701. <https://doi.org/10.1051/lhb/1952045>.
- Duval, J., Callou, C. & Horard-Herbin, M.-P. (2011). Le castor *Castor fiber* Linnaeus, 1758 en France. Étude archéozoologique. *Anthropozoologica*, 46 (2), 7 – 39. <https://doi.org/10.5252/az2011n2a1>.
- Esri, (n.d.). *Train Support Vector Machine classifier*. ArcGIS Pro. <https://pro.arcgis.com/fr/pro-app/latest/tool-reference/image-analyst/train-support-vector-machine-classifier.htm>
- Esri, (n.d.). *Méthodes de classification des données*. ArcGIS Pro. <https://pro.arcgis.com/fr/pro-app/latest/help/mapping/layer-properties/data-classification-methods.htm>
- Fairfax, E. & Small, E. (2018). Using remote sensing to assess the impact of beaver damming on riparian evapotranspiration in an arid landscape. *Ecohydrology*, 11 (7), e1993, 14 p. <https://doi.org/10.1002/eco.1993>.
- Fairfax, E. & Whittle, A. (2020). Smokey the Beaver: beaver-dammed riparian corridors stay green during wildfire throughout the western United States. *Ecological Applications*, 30 (8), e02225, 8 p. <https://doi.org/10.1002/eap.2225>.
- Fairfax, E., Zhu, E., Clinton, N., Maiman, S., Shaikh, A., Macfarlane, W. W., Wheaton, J. M., Ackerstein, D. & Corwin, E. (2023). EEAGER: A neural network model for finding beaver complexes in satellite and aerial imagery. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*. 128, e2022JG007196, 16 p. <https://doi.org/10.1029/2022JG007196>.
- Fesenmyer, K. A., Dauwalter, D. C., Evans, C. & Allai, T. (2018). Livestock management, beaver, and climate influences on riparian vegetation in a semiarid landscape. *PLoS ONE*, 13 (12), e0208928, 21 p. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0208928>.
- Fraser, R. H., Olthof, I. & Berezanski, D. (2024). Large multi-decade beaver ponding changes in the subarctic Hudson Bay Lowlands, Canada observed using satellite remote sensing. *Environmental Research Letters*, 19 (4), 044061. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/ad36d6>.

George, P. & Verger, F. (2009). *Dictionnaire de la géographie*. 3e éd. Paris : Presses Universitaires de France, Quadrige, 480 p.

Gischer, L., Hallot, E., Houbrechts, G., Van Campenhout, J & Petit F. (2012). Analyse des débits en période de tarissement : Essai d'une typologie régionale appliquée à des rivières du bassin de la Meuse (Belgique). *Société Géographique de Liège*, 59, 59 – 80.
<https://hdl.handle.net/2268/148615>.

Graham, H. A. (1998). Flood wave attenuation by a wetland following a beaver dam failure on a second order boreal stream. *Wetlands*, 18 (1), 21 – 34. <https://doi.org/10.1007/BF03161439>.

Graham, H. A., Puttock, A., Macfarlane, W. W., Wheaton, J.M., Gilbert, J. T., Campbell-Palmer, R., Elliott, M., Gaywood, M. J., Anderson, K. & Brazier, R. E. (2020). Modelling Eurasian beaver foraging habitat and dam suitability, for predicting the location and number of dams throughout catchments in Great Britain. *European Journal of Wildlife Research*, 66 (42), 18 p. <https://doi.org/10.1007/s10344-020-01379-w>.

Graham, H. A., Puttock, A., Chant, J., Elliott, M., Campbell-Palmer, R., Anderson, K. & Brazier, R. E. (2022a). Monitoring, modelling and managing beaver (*Castor fiber*) populations in the River Otter catchment, Great Britain. *Ecological Solution and evidence*, 3 (3), e12168, 17 p. <https://doi.org/10.1002/2688-8319.12168>.

Graham, H. A., Puttock, A. K., Elliot, M., Anderson, K. & Brazier, R. E. (2022b). Exploring the dynamics of flow attenuation at a beaver dam sequence. *Hydrological Processes*, 36 (11), e14735, 17 p. <https://doi.org/10.1002/hyp.14735>.

Gurnell, A. M. (1998). The hydrogeomorphological effects of beaver dam-building activity. *Progress in Physical Geography*, 22 (2), 167 – 189.
<https://doi.org/10.1177/030913339802200202>.

Gurnell, J., Gurnell, A. M., Demeritt, D., Lurz, P. W. W., Shirley, M. D. F., Rushton, S. P., Faulkes, C. G., Nobert, S. & Hare, E. J. (2009). The feasibility and acceptability of reintroducing the European beaver to England. Rapport réalisé pour Natural England et People's Trust for Endangered Species. Naturel England.
<https://publications.naturalengland.org.uk/publication/45003>. Consulté le 29 juillet 2025.

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

Hauptmann, S. (2024). *Méthode de monitoring des zones inondées par les barrages de castor sur base de données Sentinel-2 et du modèle numérique de terrain LiDAR*. Travail de fin d'études présenté en vue de l'obtention du diplôme de master bioingénieur en gestion des forêts et des espaces naturels. Gembloux, Université de Liège, inédit, 147 p.
<http://hdl.handle.net/2268.2/20208>.

Hill, A. R. & Duval, T. P. (2009). Beaver dams along an agricultural stream in southern Ontario, Canada: their impact on riparian zone hydrology and nitrogen chemistry. *Hydrological Processus*, 23, 1324 – 1336. <https://doi.org/10.1002/hyp.7249>.

Houbrechts, G., Hallot, E., Levecq, Y., Denis, A-C., Van Campenhout, J., Peeters, A. & Petit, F. (2013). Images CM de Passega des rivières ardennaises. *Bulletin de la Société Géographique de Liège*, 61, 37 – 68. <https://hdl.handle.net/2268/148615>.

Hood, G. A. & Bayley, S. (2008). Beaver (*Castor canadensis*) mitigate the effects of climate on the area of open water in boreal wetlands in western Canada. *Biological Conservation*, 141, 556 – 567. <http://dx.doi.org/10.1016/j.biocon.2007.12.003>.

Institut Royal Météorologique (IRM) (2024). *Atlas climatique [Accueil > Climat > Climat de la Belgique > Climat dans votre commune]*. <https://www.meteo.be/fr/climat/climat-de-la-belgique/climat-dans-votre-commune>. Consulté le 26 octobre 2024.

Institut Royal Météorologique (IRM) (2018). *Le point sur les orages de ce 23 mai 2018*. <https://www.meteo.be/fr/infos/actualite/2018/le-point-sur-les-orage-de-ce-23-mai-2018>. Consulté le 7 août 2025.

Jing, R., Gong, Z., Zhao, W., Pu, R. & Deng, L. (2017). Above-bottom biomass retrieval of aquatic plants with regression models and SfM data acquired by a UAV platform – A case study in Wild Duck Lake Wetland, Beijing, China. *ISPR Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 134, 122 – 134. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2017.11.002>.

Johnston, C. A. & Naiman, R. J. (1990a). The use of a geographic information system to analyze long-term landscape alteration by beaver. *Landscape Ecology*, 4 (1), 5 – 19. <https://doi.org/10.1007/BF02573947>.

Johnston, C. A. & Naiman, R. J. (1990b). Aquatic patch creation in relation to beaver population trends. *Ecology*, 71 (4), 1617 – 1621. <https://doi.org/10.2307/1938297>.

Kaphegyi, T. A. M., Eckerle, V. A. M., Christoffers, Y. & Kaphegyi, U. (2021). Reconstruction of Eurasian beaver (*castor fiber*) recolonization in moor habitats using digital orthophotos. *Biodiversity and Conservation*, 30, 4163 – 4176. <https://doi.org/10.1007/s10531-021-02295-4>.

Larsen, A., Larsen, J. R. & Lane, S. N. (2021). Dam builders and their works: Beaver influences on the structure and function of river corridor hydrology, geomorphology, biogeochemistry and ecosystems. *Earth-Science Reviews*, 218 (103623), 46 p. <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2021.103623>.

Libois, R. (1982). *Atlas provisoire des mammifères sauvages de Wallonie : Distribution, écologie, éthologie, conservation* (1ère partie). Cahiers d'éthologie appliquée à la protection et à la conservation de la vie sauvage, à la gestion et au contrôle des ressources et productions animales, Volume 2, Supplément 1-2, Collection Enquêtes et Dossiers : 3. https://www.researchgate.net/publication/270686598_Atlas_provisoire_des_mammiferes_sauvages_de_Wallonie_distribution_ecologie_ethologie_conservation. Consulté le 1^{er} novembre 2024.

Libois, R. (2006). *Les mammifères non volants de la Région Wallonne : tendance des populations*. Dossier scientifique réalisé dans le cadre de l'élaboration du Rapport analytique 2006 sur l'État de l'Environnement wallon, Unité de Recherches zoogéographiques, Université de Liège, 127 p. https://orbi.uliege.be/bitstream/2268/112260/1/dossier_FFH_Libois.pdf. Consulté le 1^{er} novembre 2024.

- Luglia, R. (2013). Le castor d'Europe (*Castor fiber*). Regards historiques anciens et nouveaux sur un animal sauvage. *Trajectoires*, 7, 13 p. <https://doi.org/10.4000/trajectoires.1130>.
- Majerova, M., Neilson, B. T., Schmadel, N. M., Wheaton, J. M. & Snow, C. J. (2015). Impacts of beaver dams on hydrologic and temperature regimes in a mountain stream. *Hydrology and Earth System Sciences*, 19, 3541 – 3556. <https://doi.org/10.5194/hess-19-3541-2015>.
- Majerova, M., Neilson, B. T. & Roper, B. B. (2020). Beaver dam influences on streamflow hydraulic properties and thermal regimes. *Science of The Total Environment*, 718, 134853. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134853>.
- Malavoi, J.R. & Bravard, J.P. (2010). *Eléments d'hydrologie fluviale*. Vincennes : Office National de l'Eau et des Milieux Aquatiques (ONEMA), Comprendre pour agir, 224 p.
- Malison, R. L., Lorang, M. S., Whited, D. C. & Stanford, J. A. (2014). Beavers (*Castor Canadensis*) influence habitat for juvenile salmon in a large Alaskan river floodplain. *Freshwater Biology*, 59 (6), 1229 – 1246. <https://doi.org/10.1111/fwb.12343>.
- Martin, S., Jasinski, B., Kendall, A., Dahl, T. & Hyndman, D. (2015). Quantifying beaver dam dynamics and sediment retention using aerial imagery, habitat characteristics, and economic drivers. *Landscape Ecology*, 30, 1129 – 1144. <https://doi.org/10.1007/s10980-015-0165-9>.
- Masson, R., Auberson, C. & Angst, C. (2024). *Les milles vies du castor*. Première édition. France : Les Editions de la Salamandre, Histoires d'Images, 154 p.
- McLaren, A. A. D., Newton, E. J., Silver, A., Allan, M. R., Middel, K. R., Pond, B. A. & Patterson, B. R. (2022). Too Many to Count: Using Orthophotography to Census an Unharvested Beaver (*Castor Canadensis*) Population in Ontario. *Ecosphere*, 13 (7), e4185, 11 p. <https://doi.org/10.1002/ecs2.4185>.
- Morrison, A., Westbrook, C. J. & Bedard-Haughn, A. (2015). Distribution of Canadian Rocky Mountain Wetlands Impacted by Beaver. *Wetlands*, 35, 95 – 104. <https://doi.org/10.1007/s13157-014-0595-1>.
- Musy, A. & Higy, C. (2004). *Hydrologie : Une science de la nature*. Lausanne : Les Presses polytechniques et universitaires romandes, Gérer l'environnement, 21, 314 p.
- Natagora (2012). *Position de Natagora sur le castor en Wallonie*. Natagora. <https://www.natagora.be/position-sur-le-castor>. Consulté le 5 juillet 2025.
- Neumayer, M., Teschemacher, S., Schloemer, S., Zahneer, V. & Rieger, W. (2020). Hydraulic Modeling of Beaver Dams and Evaluation of Their Impacts on Flood Events. *Water*, 12 (300), 23 p. <https://doi.org/10.3390/w12010300>.
- Nyssen, J., Pontzele, J. & Billi, P. (2011). Effect of beaver dams on the hydrology of small mountain streams: Example from the Chevril in the Ourthe Orientale basin, Ardennes, Belgium. *Journal of Hydrology*, 402, 92 – 102. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2011.03.008>.
- Pearl, C. A., Adams, M. J., Haggerty, P. K. & Urban, L. (2015). Using occupancy models to accommodate uncertainty in the interpretation of aerial photograph data: Status of beaver in Central Oregon, USA. *Wildlife Society Bulletin*, 39 (2), 319 – 325. <https://doi.org/10.1002/wsb.516>.

- Petit, F., Hallot, E., Houbrechts, G. & Mols, J. (2005). Évaluation des puissances spécifiques de rivières de moyenne et de haute Belgique. *Bulletin de la Société géographique de Liège*, 46, 37 – 50. <https://orbi.uliege.be/bitstream/2268/25625/1/Soc%20Geog%20Puissance.pdf>.
- Plunus, J. (2009). *Paramètres hydrologiques et impacts hydrologiques et géomorphologiques des barrages de castors en région wallonne*. Travail de fin d'études présenté en vue de l'obtention du diplôme de master Sciences géographiques : orientation générale. Liège, Université de Liège, inédit, 159 p.
- Polvi, L. E. & Wohl, E. (2012). The beaver meadow complex revisited - the role of beavers in post-glacial floodplain development. *Earth Surface Processes and Landforms*, 37 (3), 332 – 346. <https://doi.org/10.1002/esp.2261>.
- Puttock, A., Cunliffe, A. M., Anderson, K. & Brazier, R. E. (2015). Aerial photography collected with a multicopter drone reveals impact of Eurasian beaver reintroduction on ecosystem structure. *Journal of Unmanned Vehicle Systems*, 3, 123 – 130. <https://doi.org/10.1139/juvs-2015-0005>.
- Puttock, A., Graham H. A., Carless, D. & Brazier, R. E. (2018). Sediment and nutrient storage in a beaver engineered wetland. *Earth surface processes and landforms*, 43, 2358 – 2370. <https://doi.org/10.1002/esp.4398>.
- Puttock, A., Graham, H. A., Ashe, J., Luscombe, D. K. & Brazier, R. E. (2020). Beaver dams attenuate flow: a multi-site study. *Hydrological Processes*, 35 (2), 14017. <https://doi.org/10.1002/hyp.14017>.
- Richard, P. B. (1967). Le déterminisme de la construction des barrages chez le Castor du Rhône. *Revue d'Écologie*, 4, 339 – 470. <https://hal.science/hal-03531683>.
- Ronnquist, A. L. & Westbrook, C. (2021). Beaver dams: How structure, flow state, and landscape setting regulate water storage and release. *Sciences of the Total Environment*, 785, 147333. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147333>.
- Ritter, T. D., Gower, C. N. & McNew, L. B. (2020). Habitat conditions at beaver settlement sites: Implications for beaver restoration projects. *Restoration Ecology*, 28 (1), 196 – 205. <https://doi.org/10.1111/rec.13032>.
- Saoudi, L. (2022). *Quantification des impacts hydrologiques, géomorphologiques et thermiques des barrages de castors dans la Chavanne*. Laboratoire d'Hydrographie et de Géomorphologie Fluviale (LHGF) – Université de Liège.
- SPW (2015). *Le castor en Wallonie – Entre nature et aménagement du territoire*. Brochure éditée en mai 2015. <https://biodiversite.wallonie.be/fr/09-07-2015-cohabiter-avec-le-castor-en-wallonie.html?IDC=3355&IDD=3597>. Consulté le 15 novembre 2024.
- SPW (2025). *Géoportail de la Wallonie*. Service public de Wallonie. <https://geoportail.wallonie.be/home.html>. Consulté du 1^{er} septembre 2024 au 30 juillet 2025.
- SPW. (2025). *L'hydrométrie en Wallonie*. Service public de Wallonie. <https://hydrometrie.wallonie.be/home.html>. Consulté du 1^{er} septembre 2024 au 30 juillet 2025.

- Smith, A., Tetzlaff, D., Gelbrecht, J., Kleine, L. & Soulsby, C. (2020). Riparian wetland rehabilitation and beaver re-colonization impacts on hydrological processes and water quality in a lowland agricultural catchment. *The Science of the Total Environment*, 699 (134302), 14 p. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2019.134302>.
- Stout, T. L., Majerova, M. & Neilson, B. T. (2017). Impacts of beaver dams on channel hydraulics and substrate characteristics in a mountain stream. *Ecohydrology*, 10 (e1767), 13 p. <https://doi.org/10.1002/eco.1767>.
- Swift, T. P. & Kennedy, L. M. (2021). Beaver-Driven Peatland Ecotone Dynamics: Impoundment Detection Using Lidar and Geomorphon Analysis. *Land*, 10 (12), 1333, 19 p. <https://doi.org/10.3390/land10121333>.
- TV Lux (2016). *Durbuy, Manhay, Erezée... surpris par les orages* [vidéo]. TV Lux. https://www.tvlux.be/video/info/faits-divers/durbuy-manhay-erezee-surpris-par-les-orages_23022.html. Consulté le 30 juillet 2025.
- Vaessen, Q., Peeters, F., Van Campenhout, J. & Houbrechts, G. (2020). *Suivi de l'impact hydromorphologique du démontage de barrages de castor sur la Sûre – Rapport final*. Laboratoire d'Hydrographie et de Géomorphologie Fluviale (LHGF) – Université de Liège, pour la Commission de Gestion du Parc naturel Haute-Sûre Forêt d'Anlier ASBL. <https://hdl.handle.net/2268/323073>.
- Van Alphen, R., Rains, K. C., Rodgers, M., Malservisi, R., Dixon, T. H. (2024). UAV-Based Wetland Monitoring: Multispectral and Lidar Fusion with Random Forest Classification. *Drones*, 8 (3), 113, 22 p. <https://doi.org/10.3390/drones8030113>.
- Van Campenhout, J., Houbrechts, G., Peeters, A. & Petit, F. (2020). Return Period of Characteristic Discharges from the Comparison between Partial Duration and Annual Series, Application to the Walloon Rivers (Belgium). *Water*, 12 (3), 792. <https://doi.org/10.3390/w12030792>.
- Wallemacq, V., Petit, F., Van Campenhout, J. & Houbrechts, G. (2011). Impact de la glace de ségrégation sur l'érosion des berges d'un ruisseau ardennais (la Chavanne, Belgique). *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, 1, 65 – 82. <https://orbi.uliege.be/handle/2268/103197>.
- Weber, N., Bouwes, N., Pollock, M. M., Volk, C., Wheaton, J. M., Wathen, G., Wirtz, J. & Jordan, C. E. (2017). Alteration of stream temperature by natural and artificial beaver dams. *PLoS ONE*, 15 (5), e0176313, 13 p. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0176313>.
- Westbrook, C. J., Cooper, D. J. & Baker, B. W. (2006). Beaver dams and overbank floods influence groundwater–surface water interactions of a Rocky Mountain riparian area. *Water resources research*, 42, W06404, 12 p. <https://doi.org/10.1029/2005WR004560>.
- Westbrook, C. J., Ronnquist, A. & Bedard-Haughn, A. (2020). Hydrological functioning of a beaver dam sequence and regional dam persistence during an extreme rainstorm. *Hydrological Processes*, 34, 3726 – 3737. <https://doi.org/10.1002/hyp.13828>.

Woo, M.-K. & Waddington, J. M. (1990). Effects of beaver dams on subarctic wetland hydrology. *Arctic Institute of North America*, 43 (3), 223 – 230.
<https://www.jstor.org/stable/40511261>.

Wu, S., Tetzlaff, D., Daempfling, H. & Soulsby, C. (2023). Improved understanding of vegetation dynamics and wetland ecohydrology via monthly UAV-based classification. *Hydrological Processes*, 37, e14988, 16 p. <https://doi.org/10.1002/hyp.14988>.

12 ANNEXES

12.1 ANNEXE 1 : ENSEMBLE DES PHOTOS DES BARRAGES « CHALET » PAR ANNÉE

2014 (25/08/2014 – M. Facon)



2015 (14/01/2015 – M. Facon)



2017 (non daté, M. Facon)



2018 (17/10/2018 – M. Facon)





2019 (document récapitulatif – M. Facon)



Le pertuis est obturé ,depuis les différentes opérations .Dont la casse du tuyau en béton.

La première fois sur plusieurs années .

Dans des C.R . antérieurs et des visites de terrain ,nous avons attiré l'attention



2015

sur le danger de certaines opérations de destruction près du pertuis.



2018/2019

2019 (25/02/2019 – LHGF)



2019 (4/12/2019 – M. Facon)



2020 (04/02/2020 – LHGF)



2020 (24/07/2020 – LHGF et CR Amblève)



2021 (05/02/2021 – LHGF)



Septembre 2024 (17/09/2024 – photos personnelles)



Octobre 2024 (18/10/2024 – photos personnelles)



Octobre 2024 (24/10/2024 – photos personnelles)





Décembre 2024 (01/12/2024 – photos personnelles)



Janvier 2025 (10/01/2024 – photos personnelles)





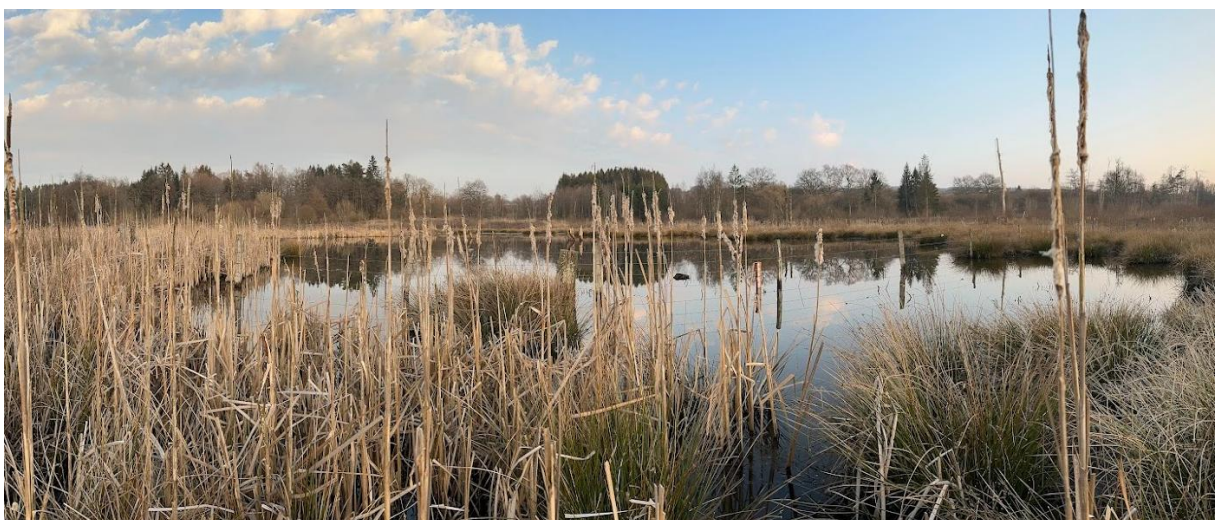
Février 2025 (08/02/2025 - photos personnelles)



Février 2025 (18/02/2025 - photos personnelles)



Mars 2025 (28/03/2025 – photos personnelles)





Avril 2025 (09/04/2025 – photos personnelles)



12.2 ANNEXE 2 : ENSEMBLE DES PHOTOS DU SITE « AUTOROUTE » PAR ANNÉE

2011 (non daté – M. Facon)



Rupture du 12 décembre 2011 (12/12/2011 – LHGF)



2012 (rupture du 21/02/2012 – M. Facon)



2012 (17/07/2012 – M. Facon)



2013 (28/03/2013 – LHGF, la hutte et le barrage)



2013 (14/05/2013 – M. Facon, barrage en aval de l'autoroute)



2013 (14/05/2013 – M. Facon)



2013 (2/07/2013 – LHGF)



2014 (25/08/2014 – M. Facon)





2015 (14/01/2015 – M. Facon)



2016 (7/06/2016 – LHGF, après la rupture totale du bassin)





2019 (25/02/2019 – LHGF)



2020 (04/02/2020 – LHGF)



2020 (24/07/2020 – LHGF & CR Amblève)





2021 (05/02/2021 – LHGF)





2022 (26/04/2022 – LHGF)





Septembre 2024 (17/09/2024 – photos personnelles)



Octobre 2024 (10/10/2024 – photos personnelles)



Octobre 2024 (18/10/2024 – photos personnelles)



Janvier 2025 (10/01/2024 – photos personnelles)



Avril 2025 (23/04/2025 – LHGF)



12.3 ANNEXE 3 : CODE PÉRIODE DE TARISSEMENT (RSTUDIO)

```
# Librairies
library(readxl)
library(dplyr)
library(lubridate)
library(openxlsx)
library(ggplot2)
library(tidyverse)

# Paramètres
setwd("C:/Documents/AMASTER2/Mémoire/Partie Hydro/Analyse hydro")

# Fichier de données
fichier <- "C://Documents//AMASTER2//Mémoire//Partie Hydro//Analyse hydro//Données
hydro//Qh_L6240_Lienne_Lorcé_1994-2025.xlsx"
nom_station <- "Station Lorcé"

# Noms des colonnes dans le fichier Excel
colonne_date <- "Date et Heure"
colonne_debit <- "Débit horaire (m³/s)"

# Lecture des données
df <- read_excel(fichier)
df[[colonne_date]] <- ymd_hms(df[[colonne_date]])
df <- df %>%
  mutate(
    year = year(.data[[colonne_date]]),
    month = month(.data[[colonne_date]])
  ) %>%
  rename(
    datetime = !!colonne_date,
    Q = !!colonne_debit
  ) %>%
  mutate(
    logQ = log(Q),
    t = as.numeric(difftime(datetime, min(datetime), units = "days"))
  )

# ANALYSE
# Dates de segmentation (à adapter selon la période étudiée)
datedebut <- "2005-09-11 03:00:00"
alpha2 <- "2005-09-11 14:00:00"
alpha3 <- "2005-09-14 04:00:00"
datefin <- "2005-09-15 20:00:00"

# Extraction des données sur la période
tarissement <- df %>%
  filter(datetime >= datedebut, datetime <= datefin) %>%
  mutate(
    t = as.numeric(difftime(datetime, min(datetime), units = "hours")),
    logQ = log(Q)
  )
```

```

# Segmentation en trois parties
seg1 <- tarissement %>% filter(datetime >= ymd_hms(datedebut), datetime <
ymd_hms(alpha2))
seg2 <- tarissement %>% filter(datetime >= ymd_hms(alpha2), datetime <=
ymd_hms(alpha3))
seg3 <- tarissement %>% filter(datetime >= ymd_hms(alpha3), datetime <=
ymd_hms(datefin))
# Régressions linéaires sur log(Q)
lm1 <- lm(logQ ~ t, data = seg1)
lm2 <- lm(logQ ~ t, data = seg2)
lm3 <- lm(logQ ~ t, data = seg3)
# Coefficients alpha (k)
k1 <- -coef(lm1)["t"]
k2 <- -coef(lm2)["t"]
k3 <- -coef(lm3)["t"]

# Débits initiaux Q0
Q0_1 <- exp(coef(lm1)["(Intercept)"])
Q0_2 <- exp(coef(lm2)["(Intercept)"])
Q0_3 <- exp(coef(lm3)["(Intercept)"])
# Affichage des valeurs
cat("Alpha (k) pour chaque segment :\n",
    "Segment 1 : k1 =", round(k1, 5), "\n",
    "Segment 2 : k2 =", round(k2, 5), "\n",
    "Segment 3 : k3 =", round(k3, 5), "\n")
cat("Débit initial (Q0) pour chaque segment :\n",
    "Segment 1 : Q0 =", round(Q0_1, 5), "m³/s\n",
    "Segment 2 : Q0 =", round(Q0_2, 5), "m³/s\n",
    "Segment 3 : Q0 =", round(Q0_3, 5), "m³/s\n")
# Graphique
plot_tarissement <- ggplot(tarissement, aes(x = t, y = Q)) +
  geom_line(color = "blue") +
  geom_line(data = seg1, aes(y = exp(predict(lm1))), color = "red", size = 1.1) +
  geom_line(data = seg2, aes(y = exp(predict(lm2))), color = "orange", size = 1.1) +
  geom_line(data = seg3, aes(y = exp(predict(lm3))), color = "green", size = 1.1) +
  scale_y_log10() +
  labs(
    title = paste("Courbe de tarissement -", nom_station),
    subtitle = paste("3 segments -", substr(datedebut, 1, 10), "au", substr(datefin, 1, 10)),
    x = "Temps (h)", y = "Débit (m³/s, échelle log)"
  ) +
  theme_minimal()
print(plot_tarissement)
# Enregistrement
resultats <- data.frame(
  Station = nom_station,
  Date_debut = datedebut,

```



```

Alpha2  = alpha2,
Alpha3  = alpha3,
Date_fin = datefin,
k1 = round(k1, 5), Q0_1 = round(Q0_1, 5),
k2 = round(k2, 5), Q0_2 = round(Q0_2, 5),
k3 = round(k3, 5), Q0_3 = round(Q0_3, 5),
stringsAsFactors = FALSE
)
# Fichier Excel de sortie
chemin_fichier_excel <- "C://Documents//AMASTER2//Mémoire//Partie Hydro//Analyse
hydro//Etiages//tarissement_résultats.xlsx"
nom_feuille <- "résultats"
if (file.exists(chemin_fichier_excel)) {
  wb <- loadWorkbook(chemin_fichier_excel)
  if (nom_feuille %in% names(wb)) {
    donnees_existantes <- read.xlsx(wb, sheet = nom_feuille)
    donnees_mises_a_jour <- rbind(donnees_existantes, resultats)
  } else {
    addWorksheet(wb, nom_feuille)
    donnees_mises_a_jour <- resultats
  }
  writeData(wb, sheet = nom_feuille, x = donnees_mises_a_jour, withFilter = TRUE)
} else {
  wb <- createWorkbook()
  addWorksheet(wb, nom_feuille)
  writeData(wb, sheet = nom_feuille, x = resultats, withFilter = TRUE)
}
saveWorkbook(wb, chemin_fichier_excel, overwrite = TRUE)
dev.off()

```

12.4 ANNEXE 4 : CODE BATHYMÉTRIE À L'AIDE DE DEUX LIDARS (UN AVANT ET UN APRÈS LE CASTOR) EN PYTHON SUR VSCODE

```
# Librairies

import os
import geopandas as gpd
import rasterio
import numpy as np
import matplotlib.pyplot as plt
from rasterio.mask import mask

# Chemins des fichiers
mnt_2013_path = r"C:\Documents\AMASTER2\Mémoire\Bathymétrie\Bathymétrie
Chalet\MNT13ChaletTif.tif"
mnt_2025_path = r"C:\Documents\AMASTER2\Mémoire\Bathymétrie\Bathymétrie
Chalet\MNTjuinChaletResample.tif"
bassin_shp_path = r"C:\Documents\AMASTER2\Mémoire\Bathymétrie\Bathymétrie
Chalet\BassinsJuinWGS.shp"

# Fonctions pour charger les données
def load_shapefile(shp_path):
    return gpd.read_file(shp_path)

def load_raster(raster_path):
    with rasterio.open(raster_path) as src:
        return src.read(1), src.profile, src

def crop_raster(raster_src, shapes):
    with rasterio.open(raster_src) as src:
        out_image, out_transform = mask(src, shapes, crop=True)
    return out_image[0], out_transform

# Chargement des données
df_bassins = load_shapefile(bassin_shp_path)
mnt_2013, profile_2013, src_2013 = load_raster(mnt_2013_path)
mnt_2025, profile_2025, src_2025 = load_raster(mnt_2025_path)
# Découpage des rasters selon l'emprise des bassins
mnt_2013_cropped, transform2013 = crop_raster(mnt_2013_path, df_bassins.geometry)
mnt_2025_cropped, transform2025 = crop_raster(mnt_2025_path, df_bassins.geometry)
# Sauvegarde des rasters
for arr, profile, fname in zip([mnt_2013_cropped, mnt_2025_cropped],
                               [profile_2013, profile_2025],
                               ["fond_bassin.tif", "surface_eau.tif"]):
    profile.update({"dtype": "float32"})
    with rasterio.open(fname, "w", **profile) as dst:
        dst.write(arr.astype(np.float32), 1)
# Remplacement des valeurs NoData par NaN
seuil_nodata = -1e30
for arr in [mnt_2013_cropped, mnt_2025_cropped]:
```

```

arr[arr < seuil_nodata] = np.nan
# Calcul des volumes et surfaces
volumes = {}
with rasterio.open(mnt_2013_path) as src_2013, rasterio.open(mnt_2025_path) as src_2025:
    for idx, bassin in df_bassins.iterrows():
        geom = [bassin.geometry]
        nom_bassin = bassin["Nom"]
        print(f'Bassin {idx} : nom = {nom_bassin}')

        fond_bassin, fond_transform = mask(src_2013, geom, crop=True,
nodata=src_2013.nodata)
        surface_eau, surface_transform = mask(src_2025, geom, crop=True,
nodata=src_2025.nodata)

        # Recadrage si tailles différentes
        min_rows = min(fond_bassin.shape[1], surface_eau.shape[1])
        min_cols = min(fond_bassin.shape[2], surface_eau.shape[2])
        fond_bassin = fond_bassin[:, :min_rows, :min_cols]
        surface_eau = surface_eau[:, :min_rows, :min_cols]

        # NoData -> NaN
        fond_bassin[fond_bassin == src_2013.nodata] = np.nan
        surface_eau[surface_eau == src_2025.nodata] = np.nan

        # Calcul de la hauteur d'eau et du volume
        hauteur_eau = surface_eau - fond_bassin
        hauteur_eau[np.isnan(fond_bassin) | np.isnan(surface_eau)] = np.nan
        pixel_area = abs(fond_transform[0] * fond_transform[4])
        volume = np.nansum(hauteur_eau * pixel_area)
        n_pixels_valides = np.count_nonzero(~np.isnan(hauteur_eau))
        surface_bassin = bassin.geometry.area

        volumes[f'Bassin_{idx}'] = {"volume": volume, "surface": surface_bassin, "pixels":
n_pixels_valides}

        # Affichage de la hauteur d'eau
        plt.figure(figsize=(8, 6))
        plt.imshow(hauteur_eau[0], cmap='Blues')
        plt.colorbar(label="Hauteur d'eau (m)")
        plt.title(f'{nom_bassin} - Hauteur d'eau')
        plt.axis("off")
        plt.show()

# Résultats
for bassin, data in volumes.items():
    print(f'{bassin}: Volume = {data["volume"]:.2f} m³, Surface = {data["surface"]:.2f} m²,
Pixels = {data["pixels"]}')

```