

Mémoire

Auteur : Dethier, Marine

Promoteur(s) : Houbrechts, Geoffrey; 27934

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/2268.2/22987>

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

L'ouverture du gouffre de Belvaux et la capture souterraine de la Lesse : chronologie et impacts géomorphologiques et archéologiques

Mémoire présenté par : **Marine DETHIER**

pour l'obtention du titre de

**Master en sciences géographiques, orientation Global Change à finalité
approfondie géomorphologie et risques naturels**

Année académique :
Date de défense :

2024-2025
Juin 2025

Président de jury :
Promoteurs :
Jury de lecture :

Pr. Xavier FETTWEIS
Pr. Geoffrey HOUBRECHTS
Dr. Christophe DELAERE
Pr. Aurélia HUBERT
Dr. Jean VAN CAMPENHOUT



Faculté des sciences
Département de géographie

L'ouverture du gouffre de Belvaux et la capture souterraine de la Lesse : chronologie et impacts géomorphologiques et archéologiques

Mémoire présenté par : **Marine DETHIER**

pour l'obtention du titre de

**Master en sciences géographiques, orientation Global Change à finalité
approfondie géomorphologie et risques naturels**

Année académique :
Date de défense :

2024-2025
Juin 2025

Président de jury :
Promoteurs :
Jury de lecture :

Pr. Xavier FETTWEIS
Pr. Geoffrey HOUBRECHTS
Dr. Christophe DELAERE
Pr. Aurélia HUBERT
Dr. Jean VAN CAMPENHOUT

Remerciements

Je tiens particulièrement à remercier mon promoteur, Geoffrey Houbrechts, et mon co-promoteur, Christophe Delaere, pour leur disponibilité, leur implication et leurs précieux conseils, qui ont contribués à la bonne réalisation de ce travail.

Ce mémoire n'aurait pas vu le jour sans l'aide du Domaine des Grottes de Han, et je remercie tout particulièrement Jean-François Collin, directeur technique, de nous avoir permis de travailler dans ce cadre exceptionnel.

De manière générale, je tiens à remercier tous les membres du Laboratoire d'Hydrographie et de Géomorphologie Fluviale pour l'accompagnement lors des journées de terrain, l'aide dans certains traitements de données et les nombreuses analyses en laboratoire. Merci à Jean, Robin, Ellynn et Eve.

Je suis également reconnaissante envers Etienne Juvigné pour le temps qu'il m'a accordé, les analyses effectuées et le partage de ses connaissances. Mes remerciements vont également à Thomas Lecocq, sismologue à l'Observatoire Royal de Belgique, pour l'aide apportée sur le terrain lors la réalisation de profils tomographiques.

J'aimerai également exprimer ma reconnaissance à mes amis, pour leur soutien, leurs encouragements, leur aide sur le terrain, et l'intérêt qu'ils ont porté à ce travail. Ces années d'études auraient certainement été bien plus difficiles sans leur présence à mes côtés.

Enfin, je tiens à exprimer ma sincère gratitude à ma famille pour leur soutien indéfectible tout au long de mon parcours universitaire, et particulièrement à ma maman et à mon frère, qui m'ont toujours encouragée et permis de mener à bien mes études dans les meilleures conditions possibles.

Résumé

Le site karstique de Han-sur-Lesse, situé en Calestienne, présente une configuration géomorphologique unique où la Lesse s'engouffre dans le système karstique au gouffre de Belvaux, plus grande perte d'Europe occidentale. Ce phénomène a profondément modifié l'organisation hydrologique et sédimentaire de la vallée de la Chavée, en aval immédiat de la perte. Toutefois, la chronologie précise de l'ouverture du gouffre de Belvaux ainsi que les impacts qui l'accompagnent demeurent incertains. Cette étude vise à mieux comprendre la dynamique d'ouverture du gouffre de Belvaux et ses conséquences sur les processus de sédimentation, les écoulements de surfaces et l'occupation humaine de la vallée.

Pour ce faire, une approche pluridisciplinaire a été mise en place. Elle combine l'étude de sondages sédimentaires, des levés de coupes de berges, des profils tomographiques et une analyse topographique. À cela s'ajoutent des analyses granulométriques et sédimentologiques, ainsi que l'étude d'événements de crue récents. Les datations radiocarbone d'éléments organiques trouvés dans les dépôts ont permis de caler chronologiquement les principales phases d'évolution du système.

Les résultats montrent une succession d'événements d'incision dans la plaine alluviale, conséquences de captures successives. L'analyse altimétrique des niveaux de cailloutis suggère que le Trou d'Enfaule, autre perte située en aval du gouffre de Belvaux, aurait été actif avant l'ouverture du gouffre de Belvaux, indiquant une dynamique d'ouverture régressive des différentes pertes situées sur le site. L'acquisition d'images par drone lors d'un épisode de crue actuel a permis la cartographie de l'étendue d'une crue et la confirmation de la présence d'une zone lacustre au gouffre de Belvaux, lié à un barrage naturel créé par une basse terrasse recouverte par des colluvions du méandre du Chesson.

Différentes datations issues d'études antérieures, combinées aux résultats sédimentaires obtenus dans ce travail, suggèrent que le système karstique était déjà partiellement fonctionnel avant 3000 BP. Toutefois, deux datations ^{14}C indiquent que la dernière phase d'ouverture significative du gouffre de Belvaux est comprise entre 2000 BP et 3000 BP. L'interprétation de la dynamique passée reste néanmoins complexe en raison de l'imbrication des processus alluviaux, colluviaux et karstiques, qui rendent difficilement distinguables les phases d'activité et les périodes de blocage temporaire du gouffre.

Ce travail met en lumière la complexité de l'évolution du système karstique de Han-sur-Lesse. Il illustre l'intérêt d'une approche croisée entre géographie physique, archéologie et géochronologie pour comprendre les interactions entre surface et souterrain.

Abstract

The karst site of Han-sur-Lesse, located in the Calestienne region, exhibits a unique geomorphological configuration where the Lesse River disappears into the karst system at the Chasm of Belvaux, the largest karst swallow hole in Western Europe. This phenomenon has profoundly reshaped the hydrological and sedimentary organization of the Chavee Valley, located immediately downstream from swallow hole. However, the precise timing of the opening of the Chasm of Belvaux, as well as the associated impacts, remains uncertain. This study aims to better understand the dynamics of the swallow hole's opening and its consequences on sedimentation processes, surface water flow, and human occupation of the valley.

To this end, a multidisciplinary approach was employed, combining the study of sediment cores, bank section survey, tomographic profiles, and topographic analyses. These were complemented by granulometric and sedimentological analyses, as well as the study of recent flood events. Radiocarbon dating of organic materials found within the deposits enabled the chronological reconstitution of the system's main phases of evolution.

The results reveal a series of incision events in the alluvial plain, indicative of successive stream captures. Altimetric analysis of gravel levels suggests that the "Trou d'Enfaule", another sinkhole located downstream from the Belvaux swallow hole, was active prior to the opening of the Belvaux feature. This indicates a regressive opening dynamic of the various sinkholes present on the site. Drone imagery acquired during a recent flood event enabled the mapping of the flood extent and confirmed the presence of a lacustrine area at the Belvaux swallow hole, associated with a natural dam formed by a low terrace covered with colluvium from the Chesson meander.

Radiocarbon dates from previous studies, combined with the sedimentary results obtained in this work, suggest that the karst system was already partially functional before 3000 BP. However, two radiocarbon dates indicate that the most recent significant phase of opening of the Belvaux swallow hole occurred between 2000 BP and 3000 BP. The interpretation of past dynamics remains complex due to the interweaving of alluvial, colluvial, and karstic processes, which makes it difficult to distinguish between active phases and periods of temporary blockage of the swallow hole.

This study highlights the complexity of the evolutionary history of the Han-sur-Lesse karst system. It illustrates the value of an interdisciplinary approach combining physical geography, archaeology, and geochronology to better understand surface-subsurface interactions.

TABLE DES MATIERES

Remerciements	4
Résumé	5
Abstract	6
Table des Figures.....	9
Table des Tableaux.....	11
Partie I : Introduction	12
I-1. Généralité et présentation de la problématique	13
Partie II : Contexte et Etat de l'art.....	15
II-1. Description de la zone géographique	16
II-2. Contexte climatique	19
II-3. Contexte historique et archéologique.....	20
II-4.1. Traces archéologiques sur le site.....	20
II-4.2. Traceur sidérurgique	21
II-4. État de l'art.....	22
Partie III : Méthodologie	25
III-1. Carottages	26
III-2. Ouverture des carottes sédimentaires.....	28
III-3. Granulométrie et observations au binoculaire.....	29
III-4. Levé de coupes.....	33
III-5. Données topographiques	33
III-5.1. RTK – Real Time Kinematic.....	33
III-5.2. LiDAR – Light Detection and Ranging	33
III-5.3. Station totale.....	34
III-5.4. Réalisation d'un profil en long.....	34
III-6. Tomographie	35
III-7. Données hydrologiques.....	37
III-8. Dépôt de crues.....	38
III-9. Matière en suspension.....	39
III-10. Acquisition d'images drone	41
III-11. Perte au feu	42
III-12. Attaque eau oxygénée.....	42
III-13. Recherche de présence de téphra dans des échantillons	43
III-12.1. Préparation des échantillons	43
III-12.2. Détermination si présence de téphra ou non	43
III-14. Calcul de récurrence d'événements hydrologiques	44

III-14.1.	Loi de Gumbel.....	44
III-14.2.	Calcul de la période de retour des crues avec une série annuelle.....	45
III-14.3.	Calcul de la période de retour des crues avec une série partielle	45
III-14.4.	Détermination de débits caractéristiques.....	45
Partie IV – Résultats.....		47
IV-1.	Profils de carottages.....	48
IV-1.1.	HSL-P1.....	48
IV-1.1.1.	Niveau de cailloutis & Profils topographique et tomographique	48
IV-1.1.2.	Granulométrie.....	50
IV-1.2.	HSL-P5.....	59
IV-1.3.	HSL-P2.....	60
IV-1.4.	HSL-P3.....	62
IV-1.5.	HSL-P4.....	65
IV-1.6.	BEL-P0.....	67
IV-1.6.1.	Niveau de cailloutis & Profils topographique et tomographique	67
IV-1.6.2.	Granulométrie.....	71
IV-2.	Levé de coupes.....	75
IV-2.1.	Coupe 1 – Rive gauche en amont du gouffre de Belvaux	75
IV-4.1.	Coupe 2 – Rive gauche Basse terrasse en aval du secteur des Rapides de la Lesse....	76
IV-3.	Profil en long.....	79
IV-4.	Analyse hydrologique	82
IV-4.1.	Caractérisation hydrométrique des événements	82
IV-4.2.	Granulométrie.....	83
IV-4.3.	Concentration en matière organique.....	84
IV-4.4.	Concentration en MES	86
IV-4.1.	Étendue des crues	89
Partie V – Discussion		90
V-1.	Discussion des résultats	91
V-2.	Réponse à la question de recherche	92
V-3.	Autocritique	93
V-4.	Perspectives.....	94
Partie VI – Conclusion		95
Bibliographie.....		97
Annexes.....		102

Table des Figures

Figure 1 : Localisation de Han-sur-Lesse.....	16
Figure 2 : Carte géologique (Bultynck et al., 2001)	17
Figure 3 : Vallée de la Lesse à Han-sur-Lesse : contexte géologique, hydrographique et géomorphologique.....	18
Figure 4: A-Gouffre de Belvaux, B-Trou d'Enfaule et C-La résurgence au Trou de Han	18
Figure 5 : Cartographie des secteurs de prélèvements des datation menées par Timperman et al. (2018)	21
Figure 6 : Localisation des coupes réalisées par J.M. Dricot en 1969 (Dricot, 1969).....	23
Figure 7 : Localisation des coupes étudiées par S. Blockmans et al. en 1999 (Blockmans et al., 1999)	24
Figure 8 : Localisation des sondages.....	26
Figure 9 : Matériel sondage à la tarière	27
Figure 10 : Matériel sondage au carottier.....	28
Figure 11 : Photo du matériel utilisé lors de l'ouverture des carottes sédimentaires	29
Figure 12 : Matériel granulométrie laser - Mastersizer 3000	30
Figure 13 : Montage pour un tamisage sous eau	30
Figure 14 : Matériel utiliser lors des observations des échantillons.....	31
Figure 15 : Image CM originale de Passega (d'après Passega, 1964 dans Houbrechts et al., 2013).....	32
Figure 16 : Localisation du profil en long et de ses différents secteurs	35
Figure 17 : Illustration d'un dispositif quadripolaire (Leuzy, 2008).....	36
Figure 18 : Représentation des électrodes et points de mesures pour le dispositif Wenner (Marescot, 2008).....	36
Figure 19 : Localisation actuelle et passée de la station limnimétrique de Resteigne.....	37
Figure 20: Localisation des prélèvements de dépôts de crue du 08 janvier 2024	38
Figure 21: Matériel de prélèvement de matière en suspension (MES).....	39
Figure 22 : Localisation des sites de prélèvement de MES	40
Figure 23: Matériel pour la filtration - Montage pompe à vide	41
Figure 24 : Profil tomographique HSL-P1	49
Figure 25 : Profil topographique HSL-P1	49
Figure 26 : Nombre de billes sidérurgiques en fonction de la profondeur dans le sondage HSL-P1-13,40m.....	50
Figure 27 : Logs stratigraphiques pour les sondages du profil HSL-P1	51
Figure 28 : Profil vertical des valeurs caractéristiques (D_{50} , D_{99} et taille du plus gros élément) du sondage HSL-P1-13,40m	52
Figure 29 : Profil vertical des valeurs caractéristiques (D_{50} , D_{99} et taille du plus gros élément) moyennées(moyenne mobile centrée sur 10 valeurs) du sondage HSL-P1-13,40m	52
Figure 30 : Image CM de Passega pour le sondage HSL-P1-13,40m	53
Figure 31 : Profil vertical des valeurs caractéristiques (D_{50} , D_{99} et taille du plus gros élément) du sondage HSL-P1-26,90m	54
Figure 32 : Profil vertical des valeurs caractéristiques (D_{50} , D_{99} et taille du plus gros élément) moyennées(moyenne mobile centrée sur 10 valeurs) du sondage HSL-P1-26,90m	55
Figure 33 : Nombre de billes sidérurgiques en fonction de la profondeur dans le sondage HSL-P1-26,90m.....	55
Figure 34 : Image CM de Passega pour le sondage HSL-P1-26,90m	56
Figure 35 : Profil granulométrique vertical brute (A) et moyenné(moyenne mobile centrée sur 10 valeurs) (B) pour le sondage HSL-P1-42m	57
Figure 36 : Profils granulométriques verticaux des valeurs caractéristiques (A- D_{50} et B- D_{99}) moyennés(moyenne mobile centrée sur 10 valeurs) des sondages HSL-P1-13,40m et HSL-P1-26,90m et HSL-P1-26,90m	58

Figure 37 : Profils granulométriques verticaux de la tailles des plus gros éléments moyennés(moyenne mobile centrée sur 10 valeurs) des sondages HSL-P1-13,40m, HSL-P1-26,90m et HSL-P1-26,90m.....	58
Figure 38 : Profil tomographique HSL-P5	59
Figure 39 : Profil topographique HSL-P5	60
Figure 40 : Profil topographique HSL-P2	61
Figure 41 : Profil tomographique HSL-P2	61
Figure 42 : Profil tomographique HSL-P3	63
Figure 43 : Profil topographique HSL-P3	63
Figure 44 : Evolution verticale des éléments les plus grossiers pour les sondages du profil HSL-P3 A-17 m, B-28 m, C-36 m, D-50 m, E-62 m et F-78 m.....	64
Figure 45 : Profil topographique HSL-P4	65
Figure 46 : Evolution verticale des éléments les plus grossiers pour les sondages du profil HSL-P4 ..	66
Figure 47 : Logs stratigraphiques pour les sondages du profil BEL-P0.....	68
Figure 48 : Profil tomographique BEL-P0 (1)	69
Figure 49 : Profil tomographique BEL-P0 (2)	69
Figure 50 : Profil topographique BEL-P0	70
Figure 51 : Déviation entre le profil BEL-P0 de 2018 et BEL-P0 de 2024.....	70
Figure 52 : Profil granulométrique vertical brute(A) et moyenné (moyenne mobile centrée sur 10 valeurs) (B) pour le sondage BEL-P0-37m.....	71
Figure 53 : Profil granulométrique vertical brute (A) et moyenné(moyenne mobile centrée sur 10 valeurs) (B) pour le sondage BEL-P0-44m	72
Figure 54 : Profil granulométrique vertical brute (A) et moyenné (moyenne mobile centrée sur 10 valeurs) (B) pour le sondage BEL-P0-49,50m	73
Figure 55 : Profil granulométrique vertical brute (A) et moyenné (moyenne mobile centrée sur 10 valeurs) (B) pour le sondage BEL-P0-56m.....	74
Figure 56 : Localisation des échantillons de la Coupe 1	75
Figure 57 : Schéma de la coupe 1.....	76
Figure 58 : Schéma de la Coupe 2.....	77
Figure 59 : Localisation des échantillons de la Coupe 2	77
Figure 60 : Résultats des observations pour ½ lame à la recherche d'éléments de téphra pour les échantillons de la Coupe 1.....	78
Figure 61 : Résultats des observations pour ½ lame à la recherche d'éléments de téphra pour les échantillons de la Coupe 2.....	78
Figure 62 : Profil topographique en long depuis le village de Belvaux jusque dans la Chavée	80
Figure 63 : Profil topographique en long depuis la station limnimétrique de Resteigne jusqu'à la confluence avec le Ry d'Ave en passant par la Chavée	81
Figure 64 : Hydrogrammes combinés des épisodes de crue étudiés	83
Figure 65 : Image de Passega pour les dépôts de crue de janvier 2024.....	84
Figure 66 : Pourcentages en matière organique pour les échantillons de MES du 10 octobre 2024.....	85
Figure 67 : Pourcentages en matière organique pour les échantillons de MES de janvier 2025.....	85
Figure 68 : Concentrations en MES pour les échantillons d'octobre 2024.....	86
Figure 69 : Concentrations en MES pour les échantillons de janvier 2025.....	87
Figure 70 : Image drone de la crue 09 janvier 2025 et cartographies de l'étendue de la crue	87
Figure 71 : Episodes de crues dépassant 40 m ³ /s sur la série temporelle 01/01/1969-27/05/2025	88
Figure 72 : Hydrogramme de l'épisode de crue d'octobre 2024 avec prélèvements réalisés le 10/10/2024	88
Figure 73 : Hydrogramme de l'épisode de crue de janvier 2025 avec prélèvements réalisés le 08/01/2025 et le 10/01/2025	88

Table des Tableaux

Tableau 1 : Valeurs de D ₅₀ et D ₉₉ pour les échantillons de dépôt de crue de janvier 2024	83
Tableau 2 : Valeurs de concentration en matière organique pour les échantillons de dépôt de crue de janvier 2024.....	85

Partie I : Introduction

Ce mémoire est rendu dans le cadre de l'obtention du titre de Master en sciences géographiques, orientation Global Change, à finalité approfondie géomorphologie et risques naturels à l'Université de Liège.

Cette première partie va introduire le sujet étudié dans le cadre de ce travail. D'abord, les différents domaines impliqués seront brièvement présentés. Ensuite, suivra une présentation de la problématique de travail ainsi que les motivations qui y sont liées.

I-1. GÉNÉRALITÉ ET PRÉSENTATION DE LA PROBLÉMATIQUE

Les rivières qui traversent les terrains karstiques subissent généralement des pertes hydrologiques plus ou moins importantes qui impactent leur dynamique et leur évolution géomorphologique. Comprendre l'évolution des paysages karstiques est un enjeu clé pour de nombreuses disciplines telles que la géomorphologie, l'hydrologie, la climatologie ou encore l'archéologie (Quinif *et al.*, 2018).

Le site de Han-sur-Lesse constitue un exemple emblématique de karst actif. La Lesse y traverse un système calcaire complexe, s'engouffrant dans le gouffre de Belvaux, l'une des plus grandes pertes d'Europe occidentale avec ses 15 mètres de haut sur 20 mètres de large. Le parcours souterrain de la Lesse fait près de deux kilomètres avant de retrouver la surface au Trou de Han (Michel, 2006 ; Quinif, 2015). Ce fonctionnement interrompt, pendant la plus grande partie de l'année, l'écoulement aérien de la Lesse dans un méandre abandonné appelé la Chavée. Cependant, lors de crues, la capacité d'absorption du gouffre de Belvaux est dépassée forçant temporairement la Lesse à emprunter son ancien tracé de surface. Lorsque ce phénomène se produit, il est dit que la Lesse « tourne » (Deflandre, 1989 ; Quinif, 2015 ; Houbrechts *et al.*, 2025).

Au niveau de son parcours souterrain, la Lesse entre par le gouffre de Belvaux et chute directement dans un siphon de 45 m de profondeur (Bonniver, 2011). Le réseau souterrain est structuré en plusieurs niveaux de galeries, témoignant d'une longue évolution dynamique (Quinif, 1989 ; Fontaine, 2022). Le niveau actuellement actif du réseau est constitué par la galerie inférieure, où s'écoule la Lesse en régime normal. Plus en hauteur, environ 8 à 10 mètres au-dessus de ce niveau, se retrouve la galerie des Verviétois, aujourd'hui fossile. Cette galerie supérieure est marquée par un remplissage sablo-limoneux reposant directement sur le substratum calcaire surmonté d'un complexe stalagmitique important. Ces deux niveaux ne sont pas disjoints car ils sont reliés par des salles et des galeries telles que la salle du Styx ou bien la salle du Vigneron (Quinif, 1989). Toutefois, la présence de ces deux niveaux distincts sont la trace des variations hydrodynamiques qui ont eu lieu au cours du temps dans le système souterrain des grottes de Han-sur-Lesse.

La question de la datation de l'ouverture du gouffre de Belvaux se trouve au centre de cette dynamique. Si plusieurs hypothèses ont déjà été formulées, les données disponibles restent éparses ou indirectes. Les études géomorphologiques de Dricot (1969) ont mis en évidence une stratigraphie complexe des dépôts limoneux, fluviatiles et périglaciaires dans la plaine alluviale en amont du gouffre de Belvaux, qui traduisent une alternance de périodes de blocage et de fonctionnement actif du gouffre. Plus récemment, des carottages et des datations radiocarbonées sur des charbons retrouvés dans les sédiments alluviaux ont permis d'avancer l'hypothèse d'une ouverture postérieure à 4022 ± 27 BP (RICH-34864), soit 2620-2460 cal BC (Houbrechts *et al.*, 2025). Cette proposition, bien que cohérente avec les données disponibles, reste une piste de travail qui devra être consolidée par d'autres analyses, notamment par des datations complémentaires et une analyse plus fine des niveaux stratigraphiques associés.

La problématique de l'ouverture du gouffre de Belvaux dépasse largement le cadre morphologique puisqu'elle a des implications archéologiques et historiques notables sur le site. En effet, plusieurs vestiges mésolithiques et néolithiques ont été retrouvés dans la plaine de la Chavée (Dricot *et al.*, 1969 ; Houbrechts *et al.*, 2025), mais les traces postérieures au néolithique s'y font rares. Cette rupture pourrait être liée à un changement majeur du régime hydrologique, notamment à l'ouverture du gouffre de Belvaux, ayant provoqué l'assèchement de la vallée, et par conséquent, l'abandon de cette zone par les populations humaines. La reconstitution de cette chronologie naturelle de l'ouverture du gouffre permet donc aussi de mieux comprendre l'évolution de l'occupation du territoire. Les recherches menées au niveau de la plaine alluviale en amont du gouffre de Belvaux sont à mettre en lien avec les recherches

qui sont effectuées à la résurgence de la Lesse, au Trou de Han. Depuis 1959, la zone fait l'objet de recherches subaquatiques par le Centre de Recherches Archéologiques Fluviales (CRAF). Des milliers d'artefacts ont été découverts couvrant la période du Néolithiques final avec des objets tels que des cuillères en os, des haches de pierre ou encore des flèches et la période de l'Âge du Bronze avec des épées, des bijoux et des haches qui ont été retrouvés dans la galerie de la Grande Fontaine. Dans la galerie des Petites Fontaines, ont été retrouvés des objets celtiques et romains comme des monnaies, des objets décoratifs, des fibules, etc. (Delaere *et al.*, 2019). Depuis 2012, le CRAF mène un nouveau cycle de fouilles au niveau de la résurgence sous le porche du Trou de Han. La méthodologie utilisée est la mise en place de fouilles ciblées avec un enregistrement stratigraphique complet et la corrélation entre les fouilles anciennes et les nouvelles données (Delaere *et al.*, 2019 ; Delaere *et al.*, 2022).

Pour répondre à la problématique de la datation de la dernière ouverture du gouffre de Belvaux ainsi que ses impacts géomorphologiques et archéologiques, une approche interdisciplinaire a été adoptée dans le cadre de ce mémoire de fin d'études. Celle-ci mobilise des outils de géographie physique, des analyses sédimentologiques, des analyses géochronologiques (datation radiocarbone), ainsi que des données issues de l'archéologie de surface et de l'étude des archives endokarstiques (Blockmans *et al.*, 1999 ; Verheyden *et al.*, 2006). Cette méthodologie croisée permet d'appréhender plus finement les processus qui ont structuré le système Lesse-Belvaux-Chavée au cours des derniers millénaires.

Partie II : Contexte et Etat de l'art

Cette deuxième partie vise à décrire la zone d'étude selon les aspects géographiques, géologiques et hydrologiques. Le contexte climatique, qui a influencé la région au cours des derniers millénaires, sera également pris en compte.

Afin de mettre en relation l'ouverture du gouffre et les impacts archéologiques observés sur le site, un bref inventaire des recherches archéologiques menées à Han-sur-Lesse sera réalisé.

Enfin, le site des grottes de Han-sur-Lesse et sa plaine alluviale ayant déjà fait l'objet de plusieurs études portant sur son évolution, un état de l'art de ces travaux et de leurs résultats sera présenté.

II-1. DESCRIPTION DE LA ZONE GÉOGRAPHIQUE

Le site de l'étude se situe entre le village de Belvaux et le village de Han-sur-Lesse, sur la commune de Rochefort, dans la province de Namur (Figure 1). La Lesse, qui prend sa source en Ardenne à proximité de Ochamps, à l'ouest de Libramont, traverse, dans la partie médiane de son cours, la Calestienne entre Resteigne et Han-sur-Lesse, où elle est influencée par de nombreux phénomènes karstiques.

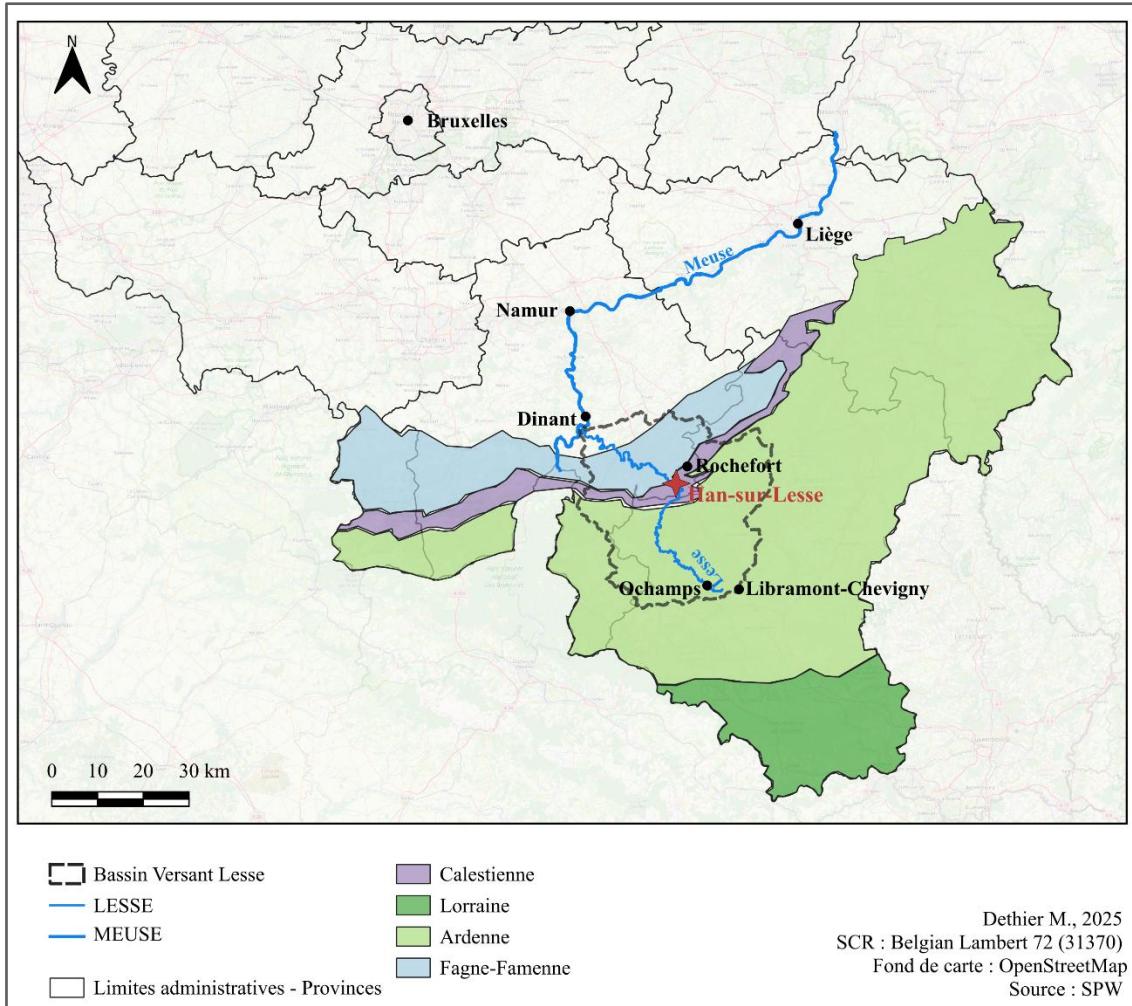


Figure 1 : Localisation de Han-sur-Lesse

La Lesse, avec un parcours de 89 km, est un affluent majeur de la Meuse qui se jette en rive droite à Anseremme. La Lesse prend sa source en Ardenne entre Recogne et Ochamps dans la commune de Libin. Dans la partie amont de son bassin versant, elle draine le substratum constitué de roches du Dévonien inférieur (Quinif *et al.*, 2018) composé de schistes, de phyllades, de grès et de quartzites primaires (Franchimont, 1993). À ce stade, la Lesse s'écoule avec une direction nord-ouest sur une surface d'érosion formée durant le Tertiaire au Paléogène. À l'approche du village de Resteigne (BV = 345 km² (Petit *et al.*, 2005)), la Lesse rencontre des calcaires eifeliens et givetiens de la Calestienne. Cette unité géologique forme un long banc calcaire situé entre 280 et 300 m d'altitude, qui marque la marge nord-ouest du massif ardennais. À ce niveau, le paysage est fortement influencé par la structure géologique plissée avec des crêtes calcaires correspondant aux formations du Givétien et de dépressions creusées dans les schistes de l'Eifelien ou du Frasnien (Poty, 1976, cité dans Quinif *et al.*, 2018, p.140 ; Van De Poel, 1968). La Lesse prend une direction nord-est et traverse un premier massif calcaire pour

ensuite traverser la dépression schisteuse de Belvaux (Quinif, 2015). En aval, la Lesse franchit le massif calcaire de Han appelé massif de Boine où la dynamique karstique y est très active. Pour finir, la Lesse entre dans la région du Condroz. En amont de Gendron (1265 km²) le bassin de la Lesse est constitué majoritairement (64%) de roches quartzo-schisto-phyllades mais également de 28% de schistes, 6% de calcaires carbonifères dinantiens et 2% de grès et quartzites du Famennien supérieur (Vereeरstraeten, 1970). Enfin, la Lesse finira par rejoindre la Meuse au niveau de Anseremme (Franchimont, 1993).

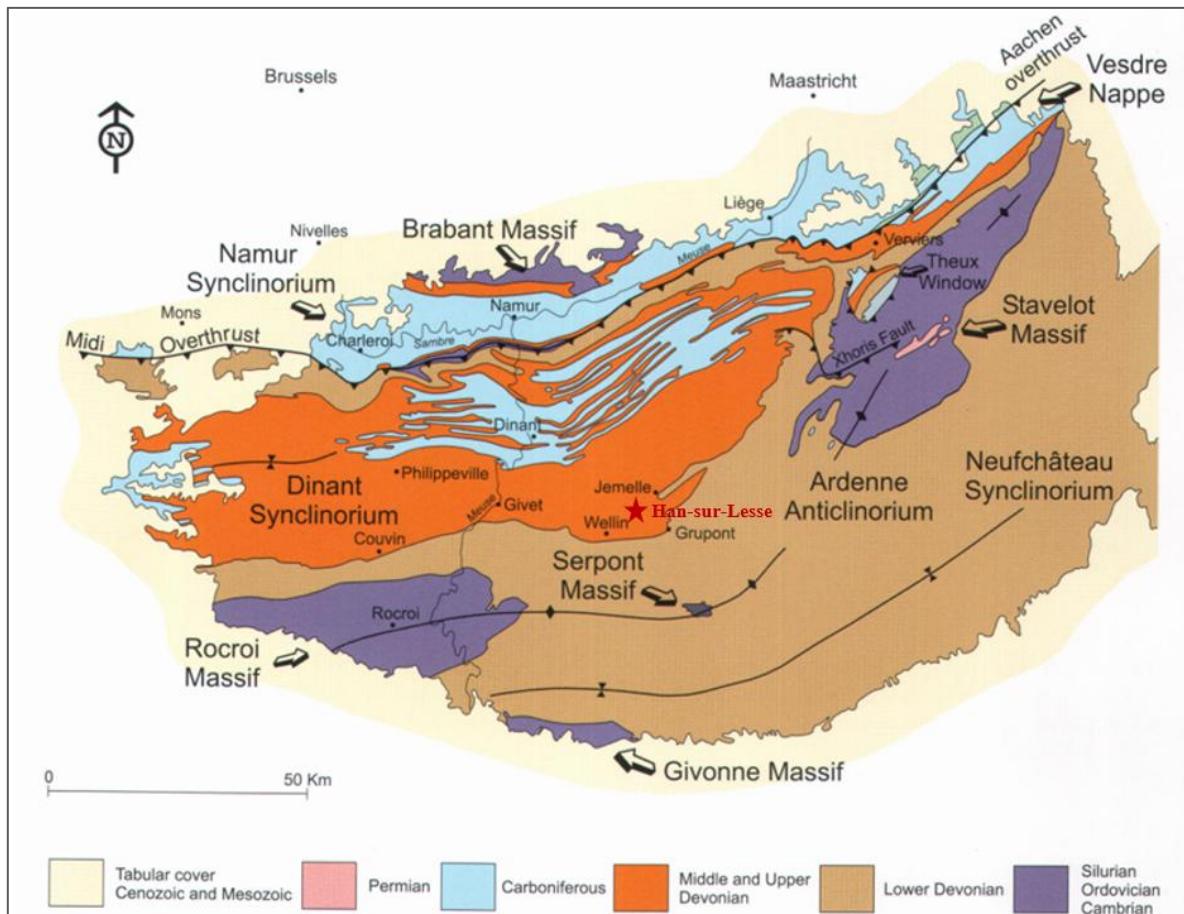


Figure 2 : Carte géologique (Bultynck et al., 2001)

Au niveau de la structure géologique, la région de Han-sur-Lesse est constituée d'une succession d'anticlinaux et de synclinaux. Les anticlinaux sont au nombre de deux, l'anticlinal de Roptai et l'anticlinal de Wavreille. Ces derniers ont une direction générale est-ouest avec un ennoiement vers l'ouest (Figure 3) (Van De Poel, 1968 ; Quinif *et al.*, 2018 ; Houbrechts *et al.*, 2025). Ces deux anticlinaux sont séparés par deux synclinaux passant au nord de Han-sur-Lesse et par Belvaux pour former un pli en S (Van De Poel, 1968).

Du point de vue hydrologique, la région de Han-sur-Lesse se caractérise par un système karstique complexe, marqué par la présence de nombreuses pertes et résurgences. Au niveau de la zone d'étude, nous nous intéressons, dans un premier lieu, à la perte du gouffre de Belvaux. (Figures 3 & 4). Cette perte présente des dimensions impressionnantes avec un porche de plus de 15 m de haut et 20 m de large (Michel, 2006). De par sa taille, la capacité d'absorption de cette perte peut atteindre une valeur maximale de débit de 25 m³/s. Le débit d'étiage à cet endroit est de l'ordre de 1 m³/s (Deflandre, 1989 ; Quinif, 2015). Lors de fortes crues, le gouffre de Belvaux ne peut absorber la totalité de l'eau et la Lesse reprend son ancien cours aérien dans la Chavée. Elle atteint alors une seconde perte, le Trou d'Enfaule (Figures 3 & 4) qui peut absorber jusqu'à 7 m³/s (Deflandre, 1989 ; Quinif, 2015). Ensuite, il y a la présence d'une troisième zone de pertes qui est située au sein même du lit de la Chavée au contact des

schistes et du calcaire. Cette perte diffuse peut absorber jusqu'à 8 m³/s. Une fois ces trois pertes saturées, la Lesse reprend entièrement son ancien tracé dans la Chavée jusqu'au Trou de Han, résurgence de la Lesse (Figures 3 & 4) (Deflandre, 1989).

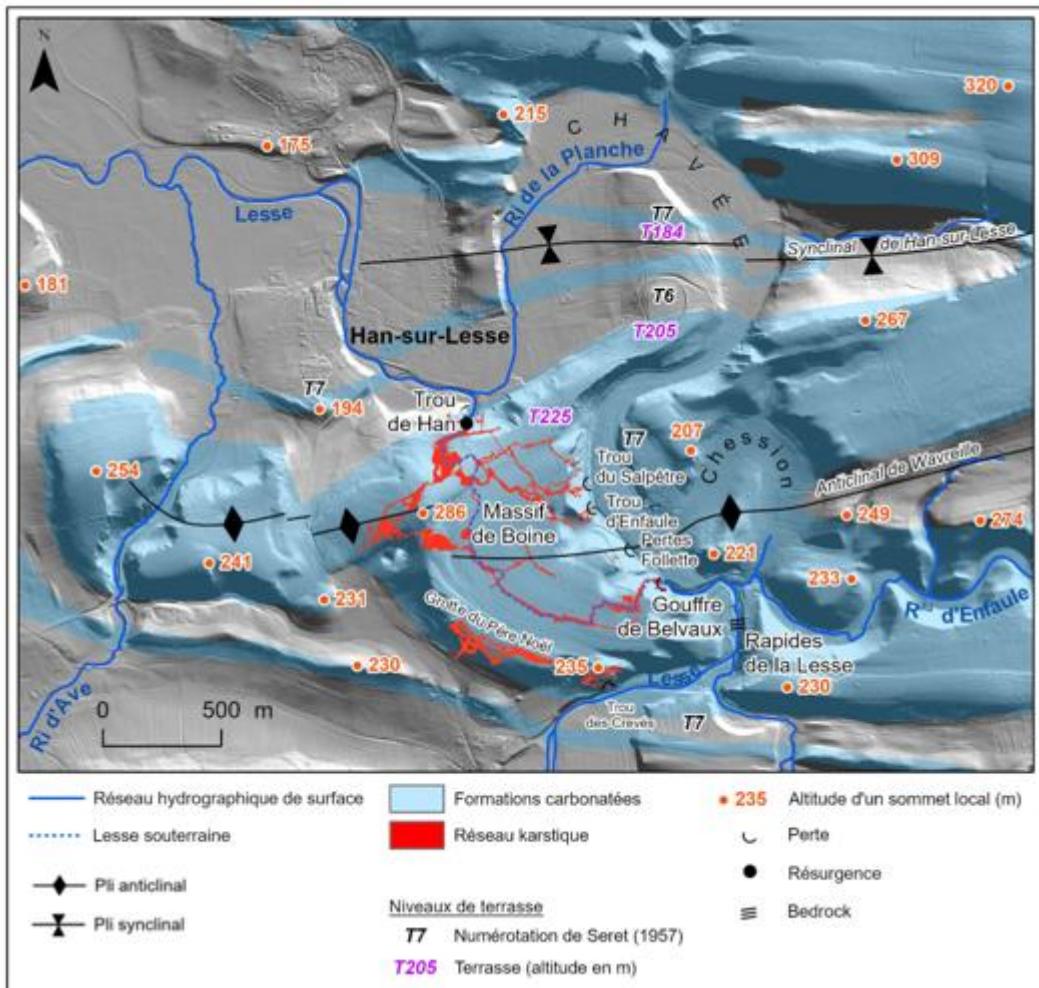


Figure 3 : Vallée de la Lesse à Han-sur-Lesse : contexte géologique, hydrographique et géomorphologique (Houbrechts et al., 2025)

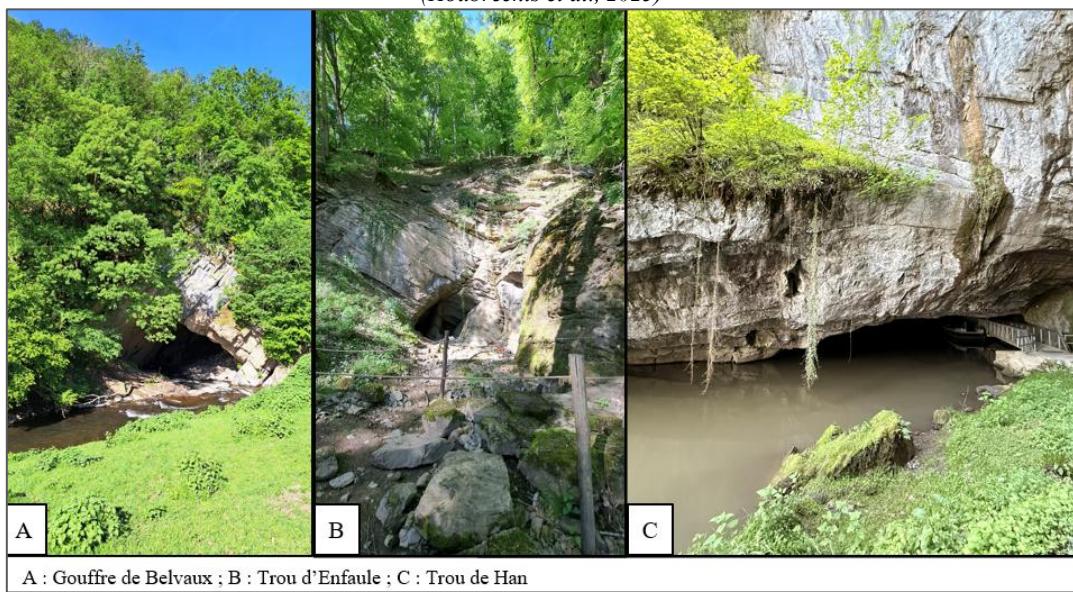


Figure 4: A-Gouffre de Belvaux, B-Trou d'Enfaule et C-La résurgence au Trou de Han

II-2. CONTEXTE CLIMATIQUE

Le paysage actuel a été façonné dans des contextes climatiques qui ont évolué au cours du Tertiaire et du Quaternaire, avec des alternances des plusieurs périodes glaciaires et interglaciaires au cours du Quaternaire. Le soulèvement tectonique régional a également eu son impact sur l'incision fluviale (Rixhon *et al.*, 2011). Ainsi, les fluctuations climatiques et tectoniques régionales ont contrôlé la mise en place progressive du réseau hydrographique et la formation de terrasses alluviales, témoins de différents niveaux de la Lesse.

Les deux dernières grandes glaciations du Quaternaire correspondent aux stades isotropiques marins MIS 6 à 8 et MIS 2 à 4, datant respectivement de 200 000 à 130 000 ans avant notre ère et 115 000 à 11 700 ans avant notre ère. Ces périodes froides ont connu des fluctuations climatiques importantes. En Belgique, bien que les glaciers n'aient pas recouvert le territoire, la proximité des calottes a induit un climat périglaciaire (Pissart, 1987). Ces conditions ont favorisé des processus typiquement périglaciaires, tels que la gélification, la solifluxion et la déflation éolienne, qui ont remodelé les versants et accumulé des matériaux dans les fonds de vallée (Pissart, 1987). Le couvert végétal y était faible, exposant les sols aux agents de transport de masse (Van De Poel, 1968 ; Pissart, 1989). Les rivières transportant une charge grossière importante formaient des terrasses alluviales liées à des phases de stockage et de réorganisation sédimentaire en période de réchauffement (Pissart, 1987). Au niveau du gouffre de Belvaux, il est probable que des embâcles de glace, des colluvions ou des éboulis aient temporairement obstrué l'entrée du réseau souterrain modifiant localement l'écoulement de la Lesse (Dricot, 1969). Les grottes de Han-sur-Lesse existaient déjà avant ces phases glaciaires, comme en témoignent les remplissages sédimentaires plus anciens piégés dans les galeries et les analyses paléomagnétiques (Quinif *et al.*, 1994 ; Quinif, 1996 ; Blockmans *et al.*, 1999 ; Vansteenberg *et al.*, 2016).

Entre ces phases froides, les périodes interglaciaires telles que celles correspondant au MIS 5 datant de 130 000 à 115 000 ans avant notre ère, étaient marquées par un climat plus chaud et humide, proche de celui de l'Holocène (Vansteenberg *et al.*, 2016). Ces conditions favorisaient la recolonisation végétale, la stabilisation des versants, une augmentation de l'érosion chimique, ainsi que la reprise de l'érosion verticale des cours d'eau et l'incision par déstockage sédimentaire (Van De Poel, 1968 ; Blockmans *et al.*, 1999).

Ces alternances climatiques ainsi que l'érosion régressive due à l'incision de la Meuse et le soulèvement progressif du massif ardennais durant le Quaternaire se traduisent dans la morphologie de la vallée de la Lesse, par plusieurs niveaux de terrasses alluviales. Ceux-ci se sont formés lors de périodes de stabilité de la rivière (Houbrechts *et al.*, 2025).

On distingue dans la Chavée, trois niveaux de terrasses. Tout d'abord, les plus haut replats, situés vers 220-225 m d'altitude. Ce niveau est considéré comme un niveau d'aplanissement partiel avec présence de galets ardennais localement (Houbrechts *et al.*, 2025). Ensuite, la terrasse T6 (Seret, 1963), située à 205 m d'altitude correspond à un second niveau sur lequel on retrouve des dépôts fluviatiles composés de galets de grès, de quartz et de quartzite (Houbrechts *et al.*, 2025). La terrasse T7 (Seret, 1963) à 184 m d'altitude marque un niveau plus récent dans la dynamique d'incision de la Lesse. Enfin, les terrasses inférieures situées en fond de vallée, à moins de 10 m au-dessus du niveau altimétrique actuel de la Lesse (Houbrechts *et al.*, 2025), se caractérisent par des dépôts grossiers et mal triés (Van De Poel, 1968).

À la suite des phases glaciaires, les rivières ardennaises, dont la Lesse, ont connu une incision post-glaciaire marquée dès le Tardiglaciaire (MIS 2) et qui s'est poursuivie durant l'Holocène (MIS 1) (Denis *et al.*, 2013). Cette période est caractérisée par une succession d'épisodes d'incision et d'aggradation en réponse aux variations climatiques mais aussi à des influences anthropiques croissantes dès le Néolithique (Denis *et al.*, 2013). Les archives sédimentaires préservées dans les fonds de vallées témoignent de ces changements, à travers des alternances de dépôts organiques, colluviaux et sableux (Denis *et al.*, 2013). L'incision fluviale holocène a ainsi largement contribué à la structuration actuelle du réseau hydrographique, avec des lits plus profondément incisés.

II-3. CONTEXTE HISTORIQUE ET ARCHÉOLOGIQUE

II-3.1. TRACES ARCHÉOLOGIQUES SUR LE SITE

La plaine alluviale au niveau du gouffre de Belvaux était autrefois une zone agricole et pastorale. En 1969, Albert Hénin et Maurice Evrard ont réalisé des prospections de surface au niveau du gouffre de Belvaux, très probablement au niveau de la basse terrasse. Ils y ont retrouvé environ 900 silex, preuve d'une industrie lithique préhistorique (Vrielynck, 2001 in Houbrechts *et al.*, 2025 ; Dricot *et al.*, 1969). Dans la même zone, Dricot et Vermeersch ont réalisé un sondage de 3 m sur 2 m dans le but de localiser l'industrie préhistorique sur le site. Leur analyse stratigraphique a identifié un niveau supérieur, épais de 30 cm, interprété comme le niveau de l'industrie préhistorique (Dircot *et al.*, 1969). Ce niveau correspondrait à un niveau de labour contenant un mélange de matériel mésolithique et néolithique datant entre 11 000 et 4000 BP (Houbrechts *et al.*, 2025). Une confirmation de cette hypothèse est donnée par Michel Fourny (1995) par son étude de 91 pointes et armatures de flèches issues de la grotte de Han-sur-Lesse (Houbrechts *et al.*, 2025).

Ce secteur a connu un changement majeur au début des années 1970, lorsqu'une partie de la Chavée a été privatisée par la SA des grottes de Han dans le but d'y aménager un parc animalier. Cette transformation a mis fin à l'exploitation agricole et pastorale traditionnelle de la Chavée, au profit d'un usage touristique.

Les données archéologiques révèlent une trace d'occupation humaine sur le site de la Chavée durant la Préhistoire, notamment durant le Mésolithique et le Néolithique. Toutefois, des traces d'occupations postérieures s'avèrent plus rares. À l'exception d'une monnaie celtique en or datant du 2^{ème} siècle avant notre ère (cal. 2100 BP) et d'un hémistatère à la fleur (Lallemand, 1994 in Houbrechts *et al.*, 2025), retrouvé en 1943 par George Sion, les vestiges attribuables aux périodes historiques suivantes sont très peu nombreux (Houbrechts *et al.*, 2025). Des tombes mérovingiennes auraient été retrouvées sur les hauteurs de la Chavée et pourraient être corrélées aux vestiges mérovingiens et carolingiens découverts à la résurgence de la Lesse dans le cadre de fouilles subaquatiques (Houbrechts *et al.*, 2025).

Au niveau de la résurgence de la Lesse, des fragments de céramiques, des ossements ainsi que des charbons ont été retrouvés dans des planchers d'occupation calcifiés (Houbrechts *et al.*, 2025). Un charbon (LMC14-53504) retrouvé dans ce plancher situé quelques mètres au-dessus du lit actuel a été daté en 2018 par Michel Timperman et a donné la date de 3000 ± 30 BP, soit 1381-1124 cal. BC, correspondant au Bronze Final (Houbrechts *et al.*, 2025). Plus largement, Michel Timperman a réalisé un total de 24 datations ^{14}C réparties sur 10 secteurs distincts (Figure 5) du réseau karstique de Han-sur-Lesse (Timperman *et al.*, 2018). Les plus anciennes traces datées remontent au Mésolithique (10 000 à 5200 BC), période particulièrement bien représentée dans la Galerie des Petites Fontaines. Plusieurs datations indiquent un « pic » marqué entre 8700 et 7500 BC. Des traces datant du Néolithique (2800-2200 BC) ont ensuite été retrouvées sur le secteur n° 7. Des traces attribuées au Bronze Final (1200-850 BC) ont été retrouvées sur plusieurs secteurs du Trou Salpêtre, à la sortie de la galerie des Petites Fontaines et au niveau du chemin de halage. Pour finir, des traces du Premier Age du Fer (850-450 BC),

du Second Age du Fer (450-50 BC), de la période gallo-romaine (50 BC-300 AD) et du Moyen-Age classique (1000-1300 AD) ont été retrouvées dans la galerie des Petites Fontaines (Timpermans *et al.*, 2018).

L'hypothèse avancée à ce jour serait que la rareté des vestiges post-néolithiques dans la Chavée pourrait s'expliquer par l'assèchement de la Chavée, ce qui rendrait la zone moins attractive et créerait le déplacement de la population de la Chavée vers une zone plus irriguée telle que le Trou de Han à partir de 3000 BP (Houbrechts *et al.*, 2025).

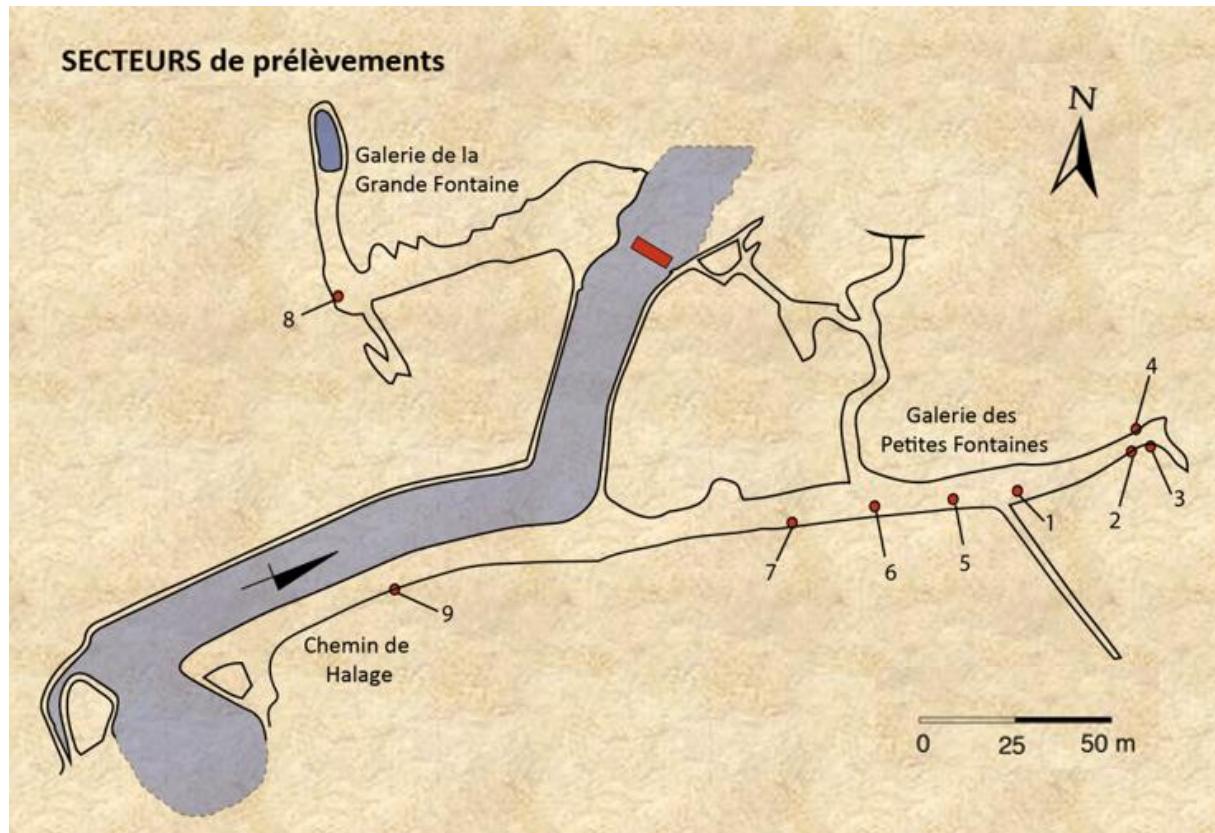


Figure 5 : Cartographie des secteurs de prélèvements des datations menées par Timpermans *et al.* (2018)

II-3.2. TRACEUR SIDÉRURGIQUE

Les microscories et billes métalliques issues des activités sidérurgiques anciennes sont présentes dans les alluvions de la Lesse (Petit *et al.*, 2005 ; Houbrechts, 2020). Dans le cadre de cette étude, les scories seront utilisées comme traceurs chronologiques de la sédimentation en plaine alluviale. Ces particules métallurgiques, essentiellement produites lors de la transformation de la fonte dans les forges d'affinage se présentent sous forme de sphérolites métalliques (de quelques dizaines de microns) ou de microscories vitreuses (fragments millimétriques issus du concassage des scories de haut fourneau). L'intérêt majeur de ces micro-éléments réside dans leur datation indirecte. Leur présence dans les sédiments permet de poser une limite chronologique inférieure pour les dépôts alluviaux, les rendant ainsi utilisables comme marqueurs stratigraphiques fiables (Houbrechts, 2020). La concentration de tels éléments à différentes profondeurs permet d'estimer l'épaisseur des dépôts mis en place depuis le début de l'activité sidérurgique connue. Ainsi, il est possible de calculer un taux de sédimentation moyen sur la période de temps qui s'écoule depuis la mise en place d'une forge impactant le site. Ces micro-traceurs sont également utiles pour détecter d'éventuelles perturbations sédimentaires liées à des événements hydrologiques extrêmes ou à des changements d'affectation du sol dans le bassin versant (Houbrechts, 2020).

L'analyse historique de la sidérurgie régionale indique que le site sidérurgique le plus proche de la zone d'étude correspond à la forge de Neupont, située à Halma à une dizaine de kilomètres en amont du gouffre de Belvaux. Cette forge a été mise en service en 1609 et est restée active pendant environ 250 ans. D'autres forges ont été actives dans la région, notamment la forge de Han-sur-Lesse active au milieu du XVI^{ème} siècle, ainsi que les forges de Grupont et Lamsoul, sur la Lomme, actives de la moitié du XVI^{ème} à la moitié du XVII^{ème} siècle (Weber, 1985; Dierkens *et al.*, 1994). Les forges de Han-sur-Lesse, Grupont et Lamsoul sont situées en aval du site d'étude. Il est donc raisonnable de supposer que les résidus métallurgiques retrouvés au gouffre de Belvaux proviennent de la forge de Neupont et ont été transportés par la Lesse. Toutefois, la possibilité de l'existence d'autres forges plus en amont ne peut pas être complètement exclue. Cette chronologie permet ainsi de considérer les éléments sidérurgiques présents dans les sédiments comme des marqueurs temporels fiables, témoins d'apports anthropiques à partir du début du XVII^e siècle (Weber, 1985; Dierkens *et al.*, 1994).

II-4. ÉTAT DE L'ART

Les travaux effectués par Dricot en 1969 sur le site du gouffre de Belvaux apportent une contribution majeure à la compréhension de l'évolution géomorphologique du secteur. Par une série de coupes stratigraphiques situées en amont du gouffre de Belvaux (Figure 6), et d'analyses sédimentologiques, il reconstruit une séquence paléoenvironnementale illustrant les étapes de fonctionnement et de blocage du gouffre. Dans ces coupes, il distingue trois horizons sédimentaires majeurs. Un premier horizon A, à la base, constitué principalement de limons mais également de cailloutis. Cet horizon correspond à un dépôt fluviatile. Ensuite, au centre, l'horizon B est un horizon périglaciaire montrant de multiples indices d'un dépôt en période froide tels que des structures de redressement de cailloux, des apports du versant calcaire ou encore des traces de solifluxion. Pour finir, l'horizon C, au sommet, est un horizon limoneux homogène lié à un dépôt lacustre en milieu calme très probablement postérieur au blocage du gouffre de Belvaux (Dricot, 1969). La cinquième coupe (IV), située en rive gauche à la sortie du secteur des Rapides de la Lesse, présente une organisation sédimentaire quelques peu différente des coupes précédentes. Cette coupe met en évidence un impressionnant dépôt de gravier quartzitiques et de débris schisteux, dont la taille augmente progressivement vers le haut, suggérant un remblaiement actif et croissant. Ces graviers sont plus ou moins lités et sont maintenus dans une matrice très faible, ce qui indique un dépôt rapide, typique d'un flux à haute énergie en lien avec un régime nival de la Lesse en période froide. Latéralement vers l'aval, ce dépôt s'interrompt de manière brusque avec une pente de 52° qui décroît à 22° à la base. L'interprétation de Dricot face à cette configuration est la présence d'un apex d'un cône de déjection formé à l'amont d'un lac temporaire, conséquence d'un blocage du gouffre de Belvaux pendant une période froide telle que le Würm. Cette hypothèse est renforcée par la présence de concrétions ferrugineuses et manganésifères, suggérant une nappe phréatique située au-dessus du niveau actuel du gouffre. Il observe également une absence de débris calcaires dans le dépôt, pourtant attendus vu la nature des versants environnants (Dricot, 1969). L'ensemble de ces éléments confortent l'idée d'un blocage prolongé du gouffre ayant mené à la formation d'un lac, dans lequel se sont successivement déposés des graviers grossiers à forte énergie, puis des limons plus fins en décantation, marquant le passage d'un système fluviatile actif à un environnement lacustre plus calme, comme illustré dans l'horizon C (Dricot, 1969).

Sur des échantillons prélevés dans les différentes coupes une analyse de la composition des minéraux lourds a été effectuée sur la fraction comprise entre 175 µm et 40 µm inclus (Dricot, 1969). Ceux-ci révèlent la présence d'éléments ubiquistes mais également d'augite, d'eustatite et de basaltène, éléments caractéristiques des retombées volcaniques. Plus particulièrement au niveau de la coupe IV, il y a une absence d'augite et d'eustatite et une très faible quantité de basaltène (E₇₅ & E₇₉, Dricot, 1969).

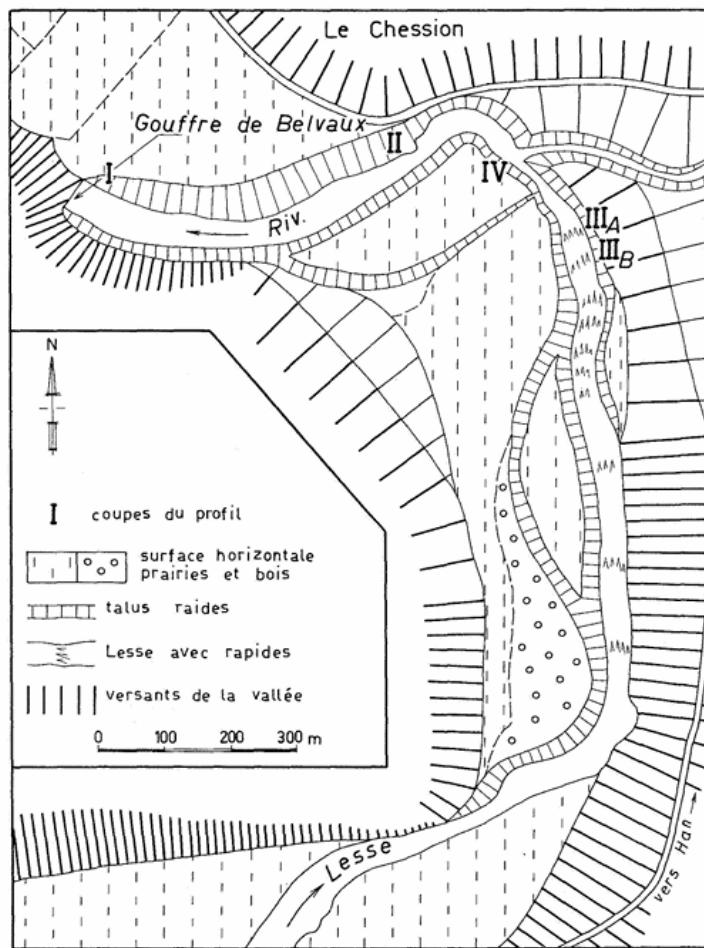


Figure 6 : Localisation des coupes réalisées par J.M. Dricot en 1969 (Dricot, 1969)

Les travaux de Blockmans *et al.* (1999) viennent enrichir cette compréhension du système karstique de Han-sur-Lesse en s'intéressant à la dynamique sédimentaire et aux paléoenvironnements enregistrés au sein des dépôts endokarstiques de la grotte et plus particulièrement lors de la transition entre le Weichsélien et l'Holocène. Leur étude se porte sur trois coupes situées dans des galeries proches de la résurgence de la Lesse au Trou de Han (Figure 7). Leur étude met en évidence une séquence stratigraphique complexe, composée d'alternances de dépôts fluviatiles, lacustres et de versant, traduisant les fortes variations hydrologiques survenues à la fin du Weichsélien. À l'aide d'analyses granulométriques et minéralogiques des sédiments, les auteurs identifient une transition marquée vers des conditions plus chaudes et humides au début de l'Holocène. La présence de concrétions carbonatées, de niveaux de suie et de matières organiques intégrées dans les sédiments témoigne à la fois de la réactivation biologique du milieu souterrain et d'une fréquentation humaine ancienne. Durant cette étude, plusieurs datations radiocarbone (^{14}C) ont été réalisées et ont permis de situer ce moment de basculement climatique aux alentours de 11 700 BP (Blockmans *et al.*, 1999). De plus, une phase d'incision est clairement identifiée dans la galerie des Petites Fontaines, située juste en amont du Trou de Han. Ce niveau d'incision marque le début du recreusement de la Lesse et du décolmatage progressif de la grotte, après une période où celle-ci était totalement colmatée dont les signes sont des dépôts lacustres fins et laminés. L'érosion de ces dépôts argileux, scellés en partie par la stalagmite du Point du Jour, indique une réactivation hydrologique postérieure à 8500 BP, en lien direct avec l'incision de la Lesse dans ses propres dépôts à la sortie du système karstique (Blockmans *et al.*, 1999). Cette dynamique témoigne du couplage étroit entre l'évolution endokarstique et celle de la vallée alluviale, notamment lors de fluctuations climatiques.

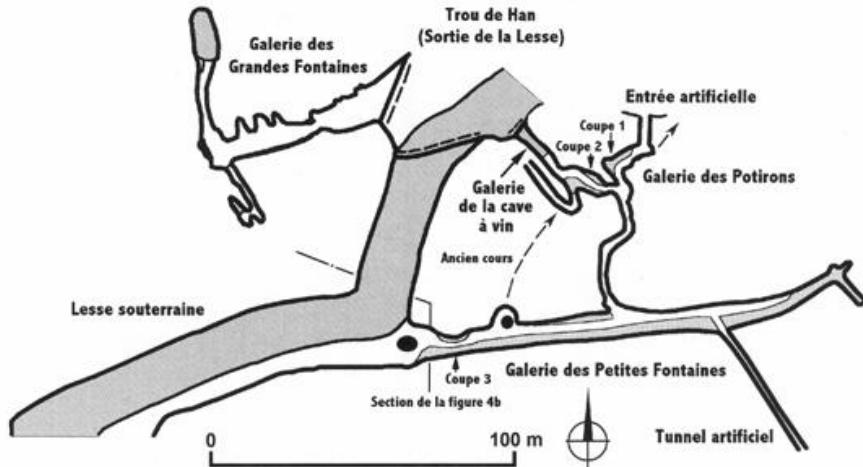


FIG. 4a. – Plan des galeries proches de la résurgence de la Lesse, localisation des coupes et esquisse de l'ancien trajet du courant cause de la sédimentation étudiée.

Figure 7 : Localisation des coupes étudiées par S. Blockmans *et al.* en 1999 (Blockmans *et al.*, 1999)

Les travaux de Verheyden *et al.* (2006) viennent compléter l'étude de l'évolution hydrogéomorphologique du site par une interprétation paléoenvironnementale de haute résolution basée sur une stalagmite du réseau de Han-sur-Lesse (salle du Dôme). Cette étude repose sur l'analyse d'une carotte de 2 m prélevée dans une stalagmite, la stalagmite Proserpine. Différentes analyses ont été effectuées telles que des datations U/Th, de la stratigraphie laminée qui consiste à un comptage de couches annuelles et de la géochimie isotopique ($\delta^{18}\text{O}$ et $\delta^{13}\text{C}$). Les résultats de cette étude révèlent une croissance quasi continue de la stalagmite sur environ 1000 ans, avec des vitesses de dépôt atteignant 1 à 2 mm/an. La séquence enregistrée permet d'identifier une phase globalement humide correspondant au Petit Âge Glaciaire, entrecoupée de périodes plus sèches ou plus froides autour de 1600 AD et 1710 AD. Des traces matérielles d'activités humaines anciennes sont également visibles dans les couches supérieures de la stalagmite. On y retrouve des résidus de suie et des fragments de paille indiquant les premières visites anthropiques dans la salle du Dôme entre 1760 et 1810 AD. Cette période coïncide avec une interruption locale de la croissance du spéléothème. Enfin, les auteurs mettent en évidence une corrélation entre la dynamique de croissance de la stalagmite, la variation des isotopes stables et les conditions de recharge hydrique, notamment via le bilan précipitation – évapotranspiration. Cette approche multi-proxy permet une compréhension fine des variations climatiques affectant le système karstique de Han-sur-Lesse durant les derniers siècles (Verheyden *et al.*, 2006).

Dans le prolongement de ces travaux, un mémoire de fin d'étude réalisé par J. Delmot (2012) a spécifiquement abordé les variations climatiques récentes, sur la période 1880-2010. Cette étude repose également sur l'analyse sédimentologique et géochimique de la stalagmite Prospérine, et apporte un éclairage complémentaire sur l'étude des dynamiques hydroclimatiques modernes du système karstique de Han-sur-Lesse (Delmot, 2012).

Enfin, des travaux récents menés par Houbrechts *et al.* (2025) proposent de nouvelles hypothèses concernant la datation de la dernière ouverture du gouffre de Belvaux. Ces recherches portent sur des dépôts de plaine alluviale situés immédiatement en amont du gouffre. Selon les auteurs, l'ouverture du gouffre aurait provoqué une incision suffisamment marquée (de l'ordre de 4 m) pour empêcher le dépôt de sables grossiers et de gravillons dans la plaine alluviale lors des crues ultérieures à l'ouverture du gouffre. Toutefois, des éléments grossiers ont été retrouvés dans un carottage effectué sur ce site. Deux pics granulométriques, à 305-317 cm et 184-200 cm de profondeur, ont pu être datés grâce à la présence de charbons : l'un à 4710 ± 29 BP (RICH-34865), soit 3630-3370 cal BC et l'autre à 4022 ± 27 BP (RICH34864), soit 2620-2460 cal BC. Sur base de ces résultats, l'étude suggère que l'ouverture du gouffre de Belvaux serait postérieure à la seconde date, correspondant à l'horizon le moins profond des deux.

Partie III : Méthodologie

Cette partie abordera les différentes méthodologies utilisées dans le cadre de ce mémoire de fin d'études. Elle se consacrera à l'acquisition de données, réalisée principalement sur le terrain, à l'aide de méthodes diverses telles que des levés géographiques, géophysiques et sédimentologiques. Mais également des traitements, effectués pour l'essentiel en laboratoire, incluant des analyses granulométriques, des traitements cartographiques, etc.

III-1. CAROTTAGES

L'étude réalisée se base principalement sur des analyses granulométriques et sédimentologiques provenant de sondages réalisés dans la plaine alluviale de la Lesse au niveau du gouffre de Belvaux et dans la Chavée au pied du belvédère (Figure 8). Une série de carottages avait déjà été réalisé auparavant par Geoffrey Houbrechts et Christophe Delaere (Hourechts *et al.*, 2025), mais ils ont été complétés par d'autres sondages réalisés dans le cadre de ce mémoire de fin d'étude afin de venir approfondir les résultats partiels déjà obtenus. Au niveau du site du gouffre de Belvaux, cinq profils de sondages ont été effectués perpendiculairement à l'axe de la vallée. Ils se nomment HSL-P1, HSL-P5, HSL-P2, HSL-P3 et HSL-P4 de l'amont vers l'aval (Figure 8). Pour ce qui est des sondages réalisés dans la Chavée au pied du Belvédère, ceux-ci sont placés sur un seul profil et se nomme BEL-P0. À cela vient s'ajouter trois sondages à la tarière en amont du gouffre de Belvaux, au niveau d'une basse terrasse située dans le village de Belvaux (BVX-1, BVX-2, BVX-3), et trois sondages à la tarière (sondage 4, sondage 5 et sondage 6) dans la Chavée (Figure 8). En annexe (Annexe 1), se trouve un tableau récapitulatif avec les différentes informations telles que la distance sur le profil, la date de prélèvement ou encore les coordonnées de chaque sondage utilisé dans le cadre de cette étude.

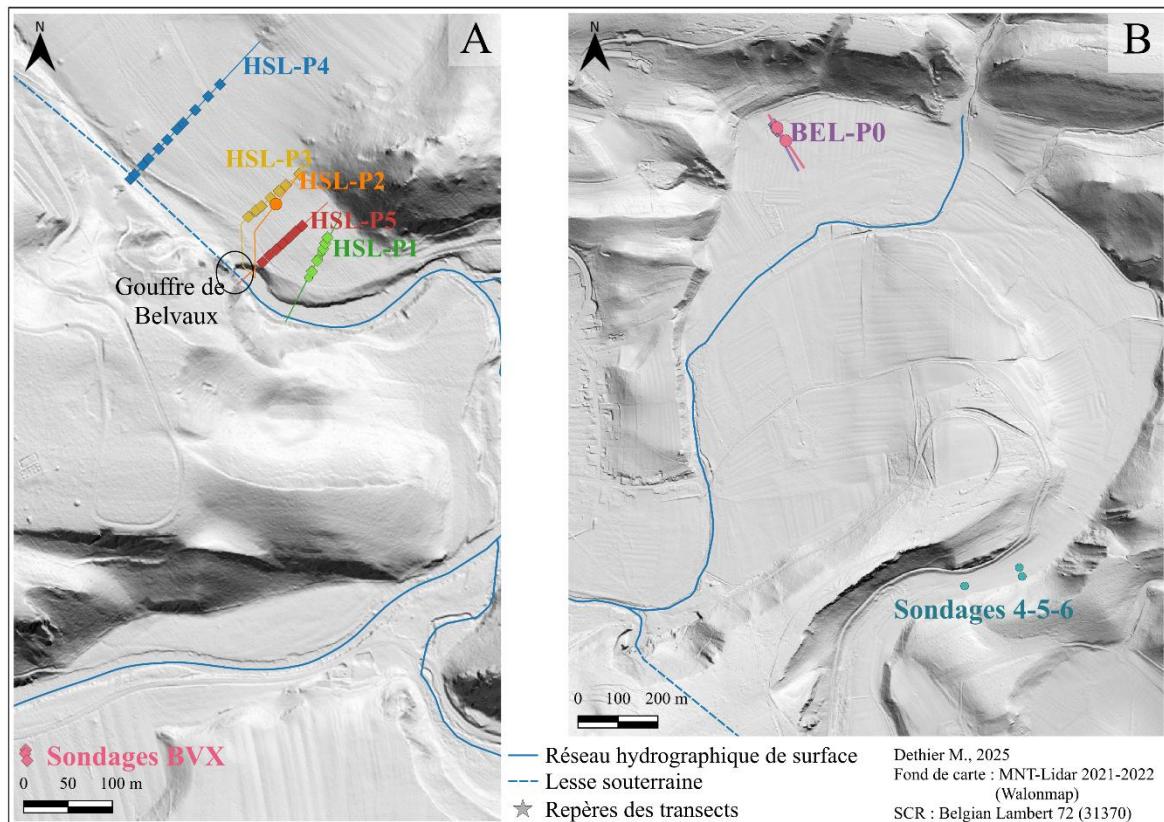


Figure 8 : Localisation des sondages

Les sondages ont été réalisés de deux manières différentes : des carottages à la tarière et des carottages motorisés. Les carottages à la tarière permettent de prélever des échantillons d'une vingtaine de centimètres mais perturbent les structures sédimentaires. De plus, il est difficile de descendre à plus de 3 à 4 m de profondeur. La profondeur de refus est généralement considérée comme le contact avec le sommet de la nappe de cailloutis (Figure 9-B). Les carottages motorisés permettent de réaliser des prélèvements de carottes d'un mètre qui ne sont pas perturbées stratigraphiquement. Le carottier permet d'atteindre des niveaux nettement plus profonds ($> 10\text{m}$) et de traverser les lentilles de cailloutis ainsi que de briser les galets de taille inférieure à environ 5-10 cm. Il est donc possible de prélever dans la

partie supérieure de la nappe de cailloutis. Quelle que soit la méthode utilisée, il faut tout d'abord déterminer l'emplacement du profil de carottage qui est défini après des recherches préalables du site notamment grâce à l'utilisation du LiDAR Hillshade (SPW, 2024a). Le profil de carottage est placé perpendiculairement à la direction d'écoulement du cours d'eau, afin de prendre en compte sa dynamique latérale. En effet, les rivières se déplacent latéralement au cours du temps, ce type de méthodologie permet de mieux comprendre l'évolution de leur tracé et les traces d'incisions antérieures. De plus, cette orientation facilite la comparaison des niveaux altimétriques successifs des dépôts alluviaux au sein du transect et également entre les différents profils. Le positionnement des sondages le long du profil transversal nécessite un repère fixe dans le temps, permettant de définir une origine de référence. La localisation des sondages peut ensuite être réalisée par mesure de la distance le long du profil, ou de manière plus précise à l'aide d'un GPS RTK, lorsque les conditions de réception le permettent.

Pour ce qui est des carottages à la tarière, ceux-ci sont manuels et réalisés à l'aide d'une tarière Edelman (Figure 9-A). Il suffit dès lors de tourner la tarière afin qu'elle s'enfonce dans le sol et qu'elle préleve un échantillon. Un fois l'échantillon prélevé, une première analyse de terrain est faite avec des observations telles que le type de sol, la présence d'éléments caractéristiques, la couleur, etc. Chaque prélèvement sédimentaire est placé dans un sac d'échantillonnage sur lequel est repris un code correspondant au site à savoir HSL (Han-sur-Lesse) ou BEL (Belvédère) dans le cadre de cette étude, la date de prélèvement, la distance sur le profil en mètre et la profondeur de l'échantillonnage en centimètre.



Figure 9 : Matériel sondage à la tarière

Dans le cas des carottages motorisés, le prélèvement sédimentaire se fait à l'aide d'un carottier (Figure 10) afin d'enfoncer un tube de prélèvement (\varnothing 5 cm) dans le sol. Ensuite, un extracteur hydraulique est utilisé afin de récupérer la carotte sédimentaire. Tout comme avec la méthode précédente les informations telles que le code du site, la date, la distance (en m) sur le profil et la profondeur (en cm) sont inscrits sur la carotte sédimentaire.

Peu importe la méthode de prélèvement choisie, les carottages prennent fin lorsque le cailloutis est atteint et qu'il n'est dès lors plus possible de descendre plus bas avec les outils utilisés.



Figure 10 : Matériel sondage au carottier

III-2. OUVERTURE DES CAROTTES SÉDIMENTAIRES

Une fois les carottes sédimentaires prélevées, celle-ci sont ramenées au laboratoire afin d'être ouvertes et d'y prélever les sédiments. Pour ce faire, la carotte est placée sur un support (Figure 11-A1) afin de la caler et éviter qu'elle ne bouge lors de l'ouverture. Le tube en PVC est ensuite découpé sur la moitié de sa hauteur à l'aide d'une meuleuse d'angle (Figure 11-A2). Ensuite, un fil de fer est glissé de part et d'autre de la carotte dans le sens de la largeur et est glissé de haut en bas de la carotte afin de découper les sédiments. Une fois ouvert (Figure 11-B), une brève description des différents horizons visibles est effectuée en observant la granulométrie, la couleur à l'aide de la charte de Munsell ainsi que tout élément atypique, comme un charbon, un galet plus grossier, etc. La carotte est désormais composée d'une partie a et d'une partie b. Les parties a sont mises au congélateur afin d'être utilisées comme témoin du carottage et d'être utilisées dans le futur si d'autres analyses devaient être effectuées. Les parties b sont les parties sur lesquelles seront réalisées les différentes analyses effectuées en laboratoire.

Les descriptions détaillées de chaque carotte sédimentaire se retrouve en Annexe 2 de ce travail. Des logs stratigraphiques (Figures 27 & 45) des différents sondages ont dès lors été établis afin de schématiser les différentes structures qui composent chaque carottages. Après cette description assez générale, des analyses granulométriques plus fines ont été effectuées afin d'étudier plus précisément la composition granulométrique du sédiment et par la suite de caractériser sa mise en place.

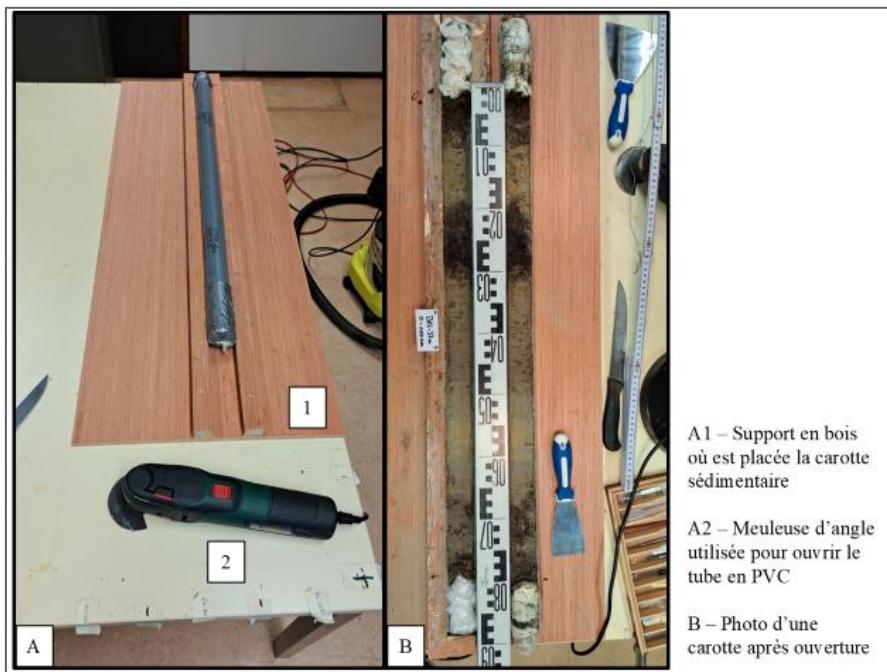


Figure 11 : Photo du matériel utilisé lors de l'ouverture des carottes sédimentaires

III-3. GRANULOMÉTRIE ET OBSERVATIONS AU BINOCULAIRE

Les analyses granulométriques ont été réalisées de deux manières différentes : une granulométrie laser et une granulométrie par tamisage sous eau avec réalisation d'observations au binoculaire. Les échantillons analysés correspondent à un découpage des carottes sédimentaires tous les 5 cm.

La première méthode, la granulométrie laser, a été réalisée à l'aide de l'appareil Malvern Mastersizer 3000 (Figure 12). Cet appareil se trouve au GreenMat, un laboratoire de recherche en chimie de l'Université de Liège. Le procédé de granulométrie laser utilise la technique de diffraction laser afin d'étudier la distribution granulométrique d'un échantillon constitué de particules solides. Ce procédé repose sur la technique de la diffusion de la lumière selon la théorie de Mie. L'analyse peut être réalisée sur des particules d'une taille allant de 10 nm à 3,5 mm (Malvern Panalytical, 2019). La taille des particules obtenue par les mesures effectuées par cet appareil n'est pas la taille réelle mais le diamètre d'une sphère équivalente. L'analyse peut être effectuée par voie sèche ou par voie humide. C'est la seconde option qui a été choisie afin de garantir la dispersion homogène des particules en suspension. Le solvant qui a été utilisé est de l'eau déminéralisée. Pour chaque échantillon introduit dans l'appareil, celui-ci effectue trois mesures. Dans les résultats, seule la troisième mesure sera utilisée car elle est considérée comme la plus fiable.

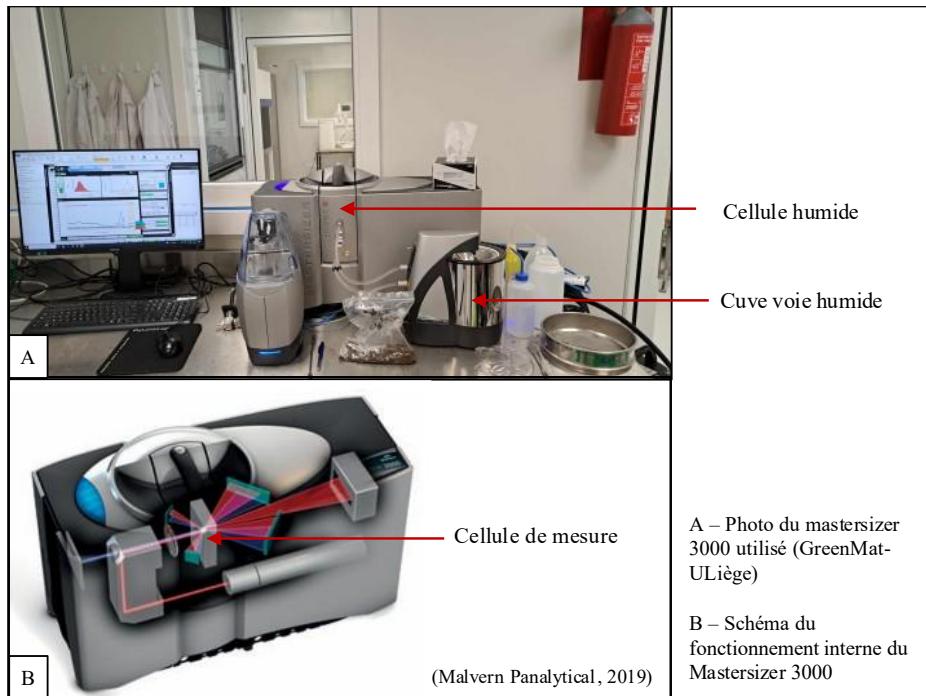


Figure 12 : Matériel granulométrie laser - Mastersizer 3000

La seconde méthode consiste à un tamisage sous eau. Ce procédé a pour but de séparer les fractions fines et grossières d'un échantillon selon une granulométrie choisie. Dans un premier temps, il convient de placer les échantillons (« tranches » de 5 cm des carottes sédimentaires) dans des berlins et d'y ajouter de l'eau chaude afin de détruire les agrégats. Ensuite, le tamisage à proprement dit peut s'effectuer. Pour ce faire il faut réaliser le montage suivant (Figure 13), composé d'un sceau, d'un entonnoir et d'un (ou plusieurs) tamis. L'échantillon est placé dans le tamis et à l'aide d'une douchette, l'eau permet de faire passer les derniers éléments inférieurs à la taille de la maille du tamis. Les éléments inférieurs à la taille de maille du tamis se retrouvent dans le seau qui est mis à décanter afin d'avoir une séparation des sédiments et de l'eau. La fraction supérieure à la maille du tamis est mise dans un berlin qui est ensuite placée à l'étuve afin de sécher les sédiments. Lorsque les sceaux ont fini de décanter, ils sont siphonnés afin d'y récolter les fractions fines qui sont mises dans un berlin et séchées, à leur tour, à l'étuve (100°C).

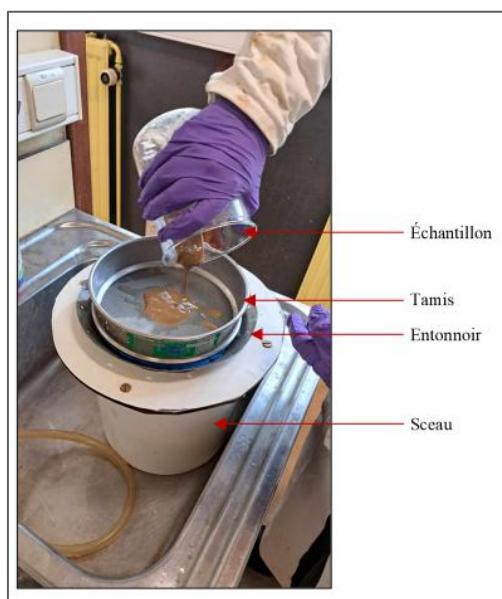


Figure 13 : Montage pour un tamisage sous eau

Un traitement différencié selon les sondages a été appliqué quant au choix des tamis utilisés en raison des besoins pour les analyses suivantes. Pour les sondages HSL-P1-13,40m et HSL-P1-26,90m, les deux premiers mètres ont été tamisés à 63 µm, 212 µm et 600 µm. Pour ce faire, au lieu d'avoir un seul tamis au-dessus du sceau, il y en avait trois, placés en colonne, dans l'ordre décroissant du dessus vers le bas. L'objectif de ce tamisage multiple était d'isoler les fractions les plus fines en vue d'un comptage de billes magnétiques dans ces classes granulométriques précises. Pour le reste de ces deux sondages, ainsi que pour l'ensemble des autres carottages de la plaine alluviale du gouffre de Belvaux qui ont été tamisés, un tamis unique de 600 µm a été utilisé. En ce qui concerne les échantillons issus des sondages situés au pied du belvédère (BEL-P0), deux tamis ont été utilisés : 600 µm et 1700 µm. Le tamisage s'est effectué en empilant les deux tamis au-dessus du sceau avec le tamis de 1700 µm au-dessus de celui de 600 µm. Le but étant d'isoler la partie la plus grossière du reste de l'échantillon. Quel que soit la gamme des tamis utilisés, chaque fraction obtenue a été pesée afin de déterminer la masse totale des échantillons et la répartition massique de chaque classe granulométrique au sein de chaque échantillon.

Après séchage, chaque échantillon supérieur à 600 µm a été observé au binoculaire (Figure 14-A) à la recherche d'éléments datables tels que des morceaux de matière organique, des charbons, etc., mais également la recherche d'éclats de silex, de scorie, d'éléments magnétiques, de présence ou non de concrétions et pour finir mesurer l'élément le plus grossier de chaque échantillon et caractériser son émoussé. La mesure de la taille de l'élément le plus grossier est réalisée à l'aide d'un pied à coulisse (Figure 14-B).

Pour les deux premiers mètres des sondages HSL-P1-13,40m et HSL-P1-26,90m, une recherche et un comptage de billes magnétiques ont été effectués sur les fractions 63-212 µm et 212-600 µm. Pour ce faire, l'échantillon a été déposé sur une feuille de papier à laquelle les bords avaient été pliés afin de créer une sorte de plateau (Figure 14-C). Une fois l'échantillon dispersé, un aimant à piston (Figure 14-D) est passé sur l'ensemble de l'échantillon à trois reprise. Un aimant à piston est un aimant qui est actif lorsque le piston est baissé et inactif quand le piston est relevé. Ainsi, il est possible de récolter des éléments magnétiques et de les séparer de l'aimant très facilement. Après séparation des éléments magnétiques du reste de l'échantillon, les billes magnétiques présentes sont comptées. Dans les résultats, afin d'avoir une comparaison entre les différents échantillons, le nombre de billes a été pondéré par la masse de l'échantillon. Ainsi les résultats s'exprimeront en nombre de billes par gramme.

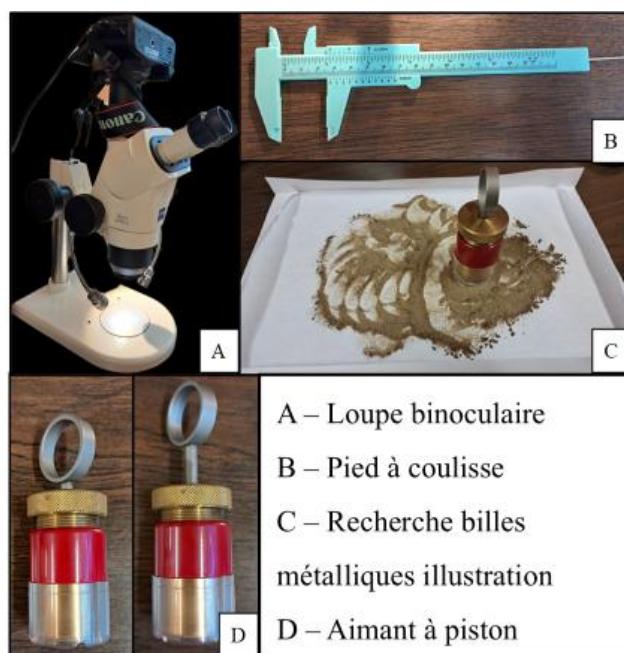


Figure 14 : Matériel utilisé lors des observations des échantillons

Suite aux mesures réalisées au granulomètre laser, des valeurs granulométriques caractéristiques telles que le D_{50} et le D_{99} ont été extraits. Avec la taille de l'élément le plus grossier de chaque échantillon, ces valeurs ont été replacées sur des graphiques représentant l'évolution granulométrique en fonction de la profondeur. Afin de lisser ces variations pour en sortir une tendance générale, une moyenne mobile sur 10 valeurs a été appliquée.

Pour finir, grâce aux résultats granulométriques, il est également possible de déterminer théoriquement le processus de mise en place des dépôts à l'aide de l'image CM de Passegaglia. Cette méthode graphique, proposée en 1957 et 1964 par Passegaglia, permet d'interpréter les dépôts sédimentaires, notamment en milieu fluviatile et marin (Houbrechts *et al.*, 2013). Elle repose sur l'analyse de deux centiles caractéristiques d'un dépôt : D_{99} (taille du plus gros grain, noté C) et D_{50} (la médiane, noté M). En reportant ces deux valeurs sur un graphique à double échelle logarithmique (D_{50} en abscisse et D_{99} en ordonnées), on obtient un nuage de point dont la position et l'alignement permettent d'identifier les modes de transport ayant conduit au dépôt : roulage, suspension gradée ou suspension uniforme. L'image CM est structurée en plusieurs segments (NO, OP, PQ, QR, RS et T) (Figure 15), chacun correspondant à un mode de transport distinct. Par exemple, le segment NO représente des dépôts grossiers issus de roulage sur le fond du lit, tandis que le segment RS est associé à des dépôts formés par suspension uniforme dans un courant turbulent. Des limites entre ces segments sont marquées par des points de flexure (N, O, P, Q, R, S) correspondant aux transitions entre les différents mécanismes de transport. De plus, des tailles critiques des grains, désignées par Cr, Cs et Cu, permettent de différencier les sédiments transportés par roulage, suspension gradée ou suspension uniforme (Houbrechts *et al.*, 2013).

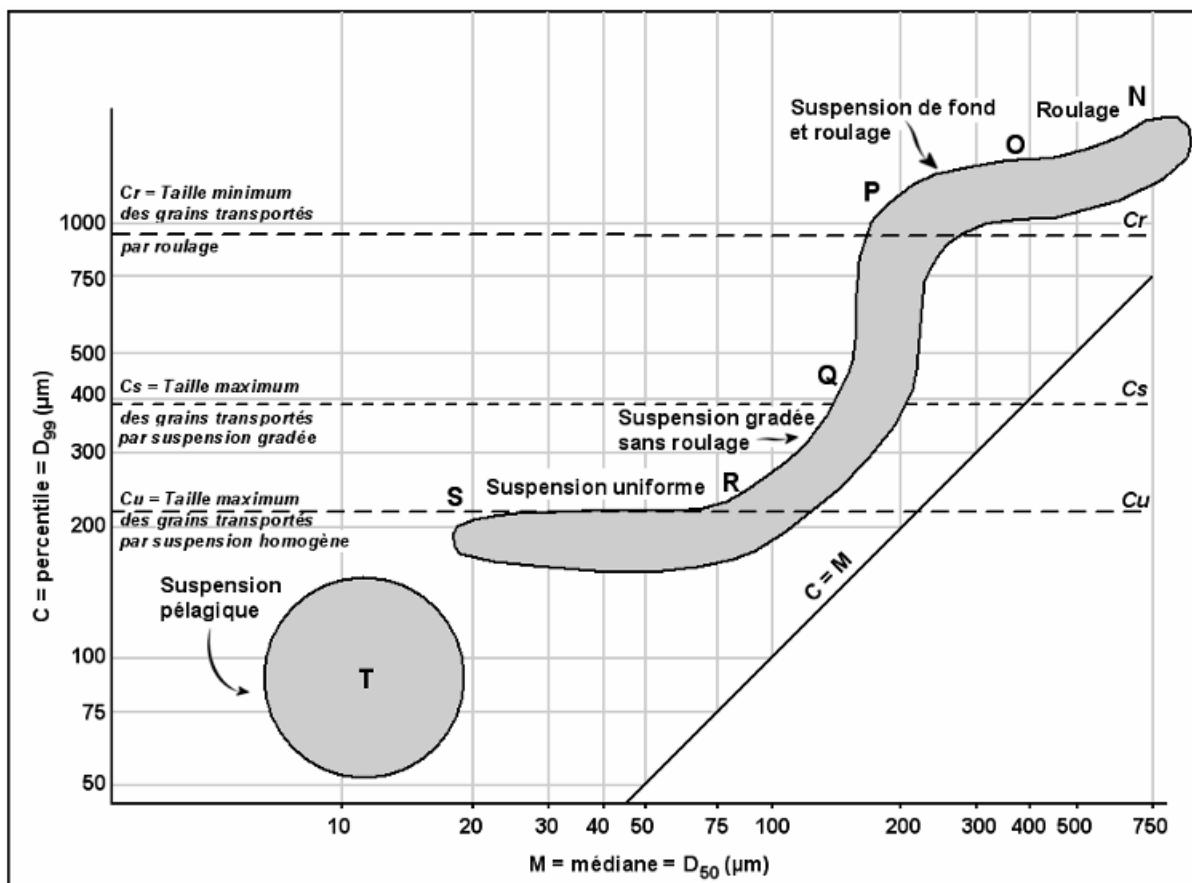


Figure 15 : Image CM originale de Passegaglia (d'après Passegaglia, 1964 dans Houbrechts *et al.*, 2013)

III-4. LEVÉ DE COUPES

Le levé de coupe consiste à faire des observations sur une coupe sédimentaire dégagée. La première étape consiste à placer un décamètre le long de la coupe, servant de repère métrique (axe X) pour localiser spatialement les observations. Un repérage vertical (axe Y) est effectué à l'aide d'une mire, permettant de replacer les observations dans un référentiel XY. La coupe est ensuite parcourue mètre par mètre, en notant et schématisant de manière la plus précise possible tous les changements observables : variations de couleur, de texture, de granulométrie, de structure, de nature, etc.

Dans le cadre de ce travail, deux levés de coupe ont été réalisés. L'une située juste à l'amont du gouffre de Belvaux sur la rive gauche (Coupe 1) mesurant 103 m de long et la seconde située à la sortie du secteur des Rapides de la Lesse au niveau d'une basse terrasse en rive gauche (Coupe 2) et mesure 17 m de long.

L'objectif de ces levés est de documenter les séquences sédimentaires, d'identifier d'éventuels changements environnementaux, et de corréler ces observations avec les données issues des carottages notamment.

III-5. DONNÉES TOPOGRAPHIQUES

III-5.1. RTK – REAL TIME KINEMATIC

Les coordonnées des sondages ainsi que de points de contrôle et autres, ont été acquises à l'aide d'un GPS RTK (Real Time Kinematic). Cette technique consiste au positionnement par satellite basé sur l'utilisation de la mesure de la phase d'ondes porteuses des signaux émis par les systèmes GPS (CentipedeRTK GitHub, 2025). En Wallonie, deux réseaux de stations GNSS peuvent être utilisés. Le réseau WALCORS (Wallonia Continuously Operating Reference System) et le réseau Centipede. Une station de référence, pour Han-sur-Lesse il s'agit de la station LEMA, fournit des corrections en temps réel permettant d'atteindre une grande précision de l'ordre du centimètre par 10 km de distance à la station de base. Ainsi, des coordonnées (X, Y, Z) d'une grande précision peuvent être acquises et utilisées.

III-5.2. LiDAR – LIGHT DETECTION AND RANGING

Des données topographiques utilisées proviennent également du LiDAR 2021-2022 mis à disposition par le Service Public de Wallonie (SPW). Le LiDAR (Light Detection and Ranging) est une technologie de télédétection active qui permet de mesurer la distance entre un capteur et la surface terrestre en émettant des impulsions laser à très haute fréquence (SPW, 2024b). Le capteur LiDAR a été embarqué à bord d'un avions spécialement équipé et l'acquisition est réalisée lors de survols du territoire. En moyenne, 7 impulsions lasers (pulses) par mètre carré ont été émises. Chaque pulse émis est réfléchi totalement ou partiellement par les éléments rencontrés à la surface tels que la végétation, les bâtiments, le sol, etc. Les ondes réfléchies permettent de construire un nuage de point 3D dont les coordonnées X, Y, Z de chaque point sont connues. La distance entre le capteur et le point d'impact est calculée grâce au temps de trajet de l'onde combinée à la vitesse de la lumière connue (SPW, 2024b). Pour géoréférencer précisément chaque point, il faut connaître le positionnement et l'orientation de l'avion en temps réel. Ces données sont assurées par un GPS embarqué corrigé en temps réel via le réseau GNSS permanent wallon, WALCORS. Les données acquises ont été traitées pour produire des modèles numériques de terrain (MNT) et des modèles numériques de surface (MNS) permettant une analyse topographique fine de la Région Wallonne (SPW, 2024b). Les données sont utilisables en libre accès depuis le Géoportail de Wallonie.

III-5.3. STATION TOTALE

Un troisième type de données topographiques a été utilisé dans le cadre de ce mémoire de fin d'études, il s'agit des données topographiques acquises par station totale (Leica-TC600). La station totale est un instrument de mesure topographique électronique qui combine un théodolite pour la mesure des angles horizontaux et verticaux, ainsi qu'un distancemètre électronique pour la mesure des distances. À l'aide de cet appareil, il est possible de déterminer avec précision les coordonnées X, Y, Z des différents points relevés sur le terrain (Brabant *et al.*, 2012).

Sur le terrain, le relevé commence par la mise en station de l'appareil. Pour ce faire, il faut positionner la station totale au-dessus d'un point de coordonnées connues ou placer la station totale à un endroit donné et prendre ses coordonnées de manière précise, à l'aide du RTK par exemple. Il faut ensuite s'assurer de l'alignement vertical et horizontal de la station qui se fait à l'aide de niveaux à bulle situés sur l'appareil de mesure. Une fois l'appareil correctement installé, il suffit de placer le prisme réflecteur sur le point à mesurer et de viser celui-ci à l'aide de la station totale. La station envoie dès lors un signal laser vers le prisme et mesure le temps nécessaire pour que le signal parcourt le trajet aller-retour, ce qui permet de calculer la distance. En combinant la distance avec angles mesurés, le système calcul les coordonnées précises du point (Ben Hadj Salem, 2015).

Cette méthode d'acquisition permet de réaliser des relevés de hautes précision, notamment dans les zones où l'utilisation des technologies LiDAR ou RTK sont limitées par des obstacles physiques ou des conditions environnementales défavorables (Vaidis *et al.*, 2021).

III-5.4. RÉALISATION D'UN PROFIL EN LONG

Dans le cadre de ce mémoire de fin d'étude, un profil en long sera présenté en guise de résultat. Celui-ci a été réalisé sur un tronçon depuis la station limnimétrique de Resteigne jusqu'à la confluence de la Lesse avec le Ry d'Ave en aval de la résurgence au Trou de Han (Figure 16). Le profil de la surface topographique a été réalisé en extrayant les données d'altitude (coordonnées Z) depuis le LiDAR 2021-2022 (SPW, 2024a) à l'aide d'un logiciel SIG (ArcGis Pro).

Le profil en long mesure 11,560 km et est divisé en 4 secteurs. Le premier secteur correspond au tracé de la Lesse entre la station limnimétrique de Resteigne jusqu'au gouffre de Belvaux (de 0 m à 4824 m sur le profil). Le secteur 1 reprend les altitudes du tracé actuel de la Lesse, toutefois, il est important de notifier que le LiDAR utilisé ne permet pas de prendre les altitudes du fond du lit car l'onde émise ne peut pas traverser les surfaces d'eau. C'est pourquoi les altitudes utilisées correspondent aux altitudes du plan d'eau. Afin d'avoir une idée du décalage d'altitude entre le fond du lit et le plan d'eau, un profil topographique de ce secteur a été réalisé à l'aide des altitudes du fond du lit reprises sur les profils en travers réalisés historiquement dans le secteur et consultables à l'Atlas des Cours d'Eau Non Navigables (SPW, 1995). Les planches Resteigne n°3 et 4/12 ont été utilisées pour les profils en travers de la Lesse 29 à 41 et les planches Wavreille 5/11, 6/11 et 3/6 ont été utilisées pour les profils en travers de la Lesse 48 à 59. Ensuite, le second secteur correspond aux altitudes du paléochenal, visible depuis le gouffre de Belvaux jusque dans la Chavée (distances 4824 m à 5584 m sur le profil). Une fois que le paléochenal n'est plus visible, des profils en travers ont été tracés dans la Chavée afin de faire passer le profil en long par les points bas de la Chavée. Cette méthode a été appliquée jusqu'à ce que le profil en long retrouve le ruisseau de la Planche (de 5584 m à 8511 m sur le profil). Pour finir, le quatrième secteur correspond à l'altitude du ruisseau de la Planche et puis de la Lesse après résurgence au Trou de Han. Les altitudes utilisées pour ce secteur sont les altitudes du plan d'eau pour les mêmes raisons que celles abordées pour le secteur 1.

Sur le profil en long, vient s'ajouter les altitudes de cailloutis atteints lors des sondages et des levés de coupes ainsi que les altitudes du Gouffre de Belvaux et du Trou d'Enfaule.

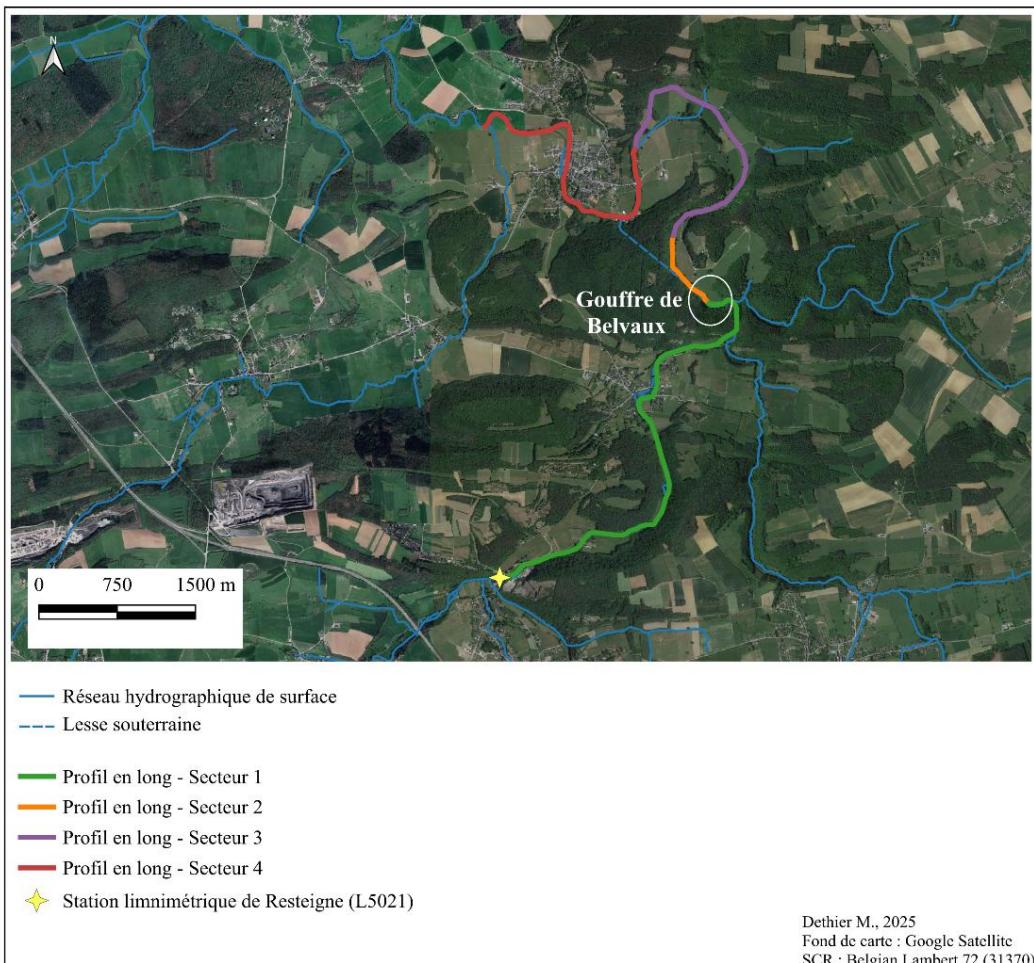


Figure 16 : Localisation du profil en long et de ses différents secteurs

III-6. TOMOGRAPHIE

La tomographie électrique, également appelée ERT (Electrical Resistivity Tomography), est une méthode géophysique qui permet de caractériser la structure interne du sous-sol en mesurant la résistivité électrique de celui-ci, c'est-à-dire la capacité qu'a le sol à s'opposer au passage d'un courant électrique. Cette technique, non destructrice, est utilisée pour détecter les hétérogénéités du sol et appliquée à de nombreux domaines comme la géologie, l'hydrogéologie ou encore en archéologie (Marescot, 2008 ; Leuzy, 2006).

Le principe de la méthode repose sur l'injection d'un courant électrique dans le sol à l'aide de deux électrodes (A et B), tandis qu'un autre couple d'électrodes (M et N) mesure la différence de potentiel générée (Figure 17). En répétant cette opération selon différentes configurations d'électrodes et sur plusieurs positions sur le profil, il est possible de collecter un grand nombre de mesures de résistivité apparente. Les mesures de résistivité sont influencées par les propriétés électriques du sol qui sont elles-mêmes influencées par la nature du sol, de la porosité, l'humidité et la teneur en minéraux (Marescot, 2008 ; Leuzy, 2006). L'ensemble des mesures constitue une pseudo-section de résistivité (Figure 18), qui donne une première image qualitative du sous-sol. Toutefois, celle-ci n'est pas exploitable quantitativement. Afin d'avoir une distribution fiable des résistivités, il faut appliquer un traitement d'inversion. Il s'agit d'un processus mathématique qui consiste à ajuster un modèle de résistivité jusqu'à ce que les réponses calculées correspondent au mieux aux données mesurées (Marescot, 2008 ; Leuzy, 2006). Cette étape est essentielle et permet de transformer des résistivités apparentes en résistivités

inversées, plus représentative de la réalité physique. Suite au traitement des données, l'erreur RMS (Root Mean Square ou erreur quadratique moyenne en français) est calculée. Il s'agit d'un indicateur statistique qui mesure la différence entre les résistivités apparentes mesurées sur le terrain et celles calculées par le modèle après inversion. Ce paramètre permet d'évaluer la qualité de l'ajustement du modèle aux valeurs observées. Plus sa valeur est faible et plus le modèle est considéré comme représentatif de la réalité. Ainsi, une erreur RMS inférieure à 5% est jugée comme très bonne, une erreur RMS comprise entre 5% et 10% est jugée acceptable et au-delà de 10%, l'erreur RMS est dite mauvaise (Marescot, 2008).

Du point de vue de l'acquisition des données sur le terrain, différentes acquisitions de profils tomographiques ont été réalisées avec des espacements variables entre les électrodes selon les profils. Cependant, le principe général reste le même. Le long d'un profil, il y a lieu d'implanter des électrodes à distances régulières, ce qui correspond à la configuration Wenner, et de les connecter à un résistivimètre (Leuzy, 2006). Dans cette étude, le résistivimètre utilisé est un SYSCAL Junior de la marque IRIS Instrument. Les données recueillies sont ensuite traitées dans le logiciel Res2DInv afin de réaliser l'inversion par moindre carré notamment. La majorité de ces mesures, ainsi que certains traitements ont été réalisés par Thomas Lecocq, sismologue à l'Observatoire Royal de Belgique.

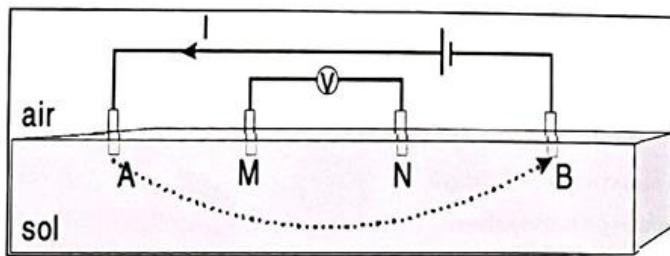


Figure 17 : Illustration d'un dispositif quadripolaire (Leuzy, 2008)

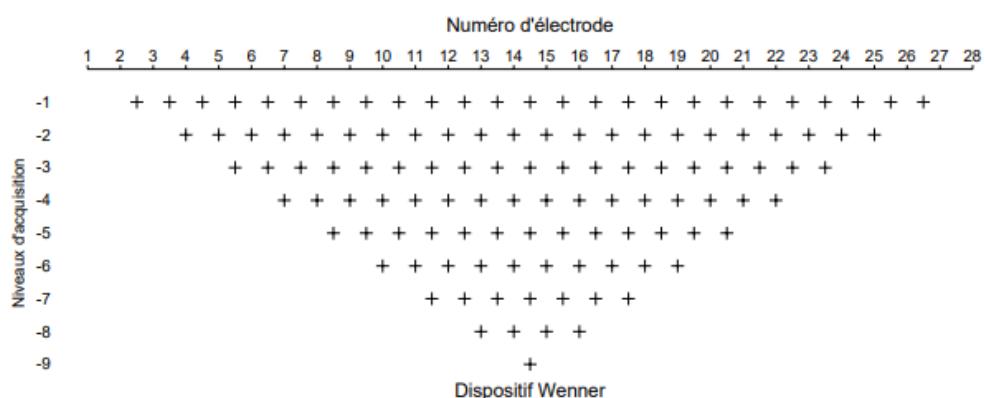


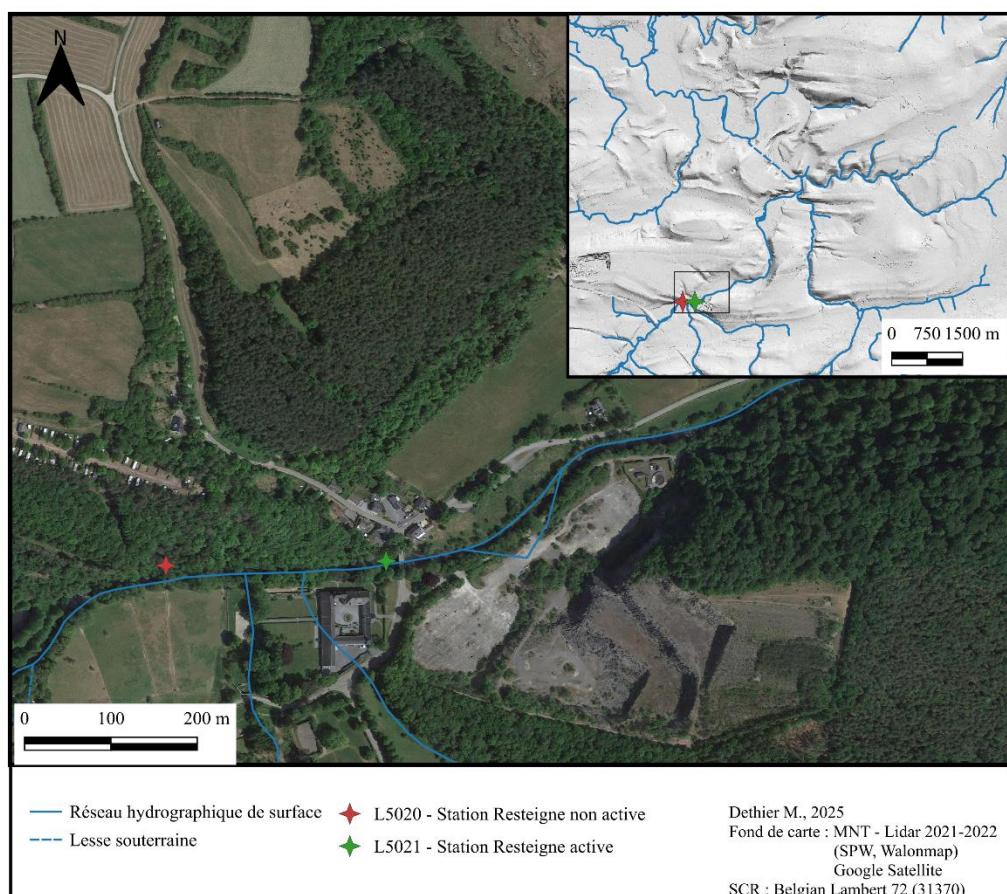
Figure 18 : Représentation des électrodes et points de mesures pour le dispositif Wenner (Marescot, 2008)

III-7. DONNÉES HYDROLOGIQUES

Des analyses hydrologiques de la Lesse ont été effectuées notamment lors d'événements de crue survenus en janvier 2024, octobre 2024 et janvier 2025. Ces analyses ont été réalisées à l'aide des données mises à disposition par la Service Public de Wallonie sur le site « L'hydrométrie en Wallonie »¹ qui met à disposition des valeurs de hauteur d'eau et de débit pour les cours d'eau wallons.

Six stations limnimétriques sont installées sur la Lesse, dont quatre situées sur la Haute Lesse et deux situées sur la Basse Lesse : L5530 à Ochamps, L7680 à Maissin, 8341 à Daverdisse, L5021 à Resteigne, L6610 à Hérock et 8221 à Gendron. Les stations de Daverdisse et Gendron appartiennent au SPW Mobilité et Infrastructures (MI), Département Expertises Hydraulique et Environnement, Direction de la Gestion Hydrologique, tandis que les autres stations appartiennent au SPW Agriculture, Ressources naturelles et Environnement (ARNE), Direction des Cours d'Eau Non Navigables (DCENN).

Le site de l'étude est situé 4,8 km en aval de la station limnimétrique de Resteigne sans affluents majeurs, c'est donc les données de cette station qui ont été utilisées. À cette station, le bassin versant de la Lesse mesure 345 km². Il faut savoir que la localisation de cette station a changé au cours du temps. De 1969 à 1992 elle était située quelques mètres en amont de sa localisation actuelle (Figure 19) (Géoportail de Wallonie, 2025). Toutefois, ce changement de localisation ne perturbe pas de manière significative les séries temporelles de mesures.



¹<https://hydrometrie.wallonie.be/home.html>, (L'hydrométrie en Wallonie, 2025)

III-8. DÉPÔT DE CRUES

En janvier 2024, la Lesse est entrée en crue avec un débit horaire au pic de crue de 66 m³/s. Ce dernier a eu lieu le jeudi 04 janvier 2024 à 10h. Il a fallu attendre la nuit entre le 06 janvier 2024 et le 07 janvier 2024 pour que les débits diminuent et que la Lesse reprennent son tracé sous-terrain. Le lundi 08 janvier 2024, le promoteur de ce travail, G. Houbrechts, s'est rendu au niveau de la plaine alluviale au gouffre de Belvaux afin de prélever des dépôts de crue. Au total, c'est 11 échantillons de dépôts de crue qui ont été échantillonnés (Figure 20).

Le prélèvement de ces échantillons a pour objectif de caractériser les sédiments transportés et déposés lors d'un tel événement mais également de caractériser sa mise en place.

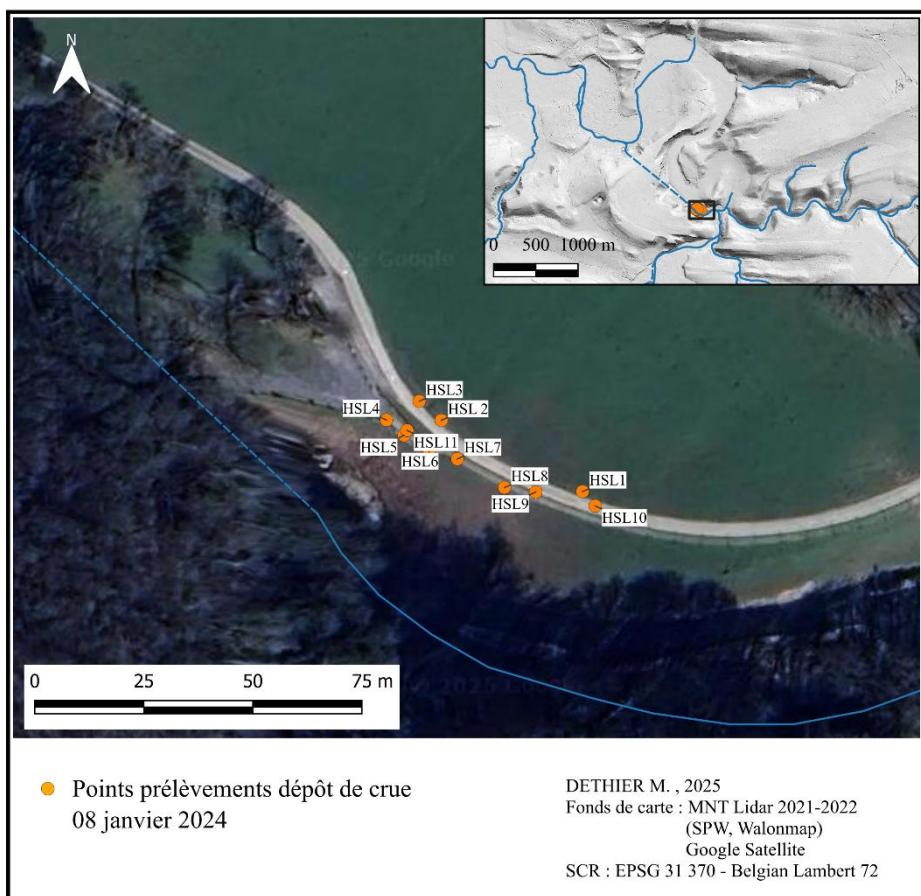


Figure 20: Localisation des prélèvements de dépôts de crue du 08 janvier 2024

III-9. MATIÈRE EN SUSPENSION

À plusieurs reprises, durant la période de réalisation de ce travail la Lesse est entrée en crue. Lorsque le débit dépasse 40 m³/s à la station de Resteigne, la Lesse reprend son ancien tracé en surface en passant dans la Chavée comme cela a déjà été expliqué précédemment. Lors de ces événements et en particulier aux dates des 10 octobre 2024, 8 janvier 2025 et 10 janvier 2025 plusieurs prélèvements de matière en suspension (MES) ont été effectués. Pour réaliser ceux-ci, le matériel utilisé est le suivant (Figure 21) :

- Un sceau d'une capacité de 5L
- Un entonnoir
- Une corde
- Des bouteilles de prélèvements d'une capacité minimale de 5L
- Un marqueur indélébile

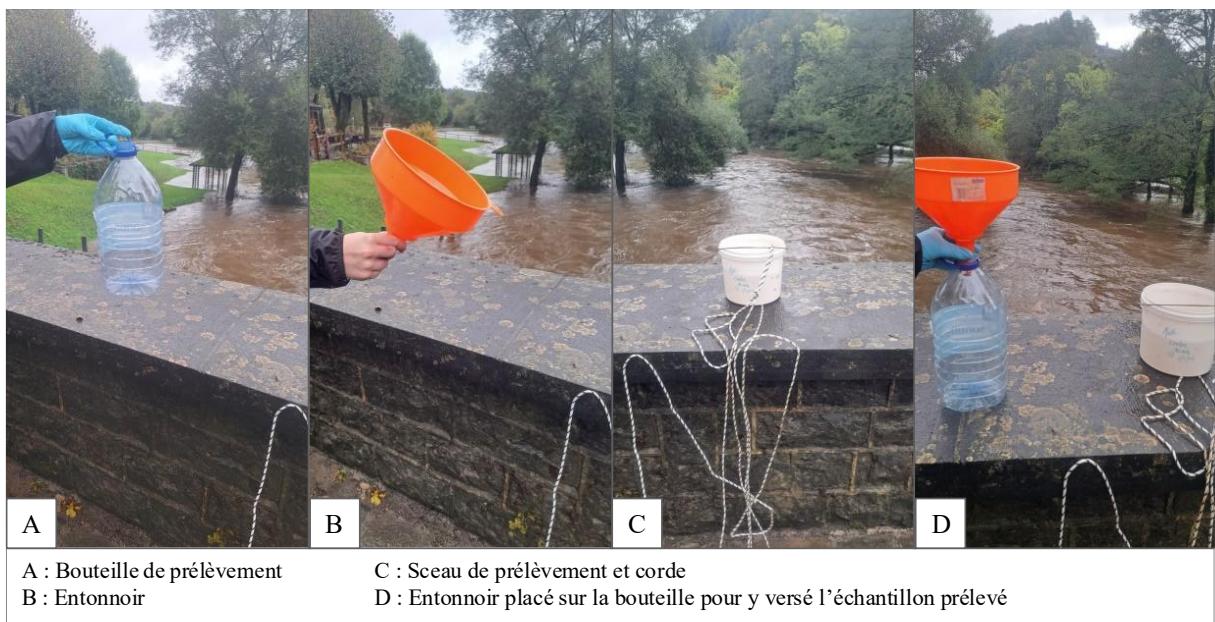


Figure 21: Matériel de prélèvement de matière en suspension (MES)

Chaque prélèvement a été effectué comme suit. La corde a été attachée au sceau de manière à ne pas se défaire lors du prélèvement. Ensuite, le sceau est descendu dans le cours d'eau afin qu'il puisse se remplir. Une fois le sceau rempli complètement, il est remonté. Il faut alors placer l'entonnoir au-dessus de la bouteille de prélèvement et y déverser le contenu du sceau qui vient d'être prélevé. Il est important que les parois du sceau soient propres suite au prélèvement. Si ce n'est pas le cas, il faut reprendre un peu d'eau que l'on vient de prélever et rincer le sceau avec. Après le rinçage du sceau, l'eau utilisée lors de cette action est mise dans la bouteille de prélèvement. Pour finir, il est important de ne pas oublier de notifier sur la bouteille de prélèvement les informations telles que la date, l'heure et le lieu.

Les différents sites de prélèvements sont repris dans la Figure 22. Le site de Resteigne correspond au prélèvement en amont du gouffre de Belvaux, les sites « Mémorial Interalliés 1940-1945 » et « Petit pont » correspondent à deux sites de prélèvement dans la Chavée et pour finir un quatrième site de prélèvement se situe à la résurgence de la Lesse au Trou de Han. Lors de la crue d'octobre 2024, des prélèvements de MES ont été réalisé à trois endroits à savoir à la station limnimétrique de Resteigne (A), au « Petit pont » (C) et en aval de la résurgence au niveau du Pavillon (E). Lors de la crue de début janvier 2025, des prélèvements ont été réalisés à quatre endroits différents qui sont la station limnimétrique de Resteigne (A), le mémorial interalliés 1940-1945 (B), le « Petit pont » (C) et à la résurgence au trou de Han (D).

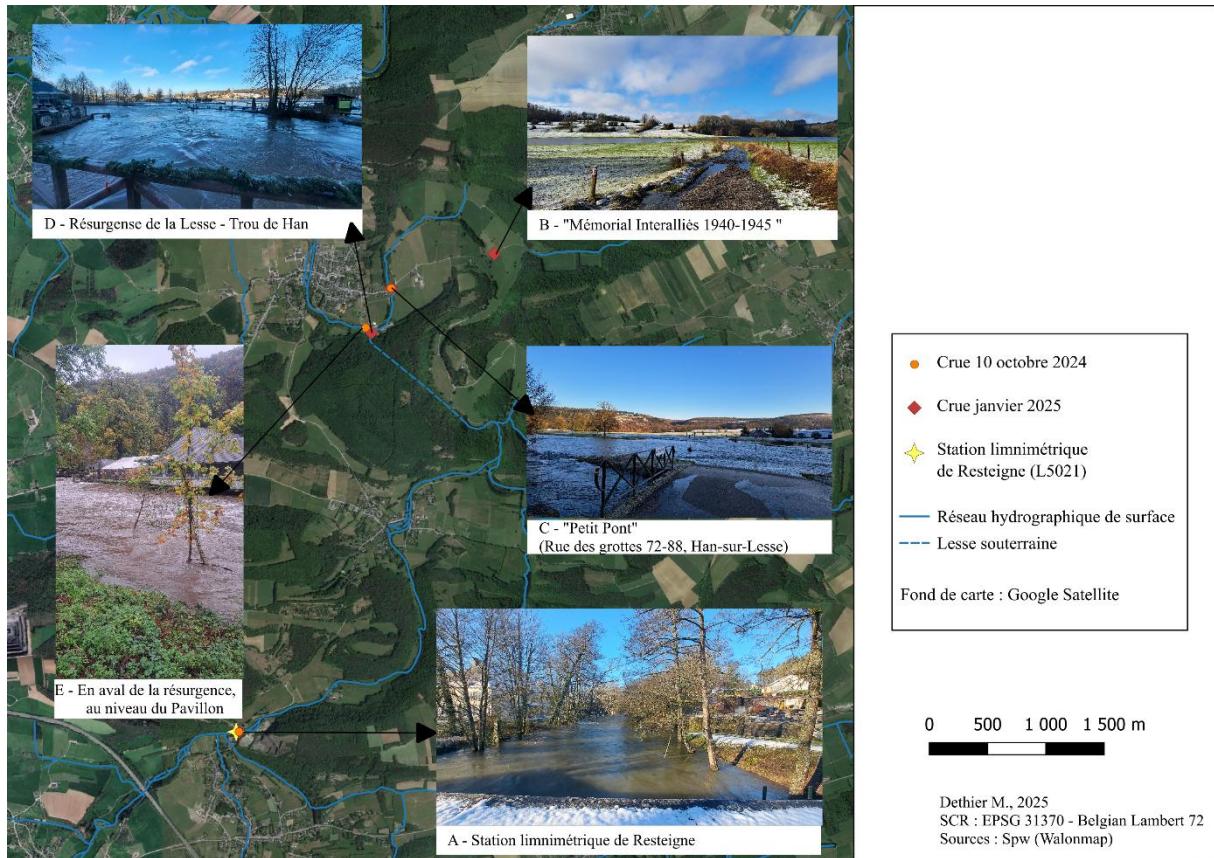


Figure 22 : Localisation des sites de prélèvement de MES

L'objectif, des prélèvements à ces emplacements est de caractériser les éléments transportés en période de crue, en amont du gouffre, dans la Chavée et à la sortie des grottes. Cela permet d'analyser le passage des sédiments à travers les grottes et de quantifier le taux de sédimentation dans la Chavée.

En laboratoire, différentes analyses telles qu'une filtration et une perte au feu ont été effectuées sur les prélèvements de matière en suspension.

La filtration a pour objectif de séparer les MES de l'eau. Pour réaliser cette manipulation il est nécessaire d'avoir le matériel suivant (Figure 23):

- Des filtres de type Whatman GF/C 110 mm, 1,2 µm, fibre de verre, pouvoir de rétention de 98%
- Une pompe à vide
- Une éprouvette graduée
- Une étuve
- Une balance

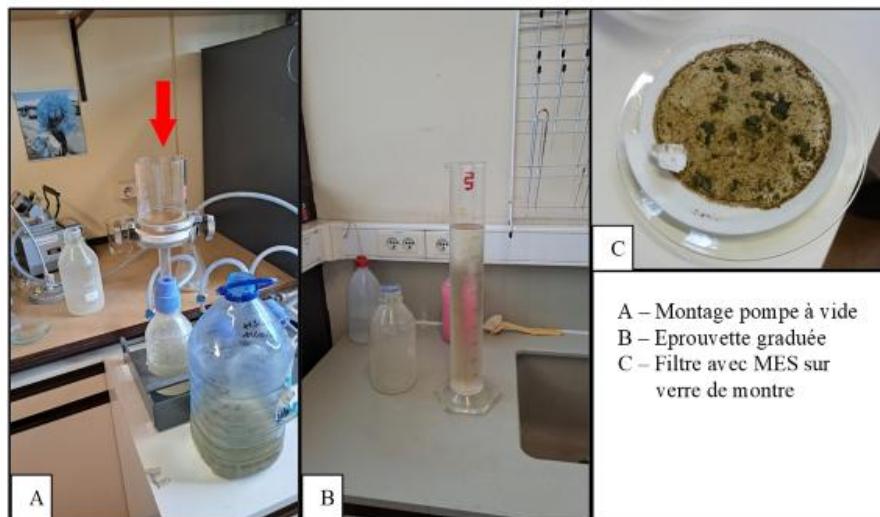


Figure 23: Matériel pour la filtration - Montage pompe à vide

Pour commencer cette manipulation, il est nécessaire de placer les filtres à l'étuve à 105°C pendant au minimum une heure afin de s'assurer qu'ils soient bien sec. Les laisser refroidir à température ambiante pendant une trentaine de minute et les peser afin d'avoir la masse des filtres secs.

La seconde étape consiste à filtrer les échantillons grâce à une pompe à vide (Figure 23-A). Le filtre est placé à l'interface entre la partie supérieure du montage de la pompe à vide où l'échantillon est introduit et la partie inférieure constituée du récipient récolteur. L'échantillon est introduit au-dessus (flèche rouge Figure 23-A). La pompe est actionnée afin d'accélérer l'écoulement entre la partie supérieure et le récipient récolteur. Une fois la filtration finie, la quantité d'eau récoltée est mesurée à l'aide d'une éprouvette graduée et le filtre est placé sur un verre de montre et mis à l'étuve afin d'être séché à 105°C pendant 60 minutes à quelques heures selon la quantité de matière. Une fois séché et refroidi, le filtre contenant les MES peut être pesé afin de connaître la quantité de ceux-ci dans l'échantillon total prélevé.

Une seconde manipulation a ensuite été effectuée sur ces échantillons. Une perte au feu a été réalisée sur les MES présents sur les filtres suite à la filtration. L'objectif de cette manipulation est de connaître la concentration de matière organique dans les échantillons de MES. La méthodologie détaillée de la perte au feu est reprise dans la partie suivante « III-11. Perte au feu ».

III-10. ACQUISITION D'IMAGES DRONE

Dans le cadre de la crue survenue le 09 janvier 2025, des relevés aériens par drone ont été réalisés dans le but d'obtenir des données spatiales précises sur l'étendue de la crue pour un débit donné et également d'observer la présence de chenaux de crue afin d'avoir une idée sur l'ancien passage de la Lesse. Pour ce faire, un drone de type DJI Mavic Mini 2 a été utilisé. Deux vols distincts ont été menés.

Le premier vol a été effectué depuis le point de vue du belvédère jusqu'au gouffre de Belvaux. Le vol a été réalisé à une altitude moyenne de 256 m, avec une résolution d'image de 0,11 m. Le second vol a été réalisé à partir d'une clairière située à proximité des Rapides de la Lesse, permettant de couvrir plus spécifiquement la zone du gouffre de Belvaux. L'altitude de vol au cours de cette acquisition variait entre 175 m et 224 m, et les images obtenues présentent une résolution plus fine, de l'ordre de 0,06 m.

L'ensemble des images collectées a été traité, par Robin Pétrossians (Assistant de recherche – LHGF) à l'aide du logiciel iTwin Capture Modeler Maser, dans le but de générer une orthomosaïque géoréférencée permettant une analyse précise de l'emprise de la crue. Grâce aux conditions météorologiques ayant précédé le vol drone de la zone, notamment des précipitations neigeuses

survenues quelques heures avant la crue, il a été possible d'observer une démarcation nette de l'étendue maximale de celle-ci. En effet les zones encore couvertes de neige lors du survol du drone étaient des zones qui n'avaient pas été touchées par la crue. Ceci a permis une cartographie, assez précise, de l'étendue maximale de la crue en plus d'une cartographie de l'étendue de crue au moment de l'acquisition de données. Toutefois, pour la deuxième cartographie, l'étendue de la crue au moment de l'acquisition, la délimitation s'est avérée plus délicate que pour l'étendue maximale. Par endroits, il était difficile de distinguer la présence d'eau ou non en raison de l'ombrage créé par le versant et de la présence de végétation.

III-11. PERTE AU FEU

L'objectif de la perte au feu est de déterminer la quantité de sédiments d'un échantillon ainsi que la proportion de matière organique qu'il contient. Le matériel nécessaire à cette manipulation est le suivant :

- Des creusets
- Une étuve
- Un four
- Un dessiccateur
- Une balance

Pour commencer cette manipulation, il faut peser les creusets vides et les numérotter. La seconde étape consiste à remplir les creusets avec les différents échantillons. Une seconde pesée est réalisée afin de connaître la masse du creuset et de l'échantillon. Les creusets sont ensuite mis à l'étuve à 105°C pendant plusieurs heures afin d'éliminer l'eau présente dans les échantillons. Les creusets sont ensuite retirés de l'étuve et mis dans un dessiccateur pendant 30 minutes. Cette opération permet de retirer toute l'humidité de l'échantillon avant de procéder à une nouvelle pesée afin de connaître la masse sèche de l'échantillon.

La quantité de sédiments présents dans l'échantillon est dès lors connue. Pour connaître la proportion de matière organique qu'il contient, les creusets sont placés dans un four à 500°C pendant 24 heures dans le but d'éliminer la matière organique. Cette étape effectuée, le four est coupé et ouvert afin de faire refroidir les creusets avant de les manipuler. Les creusets refroidis sont ensuite placés dans le dessiccateur une trentaine de minutes et puis pesés. La masse de matière organique présente dans chaque échantillon est obtenue par soustraction de la masse de l'échantillon à sa sortie de l'étude (masse 105°C) et sa masse à la sortie du four (masse 500°C).

La perte au feu a été réalisée sur les échantillons de laisse de crue de janvier 2024 et sur les échantillons de MES d'octobre 2024 et de janvier 2025.

III-12. ATTAQUE EAU OXYGÉNÉE

Une attaque à l'eau oxygénée (H_2O_2) a été réalisée sur les échantillons de laisses de crue de janvier 2024 (partie inférieure à 600 μm). Cette manipulation a eu pour but de détruire la matière organique contenue dans les échantillons. Cette manipulation a également servi à détruire les agrégats formés en partie par la matière organique. L'attaque à l'eau oxygénée a été effectuée en amont de la granulométrie laser réalisée sur les échantillons de laisses de crue.

Du point de vue méthodologique, l'eau oxygénée a été ajoutée aux échantillons. Ensuite, ceux-ci sont chauffés afin d'accélérer le processus chimique. La réaction terminée, les échantillons sont placés dans une centrifugeuse jusqu'à atteindre 3000 tours/minute dans le but d'obtenir la partie sédimentaire de l'échantillon séparée de la partie liquide.

III-13. RECHERCHE DE PRÉSENCE DE TÉPHRA DANS DES ÉCHANTILLONS

III-13.1. PRÉPARATION DES ÉCHANTILLONS

Dans le cadre de la recherche de matériaux volcaniques, une procédure spécifique de préparation des échantillons a été réalisée dans le but d'isoler la fraction la plus susceptible de contenir ces éléments. Tout d'abord, l'échantillon brut a été soumis à un tamisage sous eau (III-3. Granulométrie et observations au binoculaire) avec les tamis 255 µm et 75 µm, permettant de retenir la fraction comprise entre ces deux seuils. Une attaque à l'acide à chaud à l'aide d'une solution de HCl 10% vol. a été appliquée à la fraction retenue c'est-à-dire la fraction comprise entre 355 µm et 75 µm. Cette étape a été effectuée dans le but d'éliminer les éventuels carbonates présents dans l'échantillon. Après un rinçage à l'eau distillée afin d'éliminer les traces d'acide, l'échantillon a été séché à l'étuve.

Une fois les échantillons séchés, environ 10 g de matériau ont été prélevés pour être soumis à une séparation densimétrique. Celle-ci s'est faite à l'aide de bromoforme (CHBr₃), une liqueur dense de densité 2,8 g/cm³. Le processus a été réalisé en ampoule, selon une succession de cycles comprenant agitation, décantation, puis récupération du surnageant, jusqu'à épuisement des particules flottantes. Cette étape permet de concentrer les grains de densité plus forte, parmi lesquels peuvent se trouver des éléments volcaniques. Pour finir, les grains récupérés ont été répartis de manière la plus uniforme possible sur des lames, en vue d'une observation microscopique ultérieure (Juvigné, 1993).

III-13.2. DÉTERMINATION SI PRÉSENCE DE TÉPHRA OU NON

Trois retombées volcaniques peuvent avoir alimenté le bassin de la Lesse : le téphra du Laacher See, le téphra d'Elville et le téphra de Rocourt (Juvigné, 1993). Ces trois téphra contiennent des clinopyroxènes et des amphiboles brunes, mais le téphra du Laacher See est le seul à contenir des sphènes (Juvigné, 1993).

Le téphra du Laacher See est un dépôt volcanique issu d'une éruption majeure survenue il y a environ 12 990 ans BP dans la région de l'Eifel en Allemagne. Cette éruption a produit une couche de cendres et de matériaux pyroclastiques dispersée sur des centaines de kilomètres, atteignant la Belgique (Juvigné, 1977 *In Ponclet et al.*, 2009 ; Juvigné, 1993). En Belgique, cette couche constitue un marqueur stratigraphique dans les séquences sédimentaires du Pléistocène supérieur. Sa recherche dans des dépôts fluviaires permet d'établir des corrélations régionales assez précises et de caler chronologiquement les événements géomorphologiques et climatiques associés (Juvigné, 1993 ; Houbrechts, 2005 ; Juvigné *et al.*, 2016). Grâce à sa composition minéralogique caractéristique, notamment avec la présence de clinopyroxène, d'amphibole brune mais surtout de sphène, ce téphra est facilement identifiable. Si on trouve des sphènes à l'état remanié dans les alluvions de la Lesse, ces alluvions seront nécessairement postérieures à l'éruption du Laacher See (12 990 BP).

Le téphra de Rocourt est un dépôt volcanique issu d'une éruption survenue il y a 80 000 ans BP dans le massif de l'Eifel. Il est bien identifié dans plusieurs régions de Belgique, notamment en Ardenne, en Hesbaye, et jusque dans des formations remaniées comme les basses terrasses de la Semois et de la Lesse (Juvigné *et al.*, 2015). Ce téphra se distingue par une composition minéralogique caractéristique, dominée par des clinopyroxènes, en particulier des augites magnésiennes et des diopsides alumineux ou fassaïtiques. On y retrouve également des amphiboles brunes et de l'enstatite magnésienne (orthopyroxène). Ces éléments, et notamment la présence d'augite, permettent de reconnaître ce téphra dans les dépôts quaternaires (Juvigné *et al.*, 2013). La retombée volcanique est stratigraphiquement située dans la partie supérieure de l'interstade Dansgaard-Oeschger 21, ce qui confirme une datation autour de 80 ka (Juvigné, 1977 ; Juvigné *et al.*, 2013).

L'analyse des lames, qui ont été préparées précédemment, a été réalisée, par le Pr. Etienne Juvigné, au microscope optique afin d'identifier et de quantifier les minéraux potentiellement d'origine volcanique. Une première phase de comptage a été réalisée à l'aide de l'objectif 25X, sur une bande longitudinale par lame (une lame correspond à 34 bandes longitudinale au grossissement 25X). Tous les grains visibles ont été recensés en distinguant deux grandes catégories : les minéraux denses transparents et les minéraux non transparents, incluant essentiellement des débris lithiques et des grains opaques. Ensuite, le nombre de grains obtenu pour cette bande a été extrapolé à une demi-lame en le multipliant par 17, donnant ainsi un premier indicateur de la densité granulométrique (N1). Une seconde phase d'observation a été réalisée avec l'objectif 10X, sur six bandes (une lame compte 12 bandes au grossissement 10X). Cette observation ciblée vise à détecter les minéraux transparents caractéristiques des téphras et plus particulièrement celui du Laacher See tels que les clinopyroxènes, les amphiboles brunes et les sphènes (N2). Ces quantités d'éléments (N1 et N2) sont utilisées comme indicateurs techniques c'est-à-dire qu'ils permettent d'estimer la quantité d'échantillon brut qu'il faudrait pour obtenir un nombre donné de minéraux.

III-14. CALCUL DE RÉCURRENCE D'ÉVÉNEMENTS HYDROLOGIQUES

Sur base de la série des débits horaires de la station limnimétrique de Resteigne, des calculs de récurrence d'événements hydrologiques ont été effectués. Les calculs de récurrence sont des valeurs statistiques qui permettent d'estimer la probabilité qu'un tel événement puisse survenir à nouveau.

III-14.1. LOI DE GUMBEL

Parmi les méthodes qui existent pour calculer la récurrence d'un événement hydrologique, il existe la loi de Gumbel qui est une loi de probabilité adaptée à la prédiction des fréquences des événements hydrologiques et a été utilisée afin de déterminer la probabilité d'occurrence d'un événement particulier dans le cadre de ce travail. La loi de Gumbel peut être réalisée par régression linéaire ou bien par la méthode dite des moments. C'est cette deuxième approche qui a été appliquée. L'analyse a été effectuée sur base des débits horaires pour une série temporelle débutant le 1^{er} janvier 1969. La première étape consiste à classer la série de débits considérés par ordre décroissant et de leur attribuer un rang, la plus petite valeur de débit prenant la valeur de 1. La prochaine étape consiste à déterminer plusieurs paramètres statistiques. Tout d'abord, l'écart-type des débits (Q) est calculé à l'aide de la formule suivante :

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum(x-\bar{x})^2}{(N-1)}}$$

Ensuite, la moyenne (Q_{moy}) des débits (Q) est déterminée. À partir de cette valeur, le paramètre $\frac{1}{a}$ est obtenu selon l'expression :

$$\frac{1}{a} = \frac{\sqrt{6}}{\pi} * \sigma = 0,780 * \sigma$$

Ce paramètre permet ensuite de calculer Q_0 défini par :

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

où γ représente la constante d'Euler, dont la valeur vaut 0,577.

Enfin, la période de retour (T) d'un débit donné (Q) peut être estimé à l'aide de la relation suivante :

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

Cette approche permet ainsi d'évaluer la probabilité d'occurrence d'un événement hydrologique en fonction des données observées.

III-14.2. CALCUL DE LA PÉRIODE DE RETOUR DES CRUES AVEC UNE SÉRIE ANNUELLE

Pour le calcul des séries annuelles, les débits maximaux annuels sont utilisés. Dans la série des débits horaires, les débits maximaux annuels (Q_{\max}) ont été extraits, correspondant aux valeurs les plus élevées enregistrées chaque année sur la période d'observation. Une fois les débits horaires maximum (Q_{\max}) extraits, ils ont été classés par ordre décroissant et se sont vu attribuer un rang la plus petite valeur des Q_{\max} valant 1. Ensuite, une simple application de la loi de Gumbel a été effectuée.

La série annuelle compte 54 Q_{\max} puisque sur la série hydrologique utilisée de 1969 à 2025, les années 1988, 1989 et 1992 ne comptabilisent pas d'enregistrements.

III-14.3. CALCUL DE LA PÉRIODE DE RETOUR DES CRUES AVEC UNE SÉRIE PARTIELLE

Une seconde méthode a été appliquée pour estimer la récurrence d'événements hydrologiques particuliers. Contrairement à la méthode basée sur les séries annuelles, celle-ci repose sur des séries partielles. Le protocole appliqué, développé par J. Van Campenhout (2020), permet de calculer les périodes de retour à partir de séries partielles, en sélectionnant tous les événements ayant dépassés un seuil défini, ici le Q_b , tout en veillant à ce qu'ils soient indépendants les uns des autres.

Cette partie a été réalisée à l'aide d'un algorithme automatique (Van Campenhout *et al.*, 2020), implémenté sous VisualBasic pour Microsoft Excel. Ce script a permis d'extraire des données temporelles telles que la date de début et de fin de la crue, la durée, la date du débit maximal observé et l'intervalle de temps depuis le dernier pic de crue. Deux variables statistiques, la durée moyenne d'un épisode de crue et le débit moyen de ces épisodes, ont également été calculées par l'algorithme. Enfin, la loi de Gumbel, précédemment décrite, a été appliquée à la série partielle obtenue, afin de calculer la récurrence associée à un événement d'un débit donné.

La série partielle compte 71 événements où le débit est supérieur au seuil choisi, le débit plein bord (Q_b) dans le cas de ce travail.

III-14.4. DÉTERMINATION DE DÉBITS CARACTÉRISTIQUES

Un premier débit caractéristique à déterminer est le débit plein bord (Q_b). D'après la littérature, il est dit que la récurrence de Q_b se positionne entre 1 et 2 ans, sur base des statistiques des séries annuelles (Williams, 1978 ; Van Campenhout *et al.*, 2020). Plus précisément, de manière statistique, la période de retour de Q_b peut être considérée comme étant égale à 1,58 ans (Dury, 1973 In Van Campenhout *et al.*, 2020). Le débit plein bord est alors calculé sur base de la formule suivante :

$$Q = -\ln\left(-\ln\left(1 - \left(\frac{1}{T}\right)\right)\right) * \frac{1}{a} + Q_0 \quad \text{Avec } T = 1,58 \text{ ans}$$

Un second débit caractéristique est le débit à l'étiage (DCE). L'identification de tels événements ne fait l'objet d'aucune règle établie (Lang Delus, 2011). Le débit caractéristique d'étiage (DCE) est défini comme « le débit moyen journalier égalé ou non dépassé pendant 10 jours dans une année » (Roche, 1986). Il faut donc définir un seuil issu d'un traitement statistique préalable afin de pouvoir

calculer le DCE (Lang Delus, 2011). Plusieurs méthodes existent afin de déterminer le débit seuil. La méthode appliquée consiste à déterminer le DCE pour chaque année de la série hydrologique utilisée et ensuite d'en faire la moyenne. Cette méthode évite qu'une année avec des valeurs de débits extrêmes influence la valeur du DCE final.

Un dernier paramètre a été calculé, le pourcentage du temps où la Lesse est inférieure à un débit donné. Avec les séries annuelles, le pourcentage annuel où le débit est inférieur à un débit donné est calculé. Ensuite, il suffit d'en faire la moyenne et le résultat donne le pourcentage temporel moyen où la Lesse est inférieure à un débit particulier.

Partie IV – Résultats

Cette quatrième partie aura pour but de décrire les résultats obtenus suite aux différents terrains, manipulations et traitements effectués. Les analyses se baseront sur les résultats des niveaux de cailloutis atteints qui seront traités à l'aide de profils topographiques, des valeurs granulométriques des différents échantillons et également de l'étude d'événements de crue actuels afin de mieux comprendre les événements passés.

IV-1. PROFILS DE CAROTTAGES

IV-1.1. HSL-P1

IV-1.1.1. Niveau de cailloutis & Profils topographique et tomographique

L'analyse débute par les profils situés au niveau de la plaine alluviale du gouffre de Belvaux. Au niveau du profil le plus en amont, HSL-P1, cinq carottages sont venus compléter trois carottages déjà réalisés avant cette étude par Geoffrey Houbrechts et Christophe Delaere en mai 2022 (Annexe 1). Au total, ce sont huit carottages qui ont été effectués en rive droite à 5 m, 13,40 m, 26,90 m, 30 m, 38 m, 42 m, 48 m et 52 m du repère situé le long de la route touristique actuelle. Le profil prend une direction N 27° E. Le cailloutis a été atteint sur six des huit carottages.

Les profondeurs des différents carottages (Annexe 1) ont été replacées sur un profil topographique réalisé à l'aide d'une station totale (Figure 25). L'interprétation du tracé obtenu en reliant les différents points, permet de mettre en évidence la forme d'un ancien chenal, témoignant d'un ancien passage de la rivière. En prenant comme référence le point le plus élevé du lit actuel, il a été possible d'estimer l'ampleur de l'incision de la Lesse depuis son ancien tracé dans la plaine alluviale jusqu'à sa position actuelle. L'incision est de l'ordre du mètre au point de carottage le plus bas (HSL-P1-26,90m) et atteint la valeur de 2 à 6 mètres aux autres sondages du profil. Au niveau du carottage à 42 m, la configuration observée suggère le passage d'un ancien bras de la Lesse, qui aurait été actif lorsque la rivière occupait la position indiquée par le sondage à 26,90 m.

Un profil de tomographie électrique (ERT) a été réalisé sur le profil HSL-P1 (Figure 24). Celui-ci a une longueur totale de 69 m avec des électrodes placées à 1,5 m d'écart. L'échelle de résistivité utilisée varie entre 95,5 $\Omega\cdot m$, pour les résistivités les plus faibles, et 336 $\Omega\cdot m$, pour les résistivités les plus élevées. L'erreur RMS après inversion de ce profil est de 0,72 après 7 itérations ce qui est assez bon et traduit une bonne fiabilité de l'inversion et donc des résultats. La tomographie électrique montre une distribution hétérogène de résistivité, avec une nette opposition entre les zones de faibles résistivités ($<137 \Omega\cdot m$) en couleurs bleutées et les zones de résistivités plus élevées ($>196 \Omega\cdot m$) prenant les couleurs vertes à rouges.

Latéralement, aux extrémités du profil, c'est-à-dire de 0 m à 12 m et de 60 m à 69 m, les résistivités sont globalement modérées à fortes, comme l'indiquent les teintes allant du vert au jaune, voire localement au rouge, correspondant à des valeurs comprises entre 164 et 280 $\Omega\cdot m$. Cela suggère la présence de matériaux mieux drainés et légèrement plus grossiers tels que des sables voire des graviers pour les zones les plus résistantes. Au centre du profil, entre approximativement 20 m et 48 m, il y a présence d'une large zone de faible résistivité prenant les couleurs bleu à vert pour des résistivités comprises entre 95 et 164 $\Omega\cdot m$. Cette zone peut s'étendre jusqu'à 6 m de profondeur vers 42 m à 45 m latéralement sur le profil. Cette zone indique, très probablement la présence de sédiments plus fins tel que des limons et des argiles.

Verticalement, proche de la surface dans le premier mètre et demi, la résistivité est relativement hétérogène passant du bleu, au vert et au jaune, ce qui peut se traduire par des variations de matériaux tels que des dépôts alluviaux hétérogènes. Ensuite, entre 1,5 et 6 m de profondeur, une certaine stratification apparaît, surtout sur la zone comprise entre 36 et 48 m sur le profil. Les faibles résistivités dominent, témoignant d'un remplissage fin d'un possible paléochenal alors que plus vers la gauche du profil, les résistivités augmentent plus rapidement avec la profondeur, signe de l'approche du cailloutis. Pour finir, au-delà de 6 m de profondeur, l'augmentation de résistivité suggère la présence du substratum graveleux, voire d'une base plus résistante correspondant au cailloutis ou à un substrat rocheux.

La forme concave globale du modèle de résistivité obtenu à l'aide de la tomographie électrique, en lien avec la topographie, confirme l'hypothèse d'un ancien tracé de la Lesse, actuellement comblé par des sédiments fins.

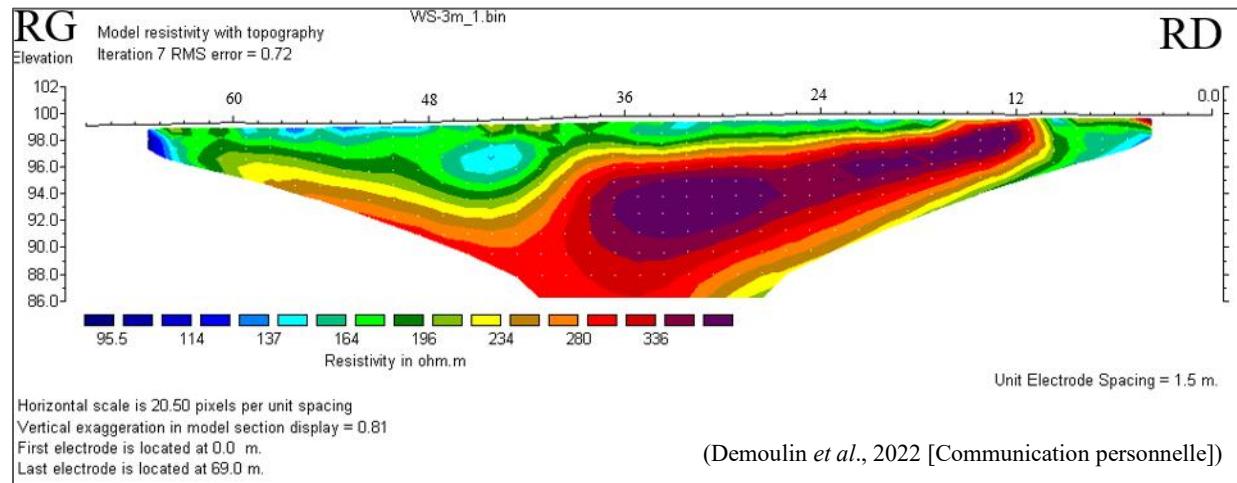


Figure 24 : Profil tomographique HSL-P1

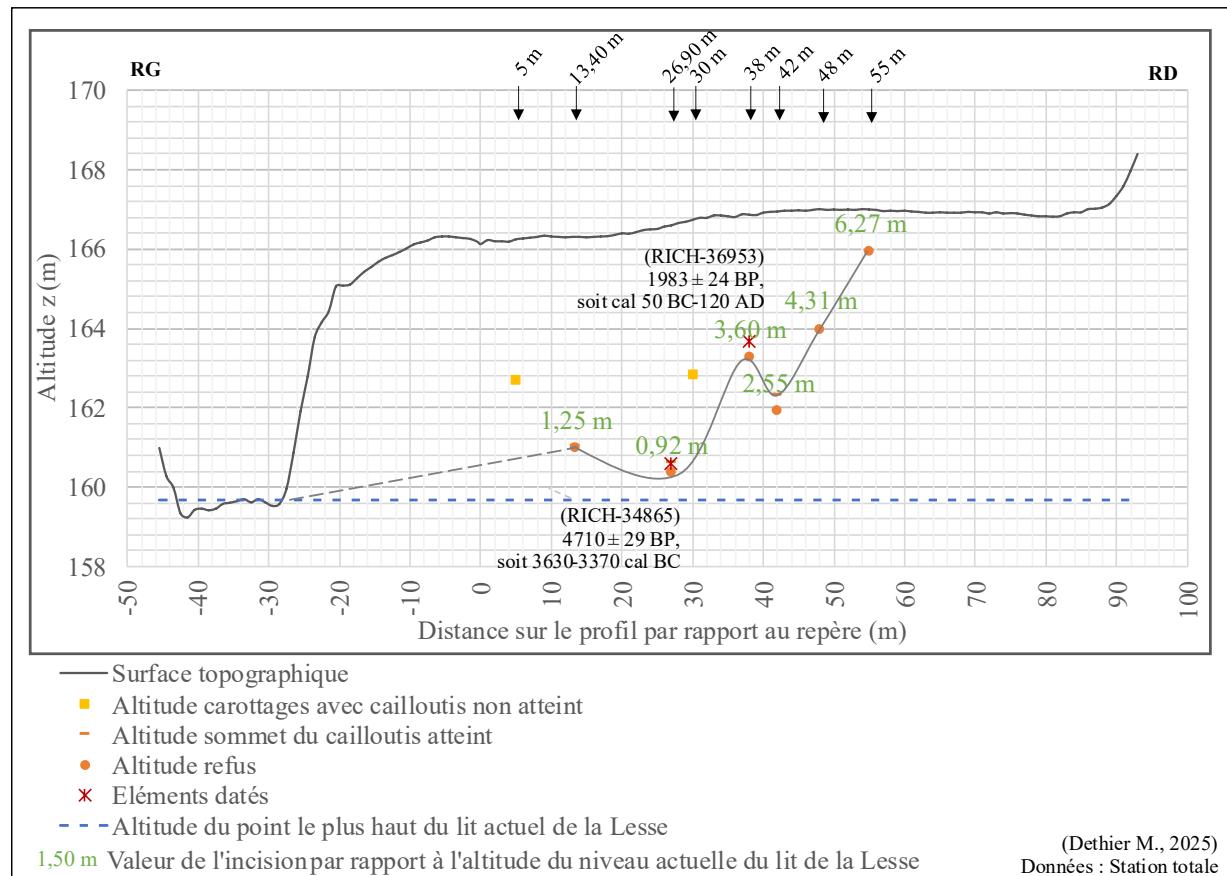


Figure 25 : Profil topographique HSL-P1

IV-1.1.2. Granulométrie

IV-1.1.2.1. Sondage à 13,40 m (HSL-P1-13,40m)

Au niveau du carottage HSL-P1-13,40m (Figure 27), les deux premiers mètres sont homogènes avec un limon brunâtre (Munsell 5YR 3/4) et la présence de quelques microcharbons. Ensuite, plus en profondeur, le limon prend une composition plus sableuse avec un changement de couleur plus rougeâtre entre 263 et 285 cm (Munsell 2.5YR 3/6). Entre 300 et 400 cm, le sondage prend un caractère encore un peu plus sableux, une teinte plus foncée (Munsell 10YR 3/4) et la présence d'horizons tachetés noirs qui correspondent à des taches de manganèse. À partir de 400 cm, la couleur devient grisâtre (Munsell 10YR 5/1) avec un niveau de charbons aux environs de 489 cm et un horizon sableux à 492 cm de profondeur. Pour finir, plus vers la base, à 524 cm, une transition vers des gravillons sableux sont présents pour ensuite arriver, à 525 cm, au cailloutis composé d'éléments grossiers de la taille du diamètre du tube d'échantillonnage (\varnothing 45 mm). Le sondage HSL-P1-13,40m mesure 530 cm avec un contact cailloutis situé à 525cm.

Au niveau du profil granulométrique vertical, des variations des différentes valeurs granulométriques (D_{50} , D_{99} et plus gros élément) sont visibles (Figure 28). Toutefois, celles-ci sont plus marquées pour les paramètres les plus grossiers. Sur le profil granulométrique vertical lissé (Figure 29), les variations sont dès lors plus visibles comme des ondulations cycliques. Les hypothèses d'interprétation liées à ce phénomène seront discutées plus loin dans ce travail une fois que les différents carottages du profils auront été exposés.

Les résultats du comptage des billes sidérurgiques (Figure 26) montrent que la majorité des billes sont présentes dans la fraction 63-212 μ m et ce jusqu'à 125 cm de profondeur, avec un pic de concentration autour d'1 m. Corrélée au passé sidérurgique du site, cette distribution indique que les 125 derniers centimètres de sédiments se sont accumulés depuis 1609, date du début de l'activité sidérurgique à Neupont. Ainsi, sur un peu plus de 400 ans, 125 cm de sédiments se sont accumulés, ce qui correspond à un taux moyen de sédimentation d'environ 0,30 cm/an, soit 30 cm par siècle.

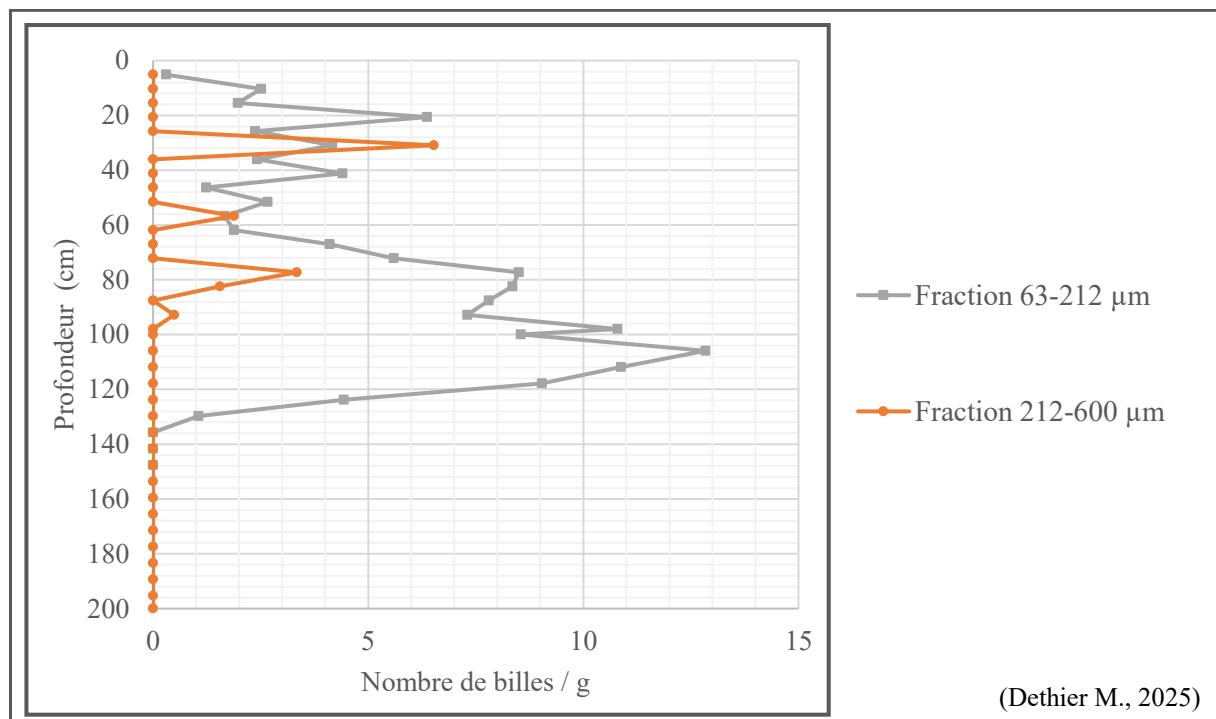


Figure 26 : Nombre de billes sidérurgiques en fonction de la profondeur dans le sondage HSL-P1-13,40m

Carottages Plaine alluviale du gouffre de Belvaux - Profil 1

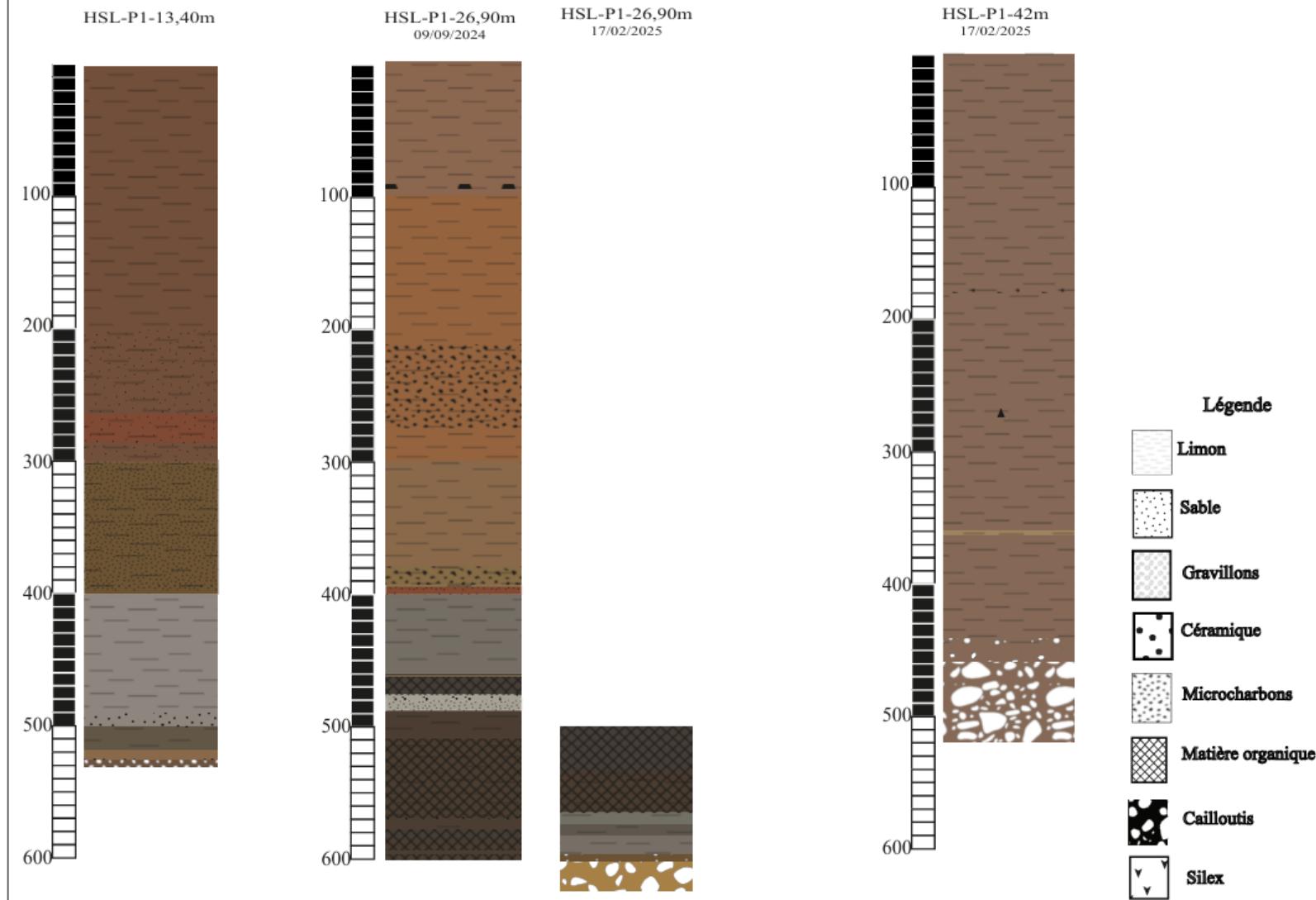


Figure 27 : Logs stratigraphiques pour les sondages du profil HSL-P1

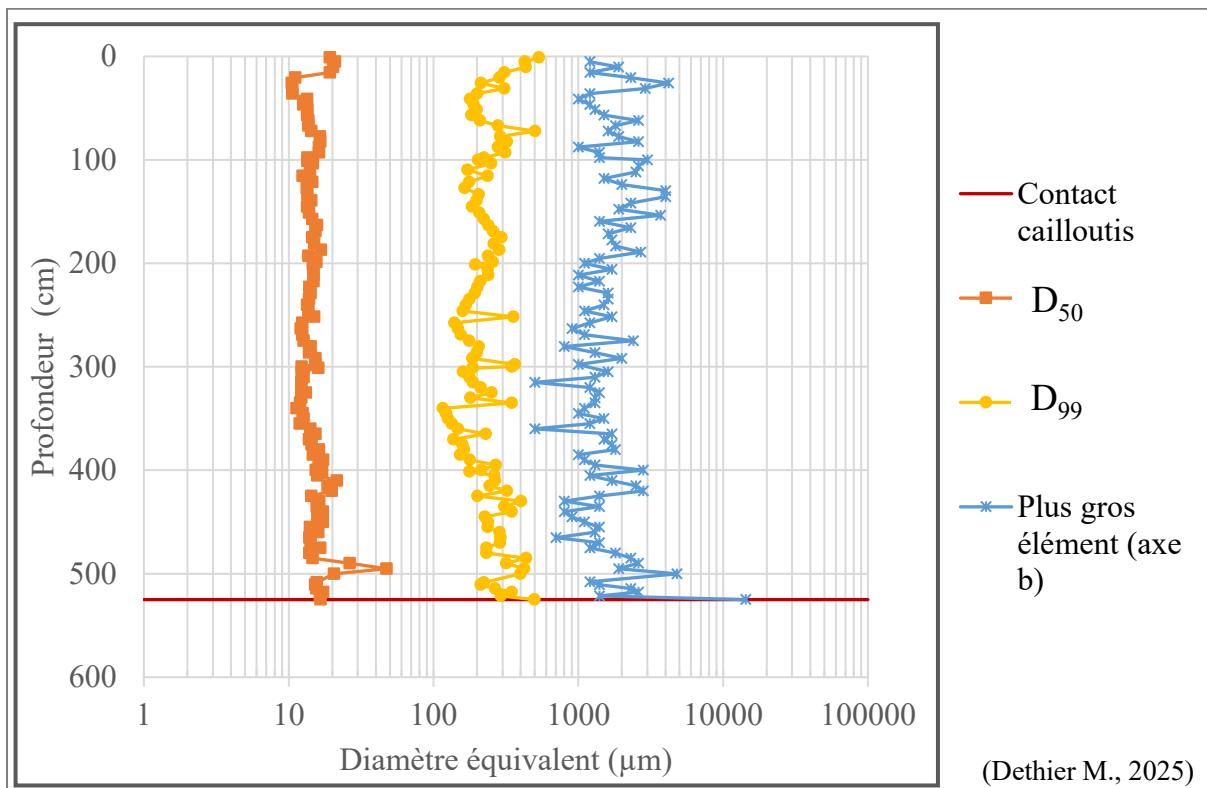


Figure 28 : Profil vertical des valeurs caractéristiques (D_{50} , D_{99} et taille du plus gros élément) du sondage HSL-P1-13,40m

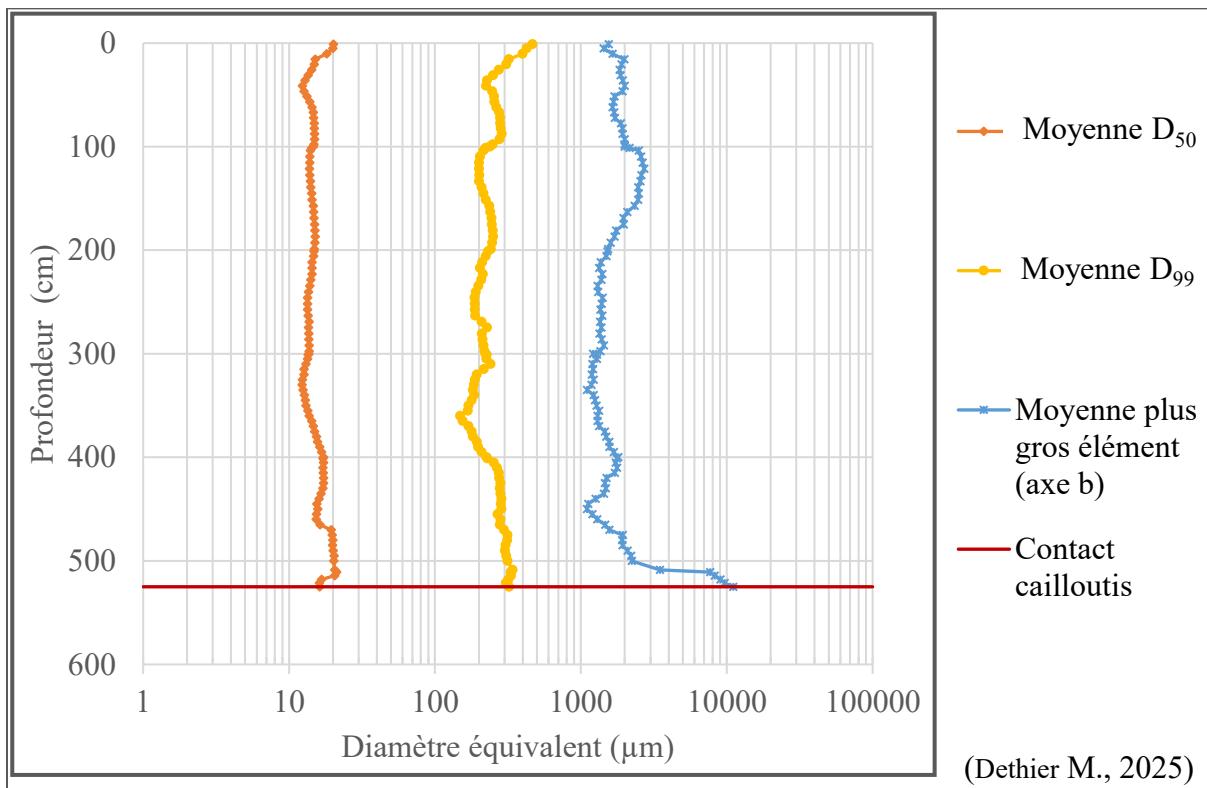


Figure 29 : Profil vertical des valeurs caractéristiques (D_{50} , D_{99} et taille du plus gros élément) moyennées(moyenne mobile centrée sur 10 valeurs) du sondage HSL-P1-13,40m

Suite aux tamisages, le pourcentage massique de chaque classe granulométrique a été mesurée. Les résultats (Annexe 4) montrent que les fractions fines – inférieures à 63 μm pour les deux premiers mètres, et à 600 μm pour la suite du carottage – dominent largement puisqu'ils représentent plus de 99% de l'échantillon. Les sédiments sont donc principalement composés de limons.

Sur l'image de Passega pour le sondage HSL-P1-13,40m (Figure 30), le nuage de point est situé dans la zone qui représente une mise en place du dépôt par décantation. L'image CM de Passega a également été réalisée avec la taille des plus gros éléments qui ont été mesurés pour chaque échantillon. Toutefois, il n'est pas possible de mettre ces valeurs en relation avec le D_{50} des prélevements laser puisqu'on compare un échantillon comprenant 5 cm de sédimentation avec un échantillon prélevé tous les 5 cm. La taille des plus gros éléments est donc uniquement placé sur l'axe vertical de l'image CM de Passega. Les éléments les plus grossiers correspondent aux éléments du cailloutis et se démarquent du nuage de points. La taille des plus gros éléments ont été pris en compte car l'objectif initial de ce travail était d'identifier les crues exceptionnelles dans les enregistrements sédimentaires par des pics granulométriques marqués. Toutefois, les caractéristiques du site ne se sont finalement pas révélées propices à une telle interprétation puis que les variations granulométriques sont influencées par la dynamique d'ouverture et de fermeture du gouffre et non uniquement de causes climatiques.

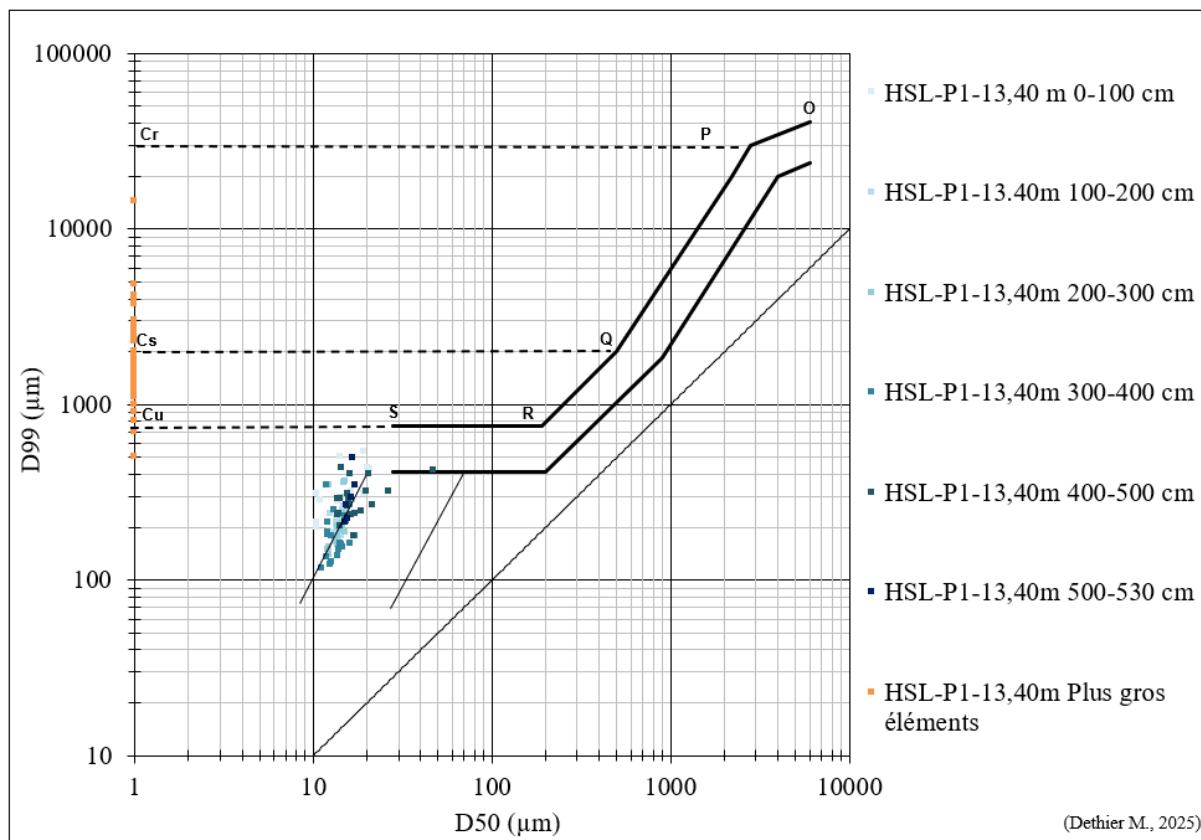


Figure 30 : Image CM de Passega pour le sondage HSL-P1-13,40m

IV-1.1.2.2. Sondage à 26,90 m (HSL-P1-26,90m)

Le deuxième sondage analysé est le HSL-P1-26,90m (Figure 27). Ce sondage a été réalisé en deux parties. Un premier carottage a été réalisé en date du 09 septembre 2024. Le cailloutis n'avait pas été atteint et lors d'une journée de terrain suivante, le 17 février 2025, le carottage a de nouveau été réalisé en vue de déterminer la profondeur exacte où se trouve le sommet du cailloutis. Sur ce deuxième carottage en HSL-P1-26,90m aucune analyse n'a été faite hormis l'ouverture des deux dernières carottes en vue de placer correctement le contact cailloutis de ce sondage. Au niveau de la description du sondage, les trois premiers mètres sont composés d'un limon homogène brunâtre avec une teinte

légèrement plus claire au début (Munsell 5YR 4/4 puis 5YR 4/6). La présence d'un morceau de céramique rouge a été observé à 91 cm sur le sondage et un niveau à microcharbons entre 211 et 277,5 cm. Ensuite, entre 300 cm et 461 cm la composition est un limon argileux homogène prenant plusieurs teintes passant du brun (Munsell 7.5YR 4/4, 10YR 4/4 et 5YR 3/6) au gris (Munsell 2.5Y 4/1). À partir de 461,3 cm, la présence de plusieurs niveaux de restes de matière organique voire de tourbe est constatée. Grâce au carottage du 17/02/2025, le contact cailloutis a pu être placé à 595,5 cm. Celui-ci est légèrement en oblique, signe d'une éventuelle érosion. À la base du sondage HSL-P1-26,90m du 09/09/2024, se trouvait des macro restes de matière organique. Ceux-ci, situés au contact du cailloutis, ont été prélevés et envoyés pour une datation radiocarbone (^{14}C). Le résultat de cette datation (RICH-36953) donne une date de 1983 ± 24 BP, soit 50 BC-120 AD cal. (Annexe 3²).

Comme pour le sondage à 13,40 m, des mesures au granulomètre laser et des observations après tamisage ont permis de dresser un profil vertical (Figure 31) selon la profondeur des différentes variables granulométriques D_{50} , D_{99} et taille du plus gros élément. Sur ce profil vertical, de nombreuses variations sont visibles. Tout comme pour le carottage à 13,40 m, un lissage sur 10 données a été réalisé (Figure 32). Les variations ondulatoires sont davantage plus prononcées que celles observées pour le sondage HSL-P1-13,40m. Ces mouvements ondulatoires sont assez discrets en surface et commencent à s'accentuer à partir de 300 cm de profondeur. Les hypothèses quant à ce phénomène de cycle granulométrique seront abordées plus tard dans ce travail une fois l'ensemble des carottages du profil HSL-P1 présentés.

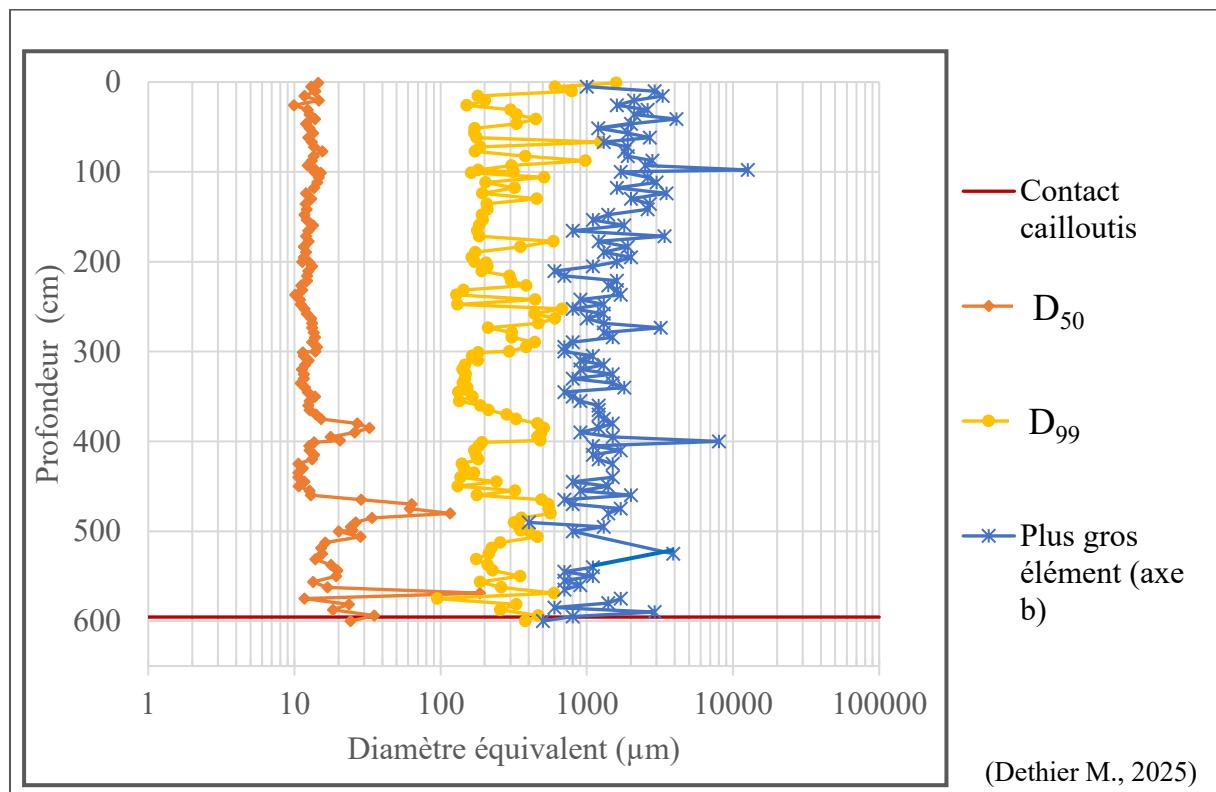


Figure 31 : Profil vertical des valeurs caractéristiques (D_{50} , D_{99} et taille du plus gros élément) du sondage HSL-P1-26,90m

² Datation réalisée au Royal Institute for Cultural Heritage (KIK-IRPA) à Bruxelles

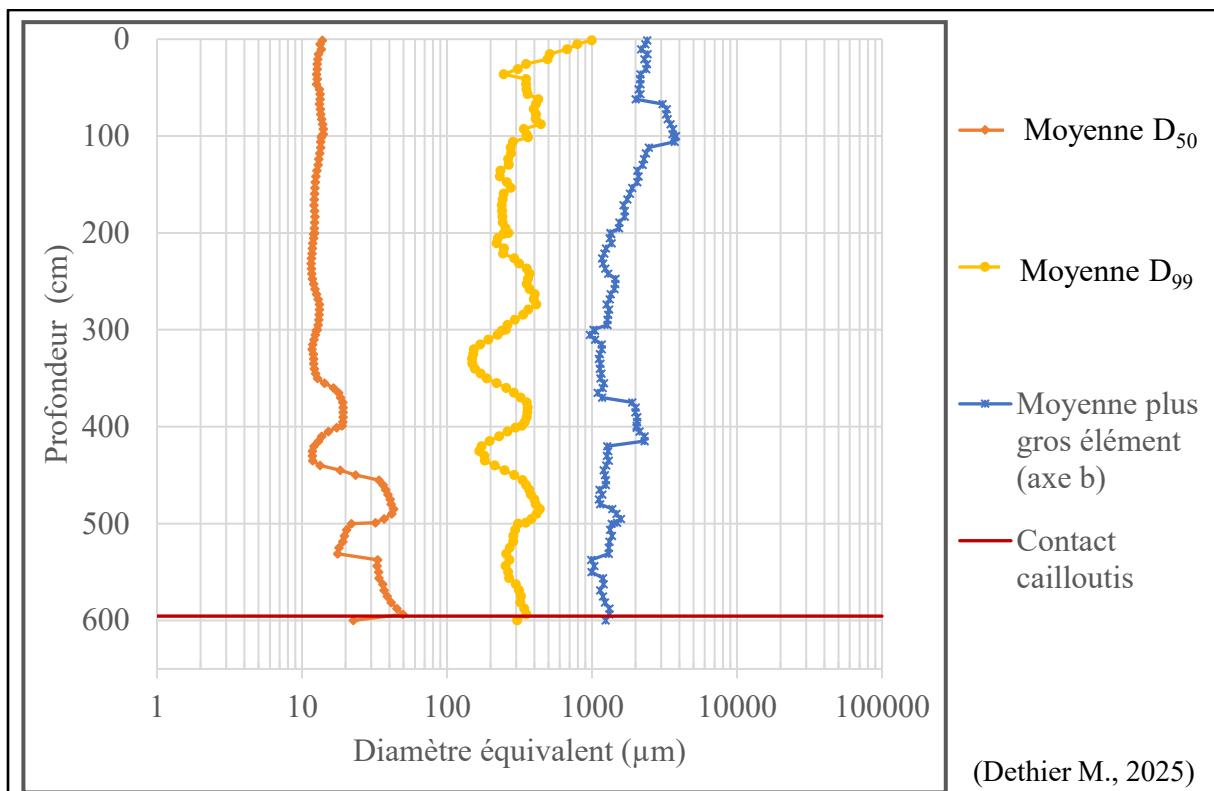


Figure 32 : Profil vertical des valeurs caractéristiques (D_{50} , D_{99} et taille du plus gros élément) moyennées(moyenne mobile centrée sur 10 valeurs) du sondage HSL-P1-26,90m

Ensuite, une recherche et un comptage de billes sidérurgiques (Figure 33) a également été réalisé sur ce sondage. Les billes sidérurgiques sont présentes sur 135 cm depuis la surface avec un pic d'activité à 75 cm de profondeur. En appliquant le même raisonnement que pour le sondage à 13,40 m, ce résultat permet d'estimer un taux de sédimentation de 0,32 cm/an, soit 32 cm par siècle. Le taux de sédimentation est comparable à celui calculé pour le sondage HSL-P1-13,40m , toutefois le nombre de billes sidérurgiques présentes dans ce sondage ci est inférieur à ce qui a pu être observé pour le carottage précédent pour la fraction 63-212 µm. Il y a donc un diminution du nombre d'éléments sidérurgiques fins au fur et à mesure qu'on s'éloigne du cours de la Lesse actuelle.

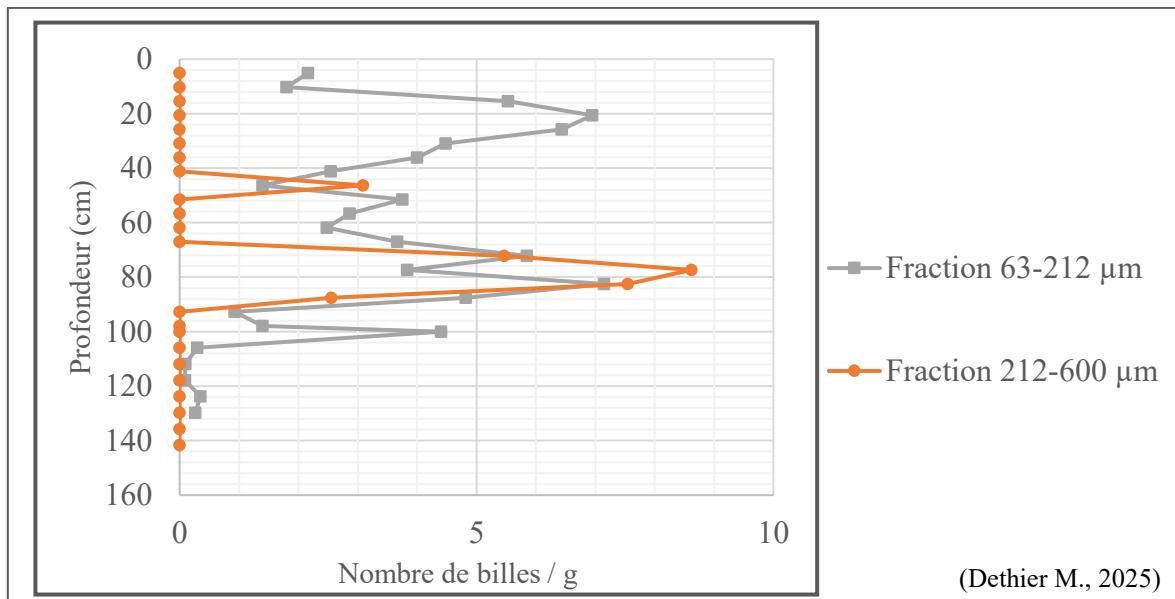


Figure 33 : Nombre de billes sidérurgiques en fonction de la profondeur dans le sondage HSL-P1-26,90m

Après la réalisation des différents tamisages, la part massique (%) (Annexe 4) de chaque classe granulométrique a été mesurée pour l'ensemble des échantillons. La totalité de ceux-ci ont une domination des classes granulométriques fines c'est-à-dire de limons.

Pour finir, l'analyse de l'image CM de Passega (Figure 34) indique que les sédiments du carottage HSL-P1-26,90m se sont déposés principalement par suspension gradée et homogène pour les trois premiers mètres depuis la surface du carottage et par décantation entre 300 et 600 cm de profondeur. Au niveau des éléments les plus grossiers, les échantillons qui se démarquent du nuage de points correspondent aux éléments situés à la base du sondage, au contact cailloutis.

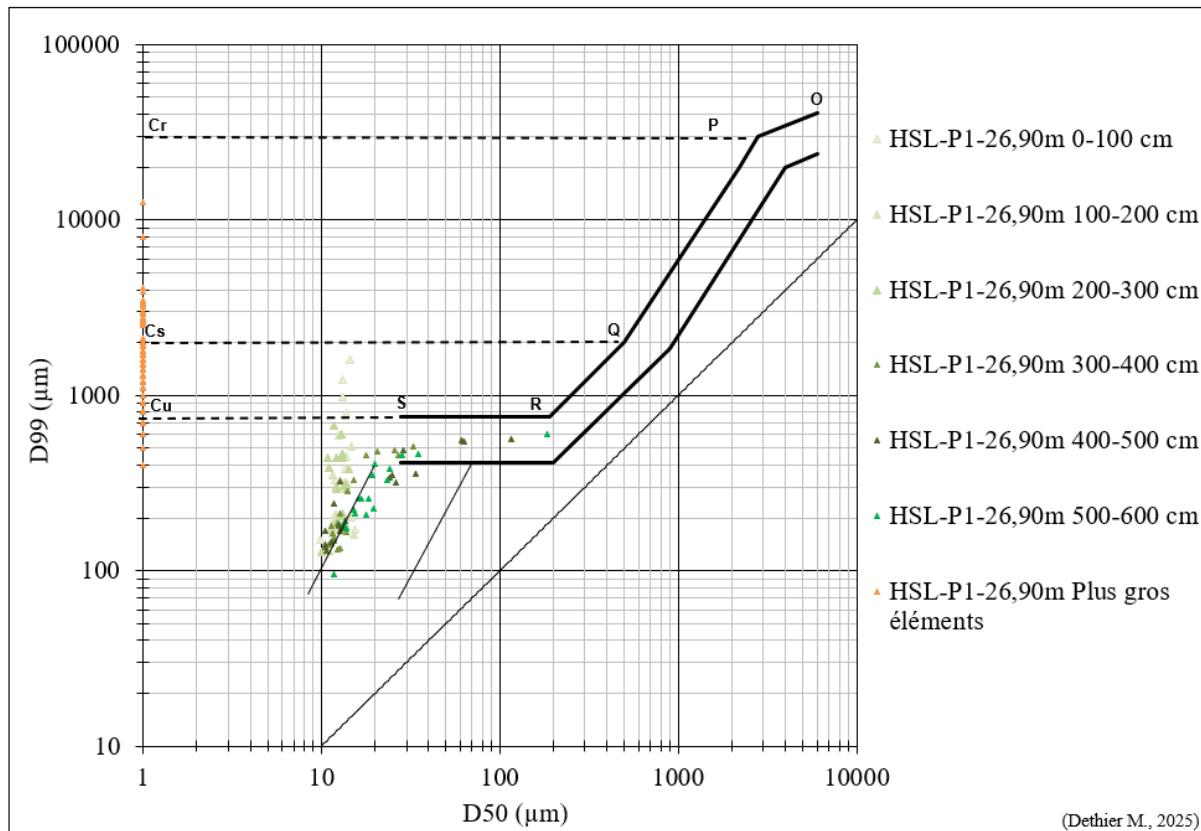


Figure 34 : Image CM de Passega pour le sondage HSL-P1-26,90m

IV-1.1.2.3. Sondage à 42 m (HSL-P1-42m)

Le troisième sondages du profil qui a été analysé est celui situé à 42 m (HSL-P1-42m) (Figure 27). Ce carottage est composé en grande partie de limon homogène brunâtre (Munsell 7.5YR 4/3). Entre 259,5 et 262 cm, il y a la présence d'un silex non taillé de 4,3 cm de longueurs (axe a) et de 2,1 cm de largeur (axe b). Il y a présence d'une couche de 3 cm de limon légèrement plus claire (Munsell 10YR 5/4) à 362 cm. À partir de 445 cm de profondeur, il commence à avoir la présence de cailloux pars dans la matrice limoneuse pour avoir un contact cailloutis situé à 462 cm. Le sondage fait 522 cm, les 40 derniers centimètres sont composés du cailloutis essentiellement constitué d'éléments roulés.

Sur ce carottage, aucune mesure au granulomètre laser n'a été réalisée. Cependant, un tamisage à 600 μm pour des prélèvements de 5 cm ont été réalisés. Sur ces échantillons des observations au binoculaire ainsi que la mesure de l'élément le plus grossier ont été effectués. Sur la figure 35 qui représente l'évolution verticale de la taille des éléments les plus grossiers, il est facilement observable qu'à partir de 400 cm de profondeur, les éléments deviennent de plus en plus grossiers pour arriver au cailloutis avec des éléments de l'ordre d'une douzaine de centimètres d'axe b. À la base, les éléments sont beaucoup plus grossiers que ceux observés dans les deux sondages précédents.

Au niveau de la répartition de l'échantillon selon les classes granulométriques, les fractions inférieures à 600 µm sont dominantes jusqu'à 467 cm où les fractions supérieures à 600 µm dépassent les 50 % de composition de l'échantillon (Annexe 4).

Pour ce sondages, aucune analyse supplémentaire n'a été effectuée et aucune recherche de billes sidérurgiques n'a été réalisée. Les résultats ne permettent pas de remplacer les échantillons dans l'image CM de Passega mais si cela avait été fait, les résultats attendus auraient été très semblables à ceux observés pour les sondages HSL-P1-13,40m et HSL-P1-26,90m.

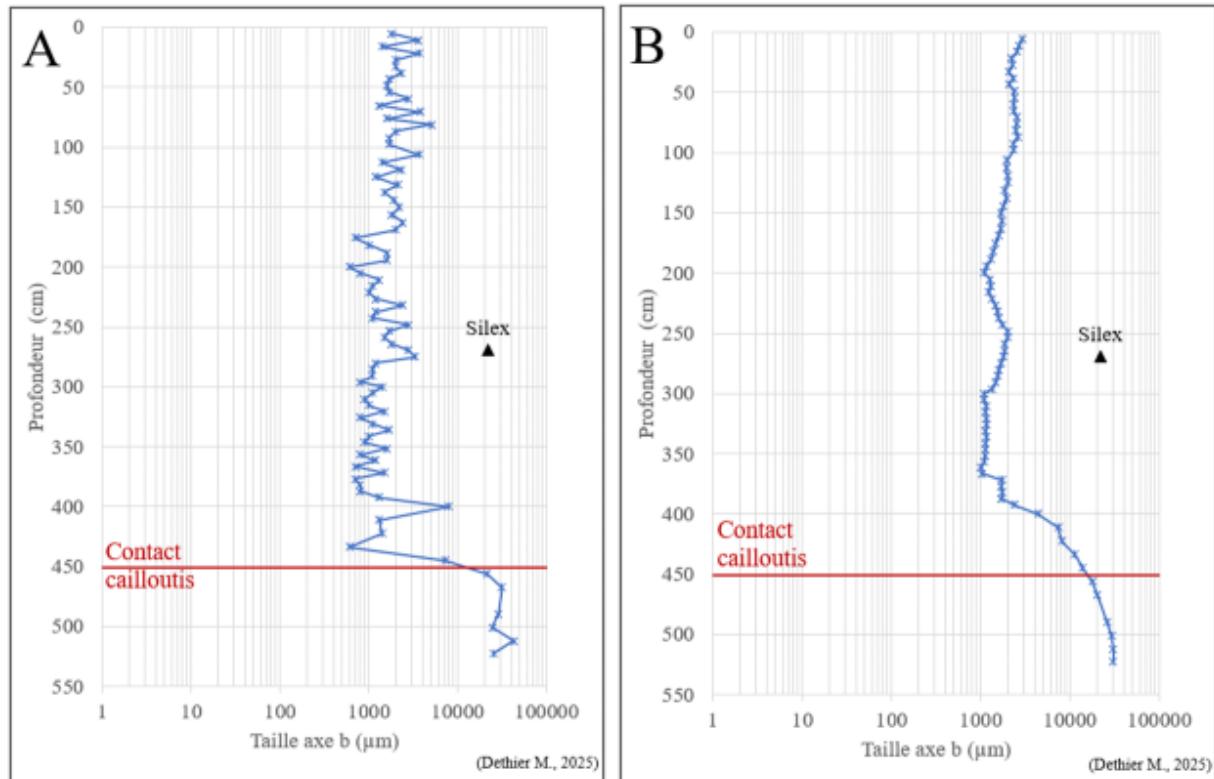


Figure 35 : Profil granulométrique vertical brute (A) et moyenné(moyenne mobile centrée sur 10 valeurs) (B) pour le sondage HSL-P1-42m

IV-1.1.2.4. Comparaison des sondages du profil HSL-P1

Maintenant que chacun des sondages du profil HSL-P1 a été décrit, il est important de les comparer davantage afin de mettre en lumière les points de convergences et ceux de divergences.

Il a été remarqué sur les profils granulométriques verticaux des sondages à 13,40 m et 26,90 m (Figures 36 & 37) des ondulations cycliques. Celles-ci ont été moins visibles sur l'analyse granulométrique verticale du sondage HSL-P1-42m en raison que la sédimentation à cet endroit est moins impactée par le gouffre car le sondage est situé plus loin sur le profil. Ces ondulations cycliques peuvent être le signe de plusieurs choses. L'entrée du réseau karstique par le siphon aurait pu être bouchée. Celui-ci aurait pu être colmaté par des sédiments tels que la charge de fond ou encore des branchages. Actuellement, le gouffre de Belvaux est régulièrement nettoyé afin d'y enlever tout élément qui obstrue l'entrée de la Lesse dans le système karstique mais ça n'a pas été toujours le cas. Une autre hypothèse pouvant être envisagée serait pour des raisons climatiques qui auraient impactées le régime hydrologique de la Lesse. Des changements à l'échelle du bassin versant de la Lesse ou même de la région auraient pu affecter le régime hydrologique de la Lesse. Une modification du régime de précipitations, une baisse des débits ou une augmentation de la fréquence des étiages, auraient pu réduire la capacité d'alimentation du gouffre et influencer de manière significative son fonctionnement. De plus, le gouffre n'est pas soit ouvert, soit fermé. Même une fermeture partielle du système d'infiltration karstique peut avoir des impacts sur la sédimentation.

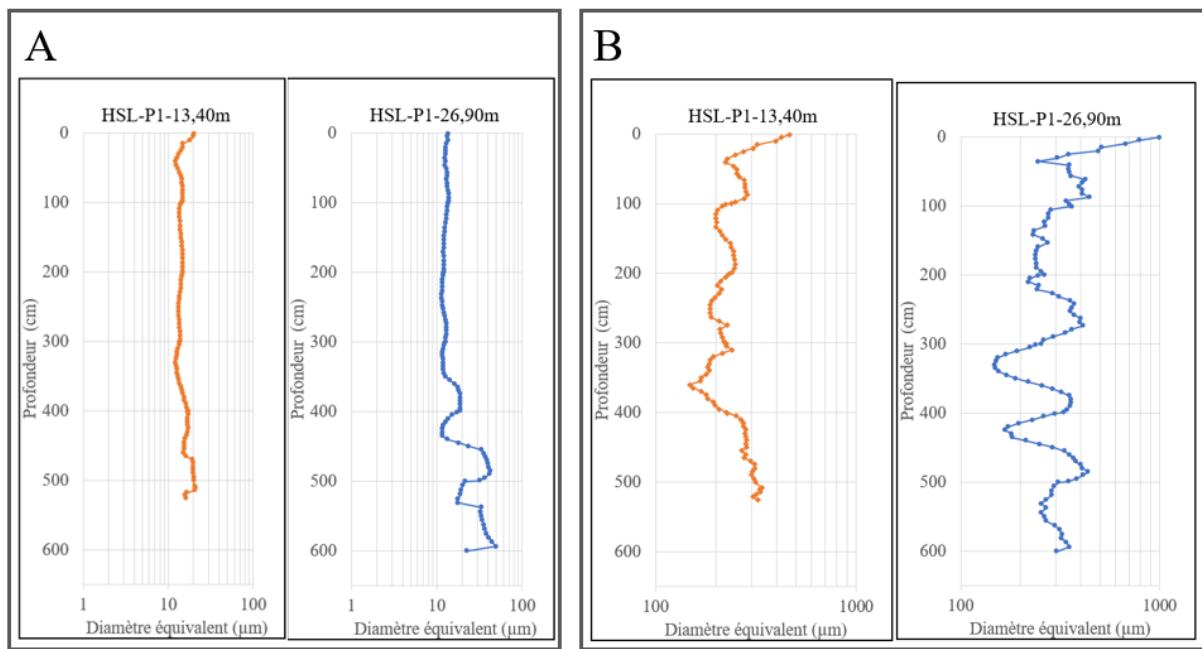


Figure 36 : Profils granulométriques verticaux des valeurs caractéristiques (A- D_{50} et B- D_{99}) moyennés(moyenne mobile centrée sur 10 valeurs) des sondages HSL-P1-13,40m et HSL-P1-26,90m et HSL-P1-26,90m

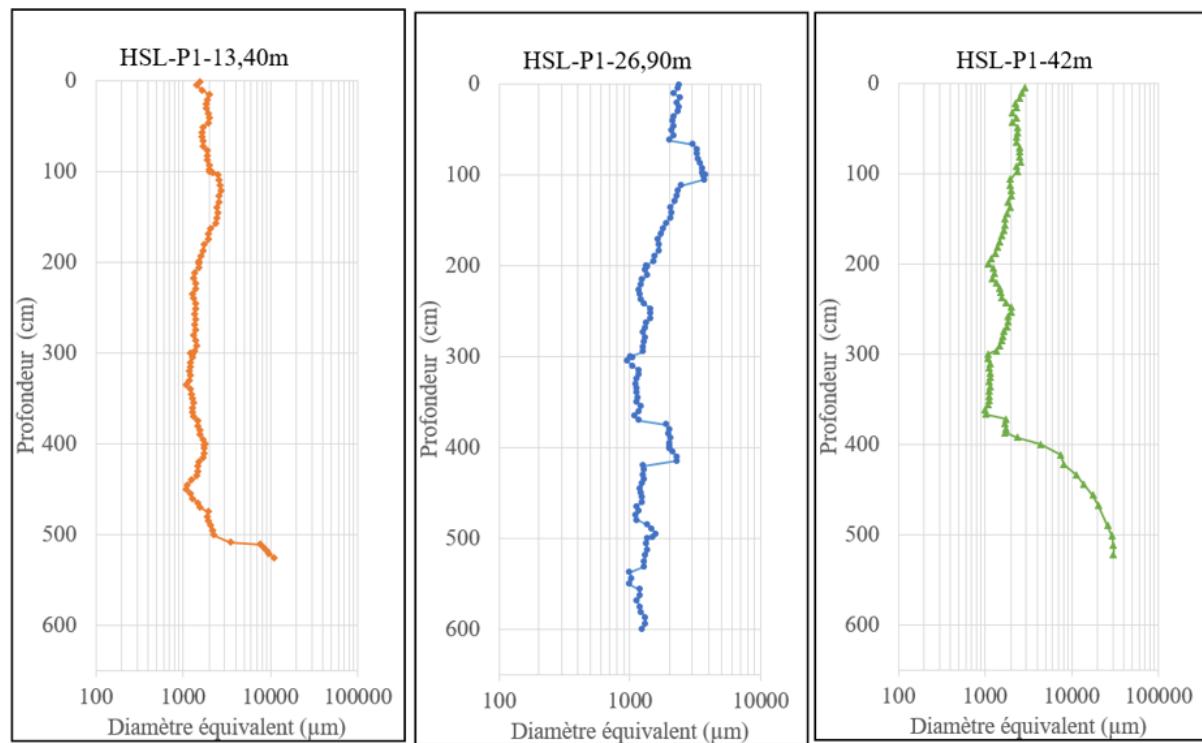


Figure 37 : Profils granulométriques verticaux de la tailles des plus gros éléments moyennés(moyenne mobile centrée sur 10 valeurs) des sondages HSL-P1-13,40m, HSL-P1-26,90m et HSL-P1-26,90m

IV-1.2. HSL-P5

Ce profil a été réalisé dans la plaine alluviale du gouffre de Belvaux juste au niveau de l'entrée du gouffre (Figure 8). Les carottages réalisés sur ce profil sont au nombre de six et ont été réalisés les 13 et 14 mai 2025. Aucune analyse sédimentaire n'a été effectuée sur ces échantillons dans le cadre de ce travail en raison de la date à laquelle les carottages ont été effectués. Seules les altitudes du cailloutis vont être traitées. Les carottes n'ont pas été ouvertes et décrites. Elles sont stockées dans un congélateur pour de futures analyses éventuelles.

Le profil prend une direction N 47° E. Les différents sondages ont été réalisés à 5m, 25 m, 35 m, 45 m et 55 m par rapport au bord du chemin asphalté. Tous les sondages ont atteint le cailloutis et l'altitude de celui-ci pour chacun des sondages a été replacée sur le profil topographique (Figure 39) qui a été levé à l'aide d'une station totale. Les niveaux de cailloutis atteints lors des carottages montrent différents niveaux d'incision. Un premier niveau est visible aux sondages à 35 m, 45 m et 55 m avec une incision de l'ordre de 5 m par rapport au cailloutis du lit actuel de la Lesse. Un second niveau est décrit par les sondages à 15 m et 25 m avec un taux d'incision se rapprochant des 3 m et pour finir un troisième niveau représenté par le sondage à 5 m et le niveau du fond du lit actuel.

Un profil de tomographie électrique (ERT) a été réalisée sur le profil HSL-P5 (Figure 38) avec l'aide de Thomas Lecocq. Celui-ci a une longueur de 94,5 m avec des électrodes placées à 1,5 m d'écart. La figure 37 montre un premier profil qui correspond à la pseudo-section de résistivité apparente mesurée et un second profil qui correspond à la pseudo-section de résistivité apparente calculée. Le troisième profil correspond au modèle inverse de résistivité qui a été effectué par la Méthode d'inversion Wiener-Schlumberger. L'échelle de résistivité varie entre 31,3 $\Omega \cdot \text{m}$ et 427 $\Omega \cdot \text{m}$. L'erreur RMS après inversion est de 1,36 % après 2 itérations ce qui est très bon et traduit une bonne fiabilité de l'inversion et donc des résultats. De manière verticale, le modèle montre de faibles résistivités sur les cinq premiers mètres suivis de résistivités plus fortes en profondeur. Au niveau longitudinal, le niveau plus élevé retrouvé dans les sondages à 35 m, 45 m et 55 m sur le profil est visible sur le modèle tomographique. Ce niveau est représenté par une zone de forte résistivité pouvant être assimilé à un niveau de galets compactés ou au contact avec le substratum rocheux.

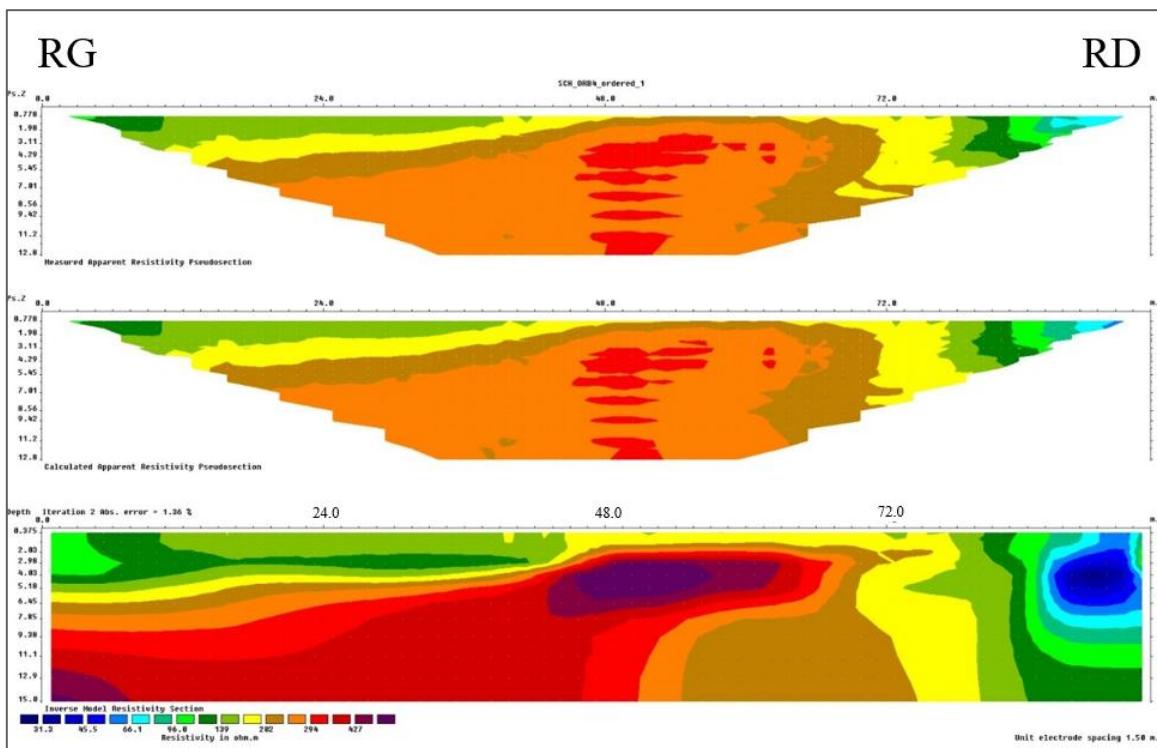


Figure 38 : Profil tomographique HSL-P5

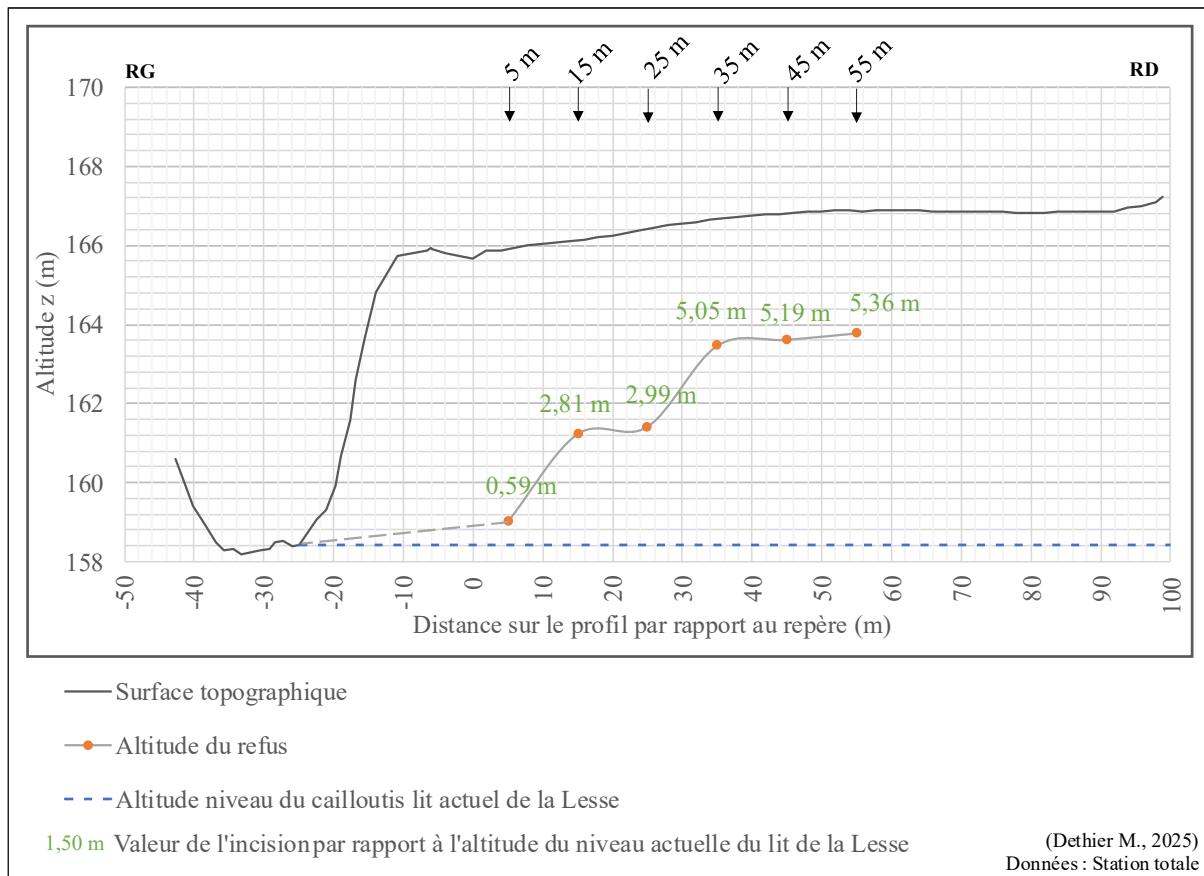


Figure 39 : Profil topographique HSL-P5

IV-1.3. HSL-P2

Le troisième profil réalisé dans la plaine alluviale du gouffre de Belvaux se situe quelques mètres en aval du gouffre (Figure 8). Sur ce profil, un seul sondage a été effectué. Celui-ci a été mené le 18 août 2022 par Geoffrey Houbrechts et Christophe Delaere. Il s'agit d'un sondage manuel réalisé à la tarière. Le point de départ de ce profil est le bord de la route touristique actuelle et prend une direction N 38° E. Le sondage a été fait à une distance de 36 m sur le profil et a atteint une profondeur de 4,25 m.

L'altitude du cailloutis atteint a été replacée sur un profil topographique réalisé sur base du LiDAR 2021-2022 et d'un levé à la station totale. L'incision a été estimée à 4,15 m (Figure 40), sur base de l'altitude actuelle du cailloutis du fond du lit de la Lesse.

Dans ce sondage, un silex a été retrouvé à une profondeur de 282-290 cm. Au contact du cailloutis, à 425 cm de profondeur, un élément organique a également été trouvé et a pu être daté. La datation obtenue est de 5402 ± 29 BP, soit 4340-4070 cal BC (RICH-34867).

En 2022, lors du carottage, un profil tomographique (ERT) (Figure 41) d'une longueur de 69 m avec des électrodes placées tous les 1,5 m a été réalisé. L'échelle de résistivité varie entre 57,9 $\Omega \cdot \text{m}$ et 840 $\Omega \cdot \text{m}$. L'erreur RMS après l'inversion est de 1,9 après 6 itérations. Cela signifie une bonne fiabilité de l'inversion et des résultats qui en découlent. La tomographie montre une couche en surface pouvant atteindre 4m de profondeur au centre du profil, de faible résistivité (de 57,9 à 124 $\Omega \cdot \text{m}$) prenant la couleur bleue foncée dans ce cas-ci. Cette couche est très conductrice et très probablement constituée de sédiments fins saturés, d'argiles et de limons. À partir de 4 m à 6 m de profondeur, des zones de résistivité plus élevées apparaissent, ce qui peut correspondre à un niveau de graviers ou un contact avec le substrat. Au niveau du sondage qui a été réalisé à 36 m sur le profil, on peut voir que la profondeur qui a été atteinte pourrait correspondre à un changement de résistivité sur le profil tomographique. Pour

finir, deux poches de résistivité nettement plus élevées (couleurs orange à rouge) apparaissent. Celles-ci pourraient correspondre à des structures de galets compactés ou très probablement au bedrock.

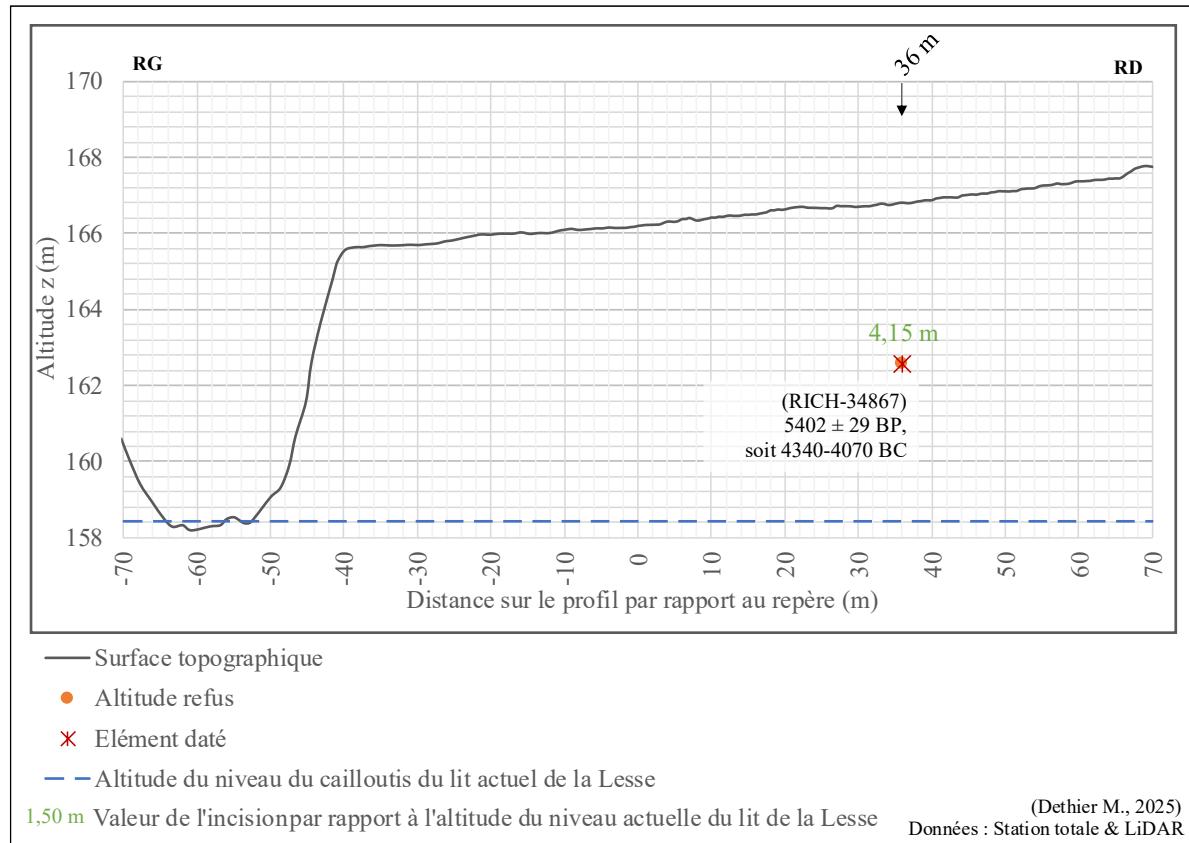


Figure 40 : Profil topographique HSL-P2

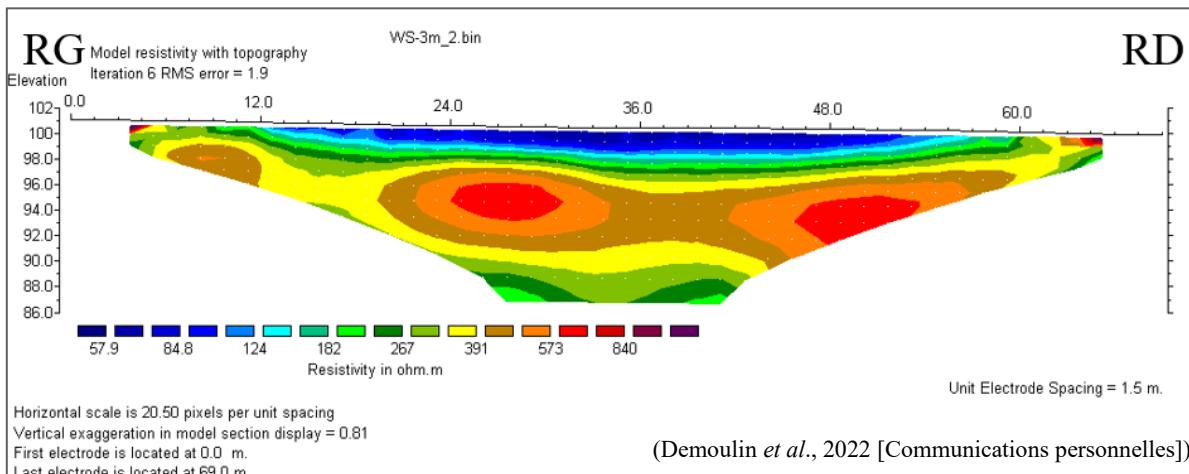


Figure 41 : Profil tomographique HSL-P2

IV-1.4. HSL-P3

Un quatrième profil de sondage a été réalisé dans la plaine alluviale du gouffre de Belvaux (Figure 8). Il prend une direction N 49° E et compte six sondages qui ont été réalisés à la tarière le 15 mai 2024.

Les altitudes du cailloutis qui ont été atteintes lors des carottages ont été replacées sur un profil topographique (Figure 43) qui a été réalisé à l'aide de point dont les coordonnées ont été prises au RTK. La trace d'un ancien chenal est visible avec le point bas situé sur le sondage à 36 m. Toutefois, cette incision ne peut pas être mise en corrélation avec l'ouverture du gouffre. Le profil HSL-P3 est situé sur un niveau de basse terrasse. L'incision visible au sondage à 36 m pourrait dès lors correspondre à un incision Holocène. De plus, le sondage à 78 m se démarque également du profil par son altitude de refus plus élevée. Une question s'est alors posée, est-ce qu'il ne s'agirait pas d'un refus biaisé par la présence d'un ancien chemin à cet endroit ? Après consultation de l'Atlas des voiries vicinales de 1841 (SPW, 2021), le sondage HSL-P3-78m est situé à 6 m de l'ancien chemin et donc son altitude de refus n'est pas impactée par celui-ci.

Les résultats qui sont présentés en Figure 44, montrent une forte variabilité verticale de la taille des éléments les plus grossiers. Les pics de taille supérieurs à 10 mm dans les sondages à 17 m et 36 m suggèrent des épisodes de forte énergie, tandis que d'autres sondages, comme HSL-P3-50m, présentent une taille des grains plus fine traduisant une sédimentation plus calme. Certains pics peuvent être corrélés entre les différents sondages. Par exemple le pic granulométrique situé aux alentours de 166,5 m d'altitude se retrouve dans les carottages HSL-P3-36m et HSL-P3-50m et les sondages à 17 m et 28 m concordent pour les pics granulométriques à 165,5 m et 166 m. Ces corrélations peuvent traduire des phases similaires de mise en place des dépôts et plus particulièrement lors de phases de forte énergie dans ce cas-ci.

En mai 2025, lors d'un stage de terrain, un profil tomographique (ERT) a été réalisé (Figure 42) par Thomas Lecocq. Le profil mesure 94,5 m de long et a un espacement entre les électrodes de 1,5 m. La figure 41 propose trois profils. Le premier représente la pseudo-section de résistivité apparente mesurée, le second représente la pseudo-section de résistivité apparente calculée et le troisième le modèle inverse de résistivité. La méthode dipôle-dipôle a été utilisée pour créer ce modèle tomographique. L'échelle de résistivité varie entre 23,9 $\Omega \cdot \text{m}$ et 704 $\Omega \cdot \text{m}$. L'erreur RMS après l'inversion est de 1,29% après 3 itérations. Cela signifie une bonne fiabilité de l'inversion et des résultats qui en découlent. Au niveau vertical, entre 1 m et 1,5 m de profondeur la résistivité est faible et puis devient très élevée. Latéralement, on retrouve la même structure que celle décrite par le profil de sondages. Il y a la présence d'un niveau de changement de résistivité assez constant autour de 1,50 m, une zone de résistivité moins forte qui correspond à l'incision du sondage HSL-P3-36m et des résistivités élevées quasiment en surface sur la droite du modèle qui peuvent être corrélées avec le niveau atteint au sondage HSL-P3-78m.

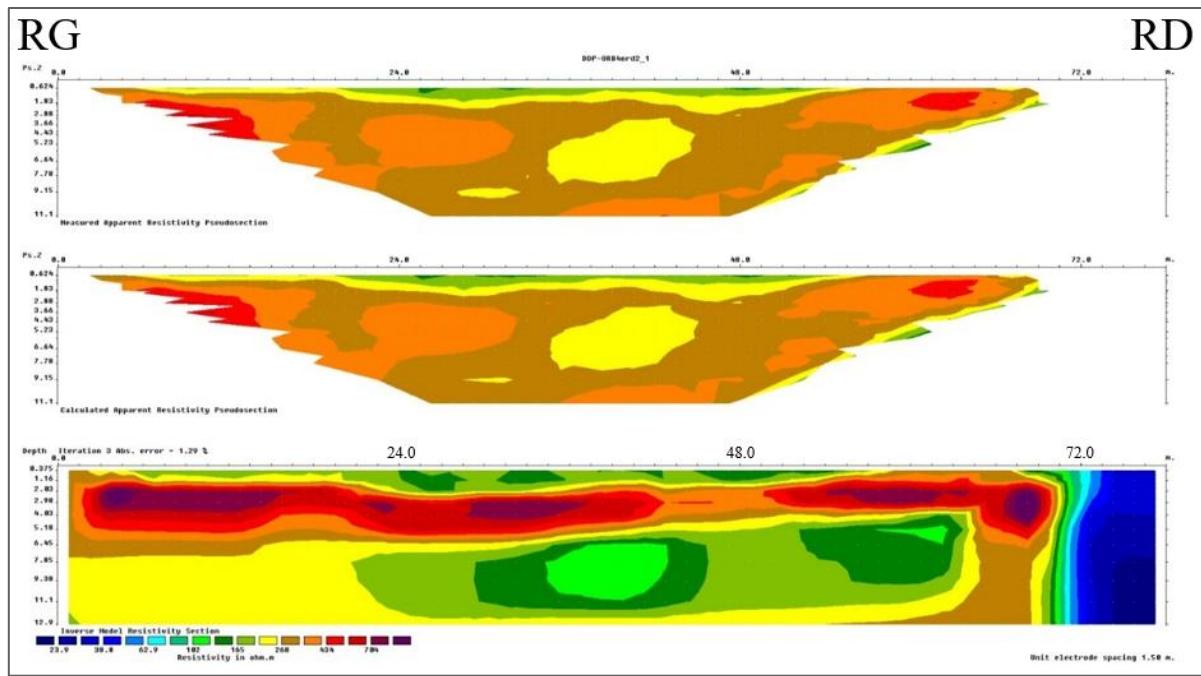


Figure 42 : Profil tomographique HSL-P3

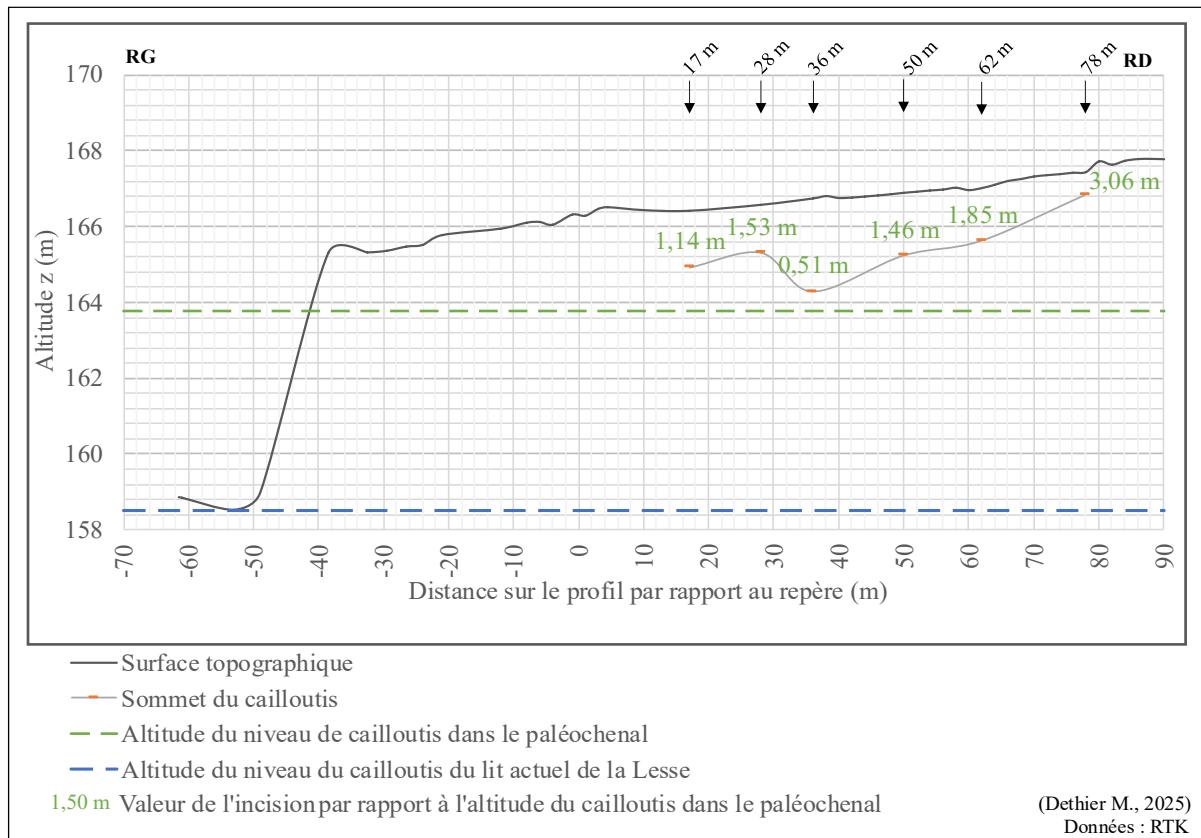


Figure 43 : Profil topographique HSL-P3

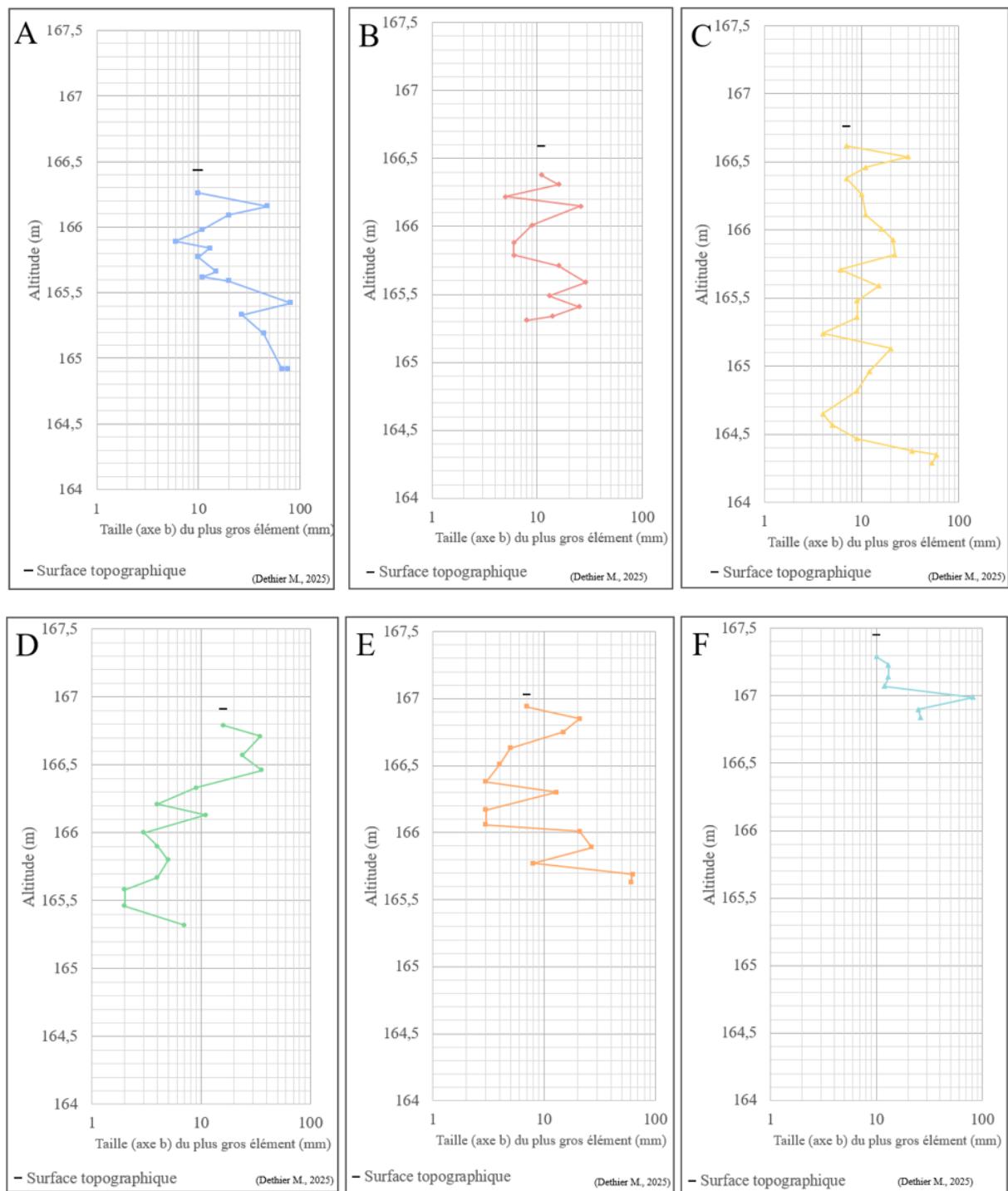


Figure 44 : Evolution verticale des éléments les plus grossiers pour les sondages du profil HSL-P3
 A-17 m, B-28 m, C-36 m, D-50 m, E-62 m et F-78 m

IV-1.5. HSL-P4

Un cinquième profil de carottage a été réalisé dans la plaine alluviale du gouffre de Belvaux (Figure 8). Ce profil, HSL-P4, prend une direction N 43° E et est situé au débouché du méandre abandonné du Chession (Houbrechts et al., 2025). Les carottages sont au nombre de 10 et ont été réalisés le 14 mai 2024 à l'aide d'une tarière.

Comme précédemment, les altitudes de cailloutis qui ont été atteintes dans les différents sondages ont été replacées sur un profil topographique (Figure 45). Celui-ci a été réalisé à l'aide de la station totale. Entre le niveau de basse terrasse (sondages à 131 m et 150 m) et le niveau de cailloutis dans le paléochenal, situé entre le gouffre de Belvaux et le Trou d'Enfaule, l'incision calculée est de l'ordre de 2,89 m.

La même méthodologie que celle appliquée aux échantillons du profil HSL-P3 a été utilisée ici. Les profils granulométriques verticaux (Figure 46) présentent des pics granulométriques pouvant être corrélés entre les différents sondages. Les sondages à 50 m, 64 m, 80 m, 90 m et 110 m ont des allures granulométriques forts similaires signe d'une mise en place des dépôts lors de phases communes telles des événements à forte énergie, des événements de crue, etc.

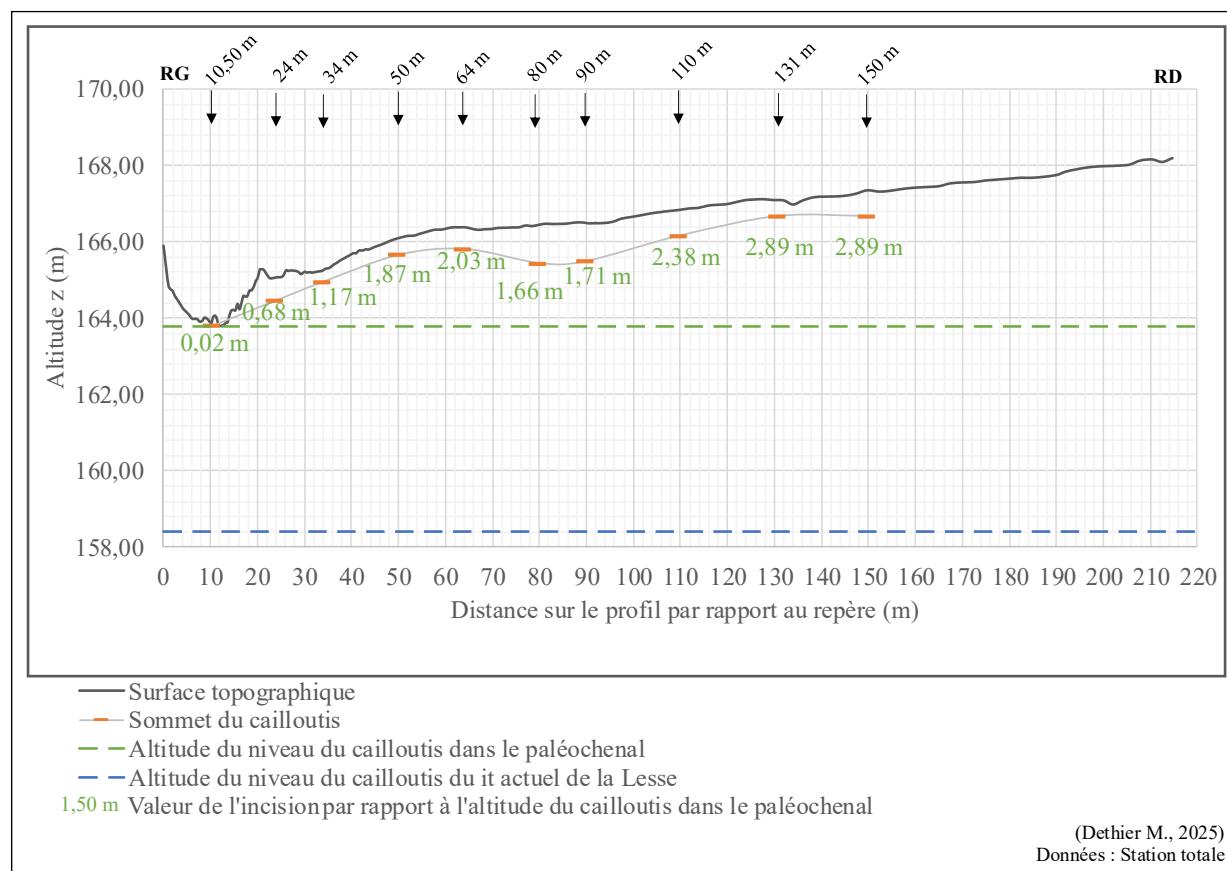


Figure 45 : Profil topographique HSL-P4

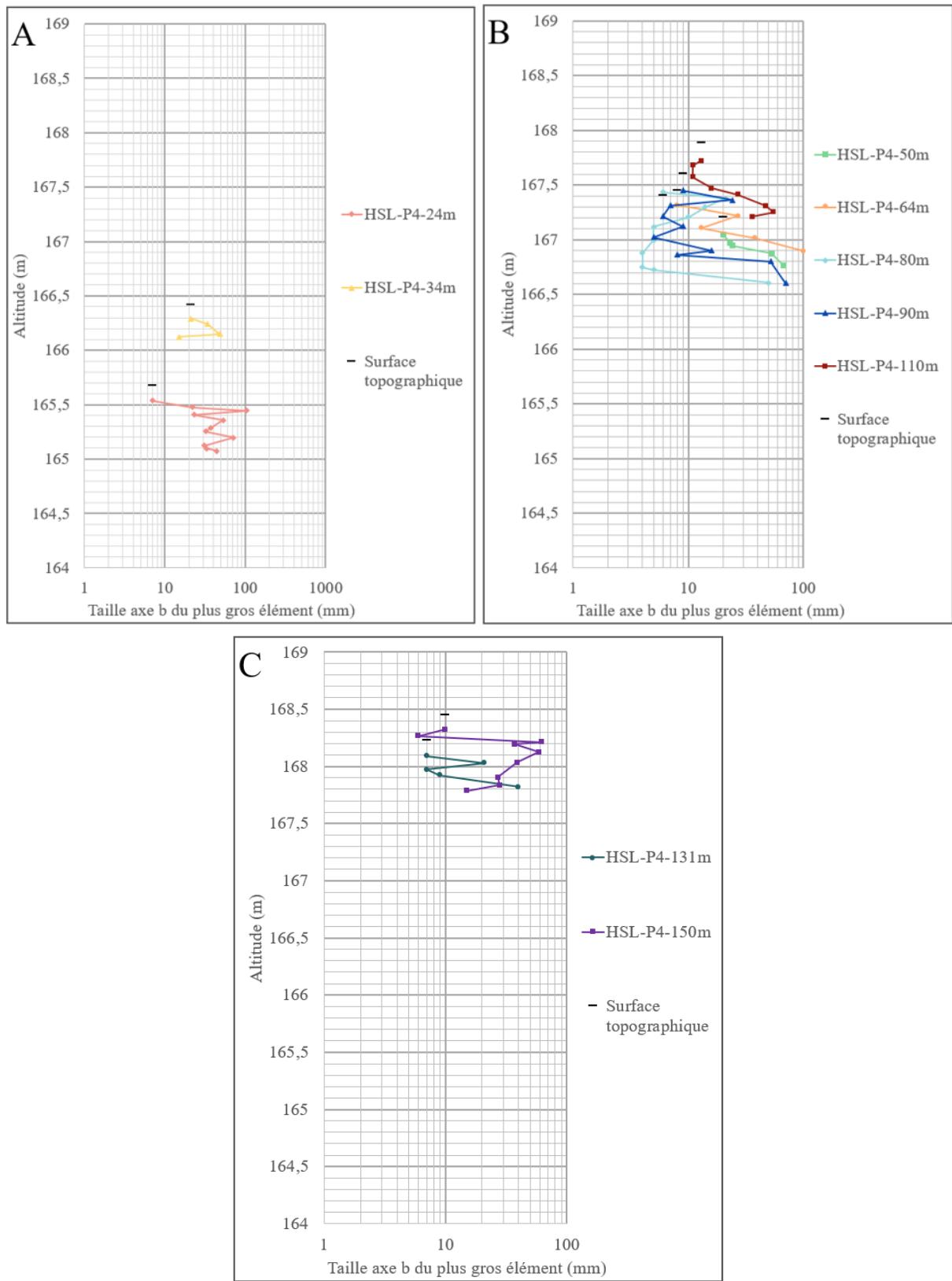


Figure 46 : Evolution verticale des éléments les plus grossiers pour les sondages du profil HSL-P4

IV-1.6. BEL-P0

Un second site de carottage a été exploité dans le cadre de ce mémoire de fin d'études. Il s'agit d'une zone dans la Chavée située au pied du Belvédère (Figure 8). L'hypothèse de travail sur ce site est que lorsque le gouffre de Belvaux s'est ouvert, la Lesse a abandonné la Chavée créant un méandre abandonné voir un oxbow lake. Ainsi, de la matière organique devrait s'être accumulée en condition palustre au contact cailloutis. Il est très fortement probable qu'elle se soit mise en place lors de l'abandon de la Chavée. De plus, le site choisi est quelques mètres en aval de la source du ruisseau de la Planche qui prend le nom de Fontaine Saint-Martin. La fontaine Saint-Martin est connue pour la présence de tuf, roche sédimentaire carbonatée due à la précipitation du carbonate qui enrobe les végétaux formant cette roche, typique des milieu karstique à l'émergence des sources (Ford *et al.*, 1996 ; Pentecost, 2005). Il est donc probable de retrouver des éléments de tuf dans le paléochenal de la Lesse.

IV-1.6.1. Niveau de cailloutis & Profils topographique et tomographique

Un profil de sondage (BEL-P0) a été réalisé sur le site dit du Belvédère. Sur ce profil, six sondages ont été effectués dont deux réalisé le 28 mai 2018 par des étudiants de G. Houbrechts dans le cadre d'un stage de terrain et quatre autres sondages ont été réalisés dans le cadre de cette étude en date du 13 août 2024. Les sondages de 2018 ont été réalisés à la tarière tandis que les sondages de 2024 ont été réalisés à l'aide d'un carottier motorisé. Tous les sondages ont atteint le cailloutis. Le profil prend comme repère un piquet de clôture de la parcelle agricole situé au pied d'un mirador de chasse et a une direction N 152°E.

Les altitudes de cailloutis atteint par les sondages ont été replacées sur un profil topographique (Figure 51) qui a été réalisé à l'aide d'une station totale. On peut voir que le sondage à 49 m est moins profond que celui à 49,50 m. Deux raisons peuvent expliquer cette différence d'altitude malgré la faible distance horizontale qui les séparent. D'une part, le sondage à 49 m a été réalisé à la tarière contrairement au sondage à 49,50 m. En effet, il est plus aisément de descendre dans les premiers centimètres de cailloutis avec le carottier motorisé qu'à la tarière. D'autre part, le profil de 2024 dont fait partie le sondage BEL-P0-49,50m est légèrement dévié de quelques mètres par rapport au profil de 2018 (Figure 51) dont fait partie le sondage BEL-P0-49m. Le sondage à 88 m correspond à un niveau de basse terrasse situé 2,12 m plus haut que le niveau du fond du paléochenal caractérisé par le niveau du cailloutis au sondage BEL-P0-49,50m.

Carottages au pied du Belvédère

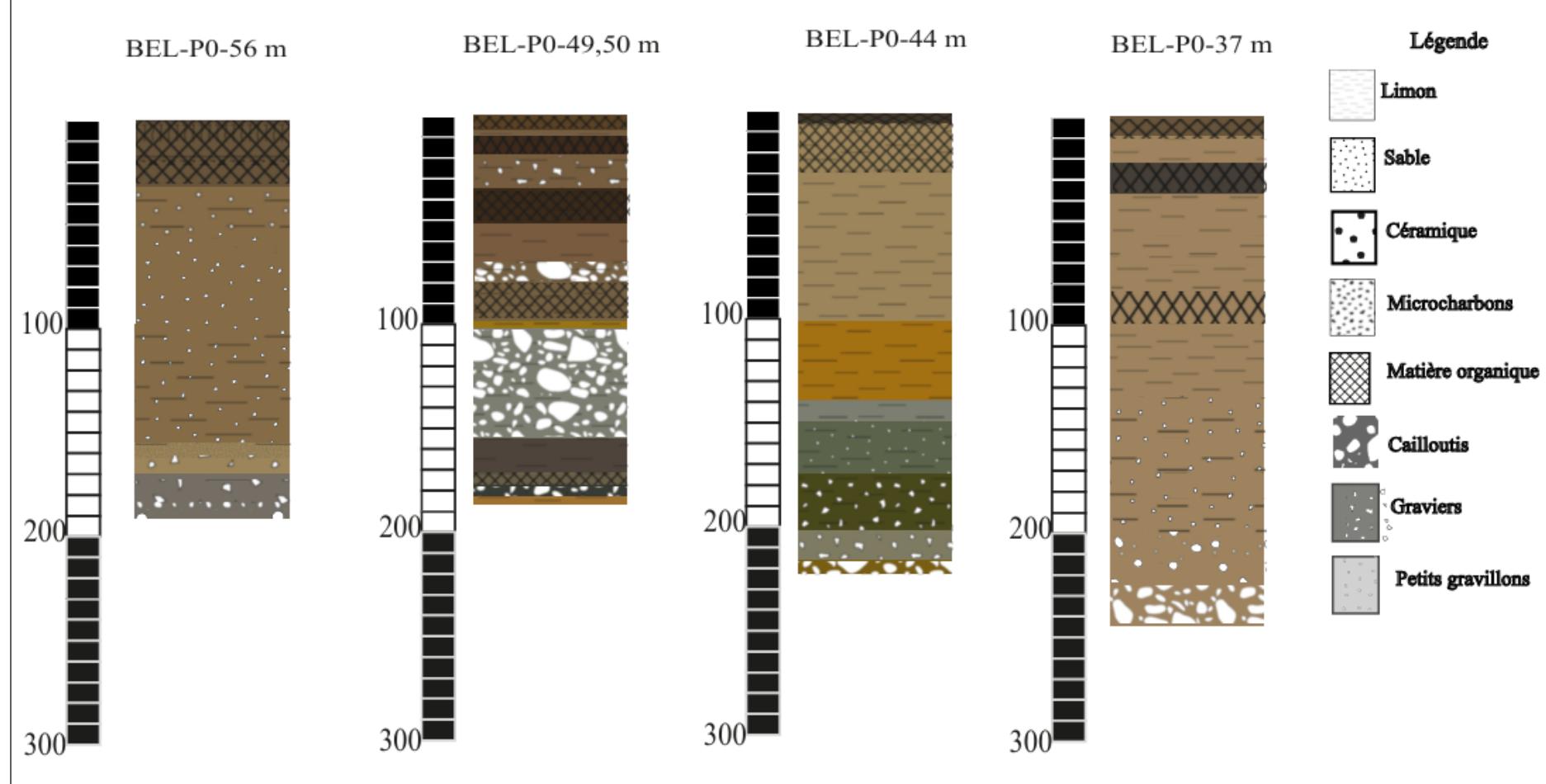


Figure 47 : Logs stratigraphiques pour les sondages du profil BEL-P0

Sur ce profil BEL-P0 deux profils de tomographie électrique (ERT) ont été réalisés en 2018. Le premier (Figure 48) a une longueur totale de 115 m avec un espacement des électrodes de 2,5 m. Son échelle de résistivité varie entre 34,9 $\Omega\text{.m}$ et 252 $\Omega\text{.m}$. L'erreur RMS de cette tomographie est de 0,78 après 5 itérations ce qui signifie une très bonne fiabilité de l'inversion ainsi que des résultats obtenus. Plusieurs zones de résistivités se dégagent sur le profil tomographique. Une première zone, entre 5 m et 45 m, de résistivité faible prend des couleurs de bleu foncé à bleu clair. La résistivité faible de cette zone s'explique par des dépôts fins tels que des alluvions constituées d'argiles et de limons et la présence d'eau dans les sédiments. Une seconde zone de résistivité plus élevée, entre 70 m et 100 m, qui prend des couleurs plus rougeâtres, peut s'interpréter comme une zone de résistance composée de graviers et cailloutis sec. Mis en parallèle du profil topographique, cette zone de forte résistivité correspondrait au niveau de basse terrasse identifié et la zone de résistivité faible correspondrait au paléochenal de la Lesse avant ouverture du gouffre. Le second profil tomographique (Figure 49) présente un focus sur la partie superficielle du premier profil, afin d'affiner l'interprétation au niveau du paléochenal de la Lesse avant ouverture du gouffre de Belvaux. Ce profil ERT a une longueur de 46 m avec un espacement des électrodes de 2 m. L'échelle de résistivité varie entre 16,4 $\Omega\text{.m}$ et 120 $\Omega\text{.m}$. L'erreur RMS après inversion est de 0.59 pour 9 itérations, ce qui indique une bonne fiabilité de l'inversion et des résultats. Au niveau des observations, celles-ci sont semblables à celles faites pour le premier profil ERT à savoir la présence d'une zone de résistivité faible au niveau du paléochenal qui coïncide avec les profondeurs de cailloutis obtenus lors des différents sondages sur ce profil.

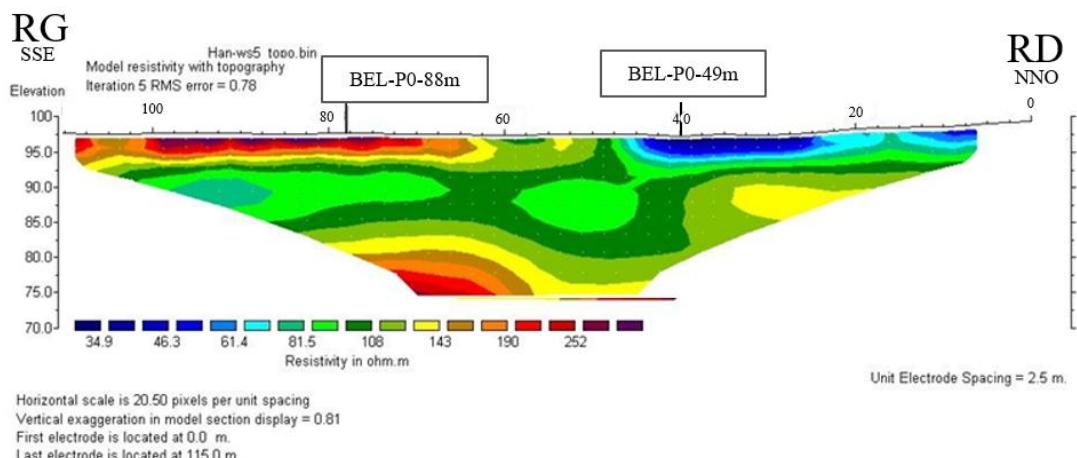


Figure 48 : Profil tomographique BEL-P0 (1)

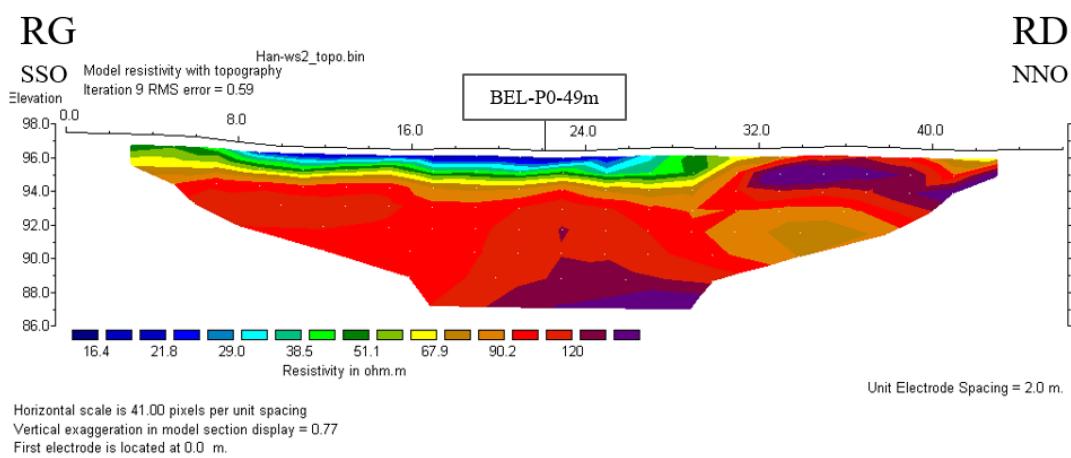


Figure 49 : Profil tomographique BEL-P0 (2)

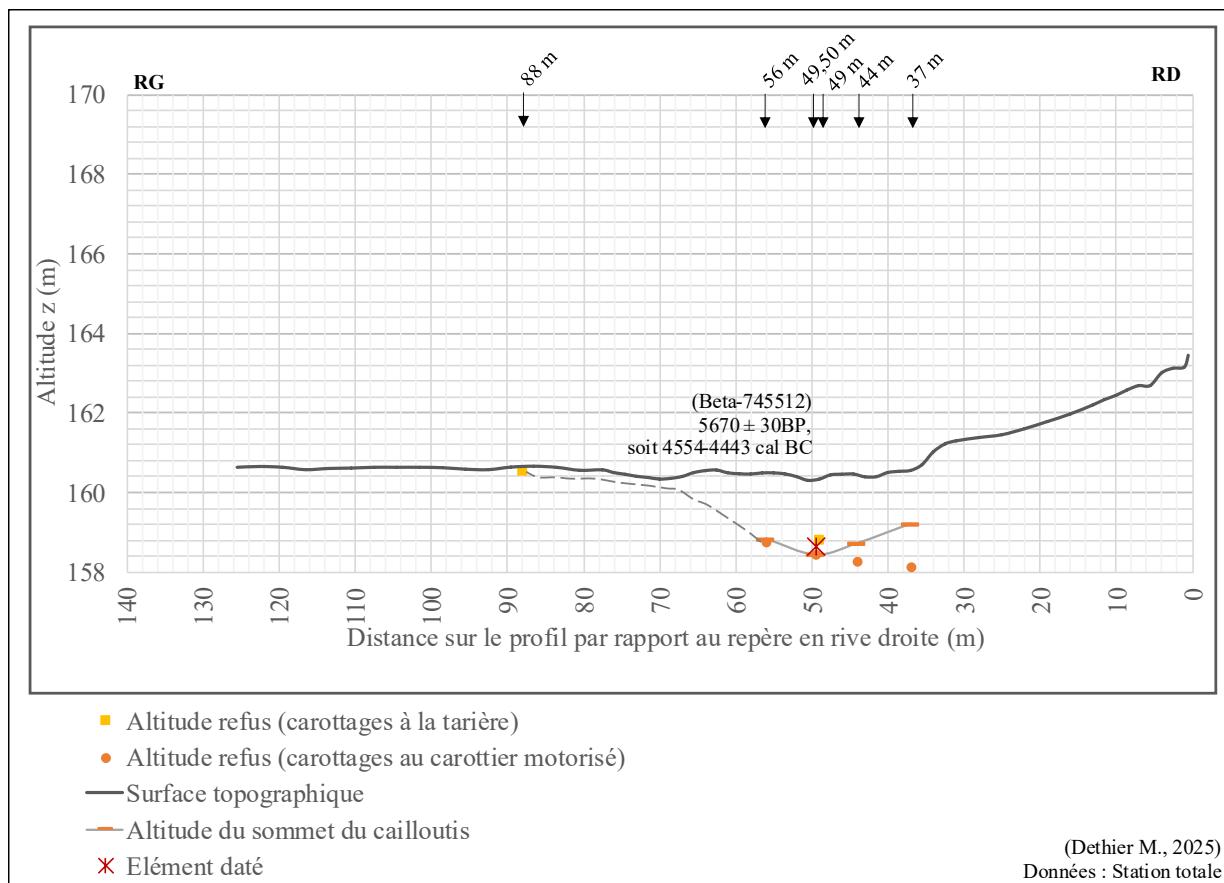


Figure 50 : Profil topographique BEL-P0

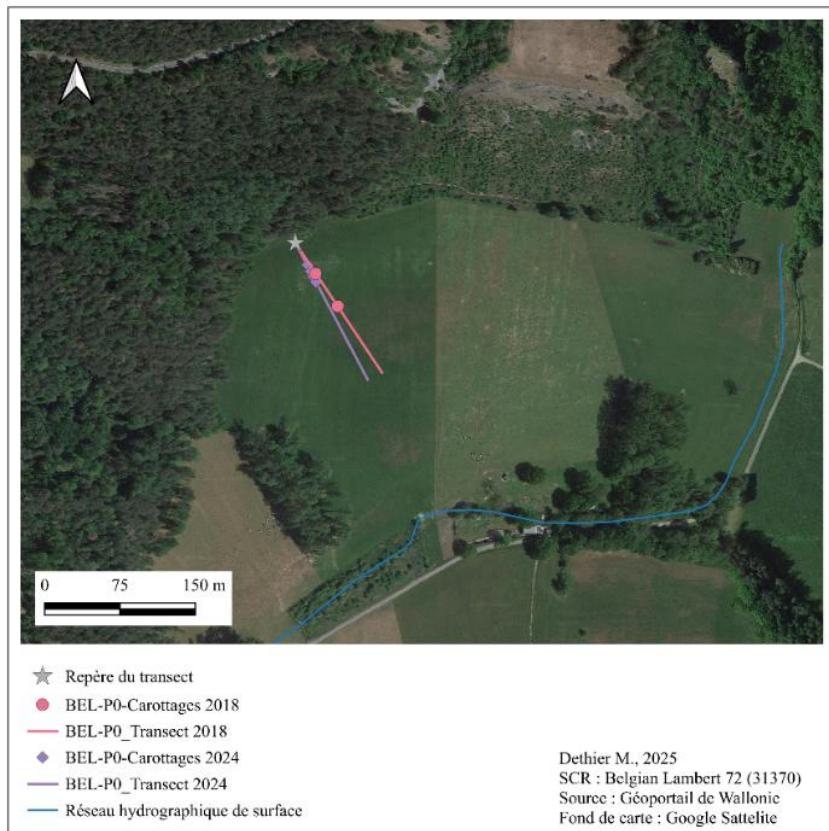


Figure 51 : Déviation entre le profil BEL-P0 de 2018 et BEL-P0 de 2024

IV-1.6.2. Granulométrie

IV-1.6.2.1. Sondage à 37 m (BEL-P0-37m)

Le sondage BEL-P0-37m mesure 244 cm et est composé sur les 10 premiers centimètres d'un sol humifère (Munsell 10YR 3/3), suivi d'un limon argileux (Munsell 10YR 4/3) avec quelques petites taches de rouille (Munsell 10YR 5/6) jusqu'à 109 cm de profondeur. Cette couche d'argile est entrecoupée d'un dépôt tourbeux entre 23 et 37 cm et d'un niveau de racines et de matière organique entre 95 et 100 cm. À 131,5 cm apparaît une transition vers le cailloutis avec des graviers dispersé. Le contact au cailloutis est placé à 134,5 cm de profondeur. Ensuite, la seconde partie du sondage, de 134,5 à 244 cm de profondeur, est composée de graviers avec présence d'éléments calcaire et de galets roulés, dont la taille augmente progressivement avec la profondeur.

Les analyses en laboratoire ont permis de réaliser un profil granulométrique vertical (Figure 52) du sondage. Celui-ci montre des éléments compris entre 1000 et 10 000 μm sur les 120 premiers centimètres, suivi d'une augmentation avec des éléments dépassant les 10 000 μm . La première partie du profil (0-120 cm) montre une légère décroissance granulométrique tandis que la seconde partie (120-244 cm) montre une légère croissance granulométrique. Le contact cailloutis est situé à 135 cm de profondeur et correspond à ce changement granulométrique qui met en évidence un changement dans le mode de dépôt. Ce profil granulométrique montre deux zones distinctes qui peuvent correspondre à deux phases successives. Depuis la base du sondage, une première zone correspondrait à un colmatage par de petits graviers lors d'une première baisse du régime hydrologique pouvant être causée par l'ouverture du Trou d'Enfaule. S'ensuit un arrêt de ce colmatage après l'ouverture du gouffre de Belvaux et une diminution granulométrique dans les dépôts. Cette transition est également observable dans la répartition en masse (%) du sondage pour les différentes classes granulométriques (Annexe 4). Depuis la base du sondage, la classe granulométrique supérieure à 1700 μm est dominante, mais un changement s'opère à partir de 145 cm de profondeur, où cette classe devient moins représentée que celle inférieure à 600 μm .

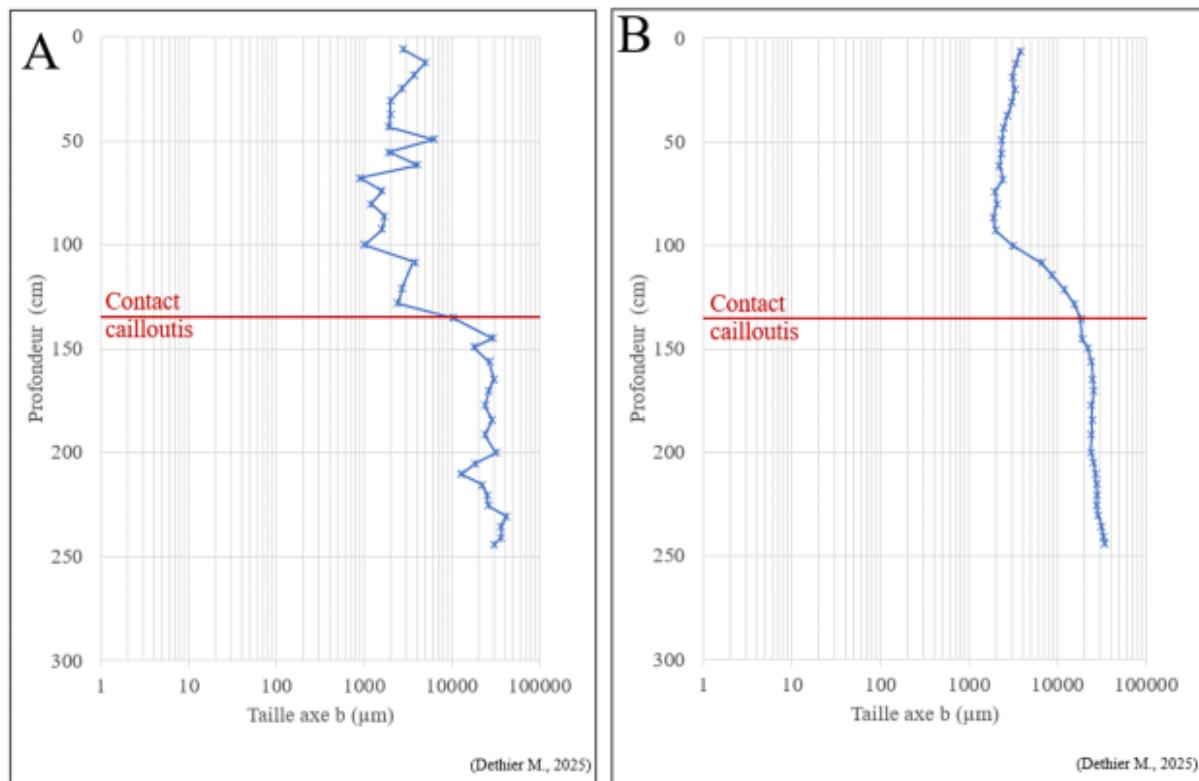


Figure 52 : Profil granulométrique vertical brut (A) et moyen (B) pour le sondage BEL-P0-37m

IV-1.6.2.2. Sondage à 44 m (BEL-P0-44m)

Le sondage BEL-P0-44m, mesure 221 cm et se compose d'un limon organique sur les 30 premiers centimètres pour ensuite passer à un limon argileux de type clay variant légèrement dans les tons de couleurs (Munsell 10YR 5/3, 5GY 4/1 et 7.5Y 4/3). À partir de 148 cm, commence à apparaître des gravillons millimétriques et une composante plus sableuse de la matrice. Un premier contact de graviers centimétriques se fait à 173 cm et un second contact avec des éléments plus de type cailloutis centimétrique se fait à 215 cm.

Le profil granulométrique vertical du sondage BEL-P0-44m (Figure 53) montre, comme dans le sondage précédent (BEL-P0-37m), une variation marquée de la taille des éléments les plus grossiers en fonction de la profondeur. Les données brutes (Figure 53 – A) révèlent une certaine hétérogénéité dans les premiers 150 cm avec des variations entre éléments fins, compris entre 1000 et 10 000 μm , et éléments plus grossiers supérieurs à 10 000 μm . Le profil vertical lissé (Figure 53-B), montre quant à lui, une tendance nette à la décroissance de la taille des éléments sur les 125 premiers centimètres suivie d'une augmentation granulométrique progressive de 125 cm à 221 cm. L'évolution granulométrique verticale de ce profil est très fortement similaire au sondage BEL-P0-37m.

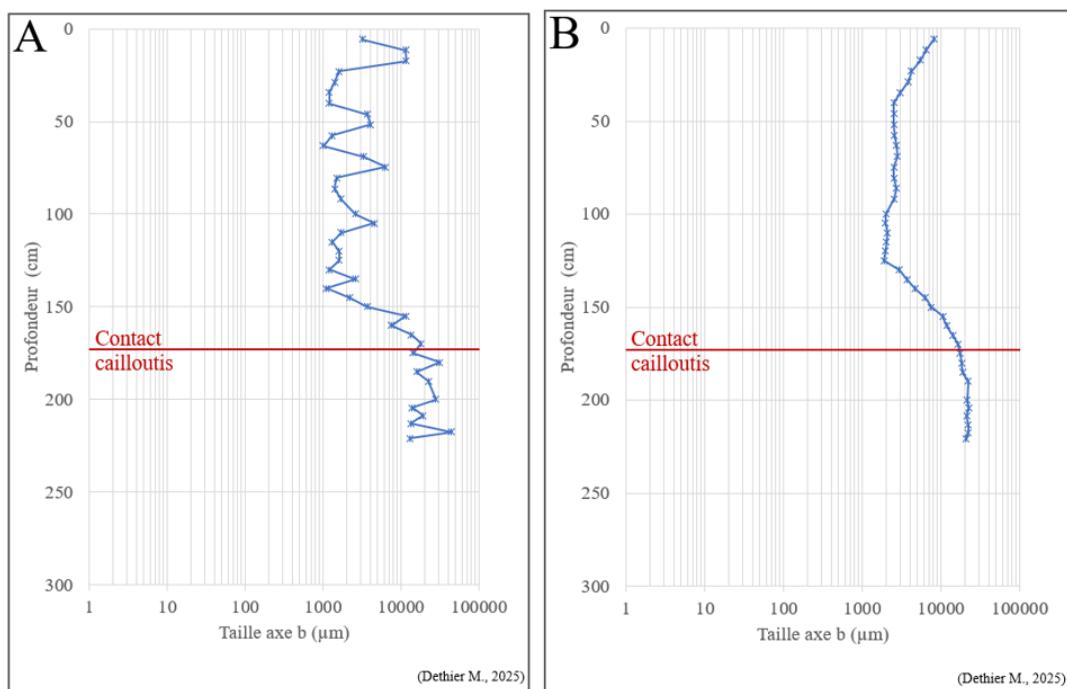


Figure 53 : Profil granulométrique vertical brute (A) et moyené (moyenne mobile centrée sur 10 valeurs) (B) pour le sondage BEL-P0-44m

IV-1.6.2.3. Sondage à 49,50 m (BEL-P0-49,50m)

Le sondage BEL-P0-49,50m a atteint la profondeur de 188 cm et se compose d'une succession de couches plus ou moins organiques. Les 8 premiers centimètres correspondent au sol humifère brun (Munsell 10YR 3/3). Ensuite, jusque 173 cm de profondeur, le sondage se compose d'un limon argileux (Munsell 10YR 4/3 et 10YR 2/3) avec la présence de petits graviers entre 20 cm et 35cm et 100 et 173 cm, des macro reste de matière organique entre 35 cm et 53 cm et 80 cm et 90 cm. Des galets de 5 cm d'axe b se retrouvent entre 53 cm et 71 cm de profondeur. Pour rappel, le tube de prélèvement fait 5 cm de diamètre, qui correspond à la taille maximale des éléments pouvant être prélevés. Une couche de limon argileux de type clay (Munsell 5Y 4/2) riche en matière organique se retrouve entre 176 et 179 cm. Dans cette couche un reste organique qui semble correspondre à un morceau d'écorce a été daté. Le résultat obtenu donne la date de $5670 \pm 30\text{BP}$, soit 4554-4443 cal BC (Beta-745512) (Annexe 5³). Pour

³ Datation réalisée chez Beta Analytic à Miami

finir, la dernière couche du sondage, entre 184,5 et 188 cm, est formée d'un limon organique sableux prenant une couleur ocre (10 YR 5/6). L'alternance des différentes couches plus ou moins organiques combinée à la présence de cailloux dispersés dans plusieurs niveaux vient renforcer l'hypothèse de base émise au début de cette partie (IV-1.6 BEL-P0) qui est que l'abandon de la Chavée à cet endroit ne s'est pas fait brutalement mais par différentes phases de diminution du régime hydrologique

Le profil granulométrique vertical du sondage BEL-P0-49,50m (Figure 54) met en évidence une répartition assez régulière de la distribution des éléments grossiers en fonction de la profondeur. Au niveau des données brutes (Figure 54-A), la courbe présente une allure stable malgré quelques fluctuations. Cela peut suggérer un dépôt moins hétérogène que ce qui a pu être observé dans les sondages précédents. Le graphique lissé (Figure 54-B) confirme cette lecture puisque la taille des éléments est relativement constante sur les 100 premiers centimètres, avant de diminuer légèrement entre 120-130 cm. Pour finir, à la base du sondage il y a une légère augmentation de la taille des éléments à l'approche du cailloutis. Contrairement aux sondages précédents du profil BEL-P0, celui-ci montre une transition plus douce, sans changement brutal de la taille des éléments, pouvant être interprétée comme une mise en place du dépôt dans des conditions plus stables.

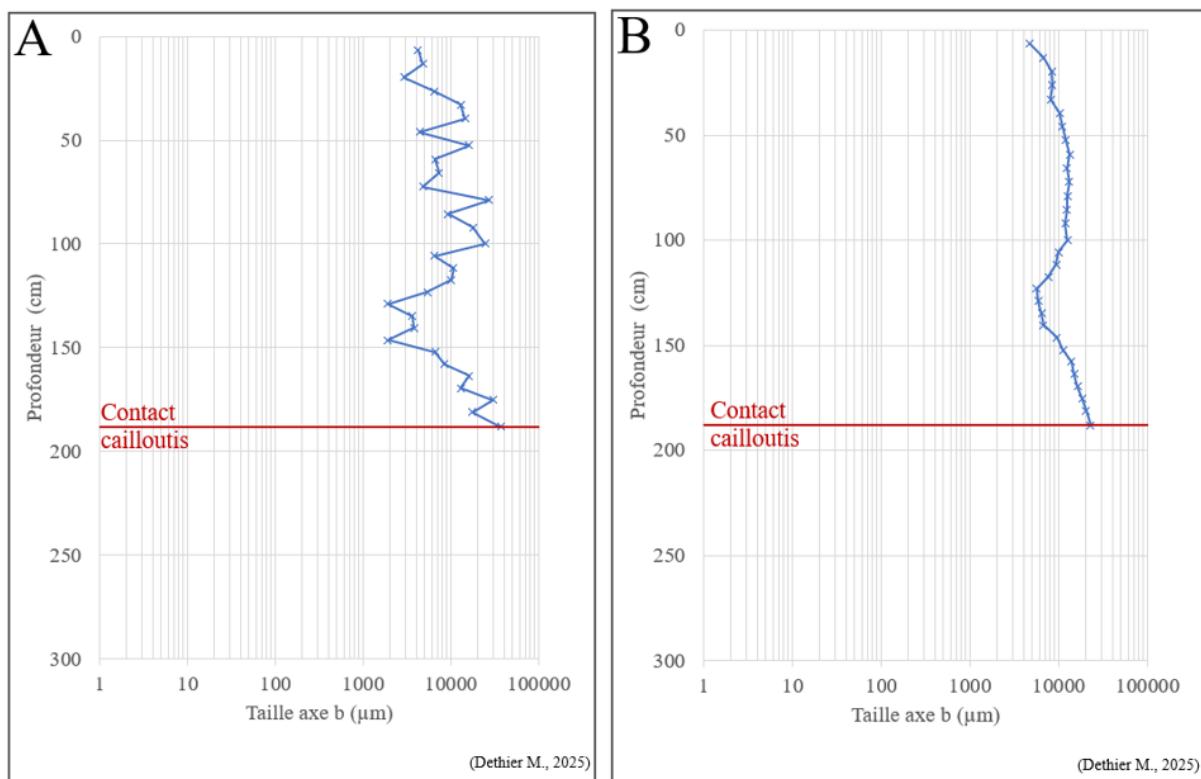


Figure 54 : Profil granulométrique vertical brute (A) et moyené (moyenne mobile centrée sur 10 valeurs) (B) pour le sondage BEL-P0-49,50m

IV-1.6.2.4. Sondage à 56 m (BEL-P0-56m)

Le dernier sondage réalisé dans la Chavée au pied du belvédère se situe à 56 m sur le profil. Celui-ci est constitué d'un sol humifère brun (Munsell 10 YR 3/3) sur les vingt premiers centimètres pour passer à un limon argileux (Munsell 10YR 4/4) jusqu'à 158 cm de profondeur. Sur le premier mètre du sondage des galets supérieurs à 1 cm d'axe b se retrouvent aux profondeurs de 10 cm, 20 cm, 27 cm, 51 cm, 57 cm, 66 cm, 79 cm, 82 cm et 92 cm. Entre 158 cm et 165 cm, il y a la présence d'un niveau sableux avant d'arriver sur un niveau de graviers grossiers, entre 165cm et 172 cm et 175 cm et 185 cm. Le sondage se termine par 4 cm (entre 189 cm et 193 cm) de galets supérieurs à 5 cm d'axe b. Le diamètre du tube de prélèvement faisant 5 cm, ces éléments se sont mis de travers pour pouvoir rentrer dans la carotte.

Le profil granulométrique vertical (Figure 55) met en évidence une régularité granulométrique sur l'ensemble du sondage et l'augmentation de la taille des éléments seulement à la base du sondage, au niveau du contact cailloutis à 165 cm de profondeur.

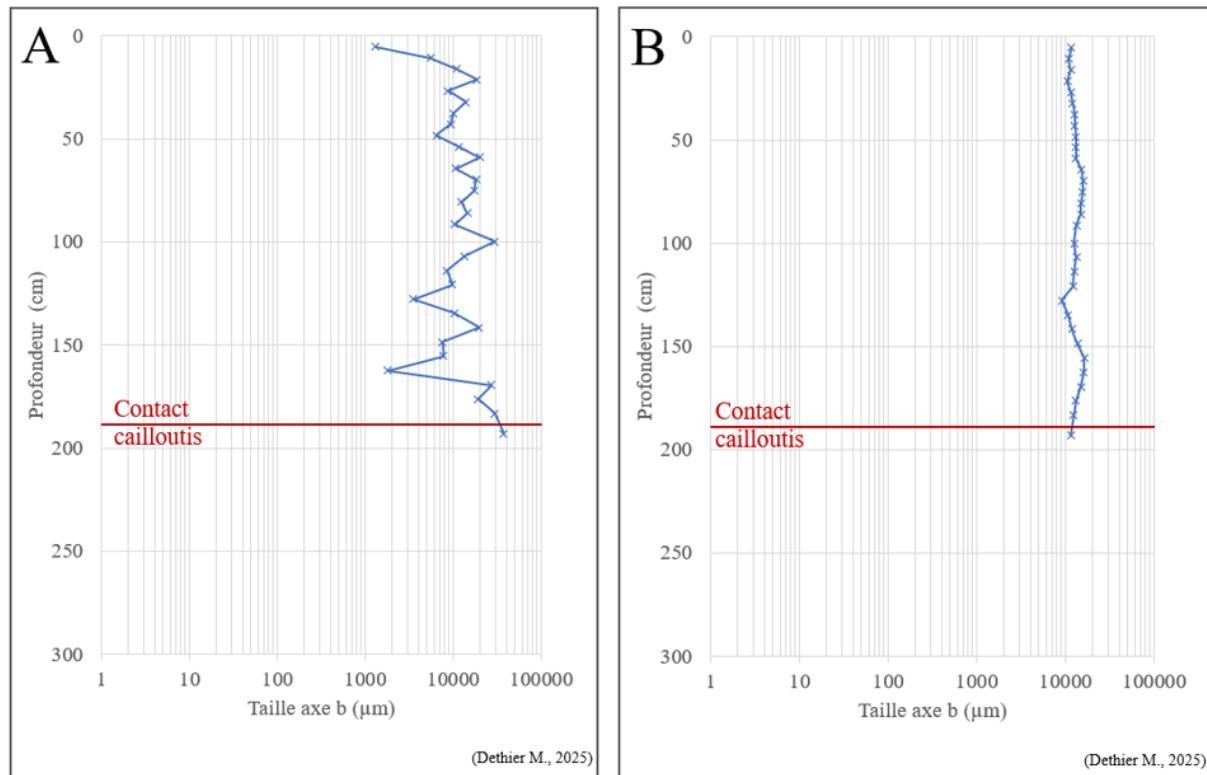


Figure 55 : Profil granulométrique vertical brute (A) et moyené (moyenne mobile centrée sur 10 valeurs) (B) pour le sondage BEL-P0-56m

IV-1.6.2.5. Sondages réalisés en 2018

Dans le sondage à 49 m réalisé en 2018, des dépôts de tufs ont été découverts. Ceux-ci proviennent de la Fontaine Saint-Martin comme déjà expliqué auparavant. Leur présence dans les dépôts sédimentaires traduit l'absence d'un écoulement de la Lesse lors de leur mise en place qui serait attribuable uniquement au ruisseau de la Planche qui prend sa source à la Fontaine Saint-Martin. En revanche, aucun dépôt de tuf n'a été observé dans les carottages réalisés en 2024. Cette absence pourrait s'expliquer par le fait que le ruisseau de la planche est un petit cours d'eau pas très large, ainsi que par le léger décalage du profil de 2024 par rapport à celui de 2018 en raison que le profil avait été positionné au GPS avec une précision de l'ordre de 3 à 4 m. Il est dès lors possible que le sondage réalisé en 2024 à 49 m se situe juste à côté du paléochenal du ruisseau de la Planche.

IV-2. LEVÉ DE COUPES

IV-2.1. COUPE 1 – RIVE GAUCHE EN AMONT DU GOUFFRE DE BELVAUX

La coupe 1 (Figure 57 – Annexe 7), haute de 6m, présente cinq zones distinctes. La première zone, de 5,5 m à 20 m, se compose à la base d'un cailloutis fluviatile émoussé, dont les plus gros éléments atteignent une vingtaine de centimètres. Il est également observable l'absence totale d'éléments calcaires, malgré leur présence dans les versants. Cette couche est surmontée d'une couche d'argile grise, épaisse d'environ 20 cm, interprétée comme la trace d'un ancien chenal. L'altitude de la base de cette couche d'argile est de 159,85 m. Sa position suggère qu'une perte pourrait avoir existé à l'arrière de cette coupe, avant l'ouverture du gouffre de Belvaux. La deuxième zone, de 20 m à 30 m, est constituée d'un cailloutis fluviatile contenant des éléments anguleux et des éléments de calcaire sur environ 60 cm. Au-dessus, un cailloutis à éléments plus grossiers dominé par des blocs anguleux calcaires, prend le relais. À partir de 30 m, le cailloutis fluviatile disparaît sous le plan d'eau et ne sera plus rencontré sur le reste de la coupe. La troisième zone, de 30 m à 39,50 m, est uniquement formée de blocs anguleux épars. La quatrième zone, de 39,50 m à 99,50 m, est marquée par la présence exclusive de gros blocs. Enfin, la cinquième et dernière zone de la coupe, de 94 m à 103 m, est composée de limon, avec un niveau contenant des microcharbons.

Sur cette coupe, quatre prélèvements d'échantillons ont été réalisés sous des gros blocs pour éviter la contamination par bioturbation dans le but de rechercher la présence ou non d'éléments volcaniques. Les quatre échantillons étudiés, localisés sur la coupe 1 (Figures 56 & 57), présentent tous des traces du téphra du Laacher See, en quantités indiquées dans la Figure 60. Suite à cette analyse, il est raisonnable de penser que ces dépôts sont postérieurs à 12,9 ka.

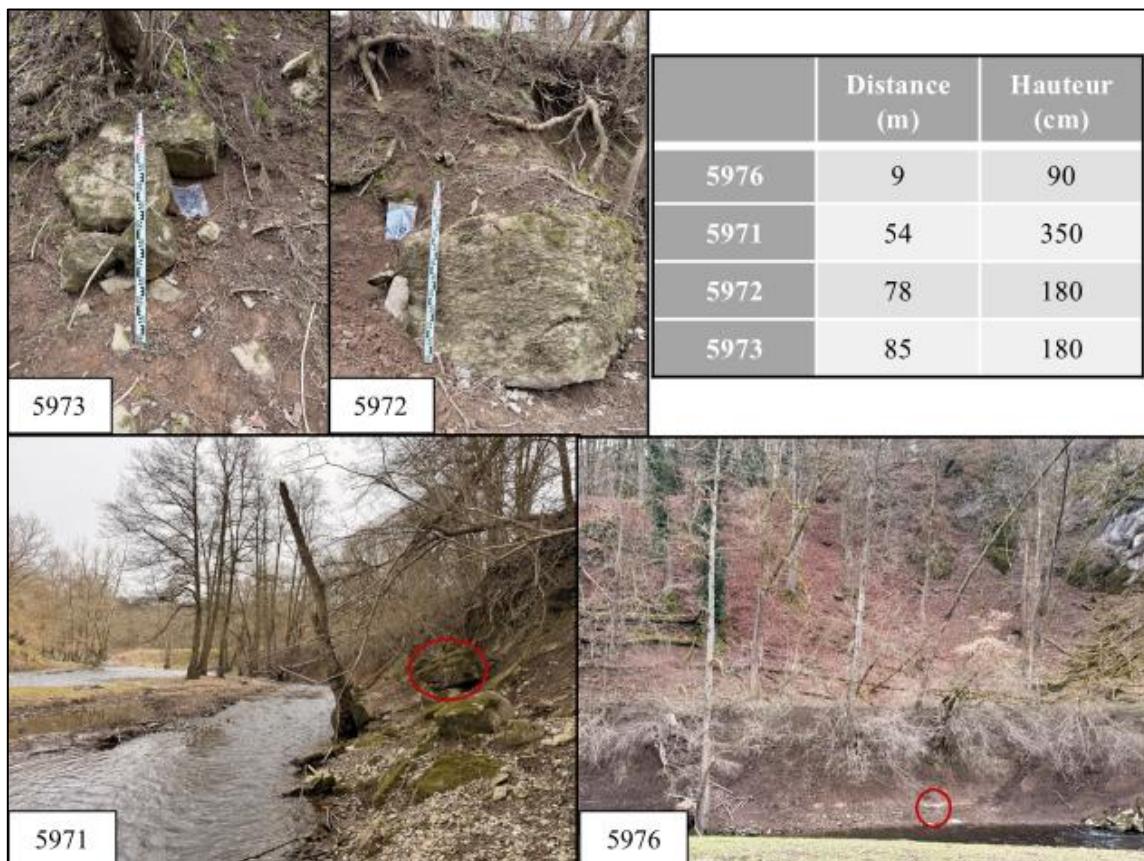


Figure 56 : Localisation des échantillons de la Coupe 1

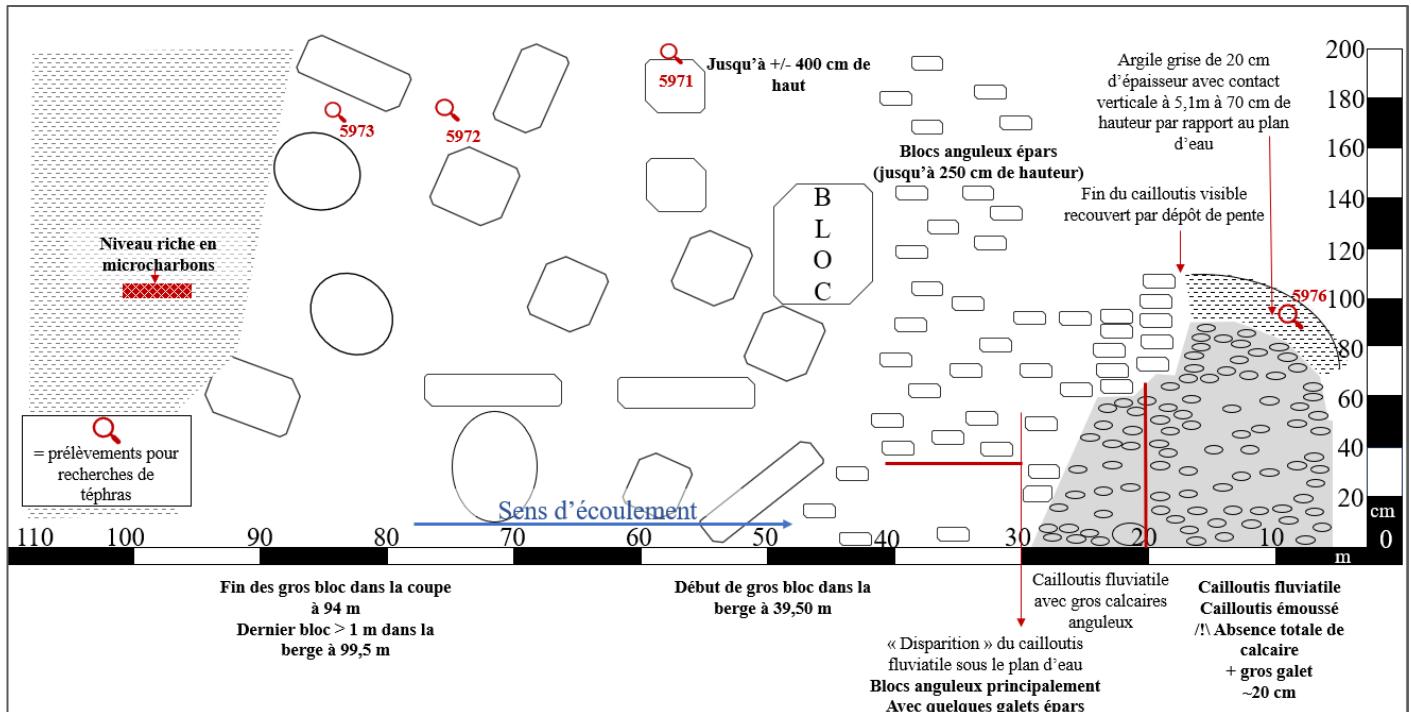


Figure 57 : Schéma de la coupe 1

IV-2.2. COUPE 2 – RIVE GAUCHE BASSE TERRASSE EN AVAL DU SECTEUR DES RAPIDES DE LA LESSE

La seconde coupe analysée (Figure 58 – Annexe 8) correspond à celle étudiée par Dicot en 1969, présentée précédemment dans la section « II-4. Etat de l'art ». Cette coupe se compose de 4 m de cailloutis surmontés d'un mètre de limon. Les éléments les plus grossiers font une trentaine de centimètres. Comme dans la première coupe, aucun élément calcaire n'a été observé malgré sa présence dans les versants. En aval, la couche de cailloutis présente une penté marquée. La taille et l'abondance des éléments suggère un dépôt formé à une période où la Lesse possédait une capacité de transport plus importante, possiblement lors d'une phase froide à régime nival. Cette pente, mise en relation avec les observations de la coupe 1, pourrait indiquer une ancienne érosion latérale du lit de la Lesse, se dirigeant potentiellement vers la perte supposée identifiée sur la coupe 1.

Sur cette coupe, deux échantillons (Figures 58 & 59) ont été prélevés dans le but de faire une recherche d'éléments volcaniques. Les observations réalisées au microscope (Figure 61) n'ont révélés aucun indice de la présence de tels éléments. Une deuxième préparation d'échantillon et une deuxième observation a été effectuée. Aucune trace d'éléments volcaniques n'a été retrouvée, à l'exception d'une augite qui se trouve dans l'échantillon 5881. Cet élément peut être attribuable au téphra de Rocourt. Au vu de la méthodologie appliquée et des éléments retrouvés, il est raisonnable de penser que le dépôt est postérieur au téphra de Rocourt et donc postérieur à 80 ka. Ce scénario évoque des dynamiques similaires à celles observées dans d'autres systèmes karstiques, comme les grottes de Remouchamps, où une obstruction temporaire des niveaux inférieurs a pu entraîner une activation du réseau supérieur (Ek, 1974). Dans le cas présent, cette hypothèse mérite d'être envisagée pour le site du gouffre de Belvaux. Une obstruction du gouffre aurait pu favoriser la mise en place des dépôts observés datant d'un période postérieure à 80 ka.

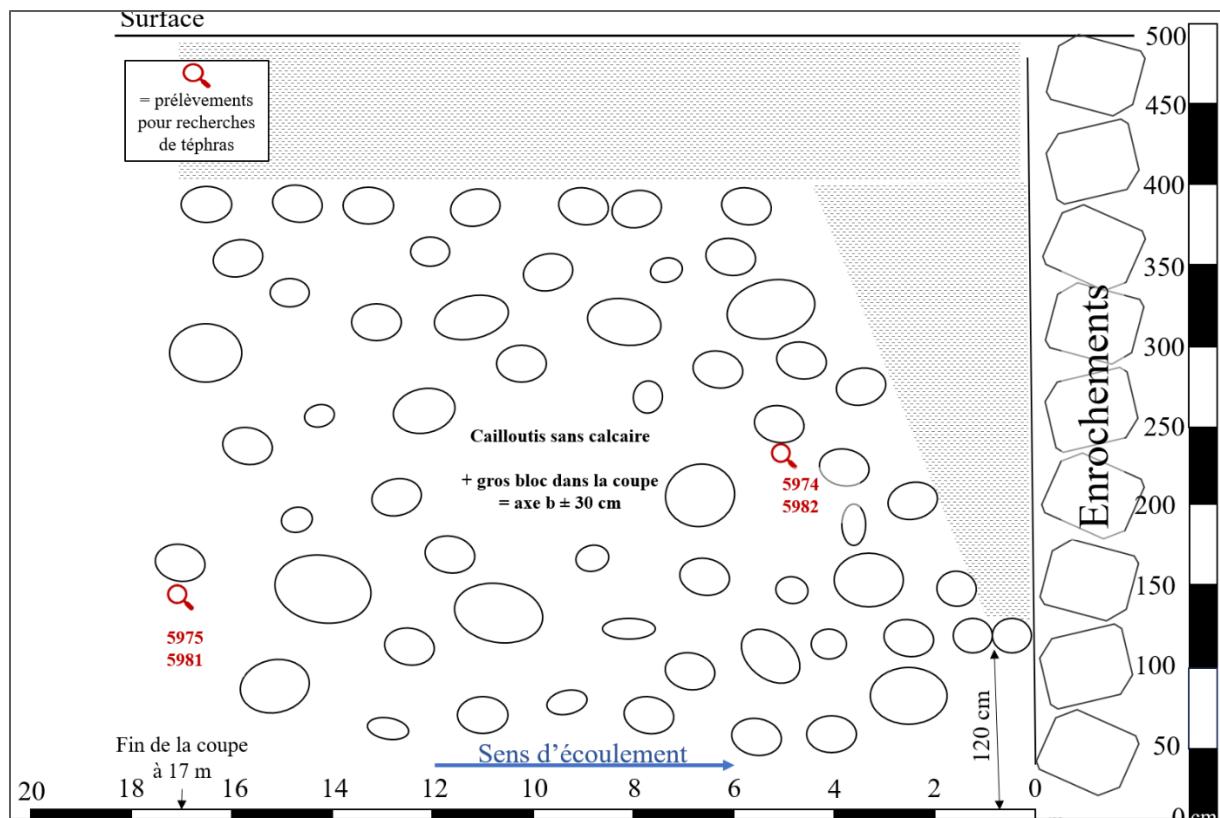


Figure 58 : Schéma de la Coupe 2

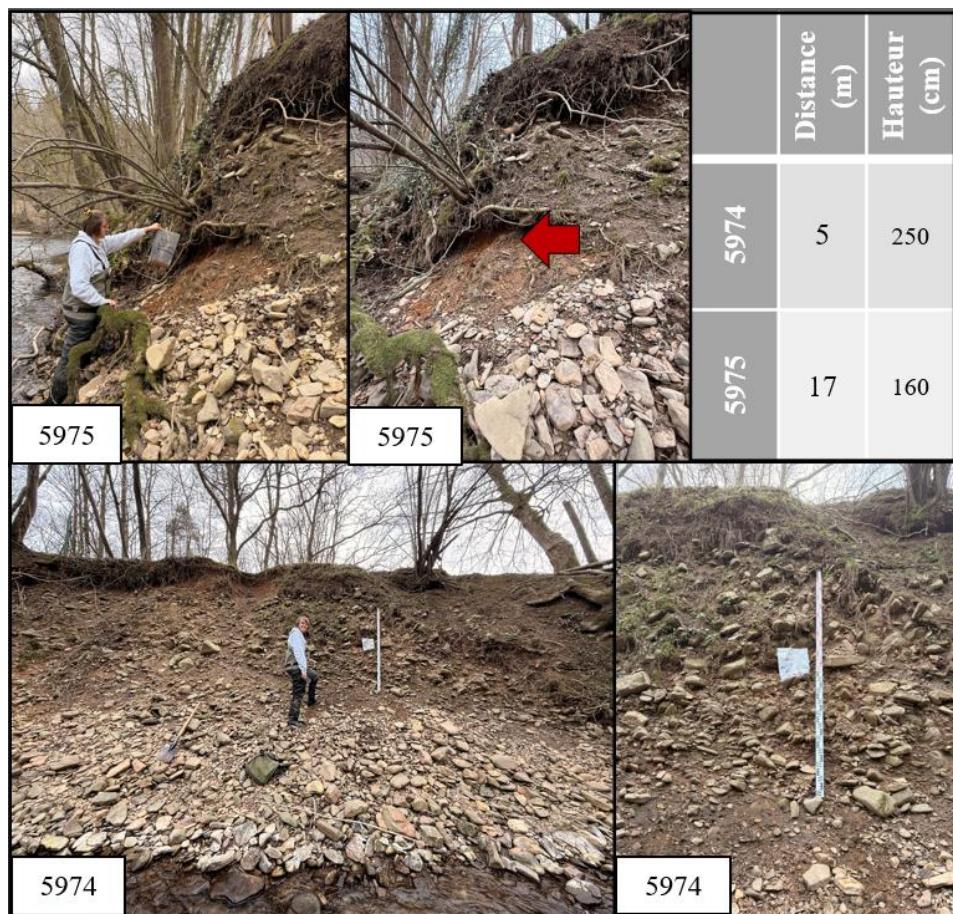


Figure 59 : Localisation des échantillons de la Coupe 2

Première observation - Grossissement 25 X												
Echantillon	Opaques et lithiques denses	Zircon	Tourmaline	Rutile	Grenat	Chlorite	Chloritoïde en feuillets	Divers déterminables	Transparent indéterminé	Clinopyroxène	Amphibole brune	Sphène
5976	6120	68	68	17	102	527	0	238	0	0	68	17
5971	5474	68	17	0	17	697	0	68	17	0	34	0
5972	5372	153	51	51	34	425	0	204	0	17	34	34
5973	3689	68	0	17	0	425	0	85	0	0	0	0

Seconde observation - Grossissement 10X				
Echantillon	Clinopyroxène	Amphibole brune	Sphène	
5976	12	17	12	
5971	3	5	3	
5972	14	14	11	
5973	20	18	6	

Figure 60 : Résultats des observations pour ½ lame à la recherche d'éléments de téphra pour les échantillons de la Coupe 1

Première observation - Grossissement 25 X											
Echantillon	Opaques et lithiques denses	Zircon	Tourmaline	Rutile	Grenat	Chlorite	Chloritoïde en feuillets	Divers déterminables	Clinopyroxène	Amphibole brune	Sphène
5974	3757	34	0	0	0	17	0	51	0	0	0
5982	8196	252	40		20	182	2	30	0	0	0
5975	3026	34	17	0	0	0	0	51	0	0	0
5981	2988	41	10	0	1	0	0	6	0	0	0

Seconde observation - Grossissement 10X				
Echantillon	Augite	Clinopyroxène	Amphibole brune	Sphène
5974	0	0	0	0
5982	0	0	0	0
5975	0	0	0	0
5981	1	0	0	0

Figure 61 : Résultats des observations pour ½ lame à la recherche d'éléments de téphra pour les échantillons de la Coupe 2

IV-3. PROFIL EN LONG

Les données relatives aux hauteurs de refus et de sommet du cailloutis, acquises par carottage et levés de coupe, permettent désormais d'examiner la manière dont ces dépôts s'organisent les uns par rapport aux autres. Pour comparer ces niveaux entre eux et tenir compte de la pente longitudinale de la rivière, les altitudes des niveaux de cailloutis atteints ont été reportées sur un profil en long (Figures 62 & 63). Il est également nécessaire reporter les différentes datations obtenues afin de mieux comprendre la chronologie de mise en place des dépôts et des phases d'incision du lit de la rivière.

Dans le but de corrélérer différents niveaux de cailloutis, plusieurs droites ont été tracées passant par des niveaux connus. Ce choix méthodologique repose sur l'idée que les pentes anciennes gardent un certain parallélisme au cours du temps, ce qui permet d'envisager des aliments cohérents entre différents anciens niveaux d'écoulement.

La première droite, servant de référence, correspond au sommet du cailloutis de la basse terrasse retrouvée au sondage BEL-P0-88m. L'analyse montre que certains niveaux de cailloutis identifiés dans les sondages HSL-P4 ainsi qu'une partie de ceux observés sur le profil HSL-P3 se situent à des altitudes supérieures à cette ligne, ce qui indique nécessairement une mise en place antérieure à la formation de la basse terrasse.

Une seconde droite, parallèle à la première, a ensuite été tracée. Celle-ci recoupe un niveau de terrasse plus élevé, localisé sur la Coupe 2 en rive gauche de la Lesse, en aval des Rapides, ainsi que le niveau de cailloutis atteint par le sondage HSL-P4-150m. Avec les datations obtenues au niveau de la plaine alluviale au pied du belvédère de 5670 ± 30 BP (Beta-745512), soit 4554-4443 cal BC et la présence du téphra de Rocourt (80 ka) dans la coupe de la basse terrasse, l'hypothèse d'une terrasse plus ancienne prend sens.

Afin d'évaluer la chronologie relative des dépôts en lien avec les ouvertures du Trou d'Enfaule et du gouffre de Belvaux, d'autres droites parallèles ont été ajoutées. L'une d'entre elles passe par l'altitude actuelle du Trou d'Enfaule, permettant ainsi de différencier les niveaux de cailloutis antérieurs ou postérieurs à cette ouverture. Il apparaît qu'une grande partie des cailloutis identifiés dans le profil HSL-P3 ont été mis en place avant l'ouverture du Trou d'Enfaule.

Enfin, une dernière droite parallèle a été tracée, cette fois-ci en prenant comme référence le niveau de cailloutis le plus bas observé dans le sondage BEL-P0. Ce niveau est interprété, selon l'une des hypothèses développées dans ce travail, comme correspondant au lit de la Lesse avant l'ouverture du gouffre de Belvaux et l'abandon de la Chavée. Dès lors, les niveaux situés au-dessus de cette ligne seraient postérieurs à l'ouverture du Trou d'Enfaule mais antérieurs à celle du gouffre de Belvaux, tandis que les niveaux inférieurs à cette droite seraient contemporains ou postérieurs à cette dernière ouverture. La majorité des niveaux de cailloutis observés dans les profils HSL-P1, HSL-P5 et HSL-P2 semblent correspondre à cette phase plus récente.

Les altitudes des niveaux de silex identifiés dans le sondage HSL-P1-42m et HSL-P2-36m ont également été reportés sur le profil en long. Selon les hypothèses formulées précédemment, ces niveaux seraient contemporains, voire légèrement postérieurs, à l'ouverture du trou d'Enfaule, mais antérieurs à celle du gouffre de Belvaux.

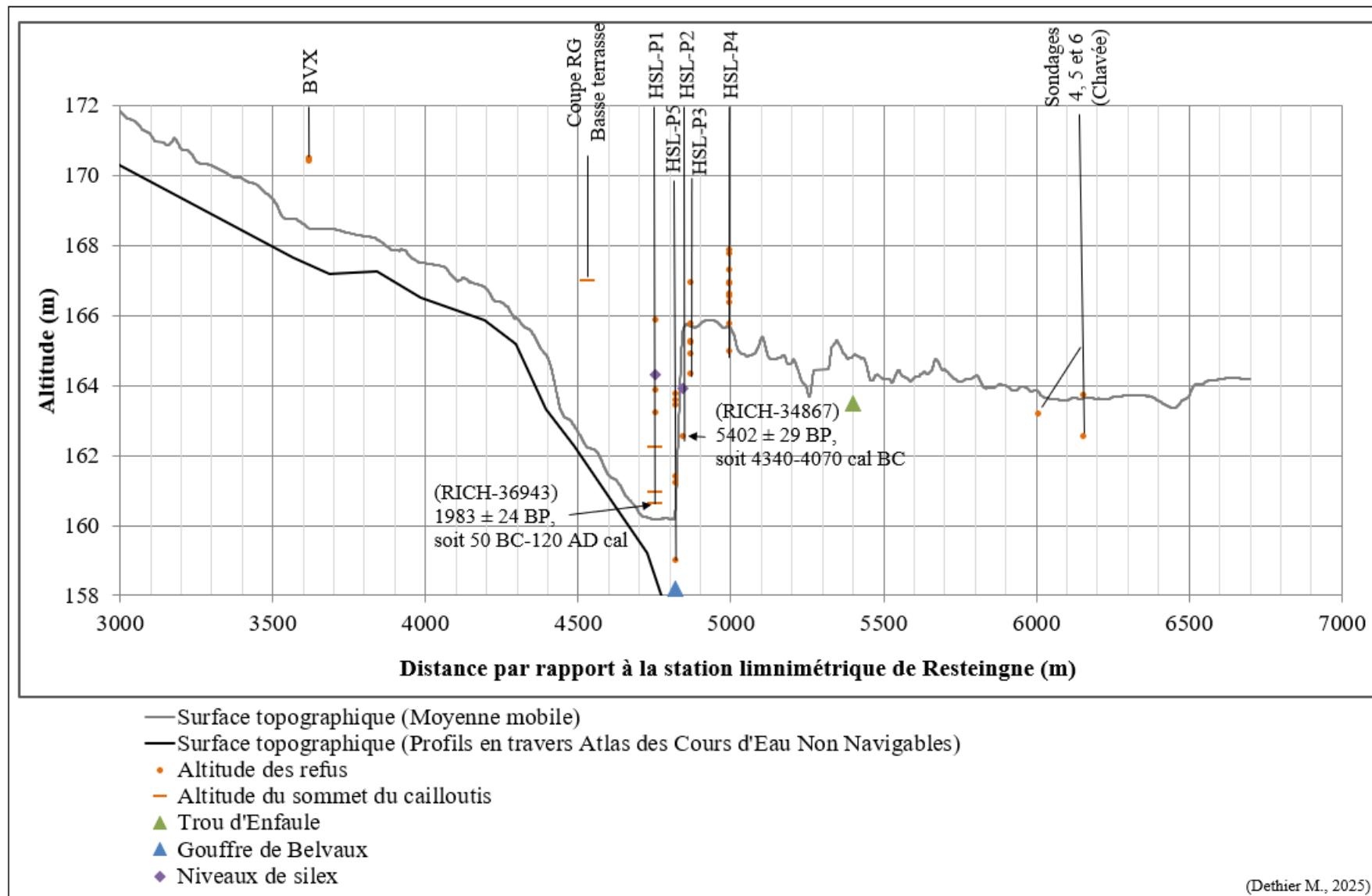


Figure 62 : Profil topographique en long depuis le village de Belvaux jusque dans la Chavée

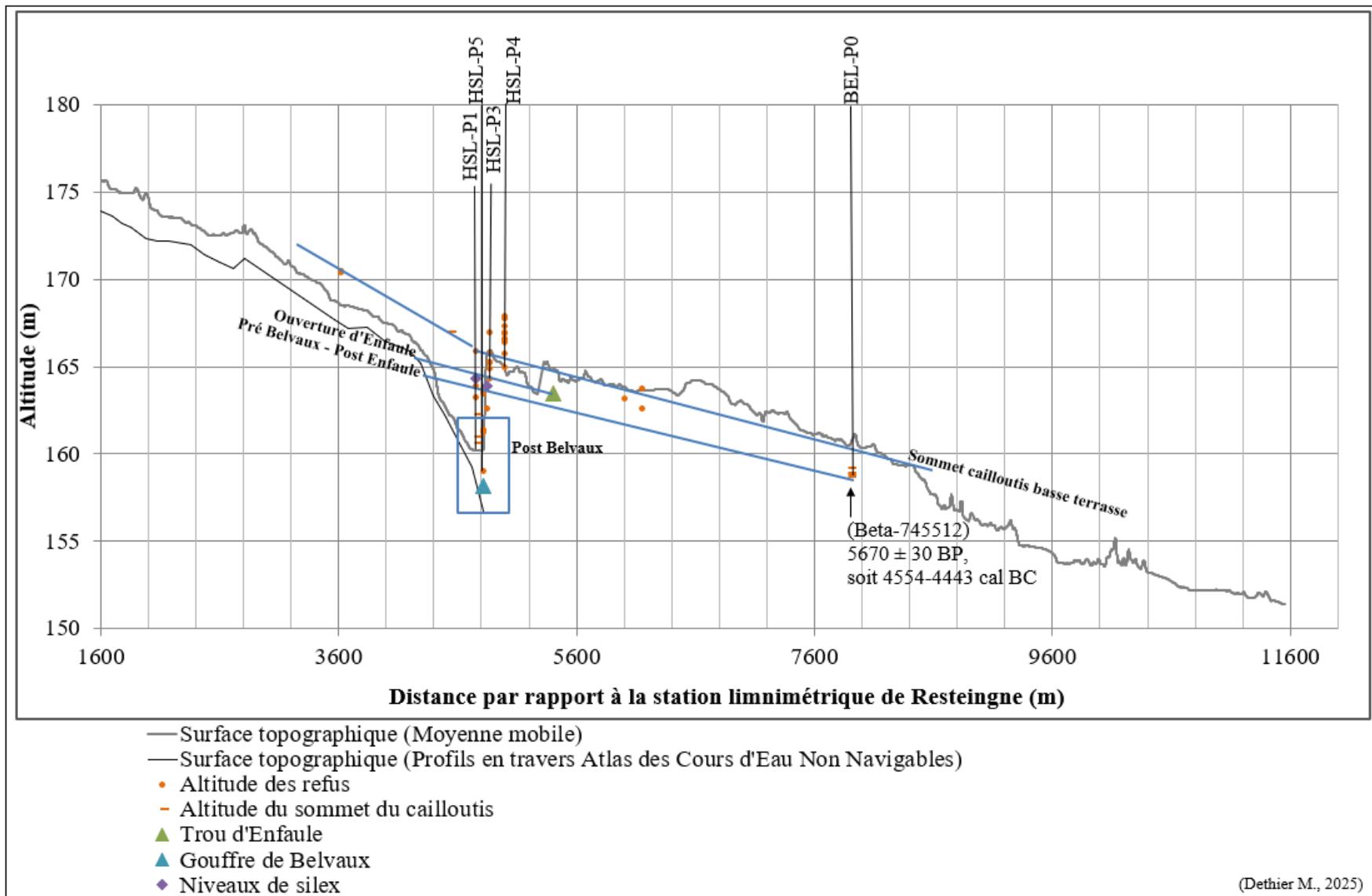


Figure 63 : Profil topographique en long depuis la station limnimétrique de Resteigne jusqu'à la confluence avec le Ry d'Ave en passant par la Chavée

IV-4. ANALYSE HYDROLOGIQUE

Suite aux analyses hydrologiques effectuées, la valeur du débit plain bord (Q_b) au niveau de la station de Resteigne a été calculée et vaut $44 \text{ m}^3/\text{s}$. Toutefois, au niveau du gouffre de Belvaux, à partir d'un débit dépassant les $40 \text{ m}^3/\text{s}$, les pertes ne savent plus absorber l'écoulement qui arrive et la Lesse réemprunte son tracé aérien dans la Chavée. La valeur de $40 \text{ m}^3/\text{s}$ vient de l'addition des capacités d'absorption des différentes pertes : gouffre de Belvaux = $25 \text{ m}^3/\text{s}$, Trou d'Enfaule = $7 \text{ m}^3/\text{s}$ et perte diffuse = $8 \text{ m}^3/\text{s}$ (Deflandre, 989, Quinif, 2015).

Au niveau des ces événements extrêmes de crue (Figure 71), sur la série hydrologique étudiée (de janvier 1969 à mai 2025) 80 événements estimés indépendants par la méthode appliquée ont un débit supérieur à $40 \text{ m}^3/\text{s}$. La situation du dépassement de capacité par les pertes karstiques est un événement qui se produit chaque année. Statistiquement, un tel événement arrive à une fréquence de 1,5 fois par an. Les événements de crue ont une durée moyenne de 1,75 jours soit 42 heures. Pour finir, le débit moyen de crue est calculé à $58 \text{ m}^3/\text{s}$. L'analyse des événements extrêmes d'étiage ont quant à eux donné une valeur de DCE de $0,61 \text{ m}^3/\text{s}$.

Pour poursuivre l'analyse des séries temporelles de débit, une estimation de la fréquence des faibles débits a été réalisée. Sur la période actuelle (1969-2024), il a été observé que la Lesse présente un débit inférieur à $7 \text{ m}^3/\text{s}$ durant 74% du temps en moyenne, soit l'équivalent de 270 jours par an. Ce calcul vise à caractériser la compétence annuelle potentielle du trou d'Enfaule à mettre la Chavée à sec, dans l'hypothèse où cette perte serait la seule active sur le site.

Durant la période de réalisation de ce mémoire, trois épisodes de crue ont été observé à Han-sur-Lesse. Les épisodes de crue qui ont été étudié dans le cadre de ce mémoire ont eu leur pic de crue le 04 janvier 2024, le 10 octobre 2024 et le 09 janvier 2025. Pour l'événement survenu en janvier 2024, des prélèvements de dépôts de crues ont été réalisés comme expliqué dans la partie méthodologie de ce travail (« III-1.8 Dépôt de crue »). Ces prélèvements ont eu pour but de caractériser les éléments déposés dans la plaine alluviale lors d'un épisode de crue actuel. Ensuite, lors des événements d'octobre 2024 et de janvier 2025, des prélèvements de matière en suspensions (MES) ont été effectués (« III-1.9 Matière en suspension ») afin de voir l'impact de la sédimentation dans la Chavée lors d'un épisode de crue actuel et de voir ce qui passait, en termes de sédiments, par le système souterrain et ce qui passait en surface. La première hypothèse de travail était qu'il y avait un dépôt progressif au fur et à mesure de l'avancée dans la Chavée.

IV-4.1. CARACTÉRISATION HYDROMÉTRIQUE DES ÉVÉNEMENTS

Le premier événement étudié est celui de janvier 2024. Le pic de crue est survenu le 04 janvier 2024 à 10h pour un débit horaire de $66 \text{ m}^3/\text{s}$. La période de retour calculée pour cet événement, sur base de la série partielle, est de 2,32 ans. Le second événement analysé est celui qui s'est déroulé en octobre 2024. Le pic de crue a été atteint le 10 octobre 2024 à 9h avec un débit horaire de $69,8 \text{ m}^3/\text{s}$. Sur base des séries annuelles, la période de retour associée à cet événement est estimée à 3,93 ans (2,85 ans sur base des séries partielles). Le dernier événements de crue pris en compte est celui de janvier 2025. Le pic de crue, mesuré le 09 janvier 2025 à 11h, a atteint un débit horaire de $73 \text{ m}^3/\text{s}$. D'après l'analyse des séries annuelles, sa période de retour est évaluée à 4,54 ans (3,46 ans sur bases des séries partielles). Les hydrogrammes de ces trois événements sont repris dans la Figure 64 ci-dessous. Les phases de décrues de janvier 2024 et janvier 2025 sont fortement semblables. La décrue est lente et corrélée, dans les deux cas, à des épisodes de décrue de fonte de neige. Pour l'épisode d'octobre 2024, la décrue est plus rapide que pour les deux autres épisodes étudiés. La phase croissante de la crue est également beaucoup plus rapide en octobre 2024. L'épisode de janvier 2025 est plus progressif puisque provient d'une addition de plusieurs heures de débits élevés.

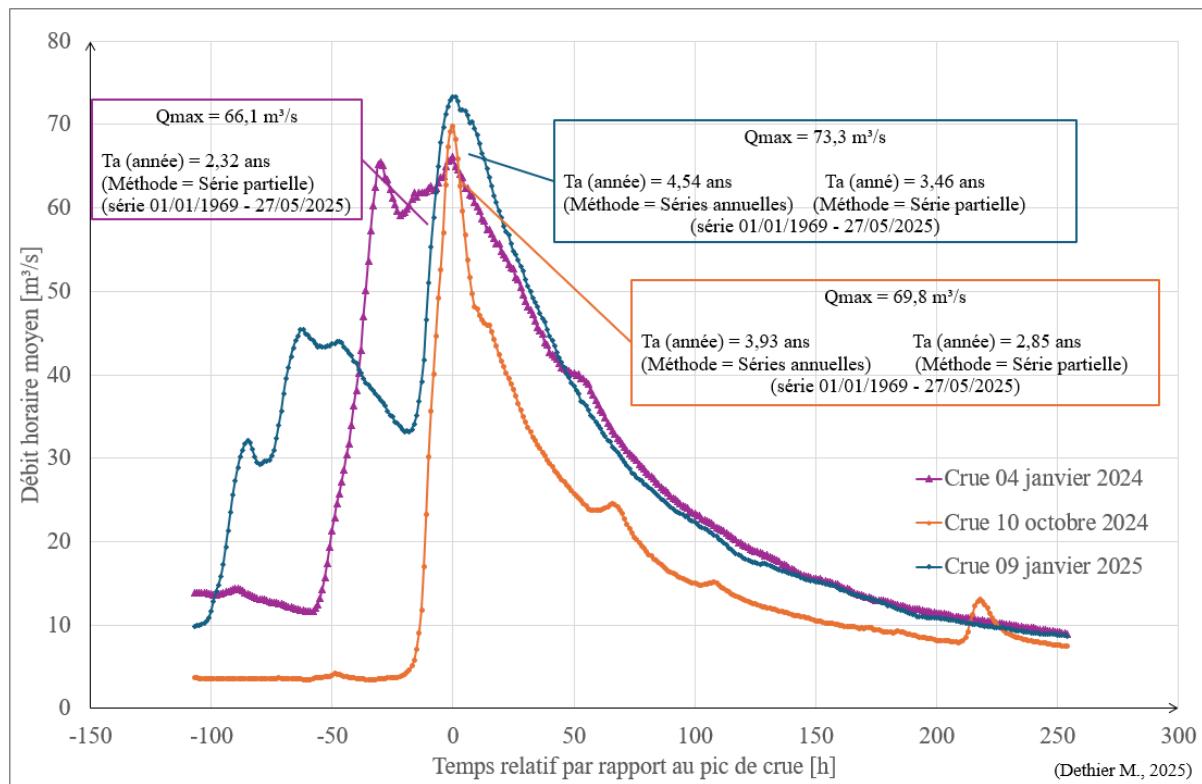


Figure 64 : Hydrogrammes combinés des épisodes de crue étudiés

IV-4.2. GRANULOMÉTRIE

Les échantillons de dépôts de crue ont subi un tamisage à 600 µm et 1180 µm, une perte au feu sur la partie inférieure à 600 µm, une attaque à l'eau oxygénée (H_2O_2) sur la partie inférieure à 600 µm et une analyse au granulomètre laser sur la partie inférieure à 600 µm.

À la suite de ces manipulations, des valeurs caractéristiques telles que le D_{50} et le D_{99} ont été calculées pour chaque échantillon (Tableau 1). Elles ont ensuite été placées sur l'image de Passega afin de caractériser les processus de mise en place (Figure 65). La plupart des échantillons indiquent une mise en place par suspension homogène, voire légèrement graduée pour certains. Sur les 11 échantillons, seuls 9 ont été conservés : HSL2 et HSL11 ont été écartés, car leurs résultats s'écartaient de manière trop importante de l'ensemble. Cette anomalie pourrait s'expliquer par des problèmes survenus lors du prélèvement, rendu difficile par les conditions de gel et de neige ayant suivi l'événement de crue.

Au niveau de la répartition granulométrique au sein même de chaque échantillon, l'ensemble des échantillons montrent une symétrie selon l'indice de Folk & Ward.

Nom échantillon	D_{50} (µm)	D_{99} (µm)
HSL1	22,876	1000
HSL3	19,046	972,779
HSL4	36,47	447,991
HSL5	21,638	476,795
HSL6	11,5	274,363
HSL7	54,481	1000
HSL8	28,628	530,002
HSL9	59,444	691,568
HSL10	41,419	533,541

Tableau 1 : Valeurs de D_{50} et D_{99} pour les échantillons de dépôt de crue de janvier 2024

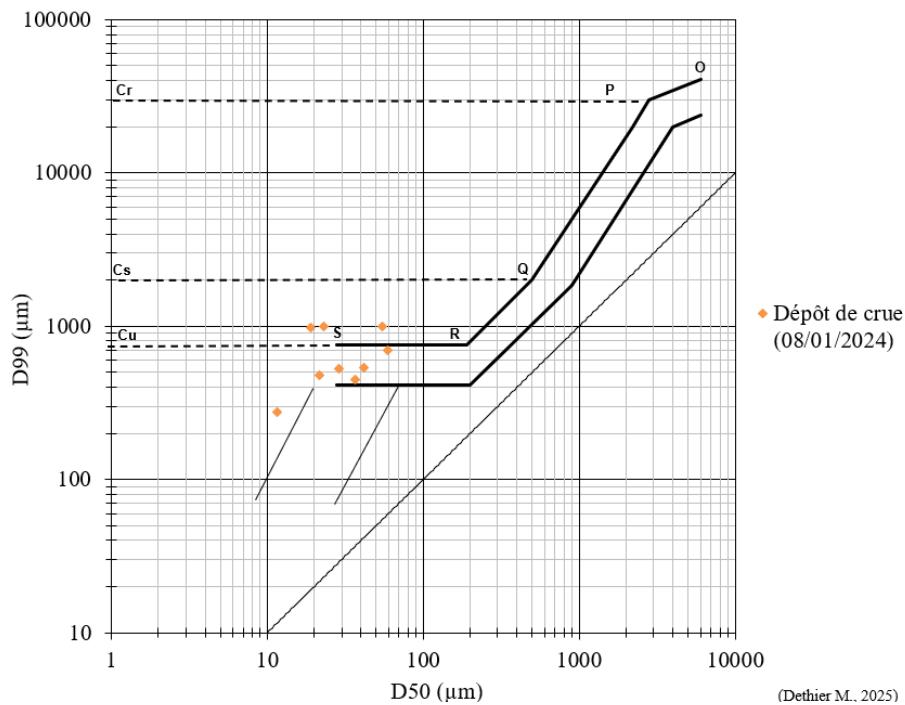


Figure 65 : Image de Passega pour les dépôts de crue de janvier 2024

IV-4.3. CONCENTRATION EN MATIÈRE ORGANIQUE

Grâce aux pertes au feu qui ont été réalisées, les concentrations en matière organique (MO) des échantillons de dépôt de crue ainsi que des échantillons de MES ont pu être mesurées (Tableau 2 et Figures 66 & 67).

Au niveau des échantillons de dépôts de crue de janvier 2024, leur taux de MO est compris entre 10% et 15% à l'exception des échantillons HSL4 et HSL5 qui ont des concentrations plus faibles. Ces deux échantillons sont situés respectivement à l'entrée du paléochenal (Figure 20).

Pour ce qui en est des échantillons de MES, pour ceux datant de la crue d'octobre 2024, leur pourcentage de MO est plus ou moins constant et se situe aux alentours de 9%. Pour les échantillons de janvier 2025 les concentrations en MO sont beaucoup plus faibles et atteignent des valeurs aux alentours de 3%. La différence de concentration entre les deux épisodes de crue étudiés pourrait très probablement venir du fait que les prélèvements d'octobre 2024 ont été effectué tout juste après le dépassement du pic de crue contrairement aux prélèvements de janvier 2025 qui ont été effectués un peu plus tardivement durant la décrue (Figures 72 et 73). Toutefois, il faut prendre en compte le décalage de la crue entre l'enregistrement à Resteigne et le prélèvement à Han-sur-Lesse plus au moins 5 km en aval. Ce décalage est de l'ordre de 30 h pour un débit de 0,9 m³/s et de 2 h pour un débit de 20 m³/s (Vincent Hallet, 2024 [Communications personnelles]). Dans les deux cas (octobre 2024 et janvier 2025) il y a une légère augmentation de MO durant la progression dans la Chavée qui pourrait s'expliquer par le fait que lors de son passage en surface, l'eau arrache de la couverture végétale provenant du sol. Au niveau des concentrations en MO au Trou de Han, celles-ci sont davantage plus élevées que les taux des prélèvements fait dans la Chavée. Cela pourrait s'expliquer par le fait que tout au long de l'année des feuilles et des bois morts rentrent dans le système karstique. Il y a donc une accumulation de MO qui est déstockée lors d'épisodes de crue. Pour ce qui est de la partie qui transite par la Chavée sa concentration initiale est faible et augmente par arrachement de surface comme déjà envisagé ci-dessus. Cette explication peut être renforcée à la vue des résultats des dépôts de crue qui sont plus élevés en amont et au niveau du gouffre par rapport aux valeurs plus faibles une fois qu'on s'éloigne en aval comme pour les échantillons HSL4 et HSL5. Cette hypothèse sera mise en perspective dans la prochaine partie qui abordera le transport de matière en suspension.

Nom échantillon	Massé échantillon [g]	Massé matière organique [g]	Pourcentage de matière organique dans les échantillons [%]
HSL1	3,492	0,453	13,0
HSL3	3,794	0,513	13,5
HSL4	4,211	0,232	5,5
HSL5	3,806	0,336	8,8
HSL6	3,374	0,411	12,2
HSL7	3,52	0,433	12,3
HSL8	4,243	0,463	10,9
HSL9	3,307	0,485	14,7
HSL10	3,636	0,489	13,4

Tableau 2 : Valeurs de concentration en matière organique pour les échantillons de dépôt de crue de janvier 2024

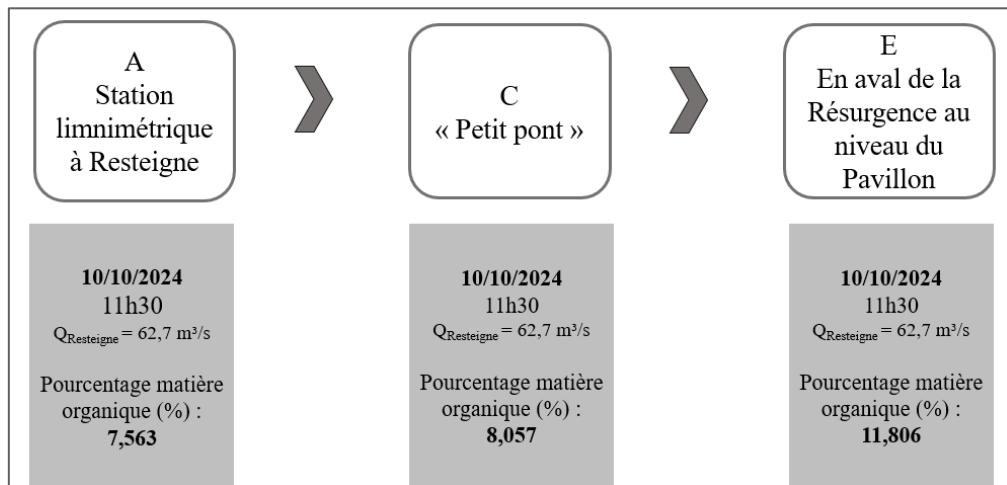


Figure 66 : Pourcentages en matière organique pour les échantillons de MES du 10 octobre 2024

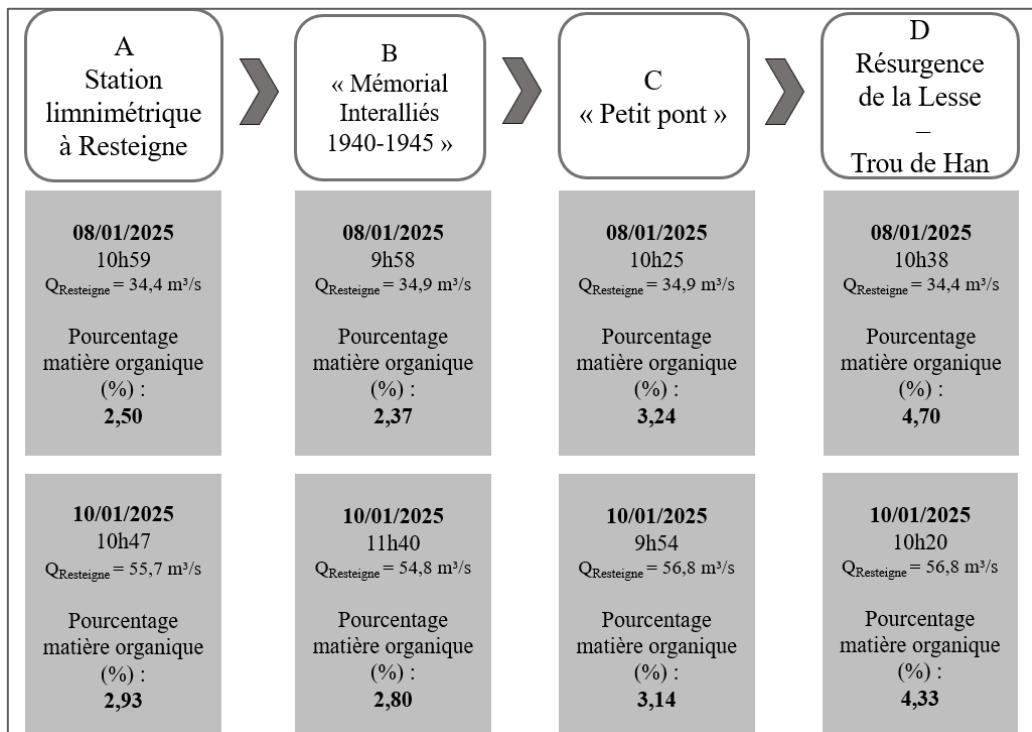


Figure 67 : Pourcentages en matière organique pour les échantillons de MES de janvier 2025

IV-4.4. CONCENTRATION EN MES

Les prélèvements de Matière En Suspension ont été effectués pour l'épisode de crue d'octobre 2024 et celui de janvier 2025. Après filtration et séchage des échantillons, la concentration de MES a pu être mesuré.

Les résultats repris sur les figures 68 et 69 montrent qu'il y a une augmentation progressive de la concentration de MES transportées en direction de l'aval. L'hypothèse de départ était que le Chavée agissait comme une zone de dépôt sédimentaire, ce qui devait se traduire par une décroissance des concentrations de MES au fur et à mesure de la progression vers l'aval. Toutefois, les résultats montrent tout l'inverse. Au sein de la Chavée, entre les points de prélèvement B et C, il y a augmentation de la concentration de MES. Ensuite, entre la point le plus en amont A et le point le plus en aval D (ou E), il y a croissance de la concentration de MES également. Toutefois, les taux entre le transport dans la Chavée (B & C) et le transport par les grottes (D) sont bien différents. L'hypothèse exposée dans la partie précédente (« IV-4.3. Concentration en matière organique ») reste valable au vu des résultats obtenus ici. De plus, les résultats concernant les prélèvements lors de la crue d'octobre 2024 sont bien plus élevés que ceux recueillis pour la crue de janvier 2025. L'explication formulée précédemment reste valable dans cette situation également.

Les faibles taux de MES dans la Chavée peuvent également s'expliquer par la présence d'un plan d'eau au niveau du gouffre de Belvaux comme cela va être exposé dans la partie suivante. En effet, avec la création de cette retenue d'eau, il y a une décantation en milieu calme qui se forme et les eaux qui passent cette retenue d'eau sont alors dépourvues, en grande partie, de matériel sédimentaire.

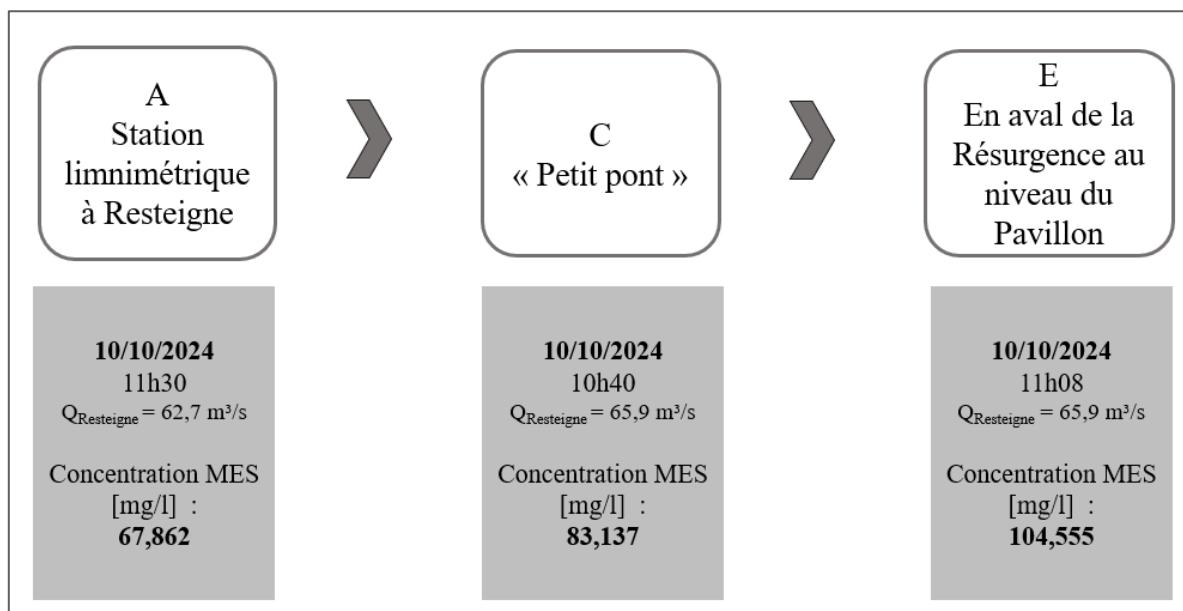


Figure 68 : Concentrations en MES pour les échantillons d'octobre 2024

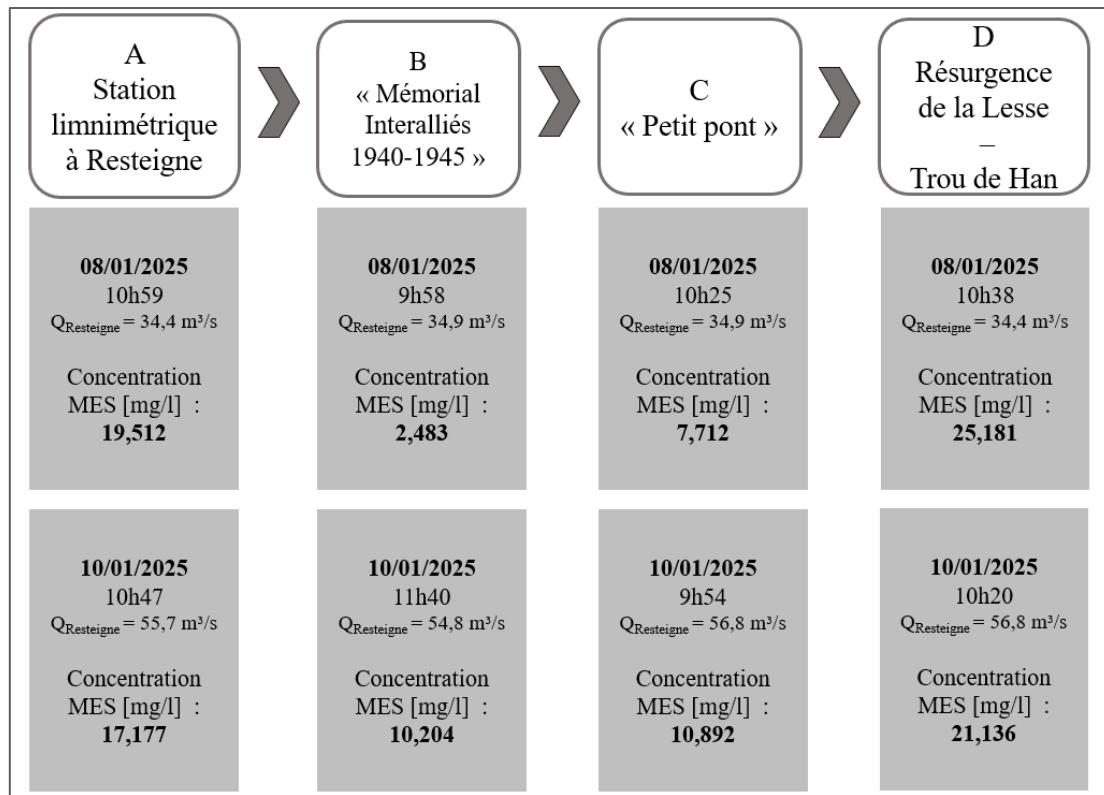


Figure 69 : Concentrations en MES pour les échantillons de janvier 2025

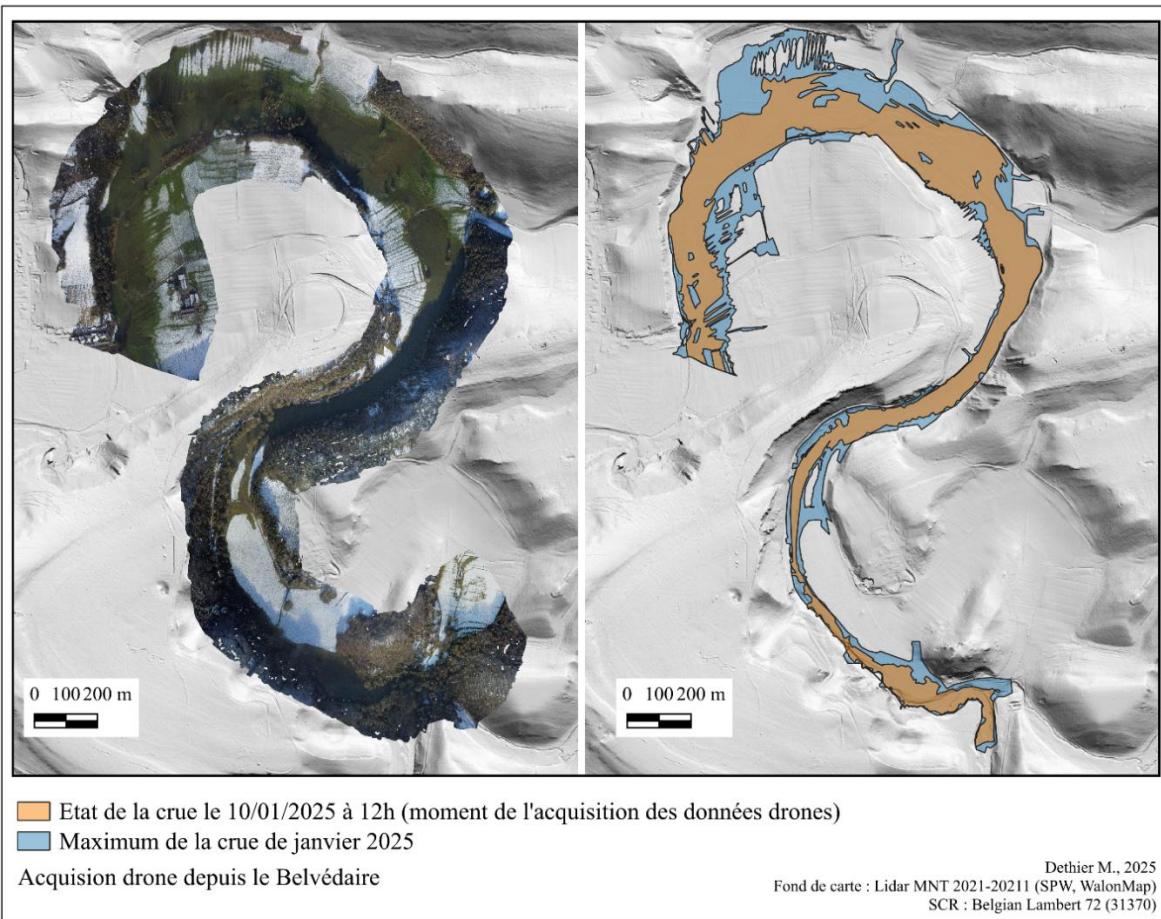


Figure 70 : Image drone de la crue 09 janvier 2025 et cartographies de l'étendue de la crue

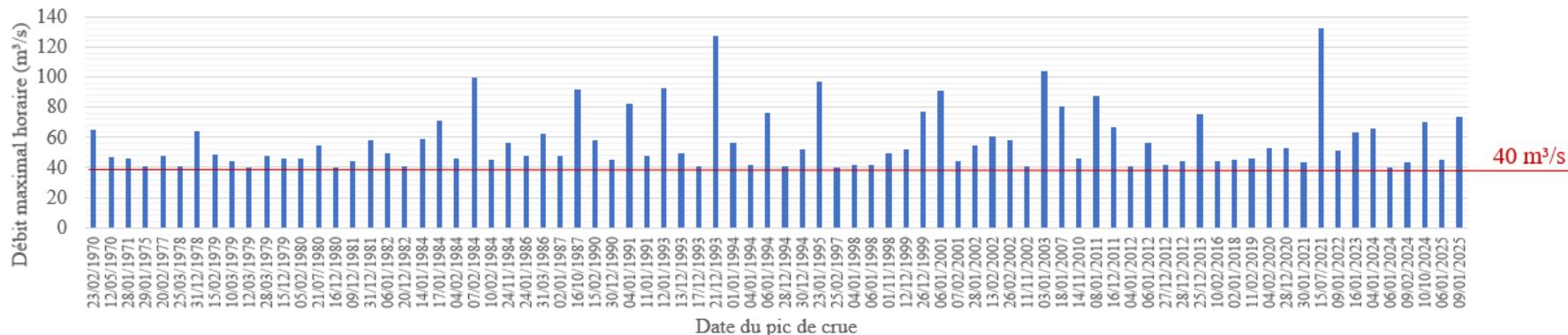


Figure 71 : Episodes de crues dépassant 40 m³/s sur la série temporelle 01/01/1969-27/05/2025

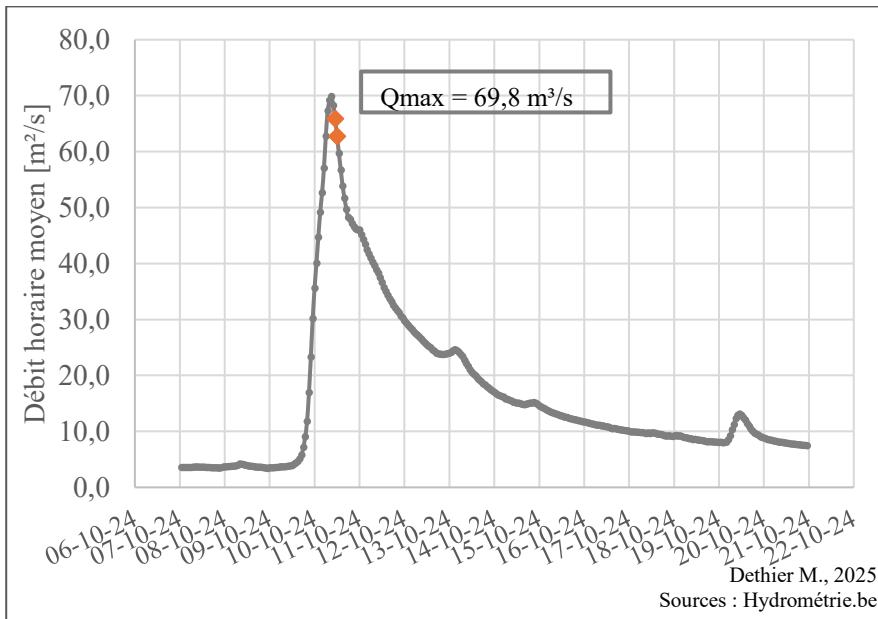


Figure 72 : Hydrogramme de l'épisode de crue d'octobre 2024 avec prélèvements réalisés le 10/10/2024

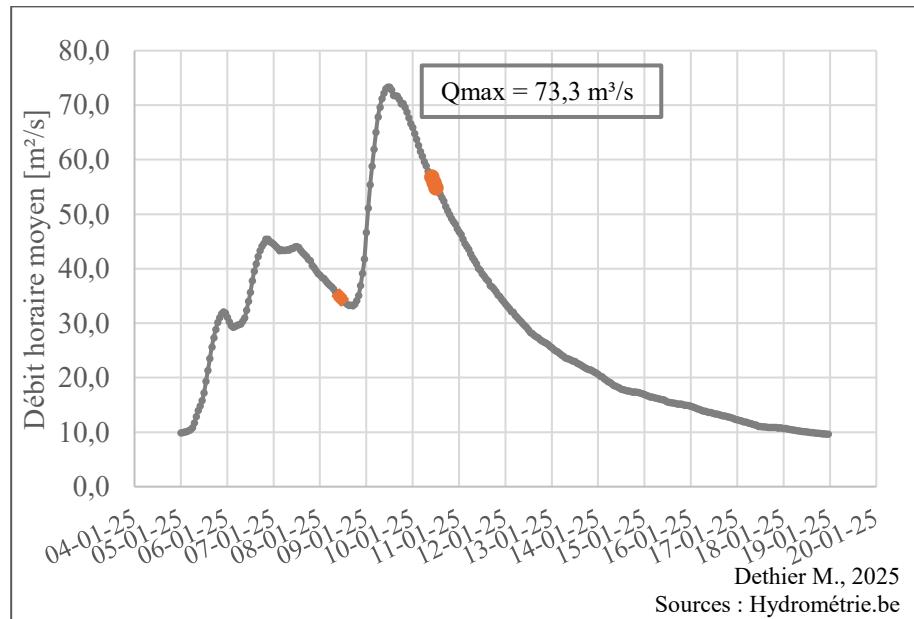


Figure 73 : Hydrogramme de l'épisode de crue de janvier 2025 avec prélèvements réalisés le 08/01/2025 et le 10/01/2025

IV-4.1. ÉTENDUE DES CRUES

Lors de l'épisode de crue de janvier 2025, un survol en drone de la zone d'étude a été effectué qui a permis de créer une cartographie de l'étendue maximale de la crue en plus de l'étendue de celle-ci au moment de l'acquisition (Figure 70). Cette cartographie a permis de se rendre compte de l'étendue des eaux et plus particulièrement au niveau de la plaine alluviale du gouffre de Belvaux. Une étendue d'eau assez importante et sans grandes vitesse se forme au niveau de la plaine alluviale du gouffre de Belvaux et remonte jusqu'au secteur des Rapides de la Lesse. Les blocs verticaux qui constituent ce secteur sont submergés et ne sont plus visibles en raison de la hauteur d'eau. Ces images confirme les résultats granulométriques obtenus précédemment et montre bien qu'au niveau de la plaine alluviale du gouffre de Belvaux la mise en place des éléments se fait par décantation en eaux calmes. Cela pourrait également expliquer pourquoi aucun élément grossier n'a été observé à cet endroit, contrairement aux premières hypothèses de travail. En effet, à l'origine, la question de recherche était de savoir s'il était possible de retrouver des signes d'anciennes crues exceptionnelles dans les sédiments grâce à des pics d'éléments grossiers dans la stratification. Le site d'étude ne s'est pas révélé optimal pour étudier ce phénomène. Deux raisons peuvent expliquer cela, la première c'est qu'une majeure partie de la plaine alluviale du gouffre de Belvaux est postérieure à l'ouverture du gouffre. La seconde explication est qu'avec la présence d'une zone de plan d'eau créée par le barrage naturel de la basse terrasse et le colluvions du Chession, créant une zone de décantation, les éléments grossiers transportés lors d'événements exceptionnels ne sédimentent pas dans cette zone mais plus en amont. Avec une meilleure connaissance du terrain à l'heure actuelle, pour ce genre d'étude, il faudrait privilégier un site légèrement en amont, aux environs du village de Belvaux.

Après avoir pris connaissance de la mise en place d'un plan d'eau similaire à un petit lac au niveau de la plaine alluviale du gouffre de Belvaux, la réflexion s'est portée sur comment celui-ci se met en place ? Grâce à l'imagerie LiDAR (SPW, 2024b), il est assez facile de remarquer qu'il y a présence d'un niveau légèrement plus haut qui crée la retenue d'eau. Il s'agit très fortement des colluvions du Chession, avec une direction Nord-Est Sud-Ouest, qui forment une sorte de barrage naturelles et bloquent l'écoulement des eaux en surface rétrécissant la section d'écoulement et créant le lac au niveau de la plaine alluviale du gouffre de Belvaux.

Au niveau de la Chavée, au pied du Belvédère, il a également été observé que les eaux de crue ne longent pas uniformément le pied du versant. Cette configuration pourrait s'expliquer par la présence d'un cône de déjection formé par la Fontaine Saint-Martin, qui ferait obstacle à l'écoulement des eaux à cet endroit.

Partie V – Discussion

Cette cinquième partie vise à présenter les différentes hypothèses formulées pour tenter de répondre à la question de recherche, à savoir la datation de la dernière ouverture du gouffre de Belvaux. Elles se poursuivra par une réflexion critique sur le travail mené, avant de s'achever par l'exploration des perspectives que cette étude permet d'envisager.

V-1. DISCUSSION DES RÉSULTATS

L’analyse croisée des différents profils de carottage réalisés dans la plaine alluviale au gouffre de Belvaux et dans la Chavée au pied du Belvédère permet de mieux comprendre la sédimentation et les dynamiques d’incision associées à l’ouverture du gouffre de Belvaux. Les profils HSL-P1 et HSL-P5 sont disposés en amont et au niveau du gouffre. Pour le profil HSL-P1, les taux d’incision par rapport au cailloutis du lit de la rivière actuelle, varient entre 6,27 m et 0,92 m pour le point le plus bas. La morphologie montre un aspect concave, trace d’un ancien chenal de la Lesse. La composition des sondages est homogène et composé principalement de limon. Pour le profil HSL-P5, quelques mètres en aval, le taux d’incision varie entre 5,36 m et 0,59 cm mais présente une morphologie de trois niveaux distincts montrant un glissement latéral de la Lesse en plusieurs phases avant qu’elle ne rejoigne le gouffre. Ensuite, les profils HSL-P3 et HSL-P4 montrent, tous deux, la présence d’un niveau de basse terrasse. Pour le profil HSL-P3, le niveau de la basse terrasse sur laquelle a été fait les sondages varie entre 1 et 1,5 m au-dessus du niveau du fond du paléochenal. Au niveau du sondage à 78 m, le niveau de basse terrasse est 3 m au-dessus du niveau repère, le fond du paléochenal. Ce niveau peut être mis en relation avec le niveau de basse terrasse retrouvé sur les sondages à 131 m et 150 m sur le profil HSL-P4. Du point de vue granulométrique, les éléments grossiers retrouvés dans les sondages du profil HSL-P3 et HSL-P4 sont globalement plus grossiers que ceux observés dans le profil HSL-P1. Toutefois, il faut traité cette information avec prudence car les méthodes d’échantillonnages n’étaient pas les mêmes.

Au niveau des sondages dans la Chavée au pied du Belvédère, sur le profil BEL-P0, la composition sédimentaire des sondages diffère quelque peu de ce qui a pu être observé dans la plaine alluviale du gouffre de Belvaux. Plusieurs niveaux de petits gravillons et graviers ainsi que des niveaux riches en matière organique sont présents dans les sondages. Ces variations sédimentaires témoignent d’un régime hydrologique de mise en place différent, probablement lié à des apports plus épisodiques suite à l’ouverture en amont des pertes du Trou d’Enfaule et du gouffre de Belvaux.

Sur base de la recherche et du comptage d’éléments métallurgiques dans les sondages HSL-P1-13,40m et HSL-P1-26,90m, un taux de sédimentation de l’ordre de 0,30 cm/an, soit 30 cm/siècle, a pu être estimé. Ce taux est représentatif de la période postérieure au début du XVII^{ème} siècle, en lien avec l’activité de la forge de Neupont, principale source présumée de ces résidus métallurgiques. En comparaison, dans la vallée de l’Aisne, un affluent ardennais de l’Ourthe traversant la Calestienne au niveau de Juzaine, des études similaires ont permis d’estimer un taux de sédimentation de 20 cm/siècle (Houbrechts, 2005). Sur la Liègne, un affluent ardennais de l’Amblève, un taux d’aggradation variant entre 2,7 et 16 cm/siècle selon les sites d’étude a été estimé (Houbrechts et al., 2020). Cette comparaison indique que la plaine alluviale de la Lesse au niveau du gouffre de Belvaux présente une accumulation sédimentaire légèrement plus importante, pouvant être liée à la présence du barrage naturel créé par la basse terrasse et les colluvions du Chession, qui crée un plan d’eau impliquant une zone de décantation. Les sédiments se retrouvent piégés à cet endroit.

Les résultats obtenus lors de la recherche de téphras dans les échantillons traités ne concordent pas avec ceux décrit par Dricot en 1969 pour la coupe 2 « Rive gauche Basse terrasse en aval du secteur des Rapides de la Lesse », correspondant à la coupe IV dans son étude. Alors qu’il mentionnait la présence de basaltènes (ancienne appellation pour les amphiboles brunes) ainsi que des sphènes, aucun de ces éléments n’a été identifié dans les échantillons de cette coupe analysés dans le cadre de cette étude. Seule une augite a été retrouvée, sans autre trace d’élément d’origine volcanique. Cette divergence peut provenir de la divergence méthodologique entre les travaux de Dricot (1969) et les analyses actuelles, mais également du fait que la nomenclature minéralogique ait évolué. Certaines identifications anciennes peuvent ainsi prêter à confusion, notamment dans le cas de minéraux présentant des propriétés optiques similaires.

V-2. RÉPONSE À LA QUESTION DE RECHERCHE

La mise en place du réseau hydrographique actuel de la Lesse à Han-sur-Lesse résulte très probablement d'un processus progressif, marqué par plusieurs phases de captures successives. À partir des données géomorphologiques, sédimentaires, archéologiques et chronologiques disponibles, plusieurs hypothèses peuvent être formulées concernant la datation de la dernière ouverture du gouffre de Belvaux. Chacune de ces hypothèses reposent sur un ensemble d'arguments plus ou moins convergents nécessitant une discussion critique.

Une première hypothèse situe l'ouverture du gouffre de Belvaux vers 5500 BP (âge radiocarbone non calibré). Cette hypothèse s'appuie sur deux datations concordantes : l'une issue du profil BEL-P0, 5670 ± 30 BP (Beta-745512), soit 4554-4443 cal BC, et l'autre du sondage HSL-P2, 5402 ± 29 BP (RICH-34867), soit 4340-4070 cal BC. Ces âges sont associés à des niveaux de cailloutis situés plus bas que le profil longitudinal passant par le Trou d'Enfaule, ce qui suggère une incision déjà amorcée à cette époque par l'ouverture du Trou d'Enfaule. Dans le profil en long (Figure 63), ces niveaux apparaissent plus bas que ceux attribués au niveau de l'ouverture du Trou d'Enfaule, ce qui pourrait indiquer une capture de la Lesse par un drain souterrain déjà actif. Au niveau du sondage, l'élément daté se trouve au contact cailloutis juste en-dessous d'un niveau de graviers, signe d'un changement de débit du cours d'eau qui mets en place les éléments mais toujours d'une capacité suffisante pour transporter des graviers. Enfin, une autre donnée importante est fournie par la datation U/Th réalisée par S. Blockmans (1999) dans la stalagmite du Point du Jour. Celle-ci indique un encaissement marqué de la Lesse dès 5000 BP. Cette incision ancienne pourrait témoigner d'une dynamique d'ajustement du réseau karstique suite à l'ouverture du Trou d'Enfaule.

Une seconde hypothèse émise, propose une ouverture du gouffre autour de 3000 BP (âge radiocarbone non calibré). Cette datation repose notamment sur deux pics granulométriques identifiés dans un sondage en HSL-P1 aux profondeurs de 305-317 cm et 184-200 cm. Ces dates sont respectivement 4710 ± 29 BP (RICH-34865), soit 3630-3370 cal BC et 4022 ± 27 BP (RICH-34864), soit 2620-2460 cal BC (Houbrechts *et al.*, 2025). Si le gouffre de Belvaux avait déjà été pleinement ouvert, il est peu probable que de tels dépôts aient pu s'accumuler dans la plaine alluviale. Toutefois, après réévaluation de la nature des dépôts, ceux-ci sont anguleux et fragmentés pour certains. Leur présence dans la plaine alluviale pourrait provenir de colluvions ou d'un remaniement et non d'un dépôt de crue. Par ailleurs, la datation de Timperman (2018), 3000 ± 30 BP (LMC14-53504), soit 1381-1124 cal BC, pose question. Cette datation concerne un fragment de charbon trouvé dans un plancher stalagmitique d'une galerie aujourd'hui quasiment entièrement occupée par la Lesse souterraine. Si la Lesse passait déjà dans la galerie au moment de la formation de ce plancher, le dépôt sous-jacent aurait été érodé et le plancher stalagmitique n'aurait pas pu se développer. Toutefois, pour que ce plancher se forme sur des dépôts supposés lacustres, il faut qu'une incision et une brèche à la sortie de la grotte permettent une incision suffisante pour qu'un plancher stalagmitique puisse se développer plus haut que le plan d'eau. La galerie aurait pu être inondée sans écoulement suffisamment rapide que pour entraîner une incision marquée. Cette situation serait compatible avec une configuration transitoire du réseau, dans laquelle le gouffre de Belvaux n'aurait pas été fonctionnel mais le Trou d'Enfaule, déjà actif, aurait pu absorber un débit de l'ordre de 7 m³/s. De plus, il serait nécessaire de connaître l'altitude exacte de ce plancher stalagmitique daté afin de le corrélérer plus spécifiquement à un niveau déjà identifié, ce qui n'est pas le cas à l'heure actuel. Actuellement le planché stalagmitique est en partie érodé, donc le passage de la Lesse à cet endroit est postérieur à la mise en place de celui-ci et donc postérieur à 3000 ± 30 BP (LMC14-53504), soit 1381-1124 cal BC.

Enfin, une dernière hypothèse situe l'ouverture effective du gouffre vers 2000 BP (âge radiocarbone non calibré), sur base de la datation (RICH-36953), 1983 ± 24 BP, soit cal 50 BC-120 AD, obtenue dans le sondage HSL-P1-26,90m. Cette datation faite au contact cailloutis est potentiellement lié à une capture définitive de la Lesse par le gouffre de Belvaux. L'évolution du tracé du chenal, qui s'est déplacé vers la gauche en direction du gouffre, renforce le fait que la capture de la Lesse par le gouffre ne peut pas être postérieure à cette datation. En effet, il semble très peu probable que la rivière ait adopté un trajet plus long par la suite. Toutefois, cette datation relativement récente n'exclut pas pour autant une ouverture antérieure du gouffre, ni la possibilité d'une capture progressive ayant impliqué plusieurs phases de fonctionnement. De plus, l'élément qui a été daté correspond à un niveau de matière organique qui a pu se mettre en place à cet endroit lors d'un phénomène de décantation lorsque le gouffre était temporairement obstrué par un embâcle ou des colluvions comme déjà émis pour la seconde hypothèse.

À l'aide des résultats obtenus à partir du profil en long, il est très fort probable que l'ouverture du Trou d'Enfaule soit antérieure à celle du gouffre de Belvaux et datée vers 5500 BP (âge radiocarbone non calibré), permettant un écoulement au sein du système karstique des grottes de Han-sur-Lesse. Laissant le parcours en surface à sec de manière saisonnière quand le débit de la Lesse est plus faible. Pour rappel, le débit d'absorption de Trou d'Enfaule actuel est de 7 m³/s. Sur base des données hydrologiques actuelles, il a été calculé que le Trou d'Enfaule pourrait absorber l'entièreté du débit de la Lesse 270 jours par an. Ensuite s'est effectué l'ouverture de gouffre de Belvaux, au plus tard aux environs de 2000 BP (âge radiocarbone non calibré). Toutefois, lorsque le gouffre de Belvaux est ouvert, il n'est pas exclu que celui-ci se soit rebouché temporairement lors de certains événements à cause de la création d'embâcles. En effet, aujourd'hui le gouffre de Belvaux ainsi que le Trou d'Enfaule sont sujets à des sessions de nettoyage afin d'enlever les éléments trop volumineux qui pourraient obstruer le passage de la Lesse (Annexe 6). L'ouverture du gouffre de Belvaux serait dès lors située entre 3000 ± 30 BP (LMC14-53504), soit 1381-1124 cal BC et 1983 ± 24 BP (RICH-36953), soit cal 50 BC-120 AD.

V-3. AUTOCRITIQUE

Malgré l'abondance et la richesse des données collectées et utilisées, des méthodes mises en œuvre dans ce travail restes limitées et pourraient être améliorées.

Tout d'abord, les datations réalisées sont de type radiocarbone et ont été effectuées sur des fragments de charbons ou de matière organique. Bien que ces datations soient solides, elles ne permettent pas à elle seule d'établir avec certitude la chronologie complète de l'ouverture du gouffre de Belvaux. D'autres méthodes de datations, comme la luminescence stimulée optiquement (OSL), pourraient être intégrées. Cette technique permet de dater l'enfouissement de certains minéraux comme le quartz, ce qui permettrait de combler la limite qu'a la datation radiocarbone, qui ne s'applique uniquement à des débris organiques. De plus, un problème majeur dans les datations radiocarbone est la possibilité du remaniement des éléments datés créant une datation faussée.

Ensuite, la répartition spatiale des carottages peut être questionnée. Même si la quantité de sondages effectués reste conséquent, ceux-ci se concentrent principalement sur quelques profils situés dans le même secteur. Des sondages supplémentaires en aval de la résurgence au Trou de Han auraient pu offrir une vision plus complète des dynamiques d'incision associées à l'ouverture. En effet, trois méthodes différentes auraient pu être mises en place pour répondre à la question de recherche sur la chronologie de l'ouverture du gouffre de Belvaux. La première étant de travailler sur les niveaux d'incision dans la plaine alluviale du gouffre et la seconde de travailler sur la sédimentation dans la Chavée. Ces deux points de vues ont été appliqués dans ce travail. Une troisième possibilité aurait été de travailler sur l'incision de la Lesse en aval de la résurgence au Trou de Han qui a été créée par déficit

sédimentaire du à l'ouverture du gouffre de Belvaux et le piégeage des sédiments dans le réseau endokarstiques.

Un autre point pouvant être amélioré dans ce travail est le lien entre archives sédimentaires en surface et les enregistrements endokarstiques. Une analyse croisée plus poussée aurait permis de mieux comprendre les corrélations stratigraphiques entre ce qui s'est passé en surface et ce qui s'est passé dans les grottes. De plus, pour cela une connaissance des altitudes exactes des dépôts au sein des grottes est nécessaire.

À l'heure actuelle, l'hypothèse principale replace l'ouverture du gouffre de Belvaux entre 3000 ± 30 BP (LMC14-53504), soit 1381-1124 cal BC et 1983 ± 24 BP (RICH-36953), soit cal 50 BC-120 AD. Il serait toutefois nécessaire d'avoir des datations supplémentaires pour restreindre cette intervalle chronologique et s'assurer que les dates obtenues n'ont pas été impactées par des éléments remaniés.

V-4. PERSPECTIVES

Au terme de ce travail, certaines interrogations sont toujours présentes et de nouvelles surgissent ouvrant de nouvelles perspectives de pistes de recherche sur cette problématique de la chronologie de l'ouverture du gouffre de Belvaux.

Au début de l'étude, il avait été pensé de corréler les archives sédimentaires obtenues avec une étude détaillée d'archives climatiques du Quaternaire. Il serait intéressant de voir comment cette corrélation peut se faire et quels en seraient les résultats.

Concernant les méthodologies complémentaires susceptibles d'être associées à celles utilisées dans le cadre de ce travail, la comparaison des données sédimentaires avec des données de susceptibilité magnétique avait été envisagée. Néanmoins, pour des raisons techniques et méthodologiques, cette méthode a dû être abandonnée au cours de l'étude. Toutefois, il serait pertinent d'examiner dans quelle mesure cette méthode pourrait être intégrée et quels résultats elle pourrait apporter à la compréhension du système de mise en place de l'ouverture du gouffre de Belvaux. Dans la même démarche de croiser des archives sédimentaires avec d'autres méthodes géophysiques, des recherches sismologiques sont actuellement en cours sur le site étudié. Il serait également intéressant d'évaluer comment cette technique pourrait venir enrichir les résultats obtenus.

L'étude a également permis la réalisation de levés de coupes. En amont du gouffre, une observation détaillée a été menée sur la rive gauche. Un levé de coupe avait également été envisagé sur la rive droite, mais n'a pas pu être réalisé en raison d'un niveau d'eau élevé et d'un débit trop important.

Enfin, une brève mention de l'étude morphométrique entre l'amont et l'aval du gouffre de Belvaux a été faite. Toutefois, lorsque la Région Wallonne mettra à disposition un LiDAR du fond du lit de cette zone, il serait pertinent de s'attarder sur la comparaison des profils existants à l'Atlas des Cours d'Eau Non Navigables avec ces nouveaux relevés. Une telle analyse permettrait de mieux comprendre l'évolution morphologique et de réaliser également une analyse dynamique de la plaine alluviale et des basses terrasses entre Resteigne et le village de Belvaux.

Partie VI – Conclusion

Ce mémoire a eu pour but de reconstituer la chronologie de l'ouverture du gouffre de Belvaux et analyser les impacts que cet événement ont eu du point de vue géomorphologique et archéologique dans la vallée de la Lesse à Han-sur-Lesse. À travers une approche pluridisciplinaire faisant intervenir la géomorphologie, l'hydrologie et la sédimentologie, cette étude a permis de comprendre davantage l'évolution du système karstique de Han-sur-Lesse. Il a été montré qu'il est fort probable que ce système soit plus complexe qu'une simple ouverture d'une perte mais qu'il s'agirait d'une alternance de phases de fonctionnement et de blocage de cette perte que constitue le gouffre de Belvaux.

Un des premiers résultats majeurs de cette étude sont les résultats topographiques. Ceux-ci, par la réalisation d'un profil en long notamment, ont apportés des éléments essentiels à la compréhension des différentes phases de l'évolution du site. L'analyse des altitudes des niveaux de cailloutis atteints dans les différents sondages et levés de coupe ont permis de mettre en évidence une dynamique d'ouverture régressive vers l'amont qui suggère que le Trou d'Enfaule s'est ouvert en premier, suivi de l'ouverture du gouffre de Belvaux. Ces ouvertures différées ont généré plusieurs phases successives d'incision dans la plaine alluviale.

Un second grand résultats de cette étude est la meilleure connaissance du site phase à des épisodes de crue actuelles, une fois mise en perspectives, permettent de mieux comprendre le comportement passé. Par une acquisition d'images aériennes par drone, il a été possible de cartographier l'extension de la zone inondée et notamment la cartographie du plan d'eau au niveau de la plaine alluviale du gouffre de Belvaux. Ce phénomène a confirmé les analyses granulométriques faites dans les sondages prélevés à cet endroit sur le profil HSL-P1. Celles-ci présentaient un caractère de mise en place par décantation dans une zone d'eau calme, caractéristiques d'un milieu lacustre comme c'est le cas lors d'épisode actuel de crue. Ces résultats couplés ont permis d'être en faveur d'une hypothèse de l'ouverture antérieure à la mise en place de ces dépôts et donc antérieure à 1983 ± 24 BP (RICH-36953), soit cal 50 BC-120 AD.

Enfin, les différentes datations radiocarbone qui ont été réalisées dans le cadre de ce travail ont permis de caller davantage les différentes phases clés de l'évolution karstique du site.

Toutefois, malgré ces avancées, des incertitudes subsistent, notamment au niveau de la correspondance exacte entre les dépôts de surface et les enregistrement endokarstiques. Ce dernier point, nécessite particulièrement de s'y intéresser afin d'encore mieux comprendre les différentes phases de l'évolution du site et des dynamiques qui ont été mises en place.

Bibliographie

- BEN HADJ SALEM, A. (2015). *Eléments de Géodésie et de la Théorie des Moindres Carrés.* <https://vixra.org/pdf/1511.0131v1.pdf>, consulté le 26 mai 2025
- BLOCKMANS, S., QUINIF, Y., BINI, A., ZUCCOLI, L. (1999). Dynamique sédimentaire et paléoenvironnements durant la transition Weichsélien-Holocène à partir des dépôts endokarstiques de la Grotte de Han-sur-Lesse (Belgique). *Bulletin de la Société Géologique de France*, 170 (6), 841-852. <https://pubs.geoscienceworld.org/sgf/bsgf/article/170/6/841/88193/Dynamique-sedimentaire-et-paleoenvirrionnements>, consulté le 25 avril 2025
- BONNIVER, I. (2011). Etude hydrogéologique et dimensionnement par modélisation du "système- traçage" du réseau karstique de Han-sur-Lesse (Massif de Boine - Belgique). Thèse de doctorat en Sciences géologiques, Namur, Université de Namur, pp. 349. <https://researchportal.unamur.be/fr/studentTheses/etude-hydrog%C3%A9ologique-et-dimensionnement-par-mod%C3%A9lisation-du-syst>, consulté le 06 juin 2025
- BRABANT, M., PATIZEL, B., PIEGLE, A. et MÜLLER, H. (2012). *Topographie opérationnelle : mesures, calculs, dessins, implantations.* Eyrolles. 2. Paris : Blanche BTP, pp 416.
- BULTYNCK, P., DEJONGHE, L. (2001). Devonian lithostratigraphic units (Belgium). *Geologica Belgica*, 4 (1-2), 39-69. <https://doi.org/10.20341/gb.2014.043>
- CentipedeRTK GitHub. (2025). *Le GNSS RTK c'est quoi ?* https://docs.centipede.fr/docs/centipede/2_RTK.html, consulté le 26 mai 2025
- DEFLANDRE, G. (1989). *Han-sur-Lesse et ses grottes. Les 100 plus belles photos de la Lesse secrète.* Bruxelles : Didier Hatier, 155 p.
- DELAERE, C. et WARMENBOL, E. (2019). Chapter 8 The Watery Way to the World of the Dead: Underwater Excavations (Old and New) at the Cave of Han-sur-Lesse, Belgium. In BÜSTER, L., WARMENBOL, E., MLEKUŽ, D. (eds), *Between Worlds : Understanding ritual cave use in later prehistory.* Springer Nature, 137-161. https://doi.org/10.1007/978-3-319-99022-4_8
- DELAERE, C., BILLAUD, Y. et ANSIEAU, C. (2022). Archéologie en contexte karstique subaquatique : une nouvelle approche des dépôts anthropiques et naturels à la résurgence de la Lesse aux grottes de Han (Province de Namur, Belgique). In *Actes du 18ème Congrès international de Spéléologie.* Savoie Mont Blanc, 5, 207-210. https://www.researchgate.net/publication/329783700_The_Watery_Way_to_the_World_of_the_Dead_Underwater_Excavations_Old_and_New_at_the_Cave_of_Han-sur-Lesse_Belgium, consulté le 06 juin 2025
- DELMOT, J. (2012). Reconstitution du climat récent (1880-2010) par analyses sédimentologiques et géochimiques de la stalagmite Proserpine de la grotte de Han-sur-Lesse (Rochefort, Belgique). Mémoire de master en sciences géographiques, Liège, Université de Liège, pp. 127.
- DENIS, A-C., WASTIAUX, C., PETIT, F., LECLERCQ, L., JUVIGNE, E., VAN CAMPENHOUT, J. et HOUBRECHTS, G. (2013). Reconstitution de la dynamique d'une rivière ardennaise (La Lienne) depuis le Tardiglaciaire grâce à l'analyse géomorphologique et chronostratigraphique d'une tourbière de fond de vallée. *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, 19 (2), 133-152. <https://doi.org/10.4000/geomorphologie.10187>

DIERKENS, A. et DUVOSQUEL, J-M. (1994). *La sidérurgie en Terre de Saint-Hubert de Jehan Rifflar à Nestor Martin*, 5. Crédit Communal, Saint-Hubert en Ardenne Art-Histoire-Folklore, 34 p.

Domaine des Grottes de Han. (2020). Le Gouffre de Belvaux nettoyé ce 24 octobre dernier. Domaine des Grottes de Han. <https://grotte-de-han.be/presse/communiques-de-presse/le-gouffre-de-belvaux-nettoye-ce-24-octobre-dernier>, consulté le 28 mai 2025

DRICOT, J.M. (1969). Etude des sédiments à l'entrée du gouffre de Belvaux (Grottes de Han-sur-Lesse, Prov. De Namur). *Bulletin de la société belge de Géologie, Paléontologie et hydrologie*, 78 (1), 7-20. https://biblio.naturalsciences.be/rbins-publications/bulletin-de-la-societe-belge-de-geologie/078%20-%201969/bsbg_78_1969_p007-020.pdf, consulté le 22 avril 2025

DRICOT, J.M., Vermeersch, P. (1969). Une industrie mésolithique à Han-sur-Lesse. *Helinium*, 9 (1), 39-45. <https://lirias.kuleuven.be/bitstream/123456789/144326/1/>, consulté le 23 avril 2025

DURUPT, C. (2019). Nettoyage du Gouffre de Belvaux. RCAE-Section Spéléo de l'ULiège. <https://rcae-speleo.be/2019/03/nettoyage-du-gouffre-de-belvaux/>, consulté le 28 mai 2025

EK., C. (1974). Étude sédimentologique dans la grotte de Remouchamps. *Bulletin de la Société Royale Belge d'Anthropologie et de Préhistoire*, 85, 16-41. <https://hdl.handle.net/2268/174849>, consulté le 07 juin 2025

FONTAINE, O. (2022). Caractérisation de la sédimentation dans les grottes de Han-sur-Lesse. Mémoire de Master en sciences géologiques, Bruxelles, Université Libre de Bruxelles, inédit, pp. 124. <https://difusion.ulb.ac.be/vufind/Record/ULB-MASTER:oai:dipt.ulb.ac.be:2013/336256/Details>, consulté le 06 juin 2025

FORD, T.D. et PEDLEY, H.M. (1996). A review of tufa and travertine deposits of the world. *Earth-Science Review*, 41, 117-175. [https://doi.org/10.1016/S0012-8252\(96\)00030-X](https://doi.org/10.1016/S0012-8252(96)00030-X)

FRANCHIMONT, C. (1993). *Dynamique fluviale de la Lesse : Fréquence des inondations, morphométrie des méandres et sédimentologie du lit*. Mémoire de licence en sciences géographiques, Liège, Université de Liège, inédit, 121 p.

Géoportail de Wallonie. (2025). Fiche descriptive – Réseau des stations limnimétriques sur les cours d'eau non-navigables (AQUALIM). <https://geoportail.wallonie.be/catalogue/9e8f77db-8ce9-464c-b28c-9ecb96a58a31.html>, consulté le 23 mars 2025

Houbrechts, G. (2005). Utilisation des macroscories et des microscories en dynamique fluviale : application aux rivières du massif ardennais (Belgique). Thèse de doctorat en sciences géographiques, Liège, Université de Liège, pp. 328.

Houbrechts, G. (2020). Des scories dans les alluvions du bassin de l'Ourthe : origine et utilisation en géomorphologie. In CWEPPS, *Atlas du Karst Wallon - Bassin de l'Ourthe Calestienne*, 9. Wallonie Environnement SPW, 26-32. <https://orbi.uliege.be/handle/2268/251460>, consulté le 23 avril 2025

Houbrechts, G., PETIT, F., NOTEBAERT, B., KALICKI, T. et DENIS, A.-C. (2020). Microslags as a stratigraphic tracer to quantify floodplain processes (Lienne catchment, Belgium). *Geomorphology*, 360 (7), pp.107166. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2020.107166>

Houbrechts, G., DELAERE, C. (2025). CHAPITRE 6 Géomorphologie de la vallée de la Lesse dans la traversée de la Chavée : nouvelles données concernant l'ouverture du Gouffre de Belvaux et l'abandon du méandre de Chession. (pas encore publié)

Houbrechts, G., Hallot, E., Levecq, Y., Denis, A-C., Van Campenhout, J., Peeters, A. et Petit, F. (2013). Images CM de Passega des rivières ardennaises. *Bulletin de la Société Géographique de Liège (BSGLg)*, 61, 37-68. https://orbi.uliege.be/bitstream/2268/166578/1/BSGLg_61_37-68_Houbrechts_et_al.pdf, consulté le 02 mai 2025

Juvigné, E. (1977). Zone de dispersion et âge des poussières volcaniques du tuf de Rocourt. *Annales de la Société Géographique de Belgique*, 100, 13-22. <https://popups.uliege.be/0037-9395/index.php?id=4564>, consulté le 07 juin 2025

Juvigne, E. (1993). Contribution à la téphrostratigraphie du Quaternaire et son application à la géomorphologie. *Mémoires pour servir à l'Explication des Cartes Géologiques et Minières de la Belgique*, 36, 66 p., Bruxelles. gsb.naturalsciences.be/memoirs/memoirs-36/, consulté le 26 mai 2025

Juvigné, E., Demoulin, A., Houbrechts, G. et Paulissen, E. (2015). Des terrasses de fond de vallée de la Meuse dans la région de Huy (Belgique). *Bulletin de la Société Géographique de Liège (BSGLg)*, 65, 27-50. <https://popups.uliege.be/0770-7576/index.php?id=4117>, consulté le 07 juin 2025

Juvigne, E., Demoulin, A., Houbrechts, G. et Paulissen, E. (2016). Des terrasses de fond de vallée de la Meuse dans la région de Huy (Belgique). *Bulletin de la Société Géographique de Liège*, 65, 27-50. <https://popups.uliege.be/0770-7576/index.php?id=4117>, consulté le 19 mai 2025

Juvigné, E., Pouclet, A., Haesaerts, P., Bosquet, D. et Pirson, S. (2013). Le Téphra de Rocourt dans le site paléolithique moyen de Remicourt (province de Liège, Belgique). *Quaternaire*, 24 (3), 279-291. <https://doi.org/10.4000/quaternaire.6738>

L'hydrométrie en Wallonie. (2025). <https://hydrometrie.wallonie.be/home.html>, consulté le 25 mars 2025

Lang Delus, C. (2011). Les étiages : définitions hydrologique, statistique et seuils réglementaires. Cybergeo: European Journal of Geography. *Environnement, Nature, Paysage*, document 571, pp. 22. <https://doi.org/10.4000/cybergeo.24827>

Leuzy, T. (2006). Contribution des tomographies électriques et des sondages par sismique réfraction à la géographie physique. Mémoire de licence en sciences géographiques, Liège, Université de Liège, inédit, 175 p.

Malvern Panalytical. (2019). MASTERSIZER 3000 La granulométrie plus intelligemment. <https://www.htds.fr/wp-content/uploads/2021/01/Brochure-MS3000-3000E-2019-Hydro-EV-LV-MV-SV-SM-Sight-AeroS-M-FR.pdf>, consulté le 26 mars 2025

Marescot, L. (2008). Imagerie électrique pour géologue-acquisition, traitement, interprétation. ETH-Swiss Federal Institute of Technology Zurich, pp 73. https://www.academia.edu/27049692/IMAGERIE_ELECTRIQUE_POUR_GEOLOGUES_acquisition_traitement_interpr%C3%A9tation, consulté le 26 mai 2025

Michel, G. (2006). Le Gouffre de Belvaux à Han-sur-Lesse, Patrimoine remarquable du karst wallon. *EcoKarst*, 66, 7-9. <https://www.cweppss.org/download/ecoKarst/Echokarst66.pdf>, consulté le 22 avril 2025

Pentecost, A. (2005). *Travertine*. Springer. 1. Pays-Bas : Springer Dordrecht, Springer Nature, pp 456. <https://doi.org/10.1007/1-4020-3606-X>

- PETIT, F., HALLOT, E., HOUBRECHTS, G. et 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://hdl.handle.net/2268/25625>, consulté le 06 juin 2025
- PISSART, A. (1987). *Géomorphologie périglaciaire : textes des leçons de la Chaire Francqui belge*. Université de Liège, Laboratoire de géomorphologie et de géologie du Quaternaire, Liège, pp. 135. <https://hdl.handle.net/2268/210338>, consulté le 06 juin 2025
- PONCLET, A. et JUVIGNE, E. (2009). The Eltville Tephra, A Late Pleistocene Widespread Tephra Layer In Germany, Belgium And The Netherlands; Symptomatic Compositions Of The Minerals. *Geologica Belgica*, 12(1-2), 93-103. <https://popups.uliege.be/1374-8505/index.php?id=2693>, consulté le 19 mai 2025
- POTY, E. (1976). L'influence de la structure géologique sur le relief de la Belgique. In: PISSART, A. (ed) *Géomorphologie de la Belgique*. Université de Liège, Laboratoire de Géologie et de Géographie physique, pp 107–113 (cité dans Demoulin, 2017)
- QUINIF, Y. (1989). La notion d'étages de grottes dans le karst belge. *Karstologia : revue de karstologie et de spéléologie physique*, 13, 41-49. <https://doi.org/10.3406/karst.1989.2204>
- QUINIF, Y. (1996). Enregistrement et datation des effets sismo-tectoniques par l'étude des spéléothèmes. *Annales de la Société géologique de Belgique*, 119(1), 1-13. <https://popups.uliege.be/0037-9395/index.php?id=2119>, consulté le 06 juin 2025
- QUINIF, Y. (2015). Le système karstique de Han-sur-Lesse. In : CWEPPS, *Atlas du Karst Wallon – Bassin de la Lesse Calestienne*, 5. Wallonie, Environnement SPW, 31-38. https://www.geoparcfamenneardenne.be/files/rubrique_26/quinif-2015-system-han-in-akwa.pdf, consulté le 27 mai 2025
- QUINIF, Y. et BASTIN, B. (1994). Datation uranium/thorium et analyse pollinique d'une séquence stalagmitique du stade isotopique 5 (Galerie des Verviétois, Grotte de Han-sur-Lesse, Belgique). *Comptes rendus de l'Académie des sciences*, 318 (2), 211-217. https://www.researchgate.net/publication/260198309_Quinif_Y_Bastin_B_1994_-Datation_uraniumthorium_et_analyse_pollinique_d'une_sequence_stalagmitique_du_stade_isotopique_5_Galerie_des_Vervietois_Grotte_de_Han-sur-Lesse_Belgique_CRASParis_318_serie_II, consulté le 06 juin 2025
- QUINIF, Y. et HALLET, V. (2018). The Karstic System of Han-sur-Lesse. In DEMOULIN, A., *Landscapes and Landforms of Belgium and Luxembourg*. Springer International Publishing. Switzerland : Springer Nature, World Geomorphological Landscapes, 139-158. <https://doi.org/10.1007/978-3-319-58239-9>
- RIXHON, G., BRAUCHER, R., BOURLÈS, D., SIAME, L., BOVY, B. et DEMOULIN, A. (2011). Quaternary river incision in NE Ardennes (Belgium) – Insights from $^{10}\text{Be}/^{26}\text{Al}$ dating of river terraces. *Quaternary Geochronology*, 6, 273-284. <https://hdl.handle.net/2268/203669>, consulté le 06 juin 2025
- ROCHE, M.F. (1986). *Dictionnaire français d'hydrologie de surface*, 1. Paris : Masson, pp. 292. https://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/divers21-02/26812.pdf, consulté le 05 juin 2025
- SERET, G. (1963). Échantillon de la carte géomorphologique de Han-sur-Lesse. *Revue de géomorphologie dynamique*, 7-8-9, XVIe année, 120-128

Service Public de Wallonie (SPW). (1995). Atlas des Cours d'Eau Non Navigables - Version historique – Série. Géoportail de la Wallonie. <https://geoportail.wallonie.be/catalogue/b1170763-86b2-4f58-814c-5b4369bd05d3.html>, consulté le 26 mai 2025.

Service public de Wallonie (SPW). (2021). Atlas des voiries vicinales de 1841 – Série (consolidée sur la Wallonie). Géoportail de la Wallonie. <https://geoportail.wallonie.be/catalogue/45c76d4f-c727-4bbd-b9b9-670cc6d38461.html>, consulté le 06 juin 2025

Service Public de Wallonie (SPW). (2024a). Relief de la Wallonie – Modèle Numérique de Terrain (MNT) 2021-2022- Hillshade. Géoportail de la Wallonie. <https://geoportail.wallonie.be/catalogue/89b00953-efdb-449b-baec-1c8e7ce483b5.html>, consulté le 26 mai 2025

Service Public de Wallonie (SPW). (2024b). Utilisation des produits LiDAR – Focus sur les produits issus de la campagne d'acquisition aéroportée LiDAR 2021-2022. https://geoportail.wallonie.be/files/PDF/LiDAR24/Tuto_LiDAR%202.pdf, consulté le 26 mai 2025

VAIDIS, M., GIGUERE, P., POMERLEAU, F., KUBELKA, V. (2021). Accurate outdoor ground truth based on total stations. *18th Conference on Robots and Vision (CRV)*, pp 8. <https://doi.org/10.1109/CRV52889.2021.00012>

VAN CAMPENHOUT, J., Houbrechts, G., Peeters, A. et 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>

VAN DE POEL, B. (1968). *Géologie et Géomorphologie de la Région du Parc National de Lesse et Lomme (Hans/Lesse-Rochefort)*, 3. ASBL Ardenne et Gaume, Monographie n°1, 59 p.

VANSTEENBERGE, S., VERHEYDEN, S., CHENG, H., EDWARDS, R.L., KEPPENS, E., et CLAEYS, P. (2016). Paleoclimate in continental northwestern Europe during the Eemian and early Weichselian (125–97ka): insights from a Belgian speleothem. *Climate of the Past*, 12 (7), 1445-1458. <https://doi.org/10.5194/cp-12-1445-2016>

VEREERSTRAETEN, J. (1970). Le bassin de la Meuse – Etude de géographie hydrologique. *Revue belge de géographie*, 94 (1-3), pp. 339

VERHEYDEN, S., BAELE, J-M., KEPPENS, E., GENTY, D., CATTANI, O., CHENG, H., EDWARDS, L., ZHANG, H., VAN STRIJDONCK, M. et QUINIF, Y. (2006). The Proserpine stalagmite (Han-sur-Lesse cave, Belgium): Preliminary environmental interpretation of the last 1000 years as recorded in a layered speleothem. *Geologica Belgica*, 9 (3-4), 245-256. <https://popups.uliege.be/1374-8505/index.php?id=1236>, consulté le 25 avril 2025

WEBER, J-P. (1985). Les Origines des forges du Neupont à Halma (XVIIe siècle). *De la Meuse à l'Ardenne*, 1, 39-47.

WILLIAMS, G.P. (1978). Bank-full discharge of rivers. *Water Resour. Res.*, 14, 1141–1154. <https://doi.org/10.1029/WR014i006p01141>

Annexes

Annexe 1 : Données relatifs aux différents carottages

Profil	Distance sur le profil	X - Coord. LB72	Y - Coord. LB72	X-Coord. WG584	Y-Coord. WG584	Date prélevement	Type de prélevement	Altitude plaine alluviale (m) (LIDAR)	Profondeur refus (m)	Altitude refus (m)	Cailloutis atteint ?
BVX-1		209455,017	89051,219	5,19995	50,10967	12-05-25	Carottage à la tarière	170,61	0,18	170,43	Qui
BVX-2		209454,352	89046,762	5,19994	50,10963	12-05-25	Carottage à la tarière	170,61	0,12	170,486	Qui
BVX-3		209456,584	89039,001	5,19997	50,10956	12-05-25	Carottage à la tarière	170,64	0,13	170,513	Qui
BT RG Rapides		209571	89531	5,207239	50,113931	11-03-25	Levé de coupe	168,00	1,00	167,00	Oui
Profil 1	5m	209774	89533	5,204493	50,114419	12-05-22	Carottage à la tarière	166,06	3,53	162,53	Non
Profil 1	13,40m	209778	89590	5,20455	50,114481	09-09-24	Carottage motorisé	166,19	5,30	160,89	160,94
Profil 1	26,90m	209783	89602	5,204622	50,114588	09-09-24	Carottage motorisé	166,56	6,22	160,34	160,61
Profil 1	30m	209785	89605	5,20465	50,114615	12-05-22	Carottage à la tarière	166,68	3,90	162,78	Non
Profil 1	38m	209788	89612	5,204693	50,114678	12-05-22	Carottage à la tarière	166,81	3,57	163,24	Oui
Profil 1	42m	209790	89616	5,204722	50,114714	17-02-25	Carottage motorisé	166,86	5,00	161,86	162,24
Profil 1	48m	209792	89622	5,204756	50,114764	13-05-25	Carottage motorisé	163,90	3,00	163,90	Oui
Profil 1	55m	209795	89628	5,204794	50,114822	13-05-25	Carottage motorisé	165,90	1,04	165,90	Oui
Profil 5	5m	209730	89608	5,203874	50,114649	13-05-25	Carottage motorisé	165,90	6,90	159,00	Oui
Profil 5	15m	209737	89615	5,203984	50,114707	14-05-25	Carottage motorisé	166,09	4,90	161,19	Oui
Profil 5	25m	209745	89622	5,204087	50,114767	14-05-25	Carottage motorisé	166,35	5,00	161,35	Oui
Profil 5	35m	209752	89628	5,204190	50,114826	14-05-25	Carottage motorisé	166,63	3,20	163,43	Oui
Profil 5	45m	209759	89635	5,204293	50,114889	14-05-25	Carottage motorisé	166,79	3,20	163,59	Oui
Profil 5	55m	209767	89642	5,204398	50,114945	14-05-25	Carottage motorisé	166,89	3,10	163,79	Oui
Profil 2	36m	209737	89666	5,203989	50,115168	18-08-22	Carottage à la tarière	166,82	4,25	162,57	Oui
Profil 3	17m	209705	89651	5,203539	50,115037	15-05-24	Carottage à la tarière	166,43	1,51	164,92	Oui
Profil 3	28m	209714	89658	5,203666	50,115099	15-05-24	Carottage à la tarière	166,56	1,28	165,28	Oui
Profil 3	36m	209720	89663	5,203751	50,115143	15-05-24	Carottage à la tarière	166,80	2,47	164,33	Oui
Profil 3	50m	209731	89672	5,203906	50,115223	15-05-24	Carottage à la tarière	166,93	1,67	165,26	Oui
Profil 3	62m	209740	89680	5,204033	50,115294	15-05-24	Carottage à la tarière	167,18	1,40	165,78	Oui
Profil 3	78m	209748	89687	5,204146	50,115356	15-05-24	Carottage à la tarière	167,55	0,61	166,94	Oui

Profil	Distance sur le profil	X - Coord. LB72	Y - Coord. LB72	X-Coord. WGS84	Y-Coord. WGS84	Date prélevement	Type de prélevement	Altitude plaine alluviale (m) (LIDAR)	Profondeur refus (m)	Altitude cailloutis (m)	Cailloutis atteint ?
Profil 4	10,5m	209577	89699	5,201757	50,115481	14-05-24	Carottage à la tarière	165,18	0,19	164,99	Oui
Profil 4	24m	209586	89709	5,201884	50,11557	14-05-24	Carottage à la tarière	166,39	0,60	165,79	Oui
Profil 4	34m	209593	89717	5,201983	50,115641	14-05-24	Carottage à la tarière	166,68	0,30	166,38	Oui
Profil 4	50m	209604	89728	5,202139	50,115739	14-05-24	Carottage à la tarière	167,36	0,44	166,92	Oui
Profil 4	64m	209614	89738	5,20228	50,115828	14-05-24	Carottage à la tarière	167,51	0,56	166,95	Oui
Profil 4	80m	209625	89750	5,202436	50,115935	14-05-24	Carottage à la tarière	167,55	1,00	166,55	Oui
Profil 4	90m	209632	89757	5,202535	50,115997	14-05-24	Carottage à la tarière	167,64	1,00	166,64	Oui
Profil 4	110m	209646	89772	5,202733	50,116131	14-05-24	Carottage à la tarière	167,99	0,68	167,31	Oui
Profil 4	131m	209660	89787	5,202931	50,116264	14-05-24	Carottage à la tarière	168,19	0,41	167,78	Oui
Profil 4	150m	209673	89800	5,203115	50,11638	14-05-24	Carottage à la tarière	168,54	0,67	167,87	Oui
Sondage 4	Sondage Chavée	209701	90441	5,203607	50,12139	23-02-22	Carottage à la tarière	163,67	0,43	163,24	Oui
Sondage 5	Sondage Chavée	209838	90487	5,20553	50,122539	23-02-22	Carottage à la tarière	163,64	1,06	162,58	Oui
Sondage 6	Sondage Chavée	209845	90465	5,205625	50,122341	23-02-22	Carottage à la tarière	164,31	0,65	163,66	Oui
Profil 0	37m	209223	91597	5,197104	50,13238	13-08-24	Carottage motorisé	160,31	2,44	158,07	158,11
Profil 0	44m	209226	91591	5,197145	50,132526	13-08-24	Carottage motorisé	160,53	2,21	158,32	158,25
Profil 0	49m	209232	91588	5,197228	50,132498	28-05-18	Carottage à la tarière	160,52	1,50	159,02	158,83
Profil 0	49,50m	209229	91586	5,197186	50,132481	13-08-24	Carottage motorisé	160,53	1,88	158,65	158,45
Profil 0	56m	209232	91586	5,197228	50,13248	13-08-24	Carottage motorisé	160,56	1,72	158,84	158,77
Profil 0	88m	209233	91556	5,197517	50,132208	28-05-18	Carottage à la tarière	160,67	0,10	160,57	160,56

Annexe 2 : Description des carottes sédimentaires

Carotte HSL-P1-13,40m 0-100 cm



Date de prélèvement : 09/09/2024

Longueur de l'échantillon prélevé : 96 cm



Description :

- Homogénéité parfaite
- Limoneux sur le haut et devient progressivement plus sableux au fur et à mesure qu'on descend
- Absence de charbon

Carotte HSL-P1-13,40m 100-200 cm



Date de prélèvement : 09/09/2024

Longueur de l'échantillon prélevé : 84 cm



Description :

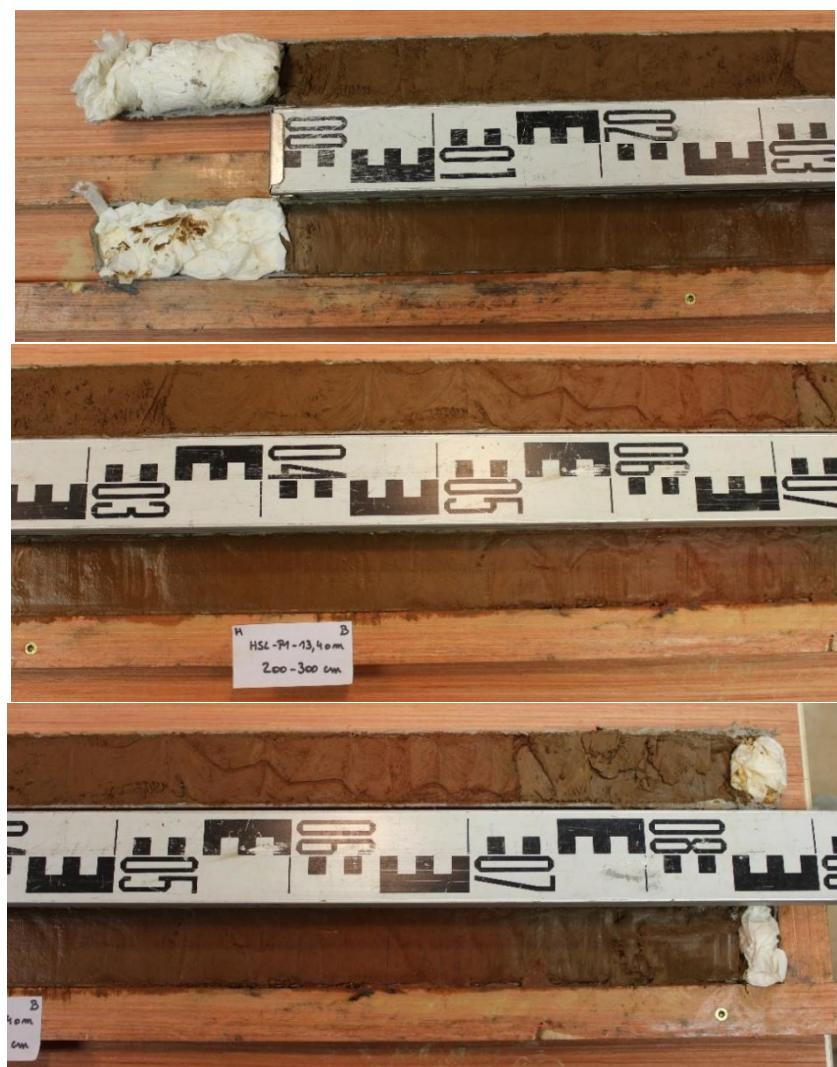
- Très homogène, pas de structure particulière. Aucun niveau sableux marqué.
- Limons
- Très peu de sable
- Très peu d'éléments grossiers
- Quelques microcharbons

Carotte HSL-P1-13,40m 200-300 cm



Date de prélèvement : 09/09/2024

Longueur de l'échantillon prélevé : 87 cm



Description :

- Limono-sableux
- Changement de couleur entre 55 et 74 cm. La teinte passe de brunâtre à légèrement plus rougeâtre.
- 0-55 cm : Classification de Munsell = 5YP 3/4 (dark reddish brown)
- 55-74 cm : Classification de Munsell = 2.5YR 3/6 (dark reddish brown)
- 74-87 cm : Classification de Munsell = 5YP 3/4 (dark reddish brown)

Carotte HSL-P1-13,40m 300-400 cm



Date de prélèvement : 09/09/2024

Longueur de l'échantillon prélevé : 1m



Description :

- Homogène
- Plus sableux que les carottes précédentes mais majoritairement limoneux
- Couleur – Classification de Munsell : 10YR ¾ (dark brown)
- Horizons tachetés noirs non visibles auparavant = taches de manganèse
- Contamination pas clairement identifiable. Peut-être les 5 premiers cm car pas de taches noires

Carotte HSL-P1-13,40m 400-500 cm



Date de prélèvement : 09/09/2024

Longueur de l'échantillon prélevé : 1m



Description :

- Couleur grisâtre – Classification de Munsell : 10YR 5/1 (gray)
- Quasiment pas de contamination. Les 8 premiers cm peuvent être une possible contamination ou bien une transition.
- Horizons tachetés noirs = manganèse
- Devient plus sableux vers la base
- 89 cm : trace noire = charbon
- 92 cm : horizon sableux

Carotte HSL-P1-13,40m 500-530 cm



Date de prélèvement : 09/09/2024

Longueur de l'échantillon prélevé : 42 cm



Description :

- 0-11 cm : Contamination visible
- 11-25 cm : Couleur – Classification de Munsell = 10YR 3/2 (olive black)
- 25-34 cm : On revient sur une couleur plus brunâtre.
Classification de Munsell = 7.5YR 4/4 (brown)
- 34-35 cm : Gravillons sableux
- 35-42 cm : Cailloutis avec gros éléments = diamètre du tube d'échantillonnage (\varnothing 45 mm)
Couleur – Classification de Munsell = 7.5YR 3/3 (dark brown)

Carotte HSL-P1-26,90m 0-100 cm



Date de prélèvement : 09/09/2024

Longueur de l'échantillon prélevé : 97 cm



Description :

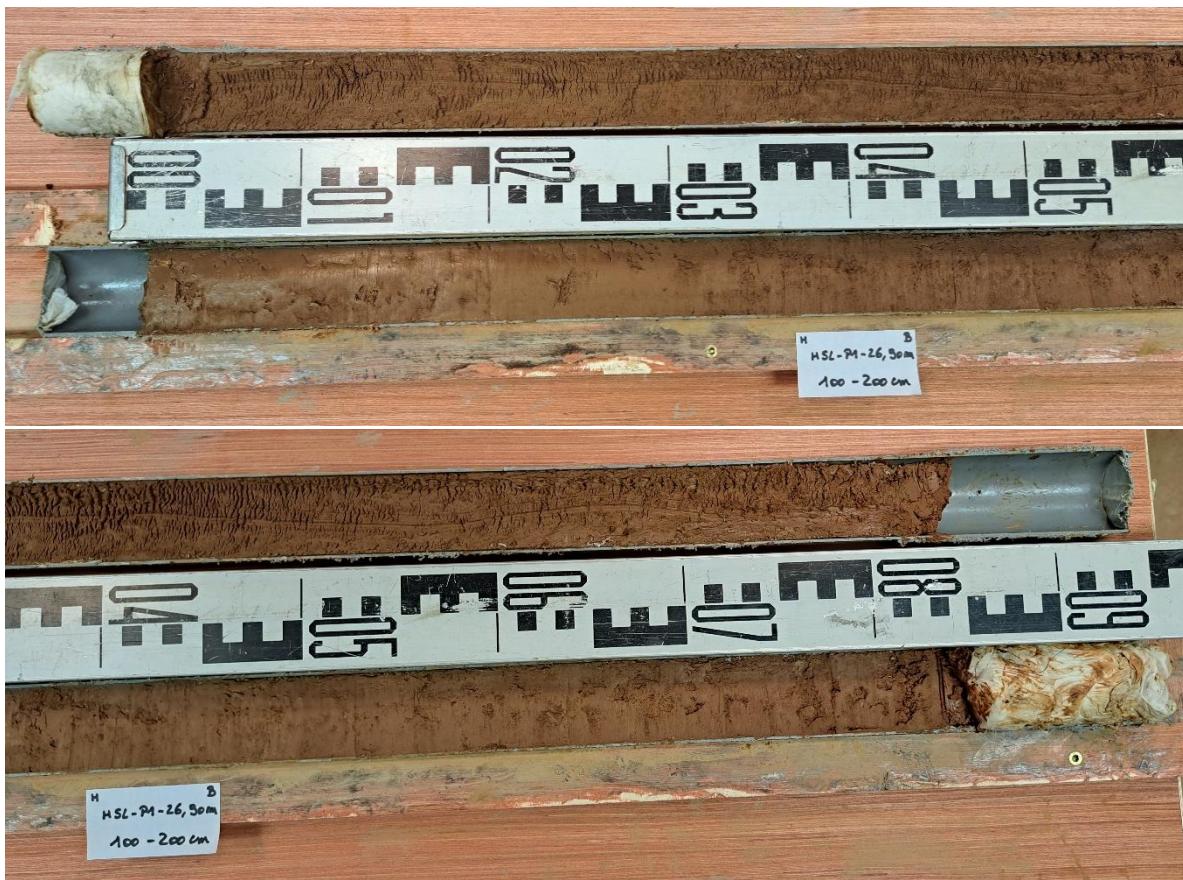
- Limon de crue
- Structure homogène
- 91 cm : Morceau de céramique rouge
- Couleur – Classification de Munsell : 5YR 4/4 (reddish brown)

Carotte HSL-P1-26,90m 100-200 cm



Date de prélèvement : 09/09/2024

Longueur de l'échantillon prélevé : 84 cm



Description :

- Limon de crue
- Structure homogène
- Pas de trace visible de contamination
- Couleur – Classification de Munsell : 5YR 4/6 (reddish brown)

Carotte HSL-P1-26,90m 200-300 cm



Date de prélèvement : 09/09/2024

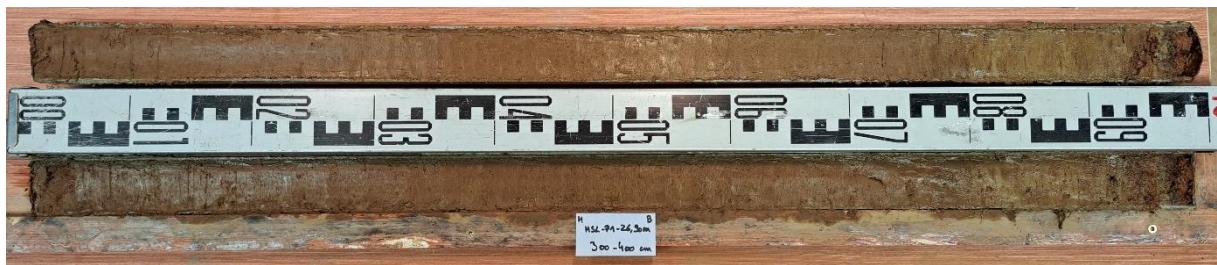
Longueur de l'échantillon prélevé : 95 cm



Description :

- Limon de crue très pauvre en argile
- Structure homogène
- Pas de trace visible de contamination
- À 11 cm et 77,5 cm : micro-charbon (dans la carotte a)
- Couleur – Classification de Munsell : 5YR 4/6 (reddish brown)

Carotte HSL-P1-26,90m 300-400 cm



Date de prélèvement : 09/09/2024

Longueur de l'échantillon prélevé : 100 cm



Description :

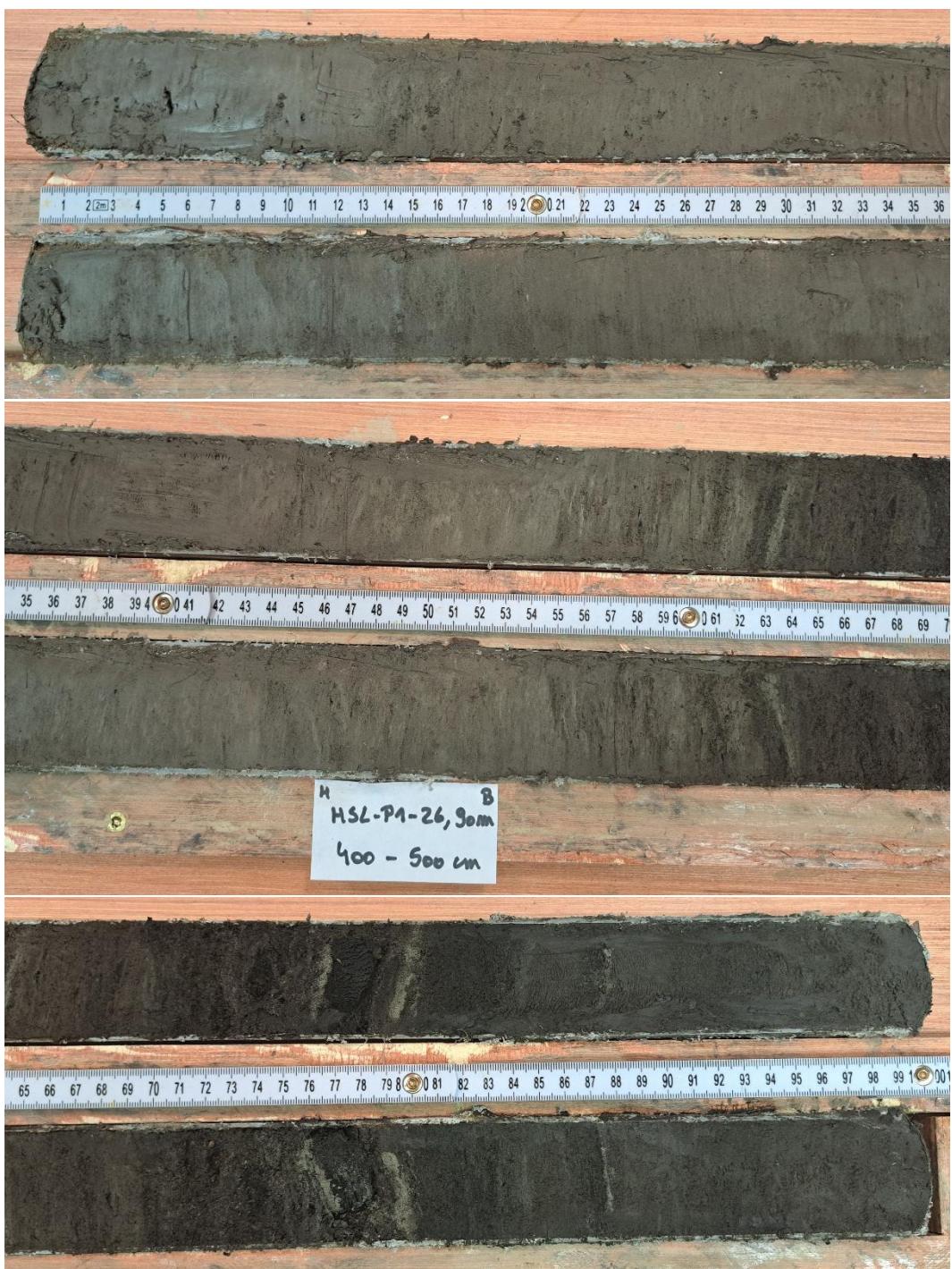
- 0-80 cm : Limon de crue argileux bruns avec petites taches probablement du manganèse
Aucune trace de contamination apparente
Couleur matrice – Classification de Munsell = 7.5YR 4/4 (brown)
- 80-94 cm : Limon de crue argileux plus clairs avec de nombreux petits charbons
À 93 cm, charbon prélevé
Couleur matrice – Classification de Munsell = 10YR 4/4 (brown)
- 94-100 cm : Niveau plus sableux avec concrétions de manganèse et de fer
Couleur matrice – Classification de Munsell = 5YR 3/6 (dark reddish brown)

Carotte HSL-P1-26,90m 400-500 cm



Date de prélèvement : 09/09/2024

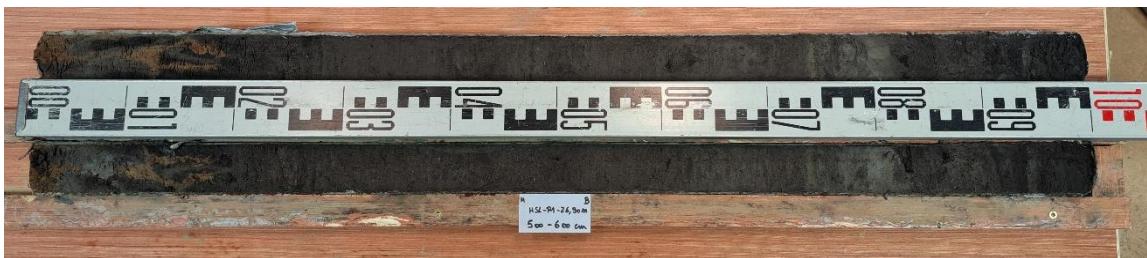
Longueur de l'échantillon prélevé : 100 cm



Description :

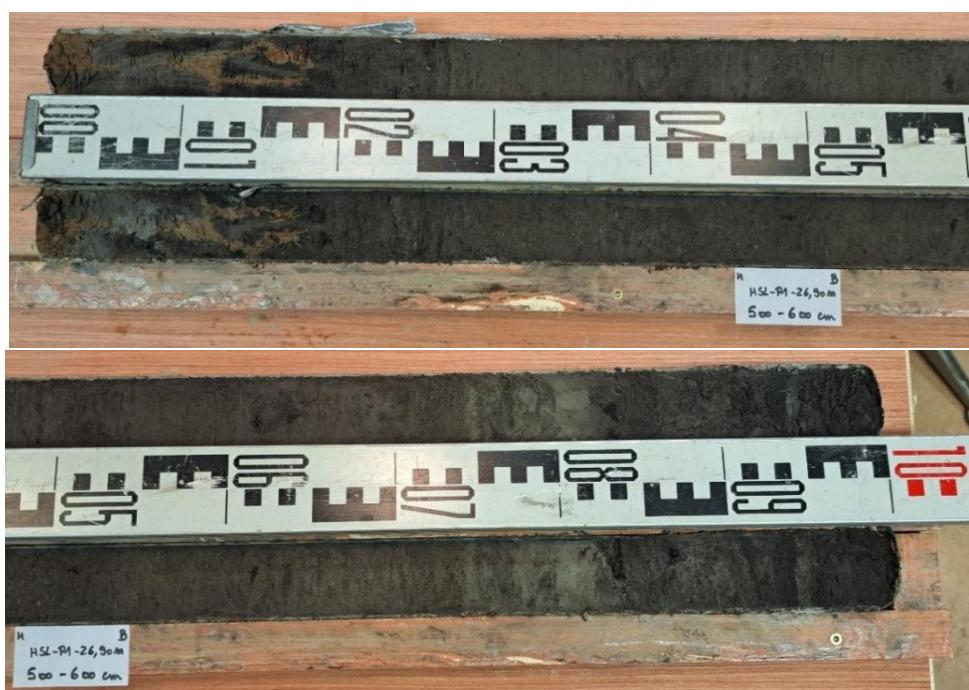
- 0-17 cm : Limon argileux très homogène avec taches claires qu'on ne retrouve pas aussi clairement ailleurs.
Couleur matrice – Classification de Munsell = 2.5Y 4/1 (yellowish gray)
Couleur taches – Classification de Munsell = 2.5Y 5/1 (yellowish gray)
- 0-61 cm : Limon argileux très homogène
Couleur – Classification de Munsell = 2.5Y 4/1 (yellowish gray)
- 61-61,3 cm : Taches de 3-4 mm de matière organique de type tourbe
- 61,3-62 cm : Limon argileux comme entre 0 et 61 cm
- 62-62,5 cm : Matière organique, tourbe de couleur brune
- 62,5-62,9 cm : Fine couche de sable fin de couleur grisâtre
Couleur – Classification de Munsell = 5Y 6/1 (gray)
- 62,9-69,5 cm : Tourbe de plus en plus organique vers la base avec des restes organiques très fins
Couleur – Classification de Munsell = 10YR 2/1 (black)
- 69,5-75,5 cm : Reste de matière organique plus grossier de quelques mm mais inférieurs à 1cm
- 75,5-79,5 cm : Sable et présence de macro restes organiques. Racines, branches ?
Couleur – Classification de Munsell = 5Y 6/1 (gray)
- 79,5-87,5 cm : Tourbe fine avec variation de couleur
- 87,5 cm : Couche de sable gris de 2mm
Couleur – Classification de Munsell = 5Y 6/1 (gray)
- 87,5-100 : Limons
Couleur – Classification de Munsell = 10YR 2/3 (brownish black)

Carotte HSL-P1-26,90m 500-600 cm



Date de prélèvement : 09/09/2024

Longueur de l'échantillon prélevé : 100 cm



Description :

- 0-20 cm : Contamination
- 20-27 cm : Couleur plus foncée ce qui indique un niveau plus organique
Couleur – Classification de Munsell = 10YR 2/3 (brownish black)
- 27-74 cm : Limon argileux organique avec quelques macro restes dont à 60,5cm une possible racine
- 74-75 cm : Lentille de sable
- 75-83 cm : Niveau argileux
- 87 cm : Macro restes
- 92-95 cm : Couche organique
- 95-96 cm : Couche de dépôts détritiques plus clairs
Couleur – Classification de Munsell = 10YR 2/1 (black)
- 96-100 : Niveau tourbeux

Hypothèse(s) :

- À 95-96 cm, ce niveau correspond à une accumulation de matière organique. Cela amène à l'hypothèse d'un méandre recoupé ou d'un paléo-chenal qui se rebouche lors de l'ouverture du gouffre de Belvaux.

Carotte HSL-P1-26,90m 500-600 cm



Date de prélèvement : 17/02/2025

Longueur de l'échantillon prélevé : 100 cm



Description :

- 0-21 cm : Contamination
- 21-46 cm : Limon de crue très organique
Couleur – Classification de Munsell = 10YR 2/1 (black)
- 46-71 cm : Limon de crue moins organique
À 51 cm, présence d'un fragment de bois (prélevé)
À 70 cm, prélèvement d'un fragment de matière organique
Couleur – Classification de Munsell = 10YR 3/1 (brownish black)
- 71-78 cm : Limon de crue très fin et plus clair
Couleur – Classification de Munsell = 10YR 4/1 (brownish gray)
- 78-85 cm : Limon de crue moins organique
Couleur – Classification de Munsell = 10YR 3/1 (brownish black)
- 85-95,5 cm : Limon de crue très fin et plus clair
Entre 90 et 93 cm, présence de cailloux
Couleur – Classification de Munsell = 10YR 4/1 (brownish gray)
- 95,5 cm : Contact cailloutis oblique (signe d'une érosion)
Couleur – Classification de Munsell = 10YR 3/4 (dark brown)

Carotte HSL-P1-26,90m 600-622 cm



Date de prélèvement : 17/02/2025

Longueur de l'échantillon prélevé : 51 cm



Description :

- 0-30,5 cm : Contamination
- 30,5-51 cm : Cailloutis couleur ocre oxydé
Couleur – Classification de Munsell = 10YR 5/6 (yellowish brown)

Carotte HSL-P1-42m 0-100 cm



Date de prélèvement : 17/02/2025

Longueur de l'échantillon prélevé : 92 cm



Description :

- Limon brunâtre homogène
Couleur – Classification de Munsell = 7.5YR 4/3 (brown)

Carotte HSL-P1-42m 100-200 cm



Date de prélèvement : 17/02/2025

Longueur de l'échantillon prélevé : 79,5 cm



Description :

- Pas de trace de contamination
 - Limon brunâtre homogène
- Couleur – Classification de Munsell = 7.5YR 4/3 (brown)
- À 56cm et à 62,5 cm, présence de charbon (carotte a)

Carotte HSL-P1-42m 200-300 cm



Date de prélèvement : 17/02/2025

Longueur de l'échantillon prélevé : 93,5 cm



Description :

- Pas de trace de contamination
- Limon brunâtre homogène
Couleur – Classification de Munsell = 7.5YR 4/3 (brown)
- 59,5-62 cm : Elément grossier dans matrice fine = Silex (non taillé)



Carotte HSL-P1-42m 300-400 cm



Date de prélèvement : 17/02/2025

Longueur de l'échantillon prélevé : 97,5 cm



Description :

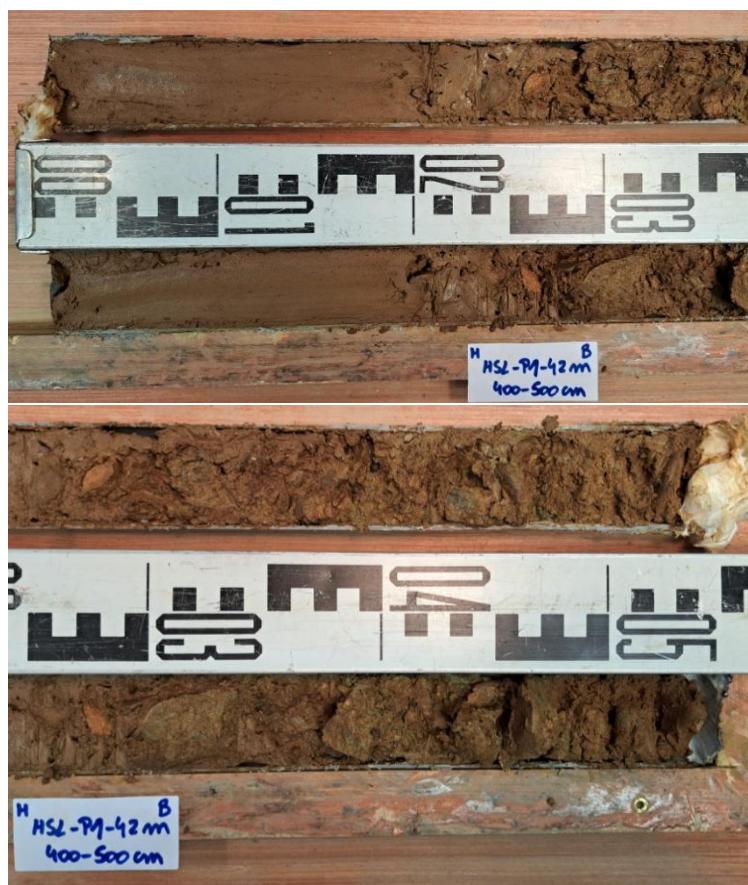
- Pas de trace de contamination
- Limon brunâtre homogène
Couleur – Classification de Munsell = 7.5YR 4/3 (brown)
- 60-63 cm : Tache plus claire
Couleur – Classification de Munsell = 10YR 5/4 (dull yellowish brown)

Carotte HSL-P1-42m 400-500 cm



Date de prélèvement : 17/02/2025

Longueur de l'échantillon prélevé : 54,5 cm



Description :

- 0-20 cm : Limon brunâtre homogène
Couleur – Classification de Munsell = 7.5YR 4/3 (brown)
- 20-23,5 cm : Cailloux épars dans matrice limoneuse
Couleur – Classification de Munsell = 7.5YR 4/3 (brown)
- 23,5-27,5 cm : Transition, augmentation du nombre de cailloux
- 27,5 cm : Contact cailloutis
- 27,5-54,5 cm : Cailloutis, éléments roulés principalement

Carotte BEL-P0-37m 0-100 cm



Date de prélèvement : 13/08/2024

Longueur de l'échantillon prélevé : 81 cm



Description :

- 0-8 cm : Sol brun humifère
Couleur - Classification de Munsell : 10YR 3/3 (dark brown)
- En dessous du sol brun humifère, directement dans le gley avec taches de rouille.
- 8-18 cm : Limon argileux
Couleur matrice - Classification de Munsell : 10YR 4/3 (dull yellowish brown)
Couleur taches - Classification de Munsell : 10YR 5/6 (yellowish brown)
- 18-30 cm : Dépôt tourbeux
Couleur - Classification de Munsell : 10YR 2/1 (black)
- 30-68 cm : Limon très fin argileux.
Présence petit gravier (4-5 mm d'axe b) à 41 cm.
Couleur matrice - Classification de Munsell : 10YR 4/3 (dull yellowish brown)
Couleur taches - Classification de Munsell : 10YR 5/6 (yellowish brown)
- 68-77 cm : Couche continue en étant plus organique.
Couleur - Classification de Munsell : 10YR 3/3 (dark brown)
- 77-81 cm : Racine, matière organique

Carotte BEL-P0-37m 100-200 cm



Date de prélèvement : 13/08/2024

Longueur de l'échantillon prélevé : 71 cm



Description :

- 0-6 cm : Contamination – Principalement dépôt tourbeux
- 6-24,5 cm : Limon argileux fin.
À 22,5 cm présence d'un petit gravier
Couleur matrice - Classification de Munsell : 10YR 4/3 (dull yellowish brown)
Couleur taches - Classification de Munsell : 10YR 5/6 (yellowish brown)
- 21,5-24,5 cm : Légère transition vers le cailloutis. Graviers dispersés.
- 24,5 cm: Contact cailloutis.
- 24,5-71 cm : Gravier avec plusieurs calcaires cassés par le carottier, galets roulés, matrice fine.

Carotte BEL-P0-37m 200-244 cm



Date de prélèvement : 13/08/2024

Longueur de l'échantillon prélevé : 43 cm



Description :

- 0-12,5 cm : Contamination
- 12,5-25 cm : Petits galets émoussés. Très peu de matrice fine
- 25-43 cm : Très gros éléments avec matrice fine

Carotte BEL-P0-44m 0-100 cm



Date de prélèvement : 13/08/2024

Longueur de l'échantillon prélevé : 87 cm



Description :

- 0-4,5 cm : Racines + limon organique brun
- 4,5-25,5 cm : Limon organique
- 25,5-87 cm : Limon argileux. Gley avec taches oranges
Couleur – Classification de Munsell : 10YR 5/3 (dall yellowish brown) et 10YR 5/8 (yellowish brown)

Hypothèse(s) :

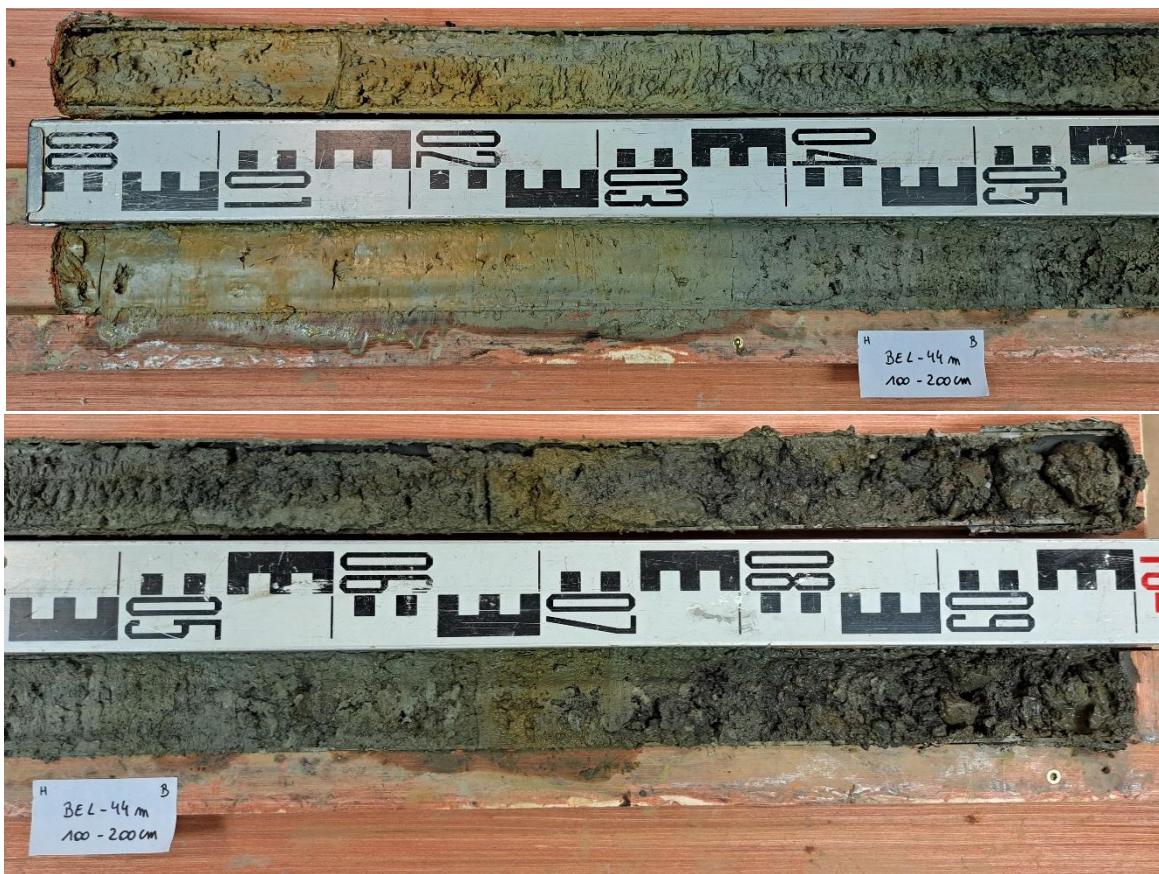
- Les 25 premiers centimètres correspondraient à la hauteur de labour réalisé au cours du Moyen-Âge.

Carotte BEL-P0-44m 100-200 cm



Date de prélèvement : 13/08/2024

Longueur de l'échantillon prélevé : 100 cm



Description :

- 0-38 cm : Limon argileux (suite de la carotte précédente)
Couleur – Classification de Munsell : 10YR 5/3 (dall yellowish brown) et 10YR 5/8 (yellowish brown)
- 38-48 cm : Changement de couleur.
Couleur - Classification de Munsell : 5GY 4/1 (dark olive gray)
Limon gley argileux
- 48-73 cm : Sédiment avec sable et gravillons de taille millimétrique + limon argileux
Couleur - Classification de Munsell : 7.5Y 4/3 (dark olive)
- 73 cm : Contact avec graviers centimétriques + présence de matière organique dans la matrice
Couleur - Classification de Munsell : 7.5 Y 3/2 (olive black)
- 100 cm : Gros bouchon (= gros gravier) de 3 cm d'axe b

Carotte BEL-P0-44m 200-221 cm



Date de prélèvement : 13/08/2024

Longueur de l'échantillon prélevé : 52 cm



Description :

- 0-28 cm : Contamination
- 28-45 cm : Graviers centimétriques
Couleur - Classification de Munsell : 7.5Y 4/2 (grayish olive)
À 41,5 cm, présence d'un morceau de matière organique (carotte a)
- 45-52 cm : Cailloutis centimétrique avec matrice centimétrique.
Couleur - Classification de Munsell : 2.5Y 4/6 (olive brown)

Carotte BEL-P0-49,50m 0-100 cm



Date de prélèvement : 13/08/2024

Longueur de l'échantillon prélevé : 76 cm



Description :

- 0-6 cm : Sol brun humifère
Couleur - Classification de Munsell : 10YR 3/3 (dark brown)
- 6-8 cm : Limon argileux
Couleur - Classification de Munsell : 10YR 4/3 (dull yellowish brown)
- 8-15 cm : Limon argileux organique
Couleur - Classification de Munsell : 10YR 2/3 (brownish black)
- 15-27 cm : Limon argileux.
Présence de graviers dont un de 1cm d'axe b à 26 cm.
Couleur - Classification de Munsell : 10YR 4/3 (dull yellowish brown)

- 27-40 cm : Tourbe et limon organique avec macro restes de végétaux et cailloux d'1 cm d'axe b à 37 et 40 cm.
Couleur - Classification de Munsell : 10YR 2/3 (brownish black)
- 40-54 cm : Limon argileux
Couleur - Classification de Munsell : 10YR 4/3 (dull yellowish brown)
- 54-61 cm : Deux gros galets dont un de 5 cm d'axe b.
Couleur - Classification de Munsell : 10YR 3/1 (brownish black)
- 61-68,5 cm : Limon argileux organique très compacte.
Présence de racine et de macro restes de marceau de bois entre 67 et 68,5 cm.
- 68,5-76 cm : Limon argileux et présence de racine. Entre 74-76 cm, galet de 2 cm d'axe b.
Couleur - Classification de Munsell : 10YR 3/1 (brownish black)

Hypothèse(s) :

L'alternance des couches plus ou moins organiques et la présence de cailloux dispersé à différentes profondeurs peut appuyer l'hypothèse qu'on est dans une zone marécageuse à décantation lente.

Carotte BEL-P0-49,50m 100-188 cm



Date de prélèvement : 13/08/2024

Longueur de l'échantillon prélevé : 76 cm



Description :

- 0-3 cm : Contamination
- 3-48,5 cm : Limon argileux.
Présence de racines verticales de couleur noire entre 20 et 41 cm.
Gravier de 5 mm d'axe b à 25,5 cm.
- 48,5-63 cm : Présence de plusieurs graviers de 5 mm à 1 cm d'axe b dans une matrice argileuse.
- 63-65,5 cm : Gros cailloux cassé
- 65,5-68 cm : Limon argileux de couleur gley avec matière organique.
Couleur - Classification de Munsell : 5Y 4/2 (grayish olive)
- 68-73 cm : Deux gros galets dont un rond de 5 cm d'axe b. Limon organique autour.
Couleur - Classification de Munsell : 5Y 2/1 (black)
- 73-75 cm : Limon organique avec un sable très fin de couleur jaune-ocre entre 74 et 75 cm.
Couleur - Classification de Munsell : 10YR 5/6 (yellowish brown)

Carotte BEL-P0-56m 0-100 cm



Date de prélèvement : 13/08/2024

Longueur de l'échantillon prélevé : 93 cm



Description :

- 0-20 cm : Sol brun humifère
Couleur - Classification de Munsell : 10YR 3/3 (dark brown)
- 30-53 cm : Limon argileux avec taches de manganèse
Couleur - Classification de Munsell : 10YR 4/4 (brown)
- 53-59 cm : Concrétions brunes de manganèse avec granules
- 60-93 cm : Présence de taches brunes et ocres (fer et manganèse)
Couleur - Classification de Munsell : 10YR 4/4 (brown)
- Sur toute la carotte, présence de limon argileux avec présence faible de sable et petits gravillons dispersés.
- Galets visibles > 1cm d'axe b à 10cm, 20cm, 27cm, 51cm, 57cm, 66cm, 79cm, 82cm, 92cm. Ils sont tous émoussés sauf à 82 et 92 cm qui sont très certainement des éclats.

Hypothèse(s) :

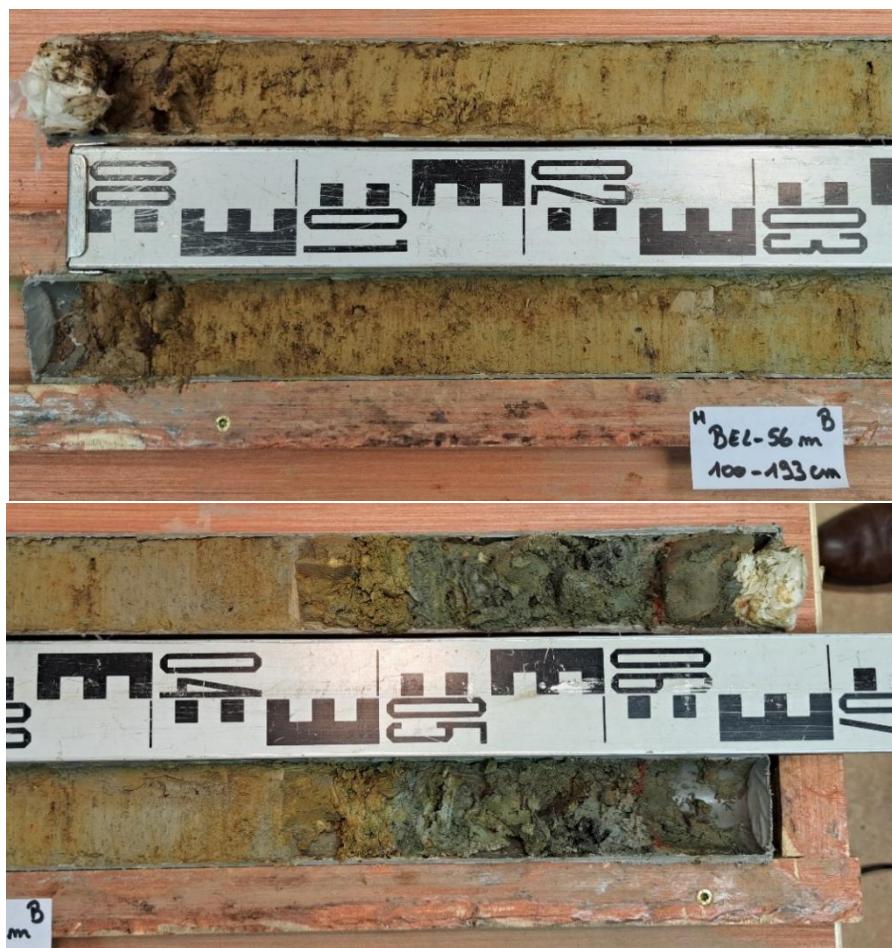
- La présence de galets est très probablement un signe que le gouffre n'était pas actif.
- Au-dessus de 30cm, trace du labour ce qui traduit un remaniement anthropique par la culture. En Famenne, la culture sur butte était pratiquée (lien avec profil topographique du site).

Carotte BEL-56m 100-193 cm



Date de prélèvement : 13/08/2024

Longueur de l'échantillon prélevé : 67 cm



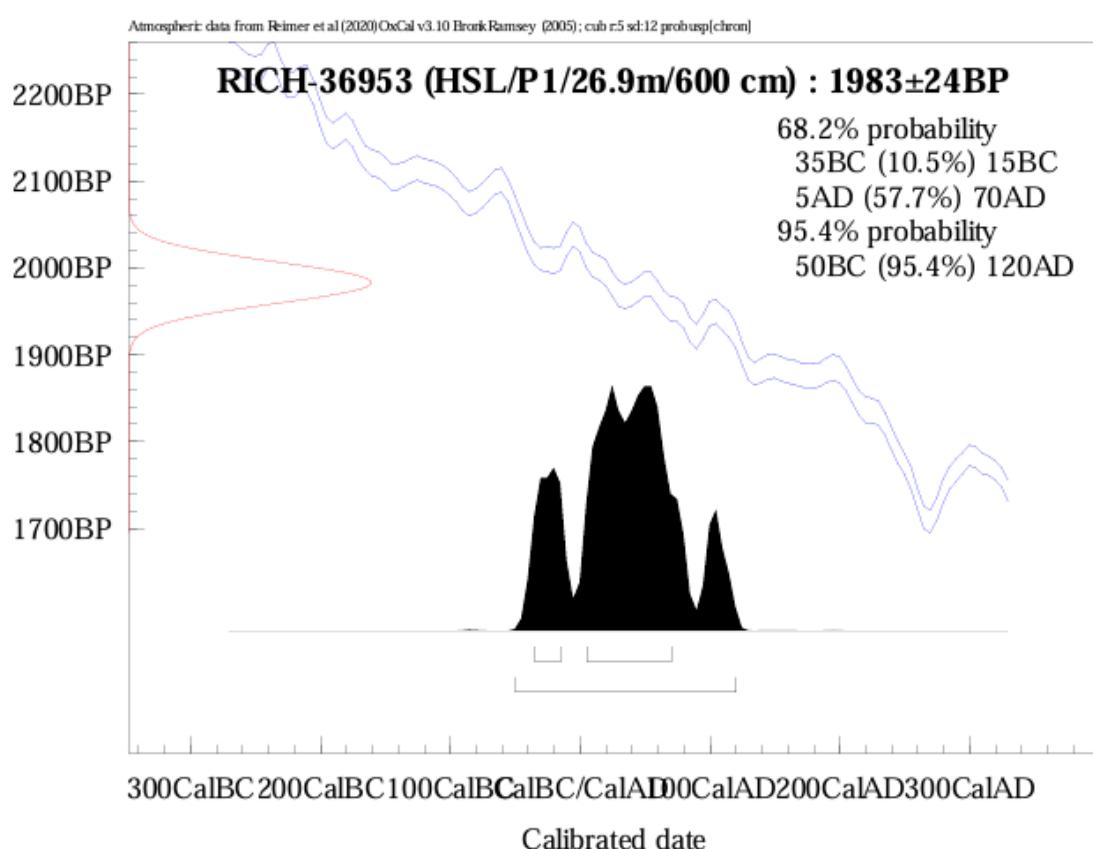
Description :

- 0-3 cm : Contamination – Présence d'herbes et compaction moins importante
- 3-42 cm : Limon argileux ocre avec taches de manganèse. De plus en plus gris vers la base.
Couleur - Classification de Munsell : 10YR 4/4 (brown)
- 42-47 cm : Niveau sableux de sable fin.
Couleur matrice - Classification de Munsell : 2.5Y 5/4 (yellowish brown)
Couleur taches - Classification de Munsell : 2.5Y 5/6 (yellowish brown)

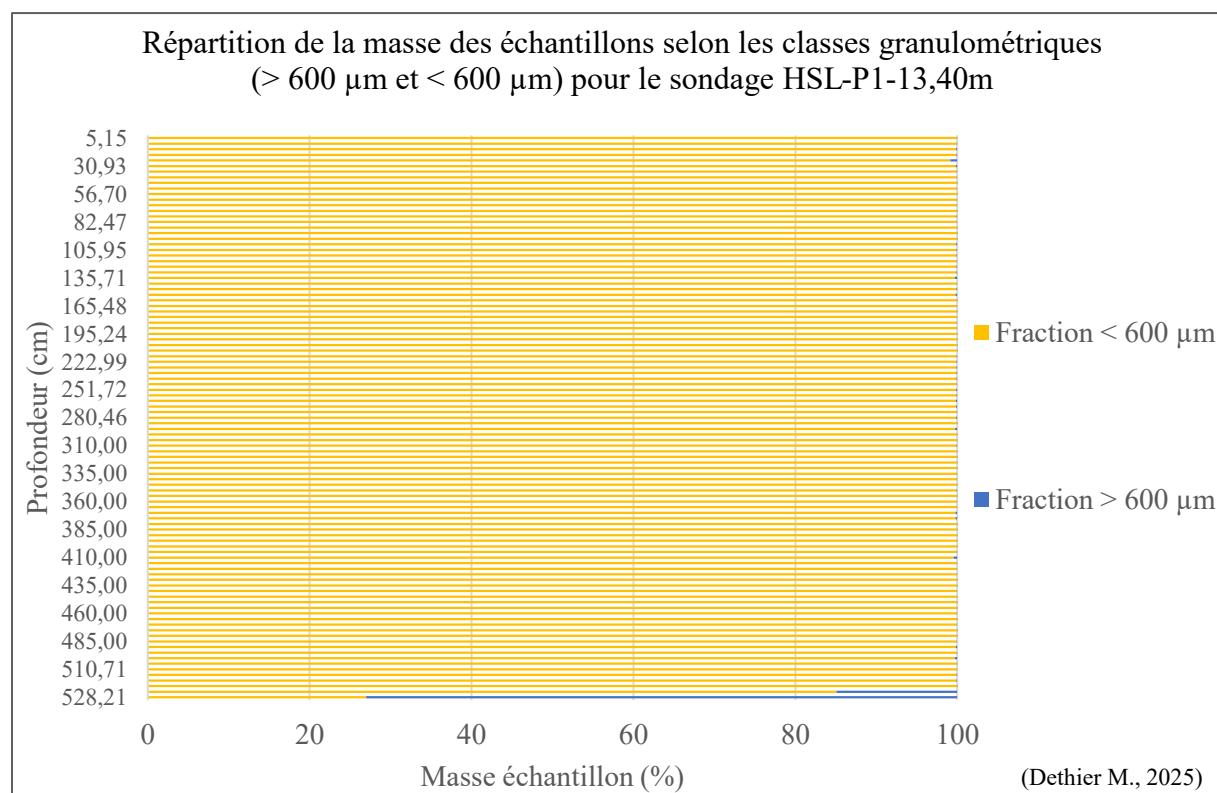
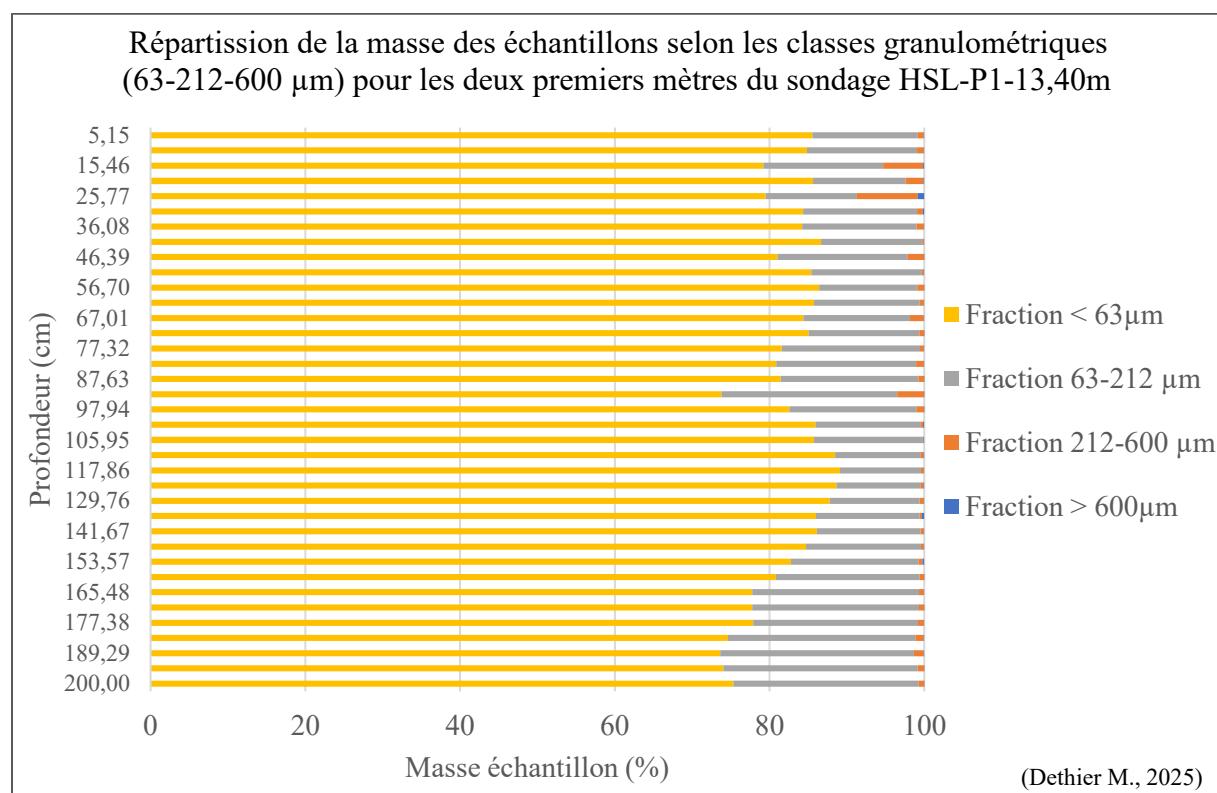
- 47-52 cm : Graviers grossiers
- 52-54 cm : Début couleur gley
Couleur - Classification de Munsell :5Y 4/1 (gray)
Limon argilo-sableux sans graviers
- 54-61,5 cm : Graviers
- 60-61 cm : Présence de matière organique (Potentielle datation C₁₄)
- 61,5-64 cm : Couche d'éléments fins
- 64-67 cm : Gros galet d'axe b supérieur à 5cm (mis de travers dans le tube d'échantillonnage)

Annexe 3 : Résultat de la datation radiocarbone (¹⁴C) de l'échantillon HSL-P1-26,90m_600cm (RICH-36953)

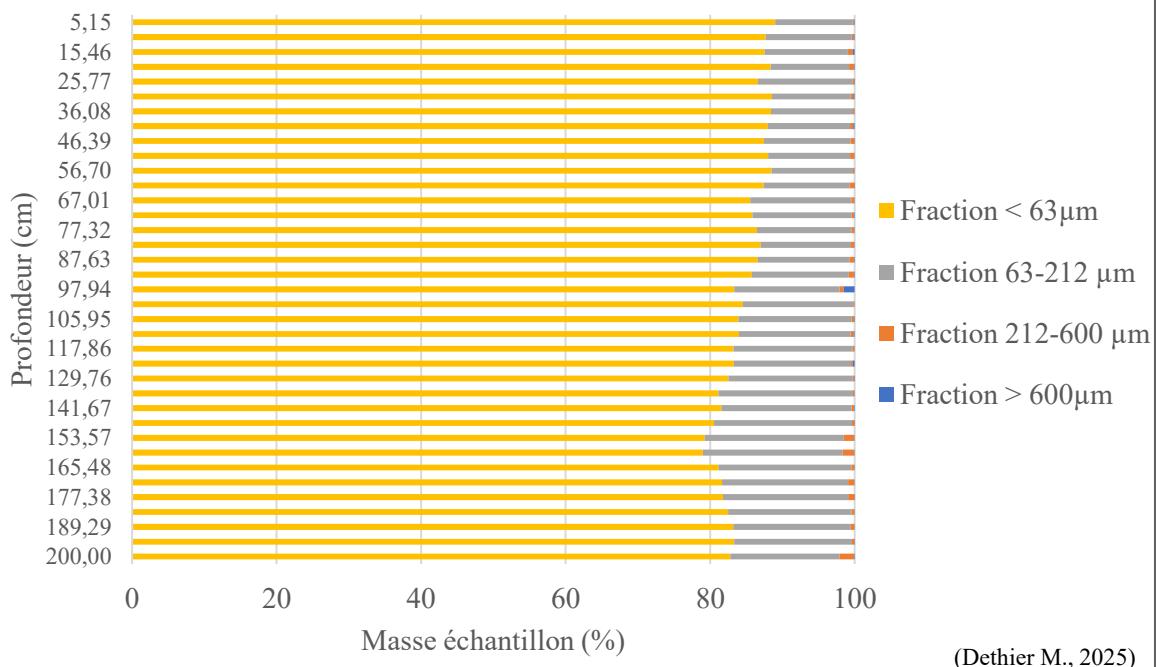
RADIOCARBON DATING REPORT



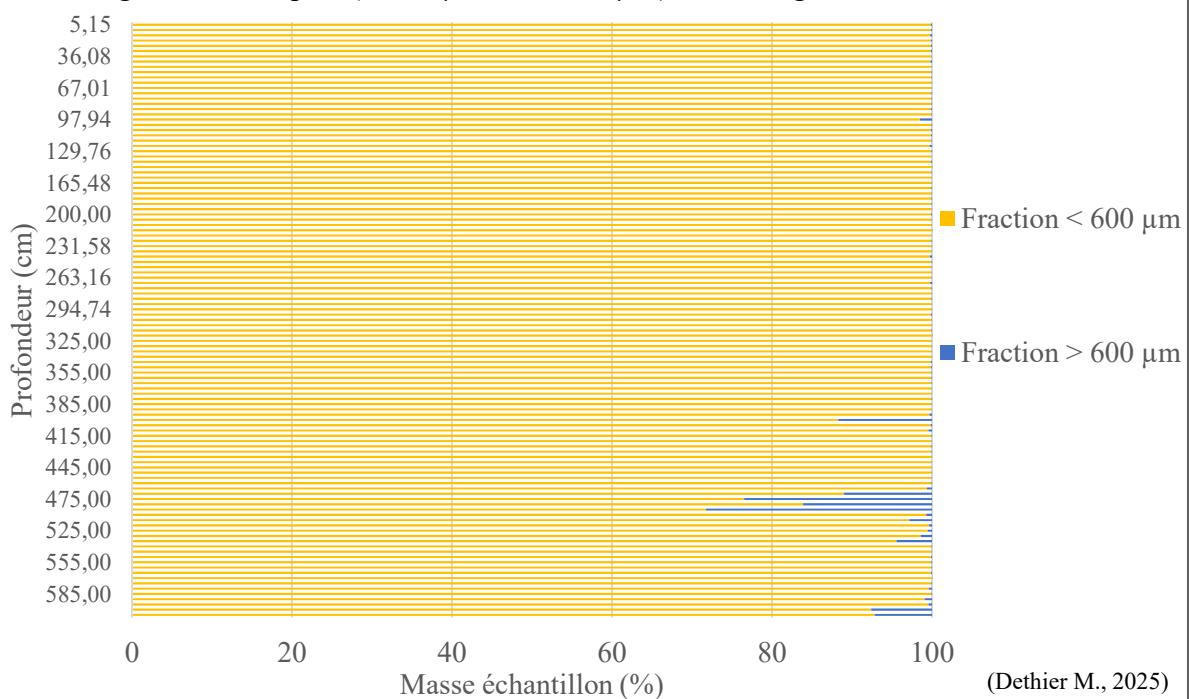
Annexe 4 : Répartition de la masses (en %) des échantillons selon les classes granulométriques

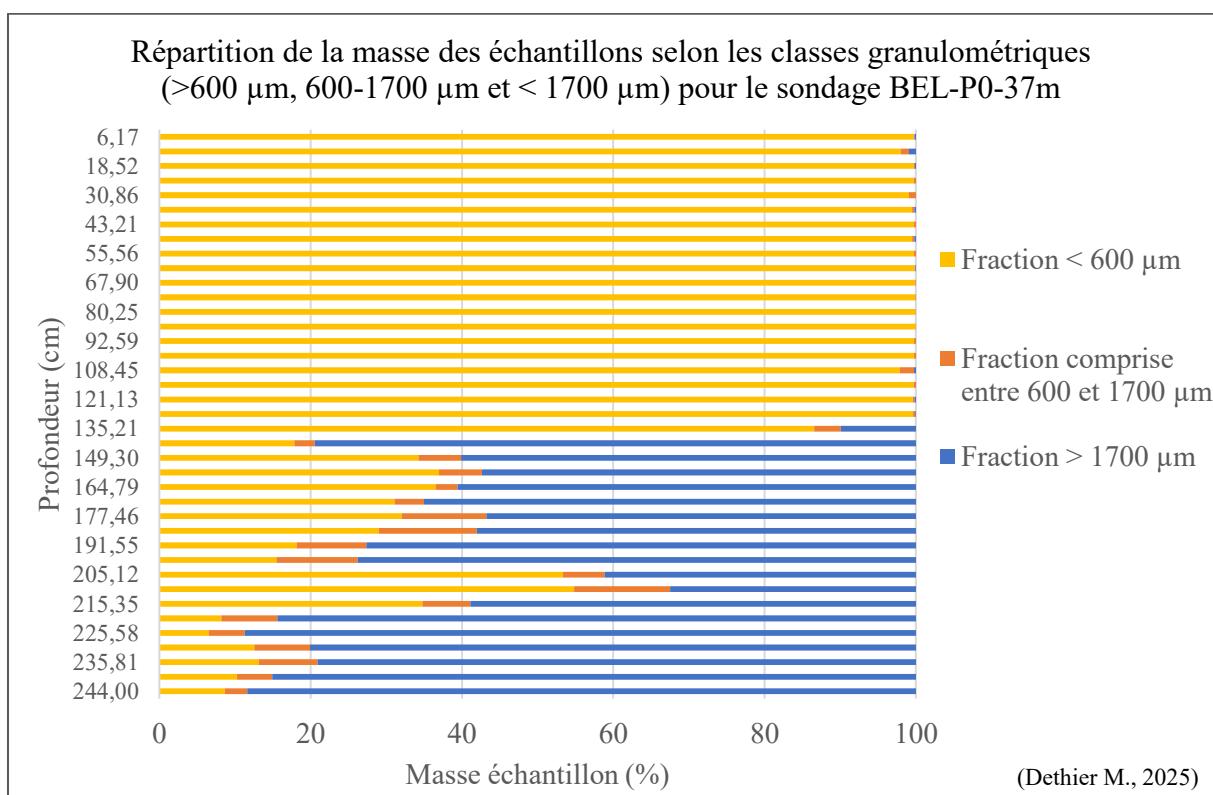
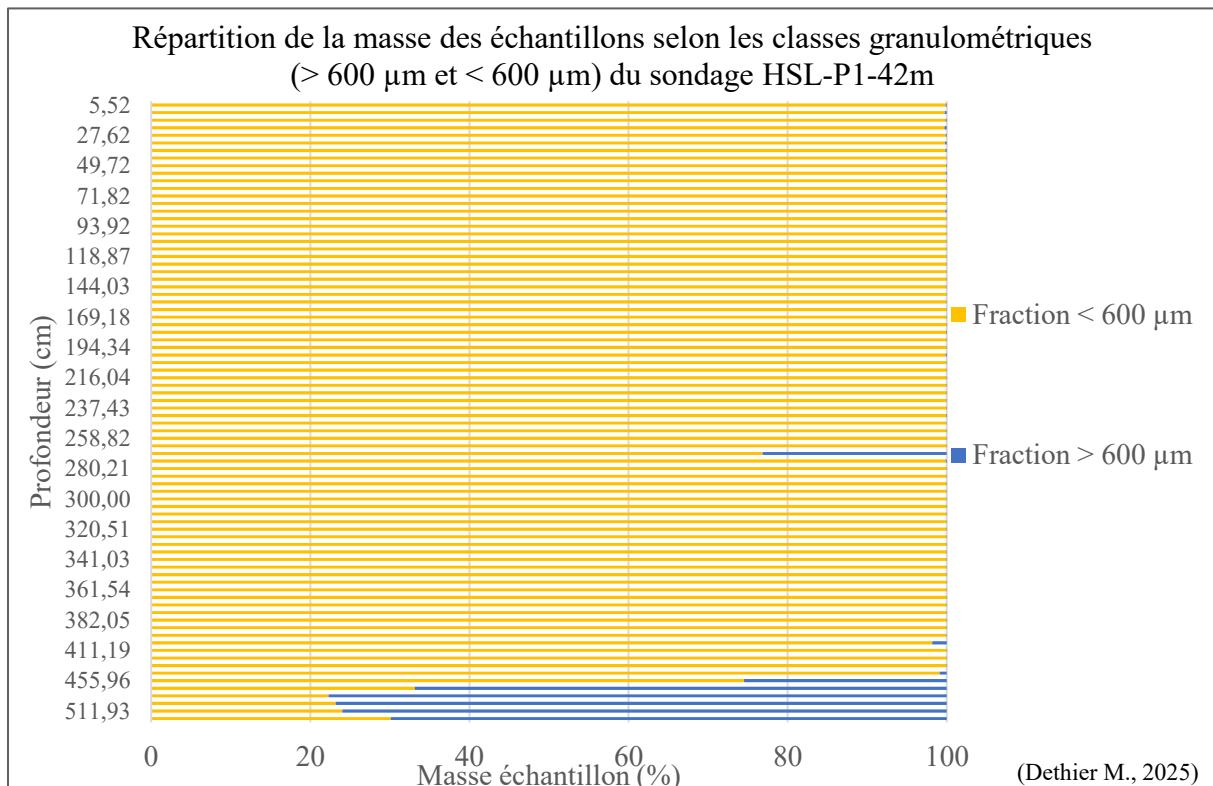


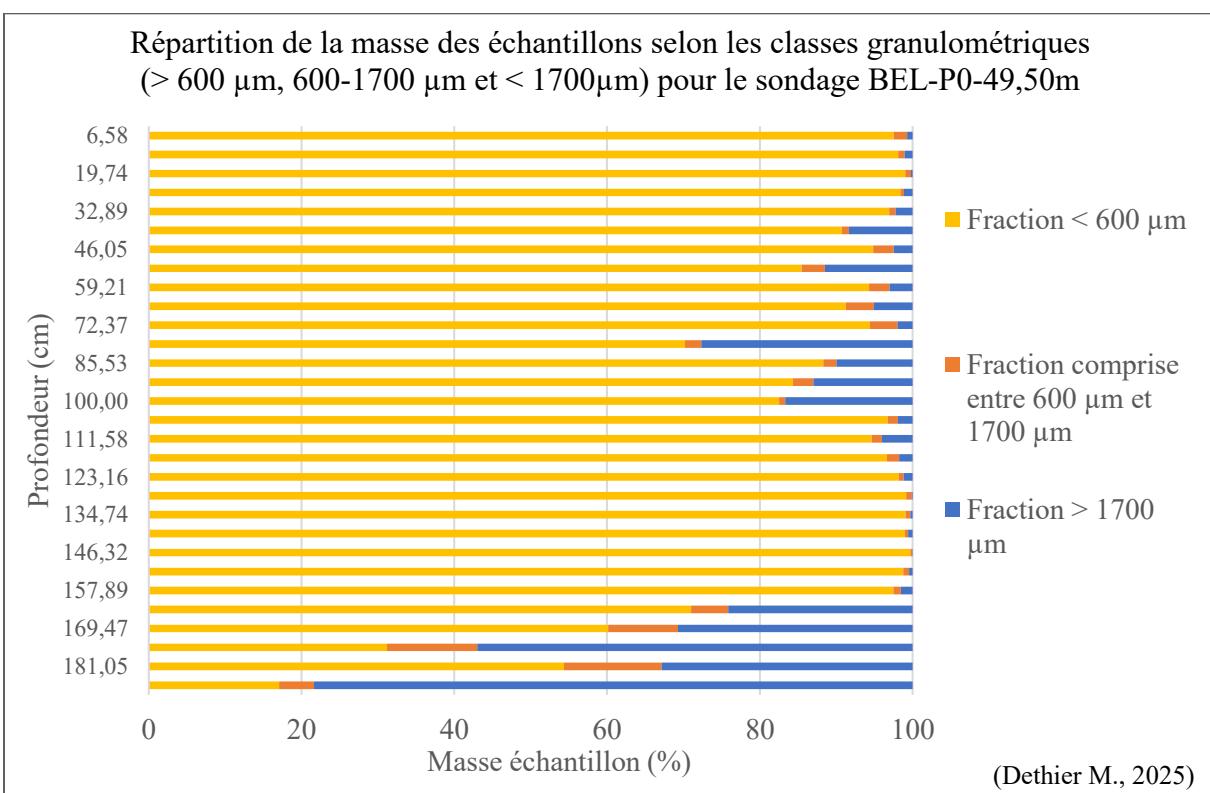
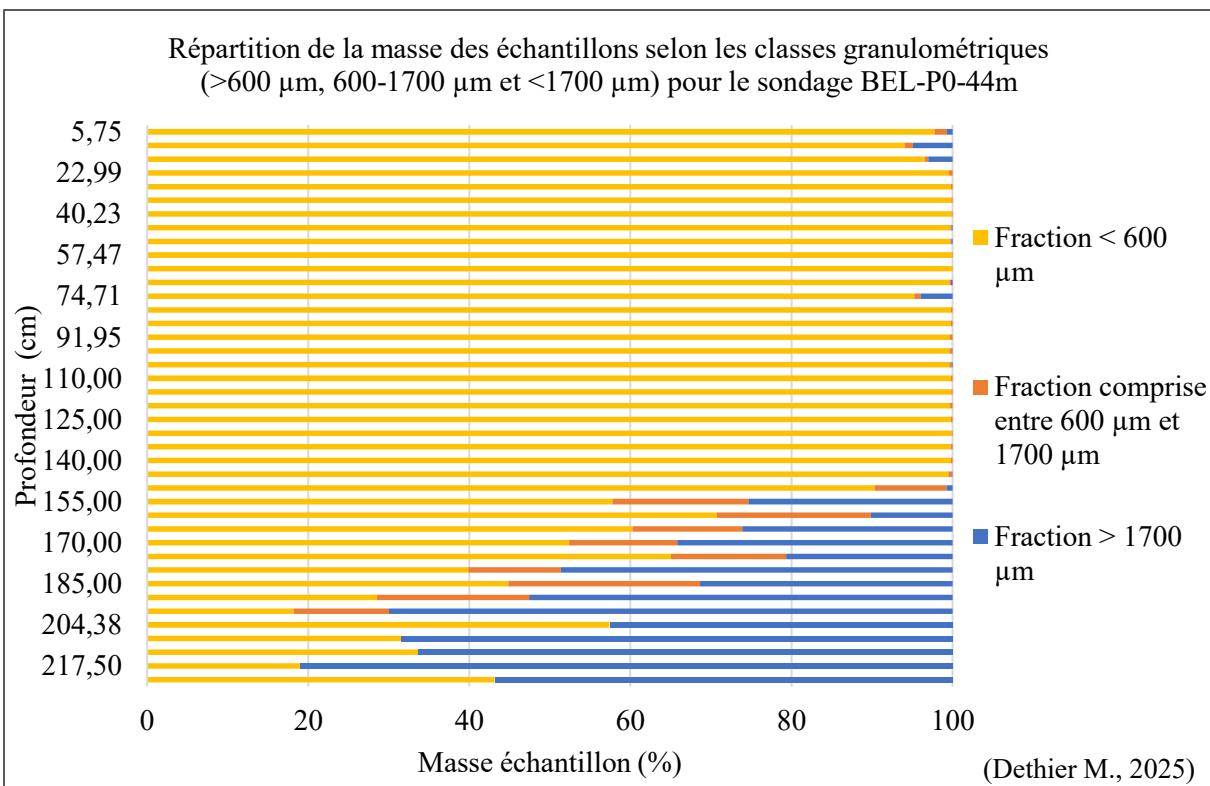
Répartition de la masse des échantillons selon les classes granulométriques (63-212-600 µm) pour les deux premiers mètres du sondage HSL-P1-26,90m



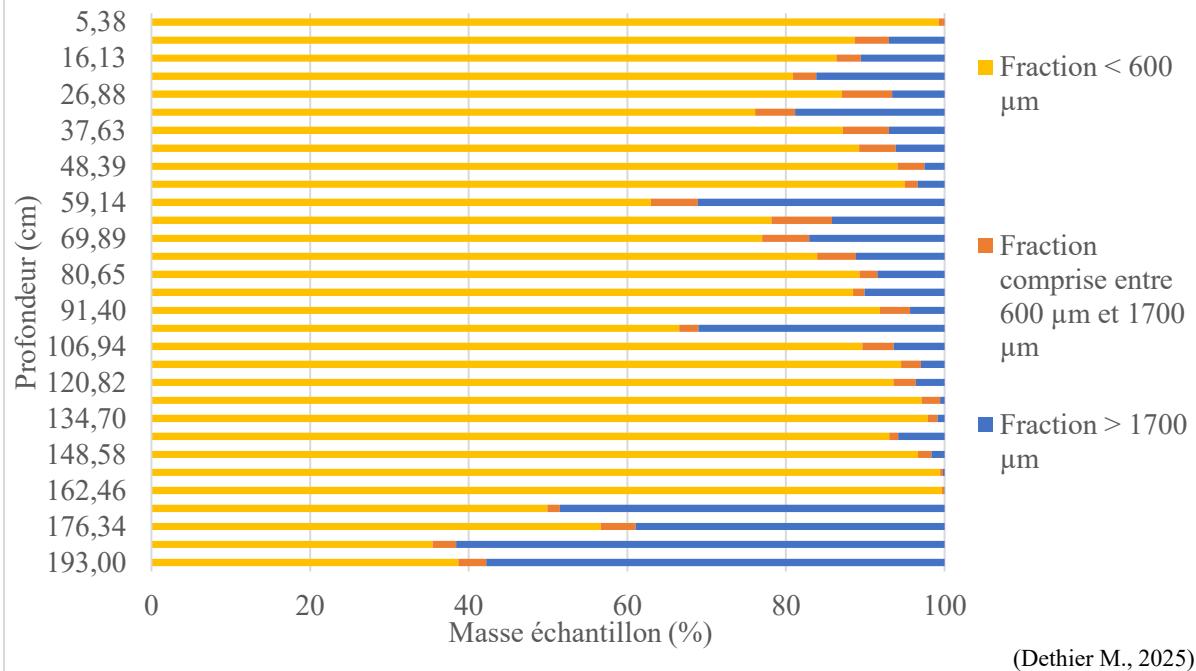
Répartition de la masse des échantillons selon les classes granulométriques (> 600 µm ou < 600 µm) du sondage HSL-P1-26,90m



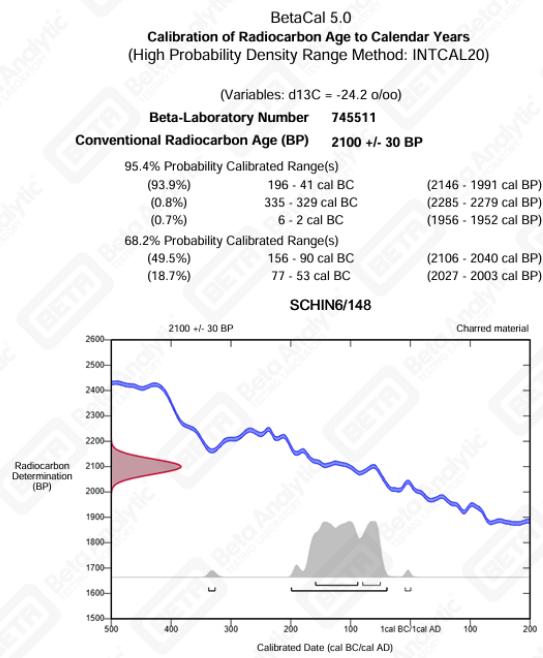




Répartition de la masse des échantillons selon les classes granulométriques ($> 600 \mu\text{m}$, $600-1700 \mu\text{m}$ et $< 1700 \mu\text{m}$) pour le sondage BEL-P0-56m



Annexe 5 : Résultat de la datation radiocarbone (^{14}C) de l'échantillon BEL-49,50m_165-170 (Beta-745512)



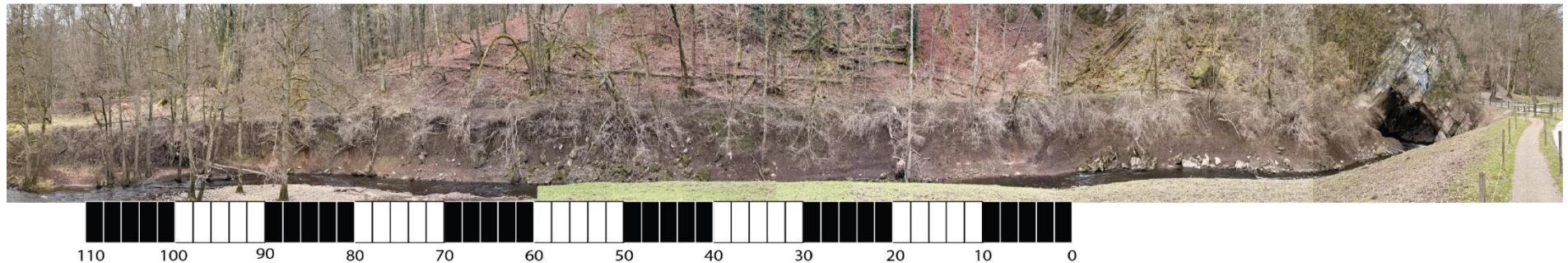
Database Used
 INTCAL20
 References
 References to Probability Method
 Bronk Ramsey, C. (2009). Bayesian analysis of radiocarbon dates. Radiocarbon, 51(1), 337-360.
 References to Database INTCAL20

Annexe 6 : Photos du nettoyage du gouffre de Belvaux

(Durupt, 2019 ; Domaine de Grottes de Han, 2020)



Annexe 7 : Photo de la Coupe 1 – Rive gauche amont du gouffre de Belvaux



Annexe 8 : Photo de la Coupe 2 – Rive gauche basse terrasse aval secteur des Rapides de la Lesse



