



HAL
open science

Rôle des espèces ingénieures dans la restauration des habitats de la Sélune

Anne-Julia Rollet, Emilien Lasne, Simon Dufour, Paul Vrchofsky

► **To cite this version:**

Anne-Julia Rollet, Emilien Lasne, Simon Dufour, Paul Vrchofsky. Rôle des espèces ingénieures dans la restauration des habitats de la Sélune. Rennes 2; INRAE. 2023. hal-04649469

HAL Id: hal-04649469

<https://hal.inrae.fr/hal-04649469v1>

Submitted on 16 Jul 2024

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

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

Rôle des espèces ingénieures dans la restauration des habitats de la Sélune



Coordinateur(s) :

Anne-Julia ROLLET (UMR LETG, Université Rennes 2) ; Emilien LASNE (UMR DECOD, INRAE)

Participants :

Simon DUFOUR (UMR LETG, Univ. Rennes 2)

Paul VRCHOVSKY (Doctorant, UMR LETG, Univ. Rennes 2) : 03/10/2019-03/10/202



Financement : Agence de l'Eau Seine Normandie

Dates de début et fin du projet : 01/10/2019 au 31/12/2022



Table des matières

Préambule	4
1. Contexte et objectifs.....	5
1.1 Contexte et enjeux scientifiques.....	5
1.2 Objectifs	6
2. Méthodologie	7
2.1 Stratégie générale et choix des sites d'étude	7
2.2 Mesure de la mobilité sédimentaire.....	10
2.2.1 Modalité d'injection échelle tronçon	12
2.2.2 Modalités d'injection échelle frayère.....	13
2.2.3 Méthode de prospection et localisation	14
2.2.4 Marge d'erreur	15
2.3 Mesure de l'évolution de la micro-topographie du lit.....	15
2.3.1 Méthode d'acquisition.....	15
2.3.2 Méthode de traitement et marge d'erreur	16
2.4 Mesure des modifications granulométriques.....	18
2.5 Données hydrologiques	18
3. Résultats.....	19
3.1 Analyse de la mobilité sédimentaire.....	19
3.1.1 A l'échelle du tronçon (site du Bois d'Ardenne)	19
3.1.2 A l'échelle des frayères.....	22
3.2 Évolution de la micro-topographie du lit.....	23
3.2.1 A l'échelle du tronçon (Bois d'Ardenne)	23
3.2.2 A l'échelle des frayères (site de Bois d'Ardenne et de Bateau)	25
3.3 Effet de l'activité des lamproies sur la granulométrie du lit.....	31
4. Discussion et conclusions	32
4.1 Effets directs de la lamproie pendant la période de reproduction	32
4.1.1 Mobilité sédimentaire (taux de mobilité, distance).....	32
4.1.2 Morphologie du lit.....	35
4.1.3 Granulométrie	35

Rôle des espèces ingénieures

4.2	Effets indirects liés la présence des nids.....	36
4.2.1	Mobilité des sédiments (taux de mobilité, distance)	36
4.2.2	Récurrence des lamproies (rétroaction positive).....	38
4.3	Contribution des lamproies à la dynamique morpho-sédimentaire	39
4.4	Limites méthodologiques.....	40
5.	Conclusions et appui aux politiques publiques	41
6.	Table des illustrations	44
7.	Bibliographie.....	47

Préambule

En 2018, les chercheurs de la communauté scientifique travaillant dans le bassin versant de la Sélune ou souhaitant y travailler ont été invités à proposer des sujets de recherche ayant pour but d'analyser les processus de restauration écologiques en jeu. Les approches pluridisciplinaires ont été alors très fortement encouragées. C'est dans ce contexte que le présent projet, à la croisée de la géographie (AJR) et de l'écologie (EL), a vu le jour. Il était alors assez clair qu'il s'agissait d'un projet original, exploratoire, comprenant une part de risque. Dès le début de la mise en œuvre du projet nous avons été amenés à modifier les protocoles envisagés du fait des contraintes hydrologiques mais également des modifications de calendrier du programme de restauration.

1- Nous avons dû rapidement abandonner l'étude de l'effet des saumons. Les suivis par radiopistage des saumons sur les sites de reproduction dans la Sélune ont montré que ces sites n'étaient pas accessibles pour les observations et les expérimentations en hiver. D'une part la localisation des frayères est très difficile compte tenu de la turbidité et d'autre part, les débits rendent dangereux les prospections dans le chenal.

2- Nous proposons de mettre en place un suivi des dynamiques sédimentaires dans l'ancienne retenue : compte tenu des modifications fréquentes du lit au droit des zones de chantier pendant le projet, l'abondance de sédiments fins recouvrant la structure grossière du lit en 2019 et 2020 et des faibles mobilités sédimentaires observées en amont de la retenue de Vezins depuis 2016 (cf observatoire) nous avons restreint le protocole 2 du projet initial (voir annexe 1) à l'aval du seuil de Virey considéré comme un site contrôle (sans lamproie) durant l'étude.

3- Nous souhaitions initialement suivre l'effet de la recolonisation piscicole post-arasement sur les dynamiques sédimentaires : au regard des modifications de calendrier des travaux (ouverture totale du linéaire uniquement à l'été 2022), nous n'avons pas réalisé l'étude de l'effet de la recolonisation sur la mobilité sédimentaire comme envisagé dans le cadre du projet initial. Un seul site de référence a été équipé en amont des anciennes retenues (aval du seuil de Virey) (voir annexe 1).

En revanche le protocole 1 (voir annexe 1) a été largement renforcé. Initialement il n'intégrait que du suivi sédimentaire. Nous l'avons complété par des suivis topographiques fins afin de déterminer l'effet des lamproies à la fois sur les dynamiques sédimentaires mais aussi sur les dynamiques de la micro-topographie du lit et de la granulométrie. Nous sommes ainsi en mesure de comprendre beaucoup plus finement l'effet des lamproies sur le fonctionnement morpho-sédimentaire de la Sélune.

1. Contexte et objectifs

1.1 Contexte et enjeux scientifiques

Une des clés du succès de la renaturation des secteurs situés à l'amont des barrages de la Sélune et la diversité des communautés aquatiques qui s'y développeront est la restauration de formes fluviales diversifiées, supports d'habitats de croissance et de reproduction des organismes. Un transfert sédimentaire suffisant est pour cela nécessaire. Si la puissance fluviale et la disponibilité sédimentaires sont deux facteurs reconnus comme fondamentaux pour assurer ces transferts, des études ont également pu mettre en évidence l'importance de l'activité d'agents biotiques sur la mobilité de la charge de fond et les processus morphogènes (Moore 2006; Polvi et Sarneel 2018; S. P. Rice 2021, Butler 1995). Parmi ces agents, les effets induits par la reproduction des poissons anadromes ont été documentés comme pouvant significativement et durablement modifier la répartition des sédiments dans les zones de reproduction et augmenter la complexités des habitats. C'est le cas notamment chez le saumon (Kondolf *et al.*, 1993; Gottesfeld *et al.*, 2004; Hassan *et al.*, 2008; DeVries, 2012). Ainsi, sur de petits cours d'eau de montagne dans le bassin versant expérimental de Stuart-Takla (Colombie-Britannique, Canada), Hassan *et al.* (2008) ont montré, sur cinq ans d'observations, que le saumon rouge peut déplacer deux à trois fois le volume mobilisé par les crues. Dans ce même contexte, le processus d'excavation pour la construction des nids de saumons a participé à augmenter les contrastes topographiques du lit de l'ordre de 0,30 à 0,50 m après la période de frai. Cette diversification est caractérisée par une succession de monticules et de creux à une micro-échelle. L'action morphogène d'une autre espèce anadrome, la lamproie marine est également renseignés mais reste moins documentée (Sousa *et al.*, 2012; Hogg *et al.*, 2014) et est potentiellement différent de celle du saumon étant donné la stratégie originale adoptée pour construire leur nid. Les lamproies utilisent en effet des mouvements de queue rapides pour décoller les éléments fins et leur ventouse buccale pour déplacer, vers l'amont ou l'aval des éléments plus grossiers. Elles construisent des nids circulaires de diamètres allant de 0.80 à plus de 2 m et de profondeur variant de 0.20 à 0.40 m (Sousa *et al.*, 2012) (Figure 1). Il n'existe à l'heure actuelle pas de réelle quantification du flux sédimentaire généré par cette espèce lors de la reproduction.

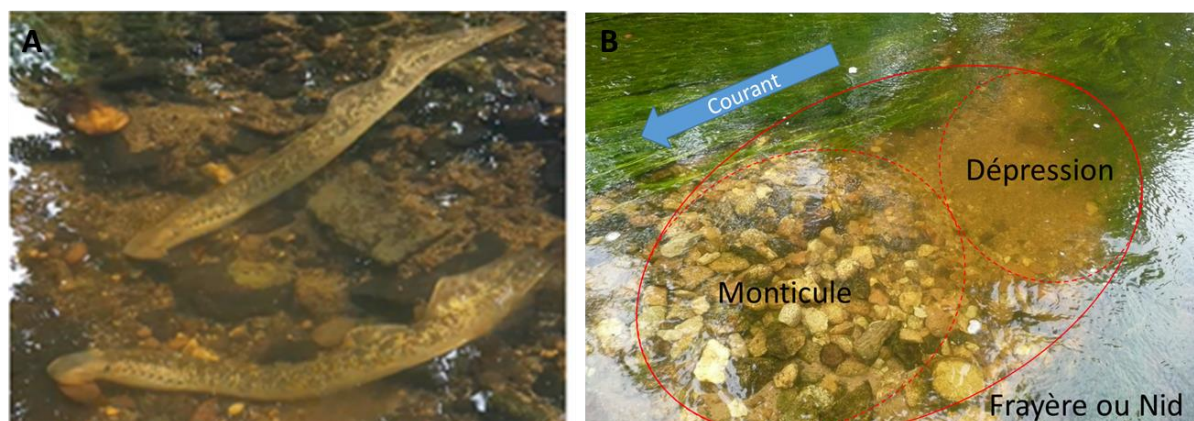


Figure 1 : Mobilisation des sédiments grossiers par les lamproies (A) pour la construction de leur nids composé d'une dépression à l'amont et d'un monticule de particules grossières à l'aval (B).

Rôle des espèces ingénieures

Ainsi, si les effets directs morpho-sédimentaires des saumons pendant la construction des nids sont assez bien documentés, les effets directs et les effets rétroactifs du frai des lamproies marines sur le transport sédimentaire (effet de surexposition de particules, effet du décolmatage sur la mobilité etc.) sont encore peu étudiés. Nous avons également remarqué un manque de connaissance sur de potentiels effets à une échelle de temps plus longue (au-delà des quelques jours ou semaines qui suivent la reproduction) et à une échelle spatiale qui dépassent le périmètre des nids.

Dans les contextes fluviaux d'énergie modérée à faible, comme dans le cas de la Sélune, la question du poids relatif des lamproies marines dans les processus physiques se pose. En effet, les suivis des sédiments grossiers initiés depuis 2016 sur la Sélune ont jusqu'à présent montré la très faible mobilité du lit en dehors des zones de reproduction des lamproies, c'est à dire à l'amont du barrage de la Roche-qui-Boit. Il est intéressant de déterminer si la restauration de la continuité écologique (en termes d'extension des zones colonisées et de densification des populations) peut participer à l'initiation ou accentuation des processus morpho-sédimentaires, eux-mêmes soutiens à la qualité écologique des cours d'eau. De plus, une meilleure connaissance des processus morphogénétiques structurant les habitats est utile : connaître le poids respectif des différents acteurs morphogènes permet ainsi de mieux anticiper les réactions du système restauré, de calibrer plus efficacement les actions à venir pour atteindre l'état souhaité après restauration et d'envisager ou non des mesures d'accompagnement (recharge sédimentaires etc ...).

1.2 Objectifs

L'objectif de ce travail est de documenter la contribution de la lamproie marine dans le fonctionnement morpho-sédimentaire de petits systèmes côtiers de faible énergie, systèmes assez peu investigués mais pourtant assez représentés sur notre territoire national.

Il s'agit ainsi d'établir tout d'abord comment la dynamique morpho-sédimentaire du lit mineur de la Sélune peut être influencée ou non par directement (construction de nids) ou indirectement (effet des frayères en début de période de hautes eaux) par l'activité reproductrice les lamproies (Figure 2). Il s'agit ensuite d'établir le poids relatif de ce facteur par rapport au facteur hydraulique. Concrètement, nous évaluons 1- la mobilité sédimentaire et 2- la morphologie du lit, 3- les modifications de la granulométrie et, pour ces trois processus, nous quantifions la contribution relative de l'activité des lamproies et de l'hydrologie.

Rôle des espèces ingénieuses

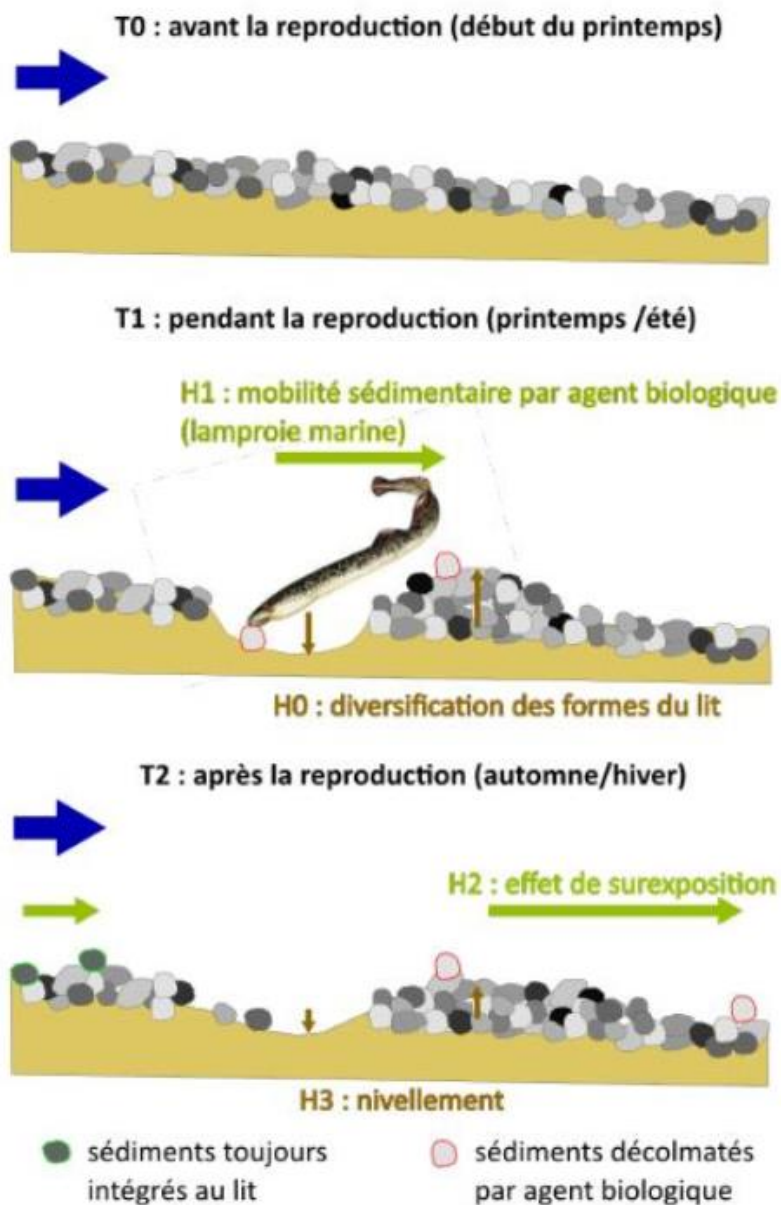


Figure 2 : Mécanismes d'action de la lamproie sur le substrat évalué dans le cadre de cette étude.

Outre les apports de connaissances fondamentales sur les relations des facteurs biotiques et abiotiques dans le fonctionnement physique des cours d'eau, répondre à ces questions permet de mettre en évidence l'importance des facteurs biologiques dans les processus de restauration et d'envisager la recolonisation piscicole non comme un objectif en soi mais comme un moyen d'accélérer la restauration des dynamiques hydro-sédimentaires nécessaires au développement d'autres communautés aquatiques.

2. Méthodologie

2.1 Stratégie générale et choix des sites d'étude

La stratégie de travail consiste à étudier l'effet des lamproies sur la dynamique morpho-sédimentaire à deux échelles spatiales complémentaires : (I) à l'échelle d'un tronçon sur

Rôle des espèces ingénieuses

lesquels des activités de fraie ont été repérées les années précédentes, pour observer l'effet de la mise en place de frayère sur les dynamiques locales et (II) à l'échelle des frayères pour observer plus finement l'influence de la présence de ces formes sur les dynamiques hydromorphologiques (transfert et formes) et suivre leur évolution dans le temps à l'échelle du cycle hydrologique .

Trois sites différents ont été retenus : Bois d'Ardennes, Bateau et Virey (



Figure 3). Les deux premiers correspondent à des secteurs avec lamproie alors que le site de Virey, en amont des ouvrages au début de cette étude, correspond à un site de contrôle sans lamproie (Tableau 1).



Rôle des espèces ingénieures

Figure 3 : Situation géographique de la Sélune et localisation des sites d'études. En bas, de Gauche à droite : Bois d'Ardennes, Bateau, Virey.

Tableau 1 : Caractéristiques hydromorphologiques des sites d'étude.

Nom du site	D50 du lit (mm)	pente de la ligne d'eau (%)	Débit biennal ($m^3.s^{-1}$)	Largeur de plein bord (m)	Frayère
Bois d'Ardennes (BA)	45	0.014	46,6	16,23	Yes
Bateau (BT)	64	0.018	46,1	19,8	Yes
Virey (VY)	32	0.007	38,9	15,4	No

Le site de Bois d'Ardennes a été sélectionné car, d'après les relevés de frayères réalisés par l'UR U3E (INRAE) depuis 2011, il présentait les plus fortes densités de frayères et, par conséquent, la probabilité d'être utilisé par la lamproie marine durant notre étude était élevée (Figure 4). Le site du Bateau a été retenu car il présentait 2 frayères bien visibles identifiées pendant les reconnaissances faites lors de la période B1. Enfin le site de Virey a été sélectionné car il s'agit du premier radier dénoyé en amont des anciennes retenues qui présente des caractéristiques géomorphologiques les plus proches des deux sites en aval, même si sa pente est légèrement inférieure. De plus, en dehors du secteur restauré (ancienne retenue) ses conditions morfo-sédimentaires sont stables durant le suivi (pas d'ajustement à attendre dans le cadre du dérasement des barrages).

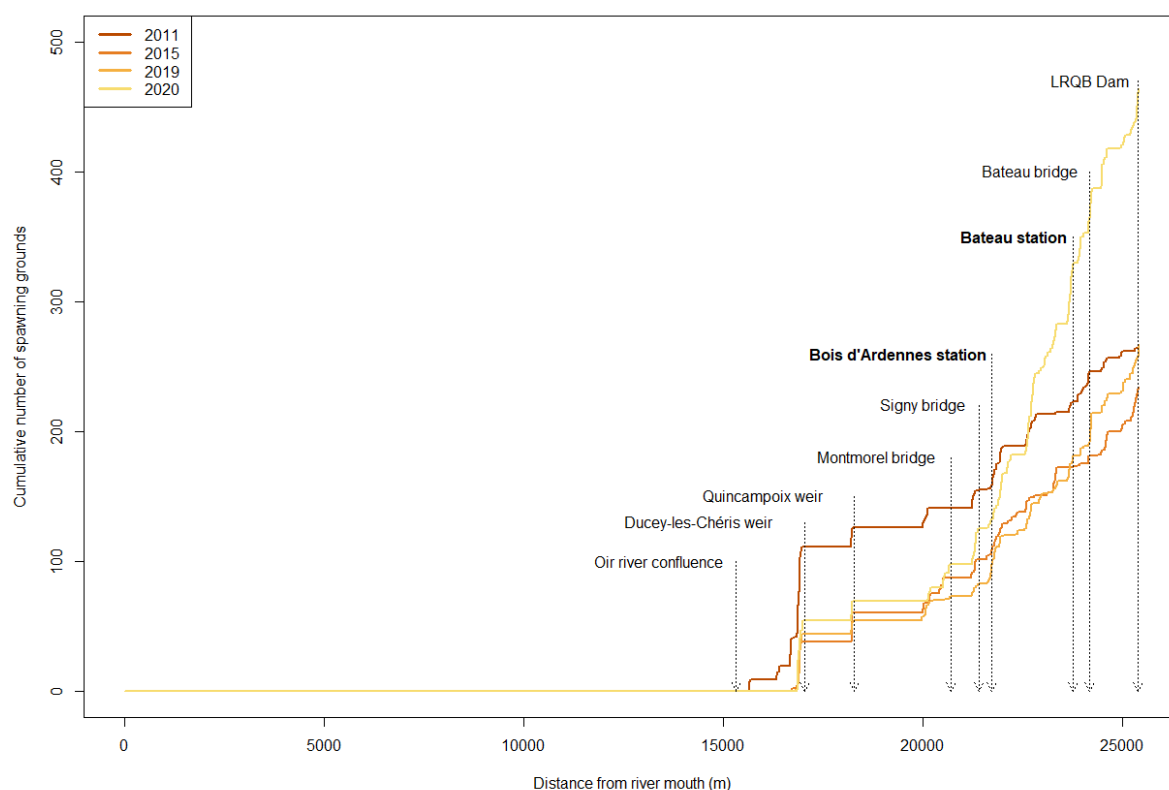


Figure 4 : Effectif cumulé des frayères recensées entre 2011 et 2020 (source : INRAE)

Afin d'isoler l'effet de la construction des nids (intervenant au printemps) de celui des crues (intervenant durant la période hivernale), nous avons réparti nos suivis avant/après les périodes de frai (avril à juillet) et avant/après les périodes de hautes eaux hivernales (octobre à mars) (Figure 5-I). Nous pouvons ainsi comparer nos observations.

Deux paramètres ont été suivis : la mobilité du fond du lit (taux de mobilité et distances de déplacement de la charge de fonds) et l'évolution des micro-formes composant le lit (Figure 5-III et IV) .

2.2 Mesure de la mobilité sédimentaire

Le suivi des dynamiques sédimentaires de la charge composant le fond du lit a été réalisé en utilisant des transpondeurs passifs de type PIT Tags (Passive Integrated Transmitter) qui sont des équipements d'identification par radiofréquence (RFID). Cette technologie utilise une antenne pour détecter, localiser et identifier des émetteurs passifs qui transmettent un identifiant unique uniquement lorsqu'ils sont exposés au champ électromagnétique de l'antenne. Ce système est couramment utilisé pour surveiller individuellement le déplacement des particules grossières dans les cours d'eau (Lamarre et al, 2005 ; Rollet et al. 2008).

Afin d'équiper rapidement les sites d'étude en raison des contraintes saisonnières, les traceurs sédimentaires injectés dans le lit sont exogènes aux sites de Bois d'Ardennes et du Bateau. Il s'agit de particules blanches ou grises achetées dans le commerce (Figure 6). Elles ont été sélectionnées pour correspondre à la granulométrie des sites d'accueil (Figure 7). Cette

Rôle des espèces ingénieures

dernière a été définie à partir d'un échantillonnage Wolman (1954) à 100 particules sur chacun des sites.

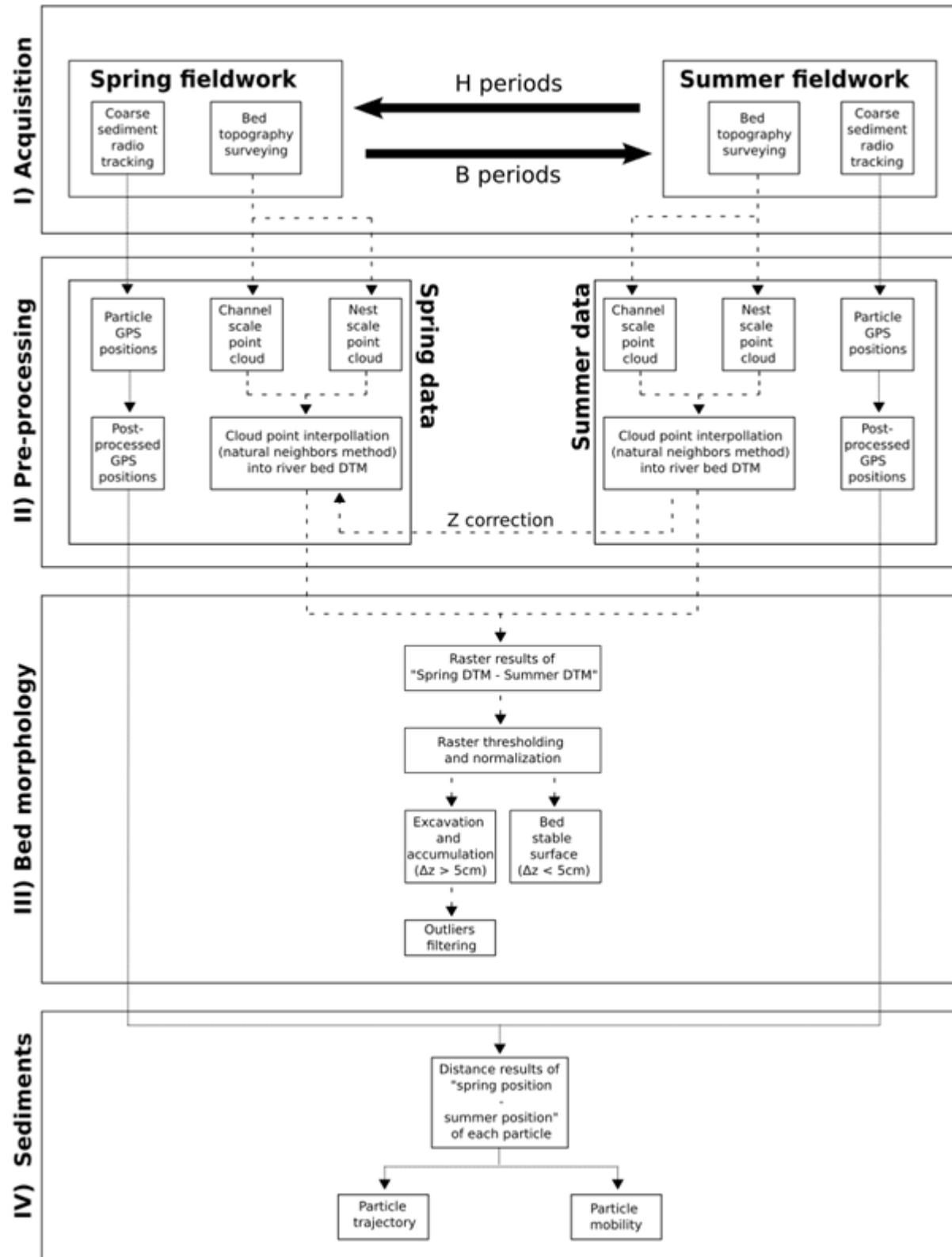


Figure 5 : Schéma méthodologique de l'acquisition et du traitement des données

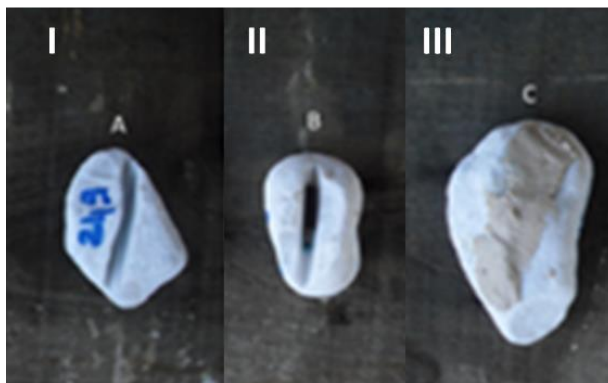


Figure 6 : Insertion des traceurs (PIT-tag) dans les particules exogènes. I- réalisation d'une entaille dans la particule, II- positionnement du traceur dans l'entaille, III- scellement à la colle chimique du traceur.

Le site de Virey ne nécessitant pas d'équipement urgent, 150 traceurs sédimentaires injectés ont été produits à partir des sédiments extraits du lit de la Sélune. Ils ont été prélevés de façon aléatoire selon la méthode Wolman.

Du fait de la taille des transpondeurs (23mm) nous n'avons équipé que les particules de taille supérieure à 32mm d'axe B ce qui explique que les valeurs médianes des distributions granulométriques des traceurs soient supérieures à celles du lit (Figure 7). Les fractions supérieures à 23mm sont cependant correctement représentées.

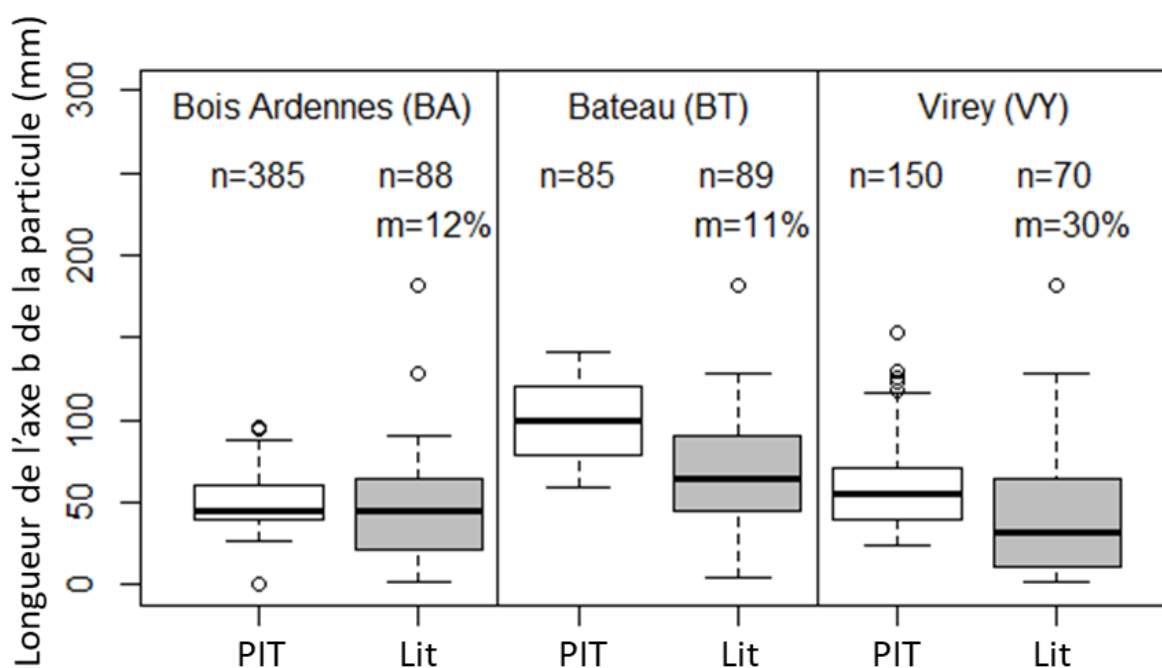


Figure 7 : Comparaison de la granulométrie (selon l'axe b) des échantillons de sédiments équipés de PIT tag (PIT) avec la granulométrie de surface des sites sur lesquels ils ont été injectés (Lit). Pour chaque boxplot, le nombre d'individu est donné (n) ainsi que la fraction de matrice interstitielle (m) pour chaque échantillon de granulométrie de surface.

2.2.1 Modalité d'injection échelle tronçon

Sur le site de Bois d'Ardennes, 385 traceurs ont été installés avant l'arrivée des lamproies marines pour la saison de frai 2020. Ils sont installés individuellement dans le lit pour

Rôle des espèces ingénieuses

reproduire les des conditions d'imbrications *in-situ*. Ils sont injectés selon un maillage de 2 m en longueur par 0.30 m en largeur (Figure 8). Pour capter le processus de construction, la largeur de la maille est inférieure à la taille moyenne des frayères de lamproies marines recensées sur la rivière Dordogne en France (0,65 m à 0,96 m, Taverny 2004). De plus, cet espacement reste suffisant pour limiter les risques d'interférence entre transpondeurs estimé à 0,10 m par le constructeur de l'antenne utilisée (A quartis antena user guide, dans Chapuis et al. 2014). L'intervalle de 2 m entre les transect est utilisé pour maximiser la surface de tronçon équipée en restant proche de la dimension des frayères de lamproies marines.

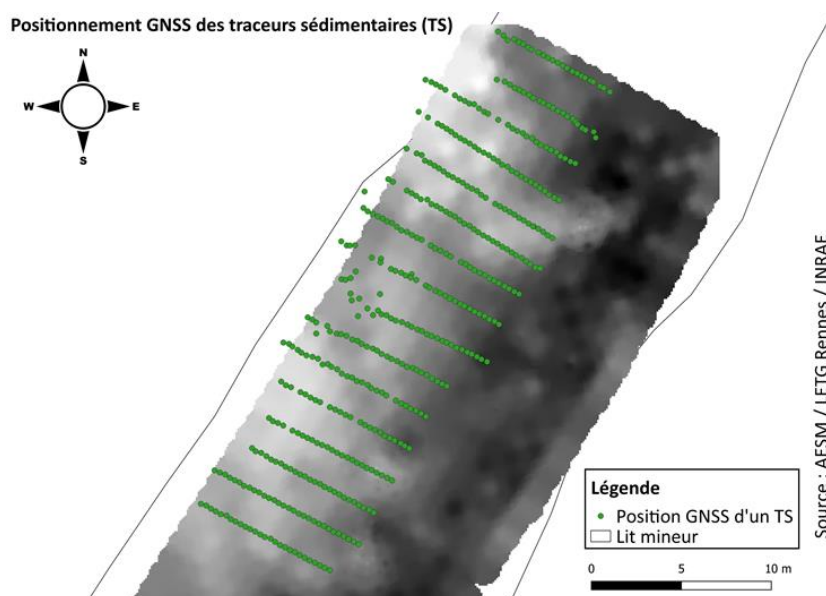


Figure 8 : Positionnement des traceurs (particules équipées de PIT-tag) injectés sur le site de Bois d'Ardenne.

Sur le site d de Virey (secteur de contrôle), 150 traceurs ont été installés avant la saison des crues hivernale 2020/2021. Nous les avons imbriqués dans la couche de surface du lit pour imiter les conditions réelles d'imbrication. Le site étant en amont des barrages, il ne dispose pas de frayère donc le maillage est plus large avec une maille de 3 m en longueur et 0,50 en largeur pour couvrir l'intégralité du faciès d'écoulement où ils ont été déposés. Ce site est suivi une fois par an à la fin de l'été avant les crues hivernales.

2.2.2 Modalités d'injection échelle frayère

Sur le site de Bateau, 85 traceurs ont été installés en 2020 après la saison de frai (fin de printemps) sur deux zones de frayères existantes. Ces dernières ont été visuellement identifiées à partir de la perturbation du substrat caractéristique de la construction d'une frayère de lamproie marine. 25 traceurs ont été déposés dessus en cluster et sans imbrication particulière pour reproduire des conditions de mise en place proches de celles réalisées par les lamproies. 60 traceurs de contrôle ont été imbriqués dans le lit à un mètre en amont et en aval des frayères (fig. X). Leur dépôt a été effectué en ligne autour des frayères en respectant un espacement de 0,30 m entre les traceurs.

Rôle des espèces ingénieuses

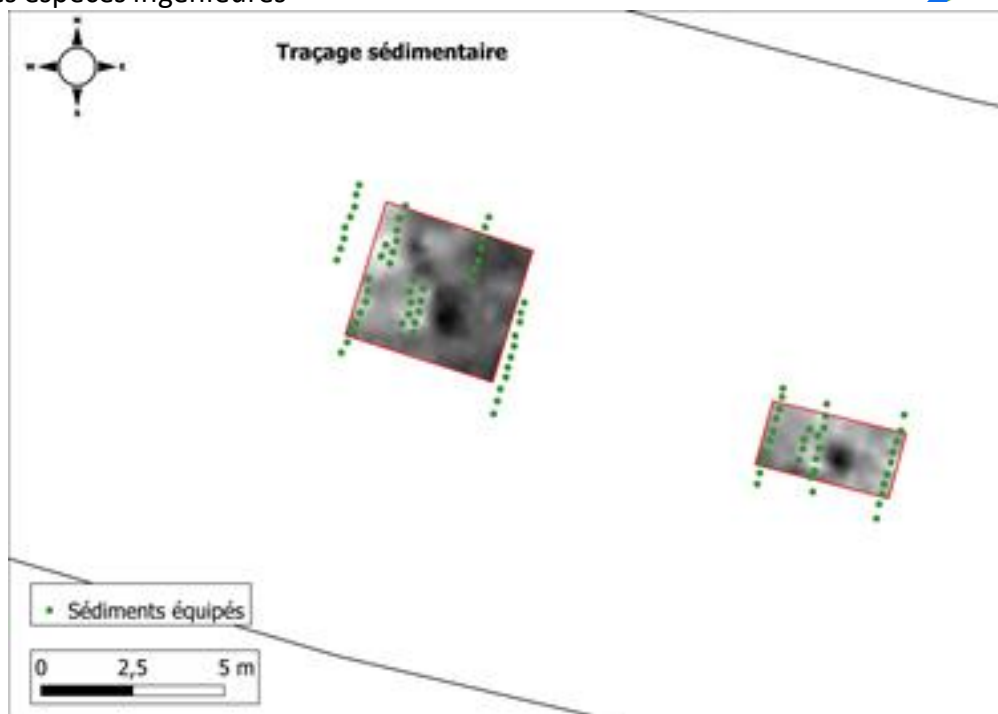


Figure 9 : Positionnement des traceurs (particules équipées de PIT-tag) injectés sur les frayères du site de Bateau.

2.2.3 Méthode de prospection et localisation

L'acquisition des données de traçage sédimentaire se divise en deux opérations sur le terrain : 1) la prospection avec l'antenne Aquartis ; 2) la géolocalisation des positions de traceurs au dGPS (Figure 10). La prospection des traceurs présente deux besoins : 1) retrouver le maximum d'individus sur des surfaces densément équipées ; 2) les localiser avec précision, notamment sur les nids de lamproies marines



Figure 10 : A) Localisation de chaque traceur à l'aide d'une antenne Aquartis, B) géolocalisation des traceurs à l'aide d'un récepteur dGPS Trimble Geo 7X GNSS et d'une antenne Zephyr 2 d'une précision centimétrique.

Pour prospecter efficacement chaque site, ils sont virtuellement découpés en bandes qui se recouvrent partiellement. Le cheminement de l'opérateur équipé de l'antenne s'effectue d'amont en aval le long de ces bandes avec un balayage régulier de gauche à droite avec l'antenne. Le recoupement des bandes permet d'avoir des angles d'approche différents pour un même traceur ce qui assure une meilleure détection (Chapuis and al, 2014). Sur les sites du Bateau et du Bois d'Ardennes, cette méthode de prospection rationalise les déplacements et limite l'effet du piétinement sur les formes du lit.

Une fois les traceurs détectés et leur position accrochée par un signal continu, cette position est enregistrée avec un dGPS centimétrique. La position est relevée systématiquement au niveau de la tête de l'antenne. Le temps d'acquisition au dGPS est ajusté en fonction de la qualité du positionnement pour garder une marge d'erreur en plan inférieure à 5 cm après

Rôle des espèces ingénieures

post-traitement. Les positions des traceurs ont été corrigées avec les données de la station RGP (Réseaux GNSS Permanent) d'Avranches à 40 km à l'Ouest de la Sélune. La correction a été faite avec le logiciel Trimble Pathfinder. La précision donnée en sortie de correction est de 0,02 m. La distance de déplacement des particules est calculée entre les positions récupérées à suivi. A partir des distances calculées, l'azimut des trajectoires de déplacement est également calculé pour caractériser la direction des flux. L'azimut de référence (0°) correspond au Nord.

2.2.4 Marge d'erreur

La couleur blanche des sédiments exogènes utilisés comme traceurs nous a permis de tester la précision de la localisation des traceurs sédimentaires par contrôle visuel, les sédiments blancs étant facilement identifiables avant le développement du biofilm. La précision de la détection avec l'antenne Aquartis a été mesurée en faisant cinquante jets aléatoires d'un traceur test peint sur le site de Virey. Pour chaque jet, deux positions sont enregistrées : 1) celle correspondant à la première détection continue du traceur est faite ; 2) celle correspondant à la position exacte du traceur test identifiée visuellement. La distance entre les deux positions est calculée pour tous les jets. Ces tests nous ont permis d'établir une marge d'erreur médiane de positionnement des traceurs de 0,66 m. Ainsi dans la suite de l'étude, nous considérons comme mobiles les traceurs ayant effectué un déplacement supérieur à 0,66 m. Cette marge d'erreur est réduite à quelques centimètre lors du premier suivi (B1) durant lequel le biofilm n'était pas encore développé et les traceurs étaient encore visuellement identifiables.

2.3 Mesure de l'évolution de la micro-topographie du lit

2.3.1 Méthode d'acquisition

Une station totale (Trimble M3) a été utilisée pour relever la topographie la bathymétrie du lit avec une précision horizontale et verticale centimétrique (Gottesfeld et al. 2004; Gottesfeld, and al. 2008; Hassan et al. 2008). Cet outil permet une haute précision des relevés (centimétrique), une qualité d'acquisition régulière sans contrainte liée à l'encaissement du site ou la présence de masque généré par la ripisylve tout en étant rapidement implémentable. Il nécessite peu de tests de validation et permet des relevés pour un coût réduit sans un important travail de post traitement.

La topographie du lit étant peu marquée, et pour assurer une résolution des levés homogènes au sein et entre les relevés, les relevés topographiques ont été réalisés suivant un maillage de 41 m x 15 m sur le tronçon du Bois d'Ardennes, de 4,5 m x 4 sur la frayère F3 (Bateau) et de 4 m x 2 m sur la frayère F4 (Bateau) . Ce dernier a été matérialisé par un système amovible de fines cordes graduées installé au-dessus du plan d'eau. Un point de levé topographique a été pris à chaque nœud du maillage. Des points d'ancrage fixes en berge ont permis de remettre le maillage à la même position pour chaque visite des sites. Deux tailles de mailles ont été appliquées en fonction de l'échelle des objets suivis (Figure 11) :

- à l'échelle du tronçon (Bois d'Ardennes), 1 point par m² étant donné ses faibles variations topographiques du lit

Rôle des espèces ingénieuses

- à l'échelle des frayères (Bois d'Ardennes et Bateau), la densité de la maille a été ajustée à 18 points par m² pour tenir compte de la taille des frayères de lamproies marines en France (0,65 m à 0,96 m, Taverny 2004). 4 frayères ont été suivies : 2 sur le site de Bois d'Ardennes (F1 et F2) et 2 sur le site de Bateau (F3 et F4).

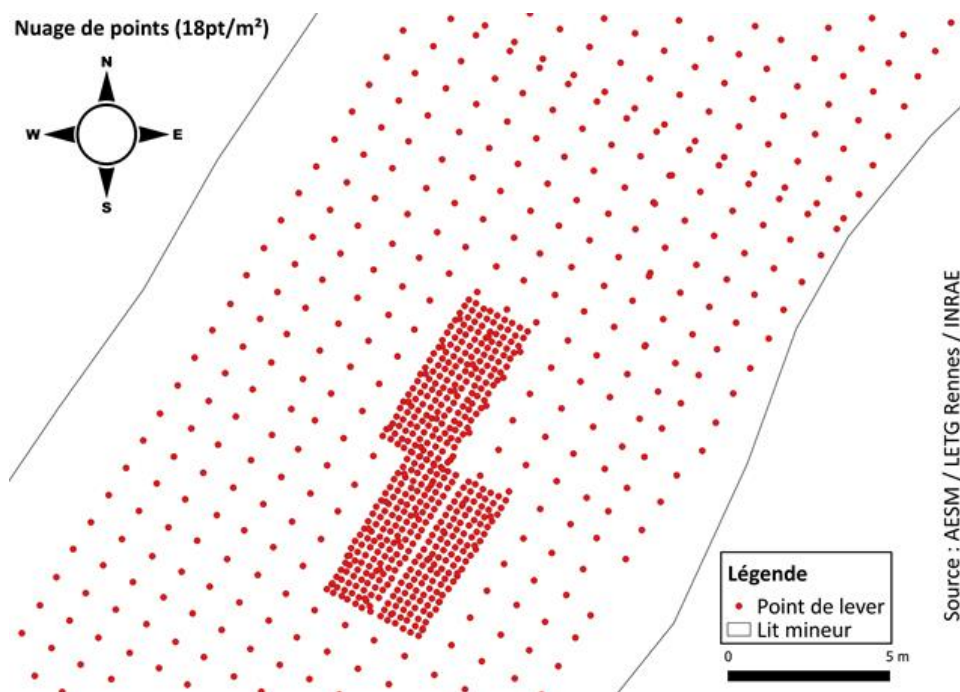


Figure 11 : Les 2 types de maillages de référence utilisés en fonction de l'objet ciblé pour réaliser les relevés topographiques sur le site de Bois d'Ardennes. Les 2 rectangles formés par un maillage de point plus dense correspondent aux frayères F1 et F2.

Sur chaque site, comme pour le traçage sédimentaire, les levés topographiques ont été réalisés deux fois par an (avant et après la saison de frai de la lamproie marine), pendant deux périodes consécutives : 2020/2021 et 2021/2022.

2.3.2 Méthode de traitement et marge d'erreur

Des repères au sol (bornes de géomètres et/ou des clous d'arpentage) ont été installés dans la plaine alluviale autour des stations concernées pour permettre de géo-référencer les levés topographiques dans le système de coordonnées Lambert 93 et dans le Nivellement Géodésique Français (NGF). La localisation de ces repères a été enregistrée avant chaque acquisition avec un dGPS permettant une précision de localisation de 3 cm dans les systèmes mentionnés précédemment. La marge d'erreur des levés topographiques a été fixée à 5 cm en cumulant l'erreur de positionnement des repères au sol et l'erreur intrinsèque au réglage de la station totale. Les nuages de points topographiques ont été interpolés spatialement en utilisant la méthode Natural Neighbors afin de générer des MNT bathymétriques (Figure 12). C'est une méthode non-géostatistique est recommandée pour des nuages de points réguliers avec un format grille (Li and al, 2008). Les trois séries de MNT (Bois d'Ardennes, Bateau 1, Bateau 2) ont été découpées selon une emprise spatiale commune à chaque série pour supprimer les effets de bords issus de l'interpolation.

Rôle des espèces ingénieuses

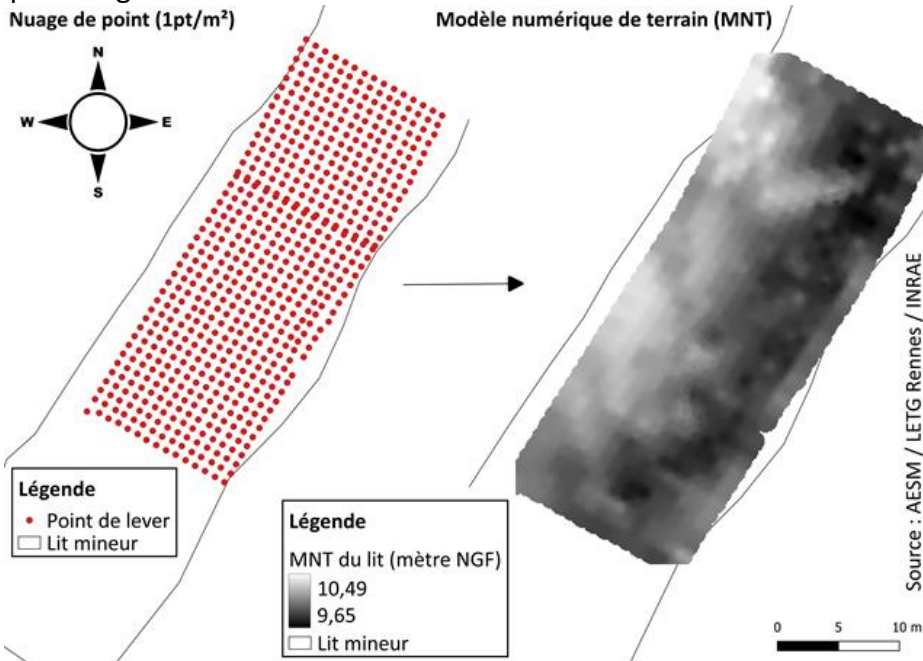


Figure 12 : Construction des MNT à partir des relevés topographiques réalisés sur le site de Bois d'Ardennes.

La différence d'altitude a été calculée entre chaque MNT (5 pour Bois d'Ardennes et 4 sur les 2 frayères du site de Bateau) des trois séries. Sur les rasters de soustraction qui ont été calculés (Figure 13), le seuil de détection de changement a été fixé à 0.05 m pour englober la marge d'erreur verticale liée à la mesure topographique et la variation de hauteur liée à la taille des particules composant le lit. Les pixels du raster de soustraction compris entre -0.05 m et 0.05 m ont été classés stables. Les pixels supérieurs à 0.05 m ont été classés comme "érosion" et ceux inférieurs à -0.05 m ont été classés comme "accumulation". Afin d'écarter des faux positifs qui sont des artefacts de l'interpolation spatiale, les changements classés "érosion" et "accumulation" ont été filtrés selon le critère suivant : un changement a été validé si et seulement si sa superficie contient un point de chaque nuage utilisé pour calculer la soustraction d'altitude entre deux dates. De plus, pour éviter qu'une variation de hauteur ne soit confondue avec la hauteur d'un bloc rocheux présent dans le chenal nous avons filtré les changements associés à une granulométrie "bloc".

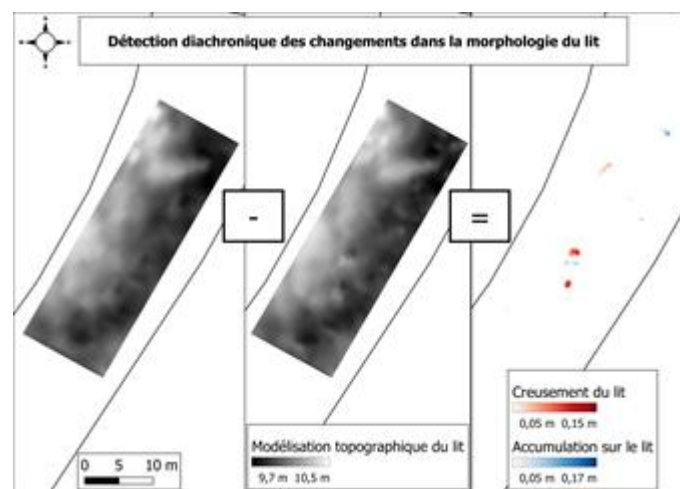


Figure 13 : Détection diachronique des changements morphologiques du lit

Rôle des espèces ingénieuses

2.4 Mesure des modifications granulométriques

Pour montrer l'effet du tri sédimentaire opéré par les lamproies marines sur la structure granulométrique du lit et étudier la durée de cette perturbation (Sousa et al. 2012 ; Hogg et al. 2014), chaque point de levé topographique des suivis opérés sur 2021-2022 (à la fin de la période B2 et à la fin de la période H2) ont été complétés par une observation qualitative de la granulométrie selon les modalités suivantes : limon, sable, grossier mobile et bloc. Le lit a été ensuite découpé en maille de 5cm de côté et la granulométrie dominante au sein de chacune de ces mailles de 25cm² a été renseignée.

2.5 Données hydrologiques

L'hydrologie durant nos périodes de suivis a pu être caractérisée à partir des débits moyens journaliers enregistrés à la station de jaugeage automatique du Pont de Signy située à 300 m en aval du site du Bois d'Ardennes (code hydroportail : I922 1020).

Cette hydrologie a été très contrastée d'une période à l'autre (Figure 14).

Durant les 2 périodes de reproduction des lamproies que nous avons suivies (B1 et B2), théoriquement périodes de basses eaux, seule la première (B1) ne comporte aucune crue. En effet, durant la période B2, les débits moyens journaliers ont atteint 51m³.s⁻¹ (soit 0,99 Q₂) lors d'une crue qui a culminé à 56,1m³.s⁻¹ durant 13h. Il est donc délicat pour cette période d'isoler le seul effet de l'activité biologique.

Durant les 2 périodes d'hydrologie plus actives (H1 et H2), les conditions ont également été variables. H1 a montré une hydrologie particulièrement dynamique avec plusieurs occurrences de crues dépassant le seuil de la crue biennale et atteignant presque la Q₅. En revanche, la période H2 a été hydrologiquement beaucoup moins active aucune crue n'ayant excédé un débit moyen journalier de 0.86 Q₂

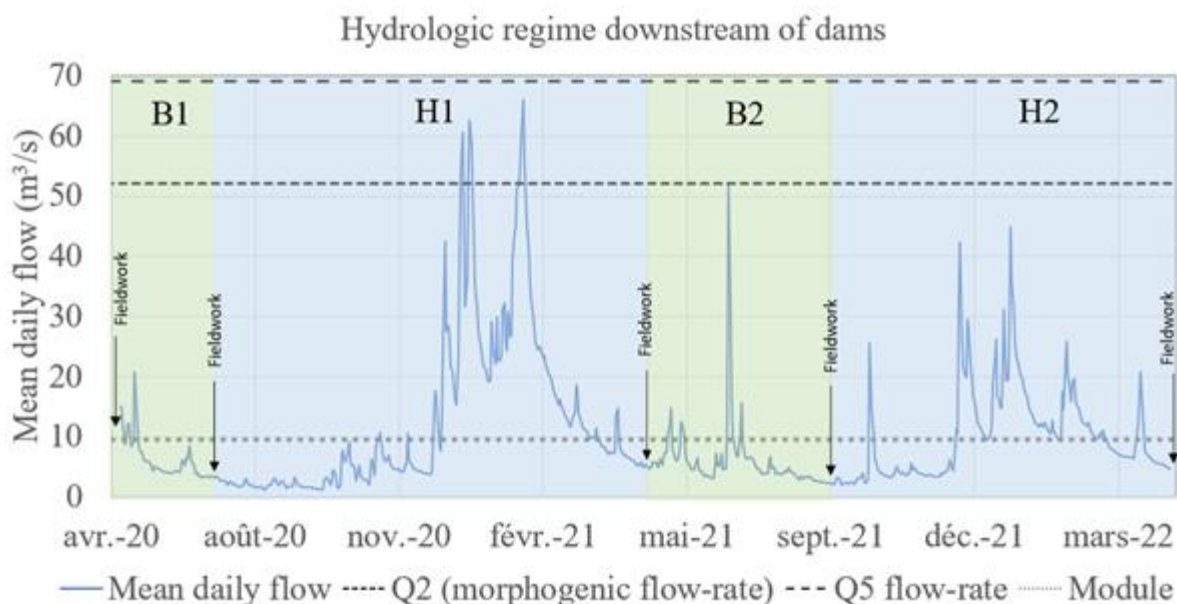


Figure 14 : Débits moyens journaliers enregistrés à la station de Signy durant l'étude (avril 2020 - Avril 2022). Les périodes en vert correspondent aux périodes de basses eaux et de

Rôle des espèces ingénieuses

reproduction des lamproies, celle en bleue aux périodes des hautes eaux automnales et hivernales.

3. Résultats

3.1 Analyse de la mobilité sédimentaire

3.1.1 A l'échelle du tronçon (site du Bois d'Ardennes)

Le suivi des traceurs nous indique que les sédiments constituant le fond du lit de la Sélune sont globalement peu mobiles quel que soit le site ou la saison considérés (Figure 15). Les taux de mobilité ont toujours été inférieurs à 65% et les distances maximales parcourues par ces traceurs mobiles n'ont jamais dépassé 25 mètres par an (distance médiane annuelle inférieure à 5 mètres). Les périodes montrant le plus de mobilité sont celles correspondant aux périodes de hautes eaux (H1 et H2).

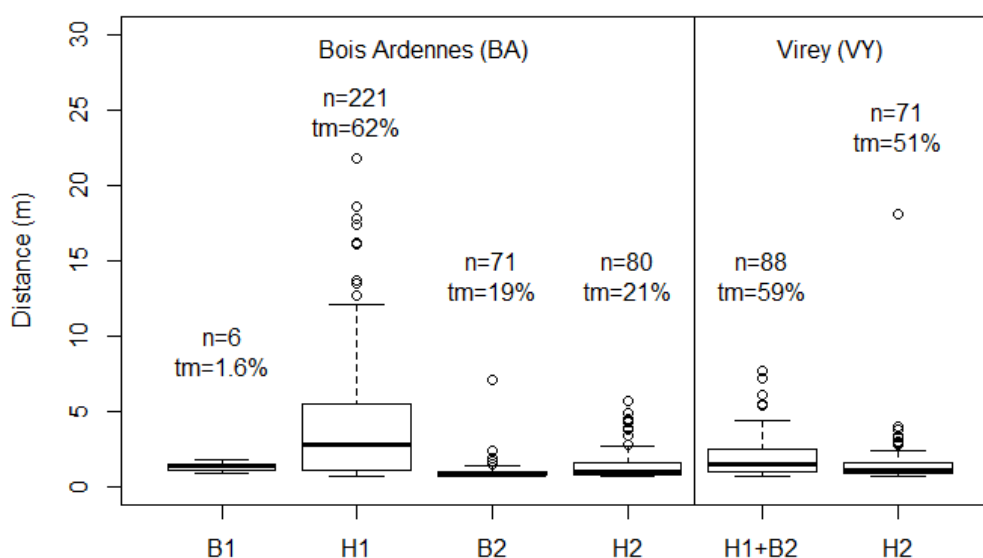


Figure 15: déplacement des sédiments grossiers à l'échelle d'un tronçon sous influence des lamproies marines (Bois Ardennes) et sans lamproies marines (Virey). Pour le site du Bois d'Ardennes, la mobilité est donnée pendant les saisons de reproduction des lamproies (B1, B2) et pendant les périodes de crues hivernales (H1 et H2). Pour chaque observation, le nombre d'individu est données (n) ainsi que le taux de mobilité (« tm »).

Dans le détail, ces mobilités sont quasiment équivalentes en termes de distances parcourues sur le site de Bois d'Ardennes (distance médiane annuelle supérieure à 3m) et sur le site de contrôle de Virey (2,5m/an) mais cette mobilité a concerné un plus grand nombre de particules sur ce dernier avec un taux de mobilité toujours supérieur à 50%. Des différences plus significatives sont observables durant la période H1 où les distances maximales sont beaucoup plus importantes sur Bois d'Ardennes (de 8 à 22 mètres) que sur Virey (de 5 à 8 mètres).

Au sein du site Bois d'Ardennes, la mobilité des traceurs durant la période de reproduction B1 est plus faible que durant les autres périodes à la fois en termes de taux de mobilité (1,6% des traceurs) et de distance parcourues (Médiane d'environ 2 mètres). De plus, les traceurs durant cette période ont parcouru des distances moins variables que lors des périodes H1, H2 et B2 :

Rôle des espèces ingénieuses

toutes les particules mobilisées partent d'un même et unique transect et arrêtent leur déplacement au même point du chenal (Figure 16).

Hormis durant la période H1, les déplacements de sédiments concernent une partie très limitée du lit, le long d'une ligne quasi centrale (durant B2 et H2), ou sur des secteurs encore plus réduits au droit de la frayère F1 (durant B1) (Figure 16).

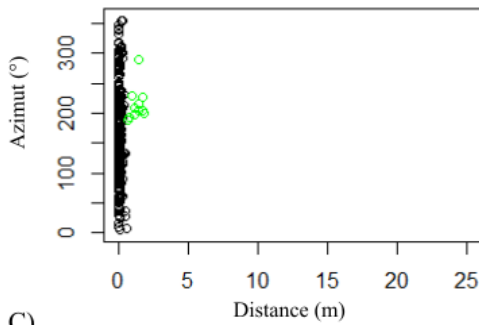


Figure 16 : Trajectoires de déplacements des particules ayant dépassé le seuil de mobilité (0.66 m) sur le tronçon du Bois d'Ardennes. Les lignes rouges représentent les transects d'injections des sédiments équipés de PIT.

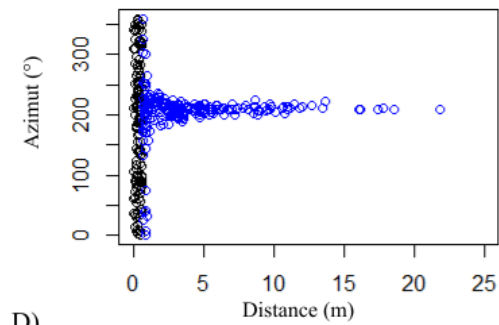
Les directions empruntées par les traceurs durant les périodes B1, H1 et H2 suivent toutes quasiment le même azimut 200 (Figure 17 A, B et D). Les trajectoires adoptées par les particules durant B2 sont beaucoup moins unidirectionnelles (Figure 17 C).

Rôle des espèces ingénieuses

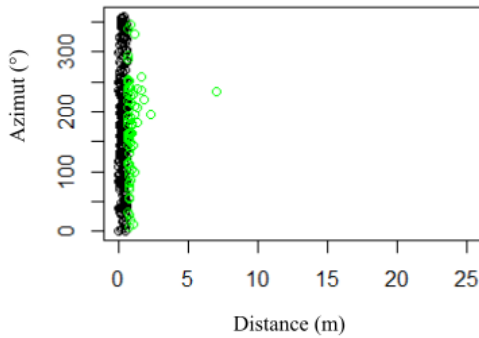
A)



B)



C)



D)

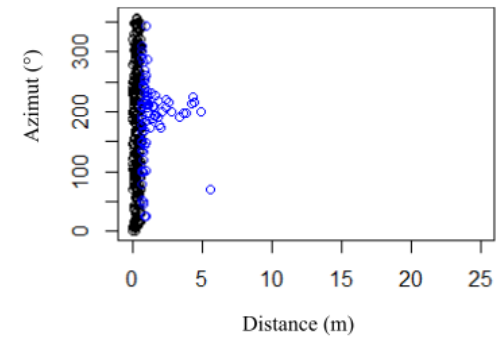
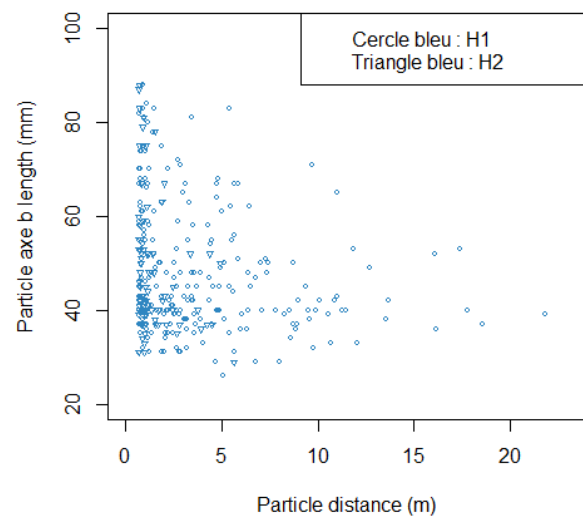
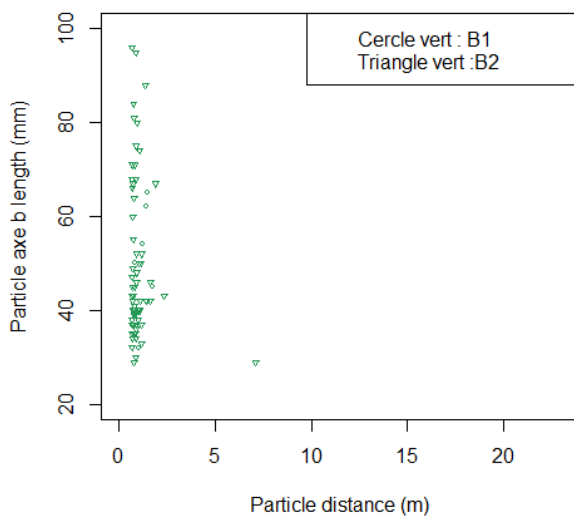


Figure 17 : Azimut des trajectoires suivies par les traceurs mobiles durant les périodes de reproduction (A) B1 et (C) B2 et durant les périodes de hautes eaux H1 (B) et H2 (D). La valeur 0 d'azimut se réfère au Nord géographique.

Lors des périodes B1 et B2, le comportement des traceurs est similaire et nous n'observons pas de relation entre les distances parcourues et la taille des traceurs et toute la gamme granulométrique est concernée. Durant les périodes H1 et H2, la gamme granulométrique considérée comme mobile est également large. Les sédiments ayant parcouru les distances les plus importantes (>10m) ont une taille inférieure ou égale à la taille médiane des traceurs injectés (Figure 18).



Rôle des espèces ingénieuses

Figure 18 : Relation entre la taille des particules mobilisées et les distances parcourues durant (A) les périodes de reproduction des lamproies (B1 et B2)) et durant les périodes de hautes eaux (H1 et H2) sur le site de bois d'Ardennes.

3.1.2 A l'échelle des frayères

A l'échelle des frayères sur le site du Bateau, nous observons une mobilité partielle des traceurs quelle que soit la période considérée, sur les deux frayères (F3 et F4)(Figure 19). Globalement, cette mobilité reste faible (distance médiane oscillant autour d'1m) (A et B). Cette mobilité concerne les particules placées sur les frayères comme celles positionnées à côté.

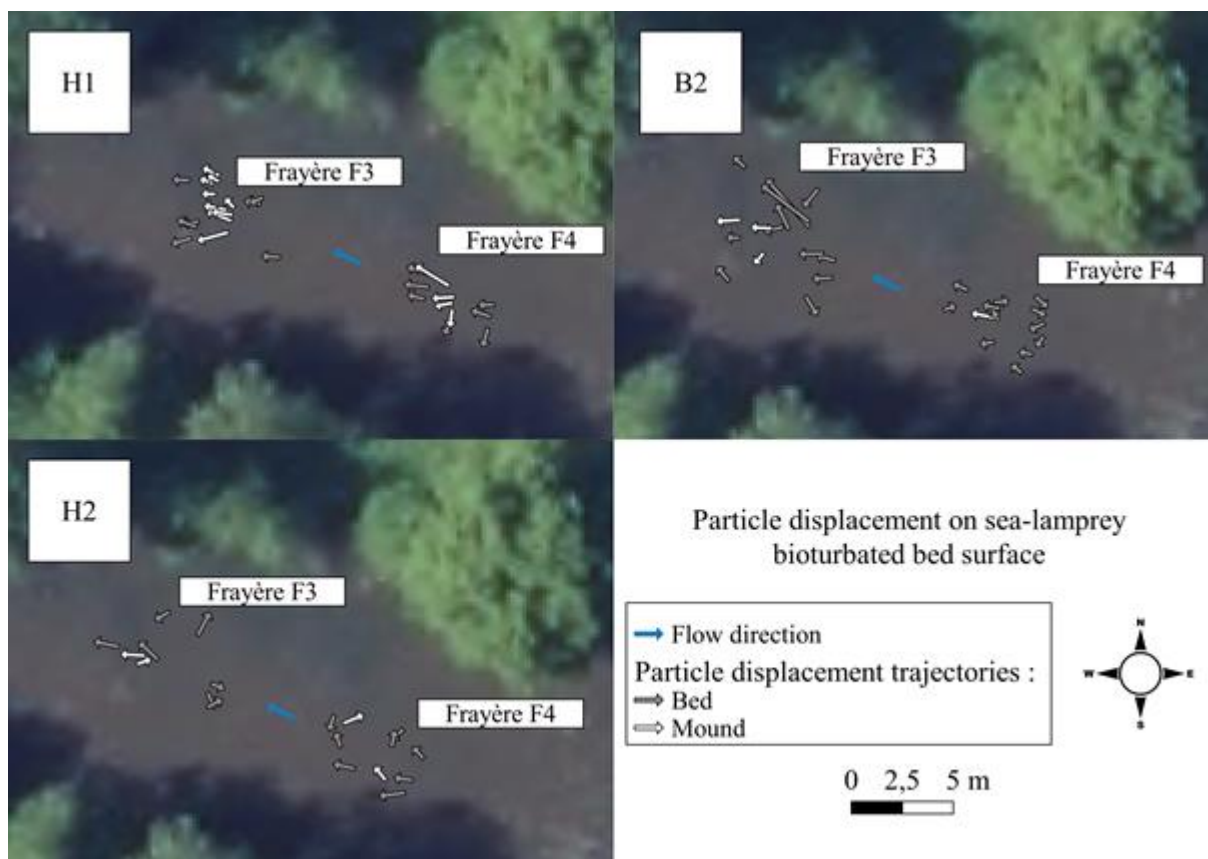


Figure 19 : Trajectoires de déplacements des particules ayant dépassé le seuil de mobilité (0.66 m) sur les frayères F3 et F4 du site du Bateau. Les trajectoires des sédiments déposés sur le monticule (en blanc) et autour de la frayère (en gris) sont différenciés.

Dans le détail, au droit de la frayère F3, nous n'observons pas de différence de distance déplacement entre les différentes périodes ou entre les particules placées sur les nids et les autres (Figure 20 A). En revanche les taux de particules mobilisées sont nettement plus importants pour les traceurs sur les nids (56%) que ceux du lit (19%) alors que nous observons l'inverse lors de la période B2, avec un taux de mobilité plus important autour du nid (31%) que sur le nid (19%).

Au droit de la frayère F4, nous observons les mêmes tendances que sur F3 (Figure 20 B). Le comportement des traceurs sur les nids ou sur le lit durant la période H2 est très équivalente.

Rôle des espèces ingénieuses

En revanche, durant la période des crues (H1), les particules positionnées sur les nids bougent plus en proportion (50%) que celles du lit (28%) alors que ce rapport s'inverse durant la période biologique (B2) avec 13% des traceurs sur les nids mobilisés contre 48% des traceurs autour du nid.

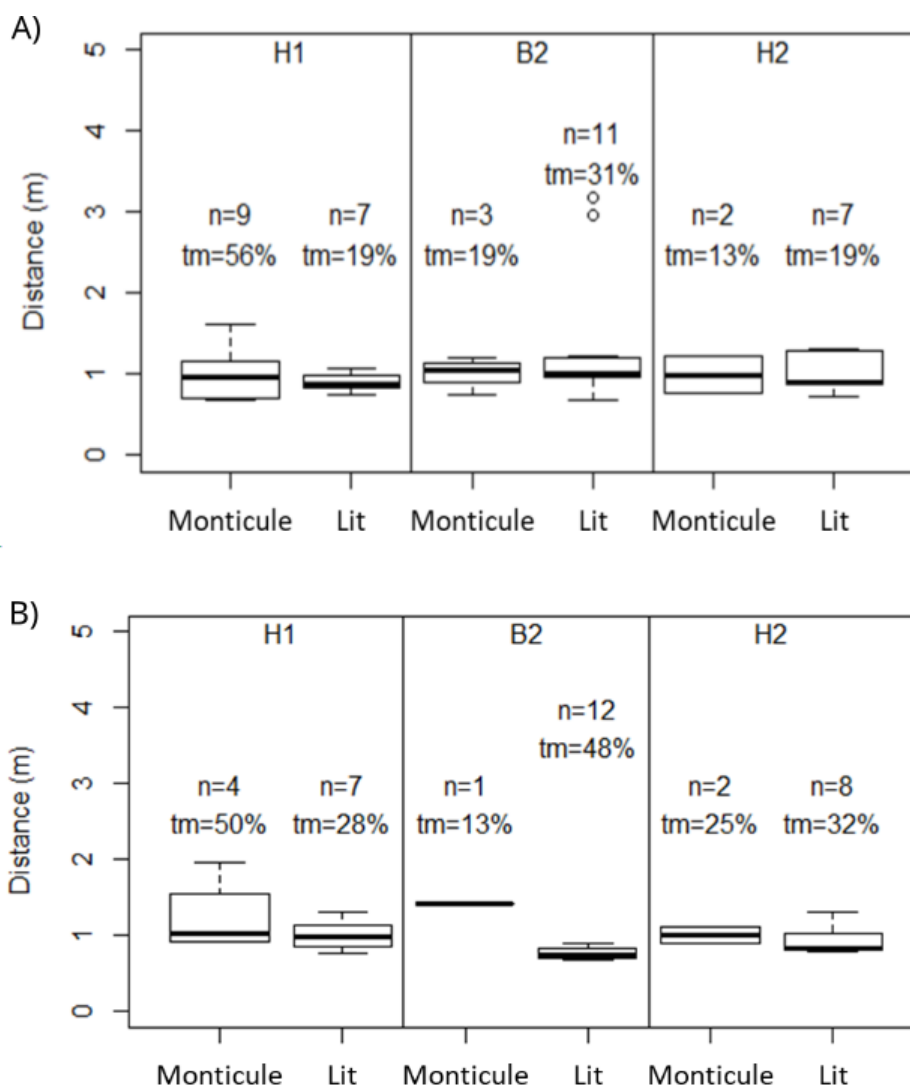


Figure 20 : Mobilité des sédiments sur la frayère F3 (A) et F4 (B). La mobilité des sédiments est mesurée sur le monticule et aux alentours de la frayère (Lit) pour 3 observations (H1, B2, H2). Pour chaque observation, le nombre d'individu est donné (n) ainsi que le taux de mobilité (tm).

3.2 Évolution de la micro-topographie du lit

3.2.1 A l'échelle du tronçon (Bois d'Ardenne)

Globalement la topographie du lit au droit du site de Bois d'Ardenne est peu variée quelles que soit la période considérée. Les changements topographiques n'interviennent que localement. Il ressort néanmoins que les secteurs d'érosion sont le plus souvent positionnés à moins de 5 mètres en amont de secteurs d'accumulation (Figure 21).

Rôle des espèces ingénieuses

Pendant les saisons de reproduction B1 et B2, le lit a montré une forte stabilité topographique. Durant B1, seule une superficie de 10,6 m² (1,4% de la superficie du tronçon étudié) enregistre des modifications significatives et ces surfaces atteignent 24,15 m² (3,2% de la superficie du tronçon) durant B2. Les changements détectés durant B1 correspondent majoritairement à une érosion très localisée (54% des surfaces de changements détectés). L'amplitude verticale de ces changements atteint un maximum de 0,14 m sur des surfaces érodées et 0,17 m sur les surfaces d'accumulation. Durant la période B2, l'érosion du lit domine également en représentant 60% des changements détectés. L'érosion et l'accumulation sont très légèrement plus importants durant B2 pouvant atteindre jusqu'à 0,17 m de hauteur.

Lors de la période de hautes eaux (H1), le lit du tronçon du Bois d'Ardenne a enregistré les changements les plus importants. La superficie totale concernée par des changements est de 53,4 m², soit 7% de la superficie totale du tronçon étudié. La superficie concernée par l'érosion du lit représente 67% de la superficie globale des changements détectée sur le tronçon. L'érosion du lit peut atteindre jusqu'à 0,15 m de hauteur tandis que l'accumulation, qui représente 33% de la superficie globale des changements, peut atteindre au maximum une hauteur de 0,17 m.

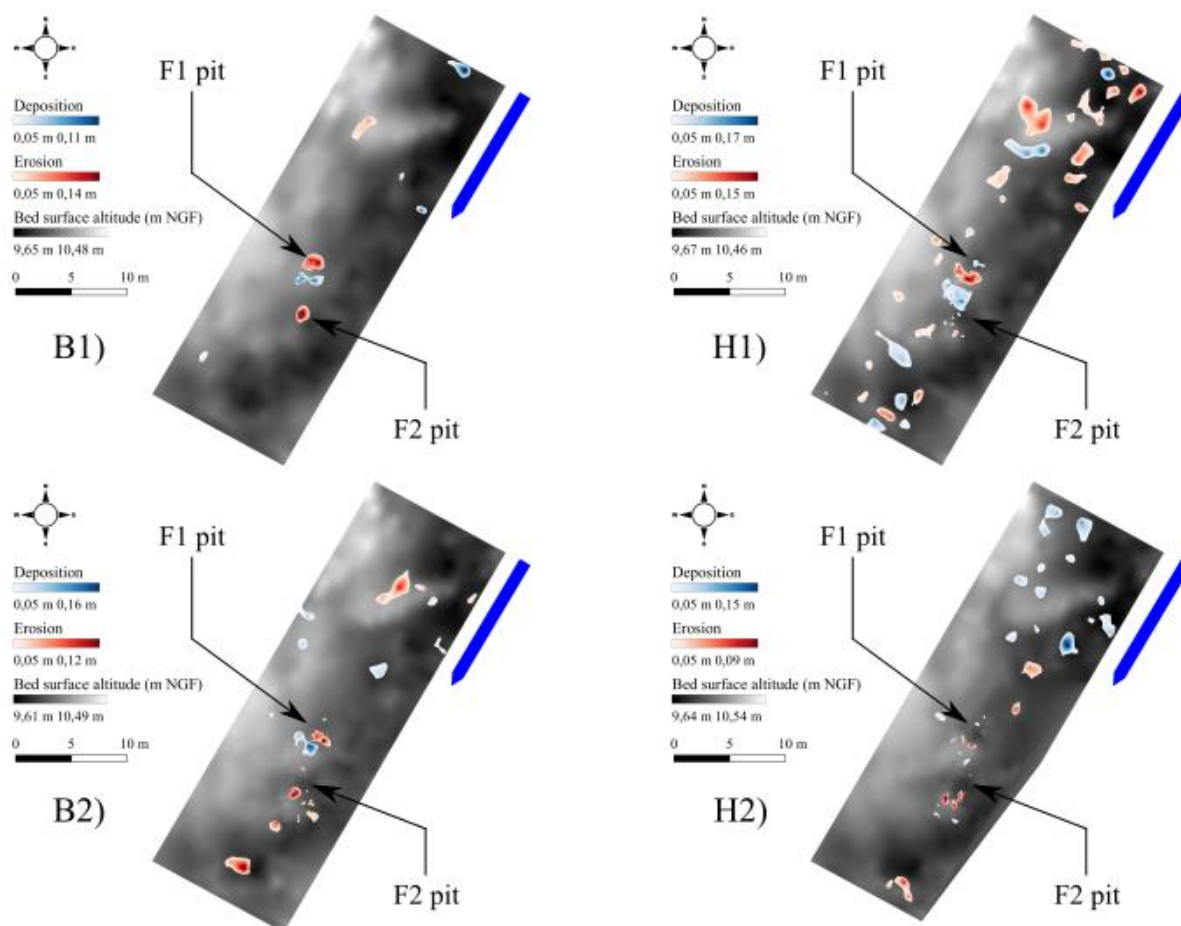


Figure 21 : Variation topographique du fond du lit durant les périodes de reproduction (B1, B2) et les périodes de hautes eaux hivernales (H1 et H2)

Durant la période H2, la superficie totale de changements détectés est de 23,5 m², soit 3,1% de la superficie totale du tronçon étudié. La superficie accumulée est cette fois-ci majoritaire avec une part de 67% dans la superficie totale des changements détectés. La hauteur maximum pour l'accumulation est de 0,15 m et de 0,17 m pour l'érosion.

3.2.2 A l'échelle des frayères (site de Bois d'Ardennes et de Bateau)

A l'échelle des frayères, les observations réalisées montrent que le lit est morphologiquement dynamique. Quel que soit le site et la période considérés des modifications topographiques supérieures aux marges d'erreur ont été enregistrées. Ces modifications sont globalement plus importantes en termes de surface moyenne (BA : 0,73 m² ; BT : 0,16 m²) et d'amplitude maximum moyenne (BA : 0,11 m² ; BT : 0,09 m²) sur le site du Bois d'Ardennes (Figure 22) que sur celui du Bateau (Figure 23). Elles interviennent au droit des frayères identifiées au début de l'étude (F1, F2) ou à leur proximité immédiate (F3). Seul le secteur de la frayère F4 n'a connu que de très faibles variations.

Les processus d'accumulation et d'érosion, lorsqu'ils sont enregistrés, présentent des amplitudes comparables. Néanmoins, sur l'ensemble des sites, les processus d'érosion sont les plus présents d'un point de vue surfacique mais aussi temporel car ils sont visibles quelle que soit la période considérée. Sur les frayères du Bois d'Ardennes l'érosion représente 54% des surfaces mobilisées alors que pour les frayères du Bateau les surfaces érodées représentent 46% des surfaces mobilisées.

Nous observons une grande variabilité saisonnière dans la réalisation de ces processus :

- Durant les périodes de reproduction B1 et B2, ces érosions ont lieu en amont des zones de frai (sauf sur F2 durant B2). Au droit des frayères F1, F3 et de façon plus nuancée F4, ces érosions sont accompagnées de zones d'accumulation directement en aval. La distance moyenne entre creux et monticule est de 0,28 m.
- Durant les périodes H1 et H2, les processus sont spatialement inversés. La partie amont des frayères est plutôt dominée par des processus d'accumulation quand en aval les érosions du lit dominant. Ceci est particulièrement visible sur les frayères du Bois d'Ardennes (F1 et F2) et sur F3 durant la période H1.

Rôle des espèces ingénieuses

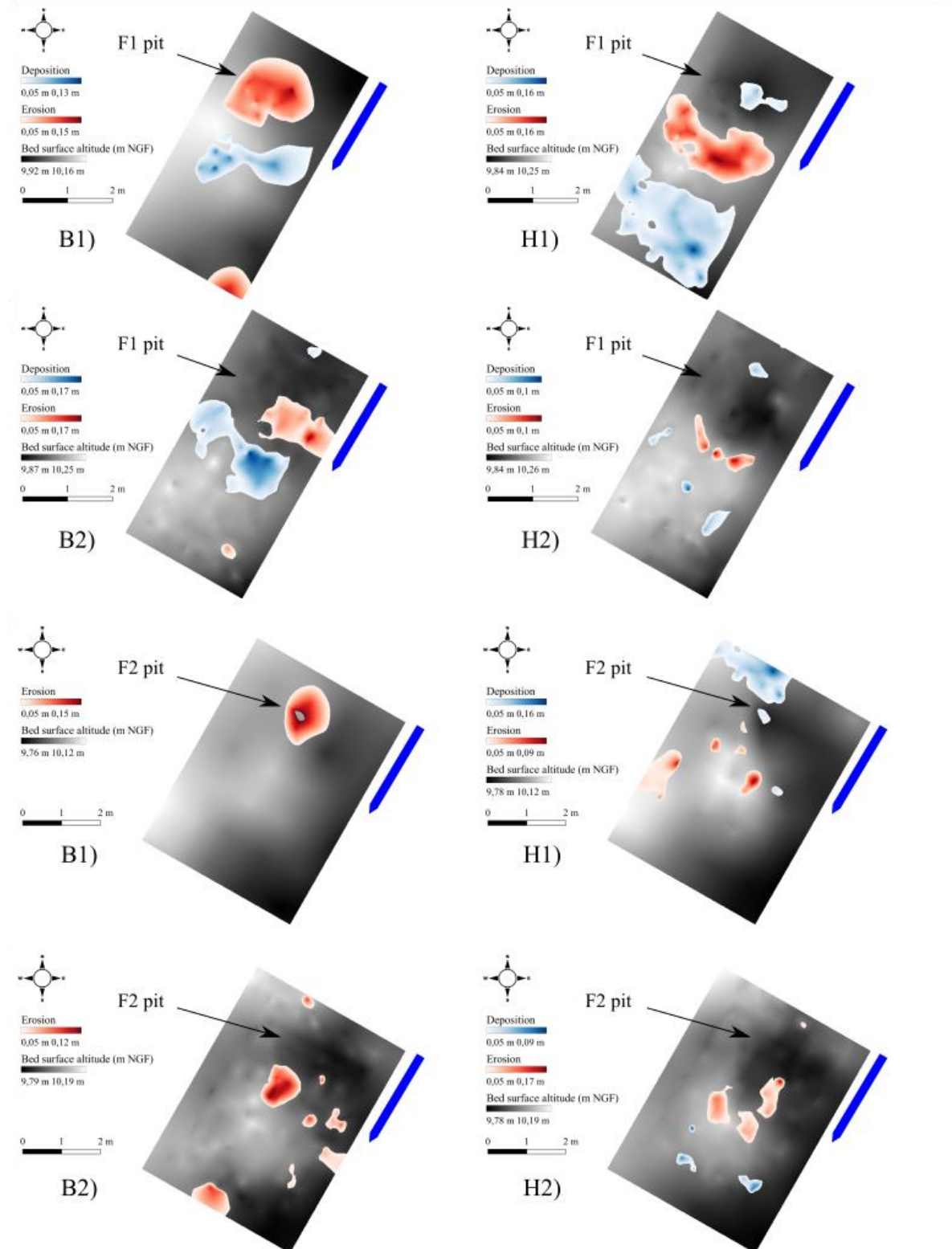


Figure 22 : Évolution morphologique du lit au droit des frayères F1 et F2 sur le site du Bois d'Ardennes

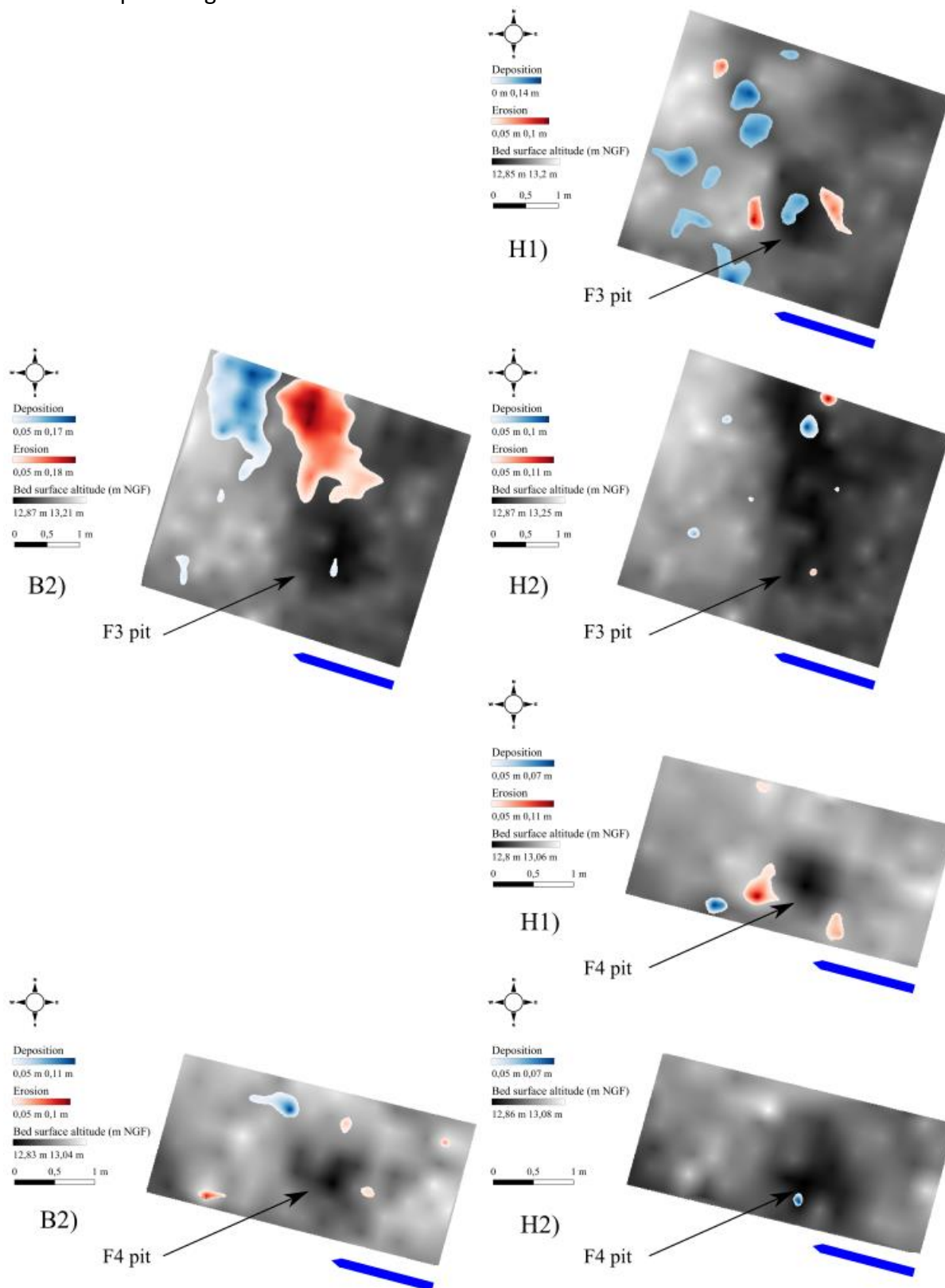


Figure 23 : Évolution morphologique du lit au droit des frayères F3 et F4 sur le site de Bateau.

La réalisation de profils longitudinaux nous permet de mieux appréhender le détail de ces changements. Ils interviennent sur les frayères F1 et F2 principalement durant les périodes de

Rôle des espèces ingénieuses

reproduction B1 et B2 (Figure 24). Ces modifications consistent alors en une accentuation du contraste topographique entre les points les plus bas et les points les plus élevés entre le début et la fin de chacune de ces périodes. Pendant B1 et B2, ce contraste est de l'ordre de 35 et 30cm sur F1 et de 30cm et 32cm sur F2. Cette accentuation de l'amplitude topographique est à chaque fois liée à un creusement en amont des monticules de l'ordre de 10 à 20cm et une accumulation d'une dizaine de cm directement en aval.

Durant la période H1, nous observons sur toutes les frayères, à des degrés divers, une diminution du contraste topographique lié à la fois à une faible accumulation dans les dépressions topographiques en amont des nids, de l'ordre de 7 cm en moyenne et à une translation des nids de quelques centimètres en direction de l'aval visible surtout durant les périodes H1 sur les frayères F1, F2 (Figure 24) et F3 (Figure 25). Cette translation correspond dans tous les cas à une érosion maximum de 17 cm de la face amont du lit accompagnée d'une accumulation de même amplitude (de l'ordre de 15 cm) en aval.

Durant la période H2, l'analyse des profils longitudinaux confirment que ces modifications sont quasiment nulles.

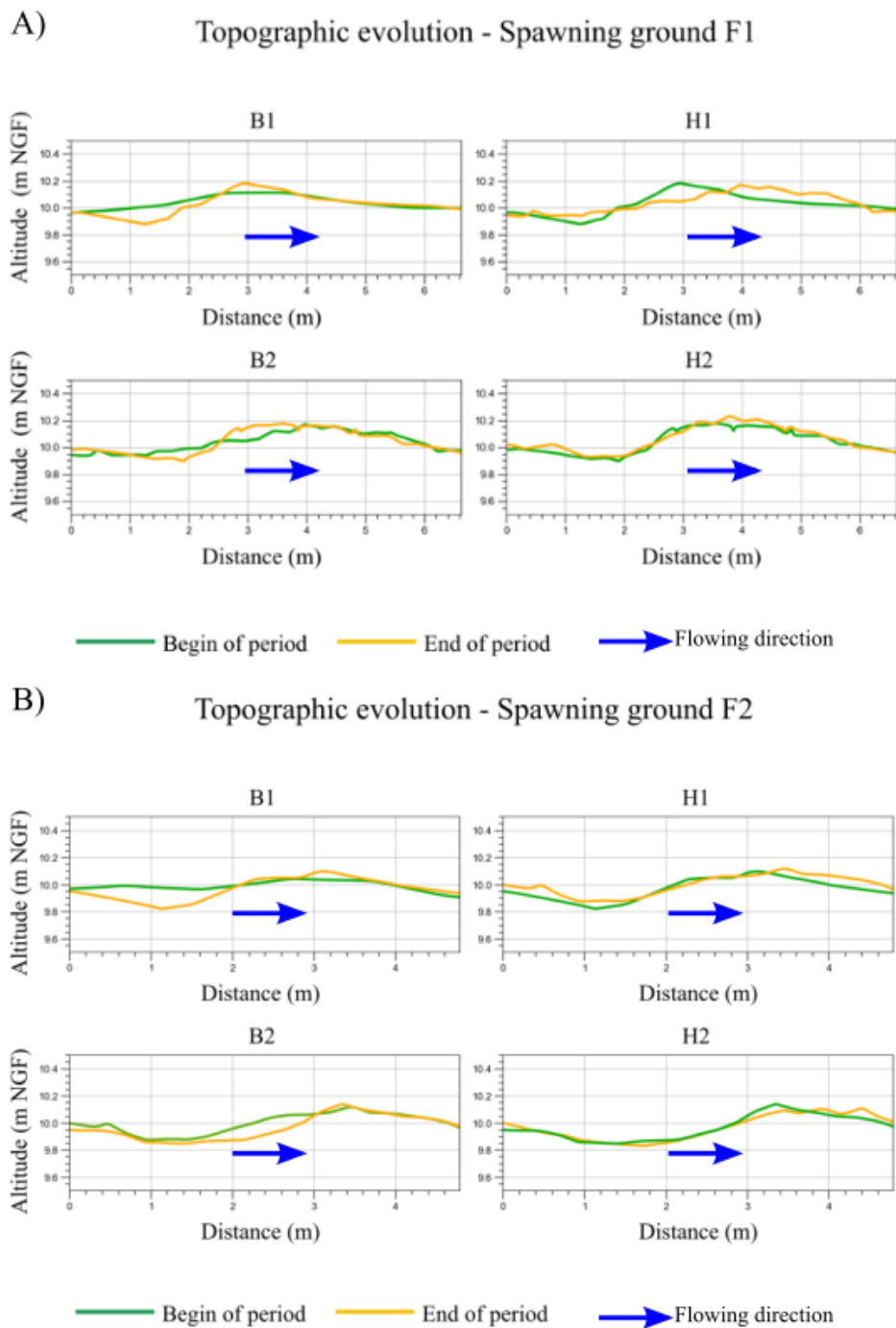
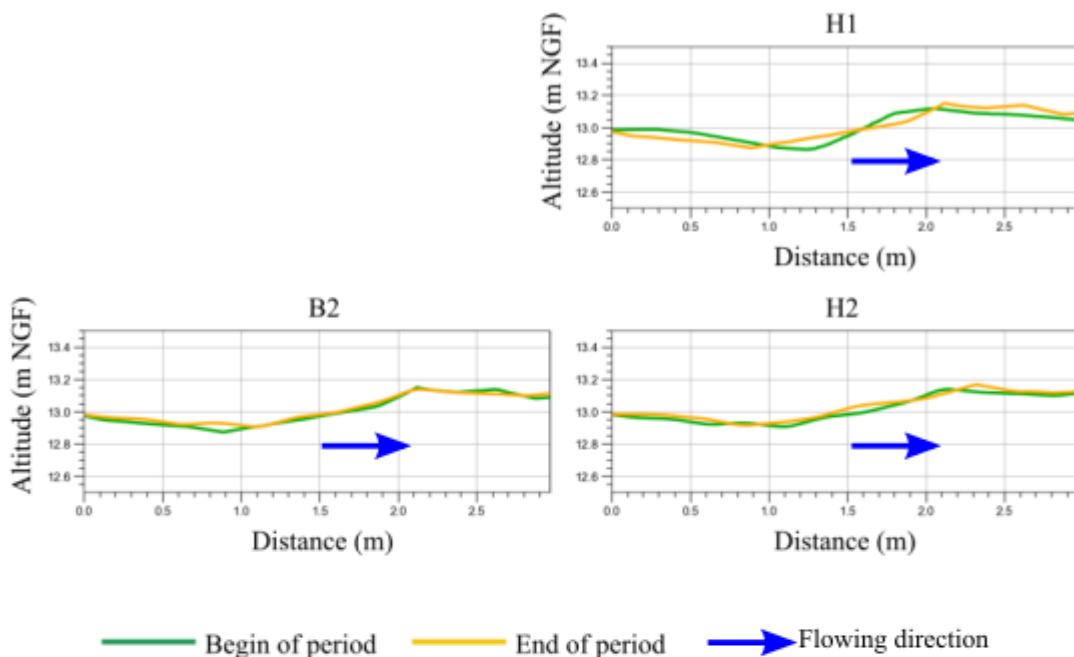


Figure 24 : Profil altimétrique longitudinale traversant le centre des frayères (A) F1 et B) F2 du site de Bois d’Ardennes. Le profil vert représente la surface au début de chaque période (B1,B2,H1,H2) et le jaune représente le profil altimétrique en fin de période.

A) Topographic evolution - Spawning ground F3



B) Topographic evolution - Spawning ground F4

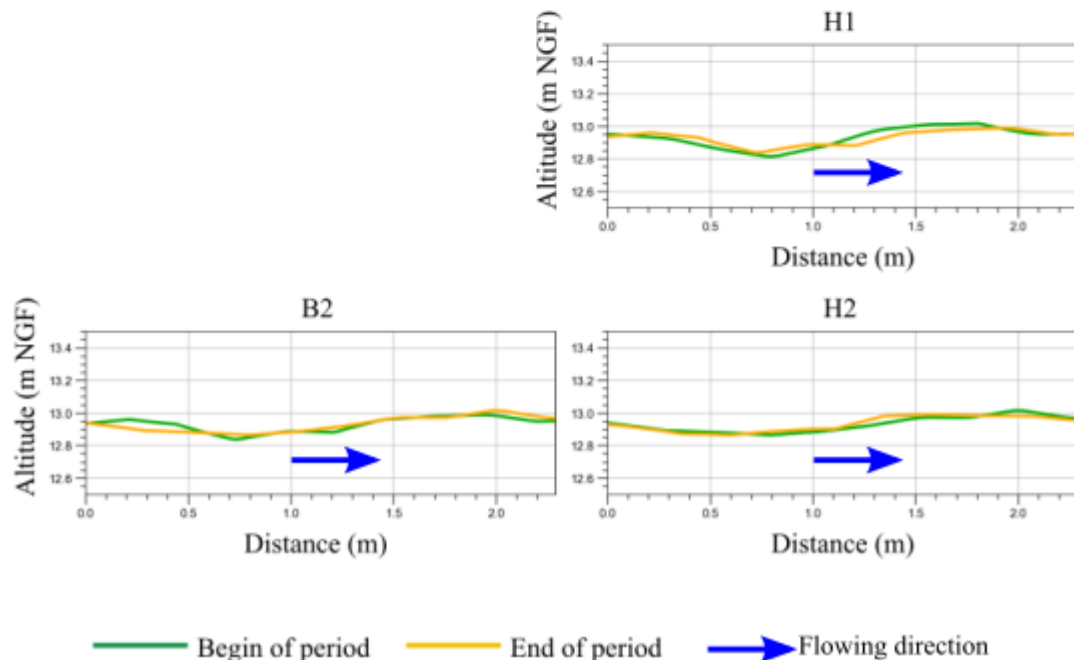


Figure 25 : Profil altimétrique longitudinale traversant le centre des frayères A) F3 et B) F4 du site de Bateau. Le profil vert représente la surface au début de chaque période (B1, B2, H1, H2) et le jaune représente le profil altimétrique en fin de période

4. Discussion et conclusions

4.1 Effets directs de la lamproie pendant la période de reproduction

4.1.1 Mobilité sédimentaire (taux de mobilité, distance)

Globalement, nos observations confirment que la Sélune est un cours d'eau présentant une dynamique sédimentaire assez faible. Quelle que soit la période considérée, la mobilité des sédiments composant le lit de la Sélune est faible (environ 2 m par an) et concerne les sédiments de taille médiane de 44 à 54 mm. Même dans des conditions de crue biennale (période H1) les distances parcourues par les traceurs sont restées inférieures à 20 mètres. Nous n'avons pas observé de processus de charriage, la mobilité des traceurs montrant une relation taille/distance assez forte pendant les crues et restant localisée sur certaines parties du lit, même lorsque les débits biennaux ont été atteints. Ces faibles mobilités sont associées à des taux de retour (ou taux de détection des traceurs) très élevés (entre 93% et 99%). L'hypothèse de traceurs qui auraient été mus sur des distances plus importantes et qui auraient donc quittés les secteurs de prospection est exclue. Nous n'avons pas observé de différences significatives entre la mobilité des sédiments sur le site de Virey (sans lamproie) et celui du Bois d'Ardennes (avec lamproie). Cette absence de contraste est probablement due aux différences de configurations locales (pente, géométrie des sections...) et au faible nombre de nids actifs identifiés sur les sites étudiés durant notre étude, qui ne permet pas de détecter l'effet de l'activité de reproduction à cette échelle.

Néanmoins nous avons pu mettre en évidence la contribution significative des lamproies à cette faible dynamique durant leur reproduction. Ainsi, nous avons observé qu'en absence totale de crue, une mobilité des sédiments était observée, de façon très localisée, durant la période B1 au droit de la frayère F1 (Figure 27) et durant la période B2 au droit de la frayère F3 (Figure 28). Cette mobilité, si elle est spatialement limitée à la zone remaniée par les lamproies, n'est pas anecdotique en termes d'amplitude dans la mesure où les distances alors parcourues sont de l'ordre de 1,7m.

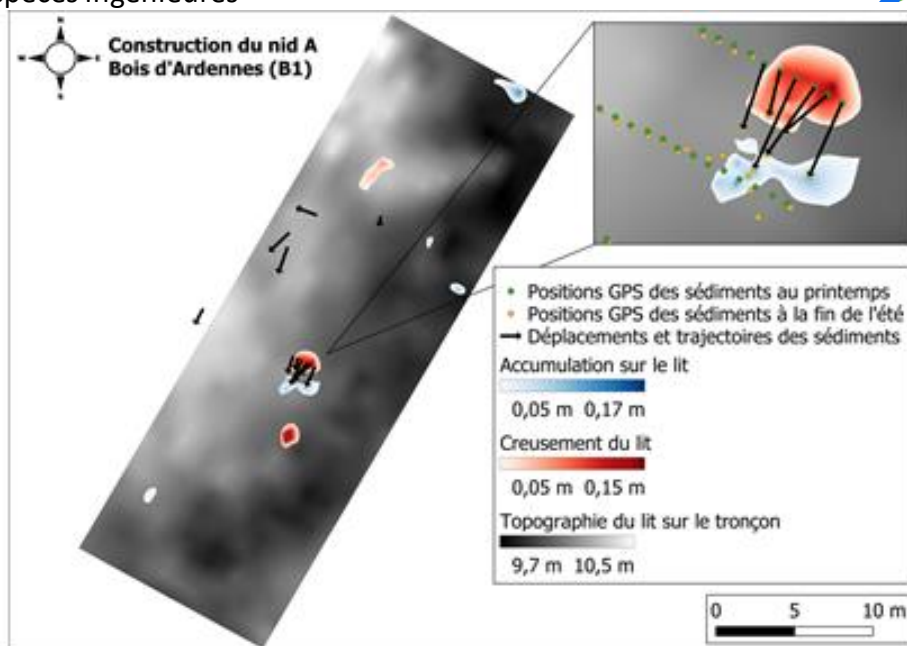


Figure 27 : Mobilité des traceurs sédimentaires et évolution topographique sur le site de bois d'Ardennes lors de la période B1 .

Le fait de découpler les suivis en période de reproduction / période de crue hivernale nous permet d'établir la complexité des relations entre l'activité des lamproies et la dynamique sédimentaire (Figure 28). Ainsi en période de hautes eaux hivernales, les particules mobilisées sur les secteurs de frayères concernent principalement les particules surexposées sur les dômes qui alimentent directement les secteurs d'accumulation en aval des nids. En revanche lors des périodes de reproduction les particules mobilisées réalisant les plus grands déplacements sont très probablement déplacées par les lamproies et proviennent du lit.

Bed morphology evolution and bed particle evolution on F3 spawning ground (Bateau station)

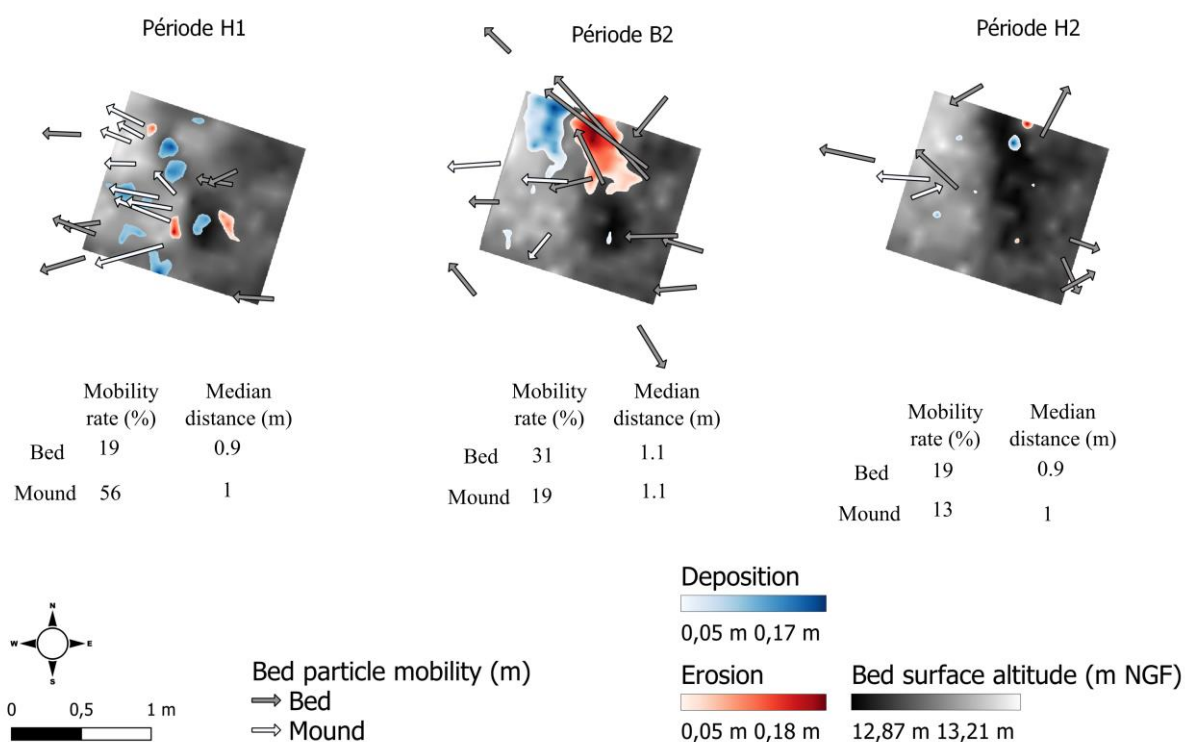


Figure 28 : Mobilité sédimentaire et évolution topographique du lit sur la frayère F3 durant les périodes H1, B2 et H2.

La mobilité sédimentaire liée à la reproduction de la lamproie n'a pas pu être confirmée sur le site du Bois d'Ardenne lors de la période de reproduction B2 durant laquelle la mobilité a été beaucoup moins localisée et les trajectoires opérées par les traceurs suivent des azimuts beaucoup plus variables ne correspondant ni au sens de l'écoulement ni à une logique de déplacement sédimentaire par les lamproies. Lors de cette période la localisation des traceurs a été réalisée uniquement depuis le signal émis par l'antenne, sans contrôle visuel comme cela a été possible durant B1 avant le développement d'un film biologique sur les traceurs. Ces éléments nous amènent à émettre l'hypothèse qu'une grande partie des mobilités observées durant B2 correspondent à des biais de localisation des traceurs. De plus la période B2 enregistre une crue courte (13h) mais intense (débit instantané supérieur au débit biennal). Ces deux éléments – biais de mesure et mobilisation sédimentaire par la crue – masquent probablement les effets de la reproduction.

Si la mobilité sédimentaire observée en période de basses eaux concerne moins de particules, elle est cependant équivalente, en termes de distance, à celle observée en période de hautes eaux lorsque les crues restent peu importantes comme durant H2 (0,86 Q_2). A cette période, nous supposons que les débits seuils de mise en mouvement n'ont pas été atteints. Ces conditions de non dépassement du débit seuil de mise en mouvement lors des périodes hivernales sont présentes sur 45% des hivers observés depuis 30 ans. Durant ces années particulières de plus faible hydrologie, il est ainsi fort probable que la mobilité sédimentaire générée par l'activité des lamproies soit équivalente à celle générée durant les périodes de hautes eaux. Ainsi, si l'effet des lamproies ne participe pas à générer des processus de forte

Rôle des espèces ingénieures

amplitude, la fréquence de ces processus est en revanche probablement plus importante que ceux gouvernés par le facteur hydraulique.

4.1.2 Morphologie du lit

Nos résultats nous permettent de souligner le rôle significatif de l'activité des lamproies dans la dynamique topographique du lit. Durant les périodes de reproduction, les lamproies construisent des nids soit *ex-nihilo*, soit sur des anciens nids. Nous avons pu mesurer le phénomène d'érosion du lit sur la partie amont du nid (dépression) et l'accumulation de sédiments grossiers (monticule) en aval. Ces constructions ont vocation à protéger les œufs produit lors de l'accouplement des individus qui a lieu dans la dépression. Les œufs – tout du moins une partie, des travaux ayant montré qu'une fraction importante pouvait être entraînée en aval (Smith and Marsden 2009) hors du nid et ont alors une faible chance de survie – sont entraînés dans les interstices du monticule et y sont piégés, à l'abri des prédateurs, et s'y développent.

Les évolutions topographiques mesurées durant notre étude montrent qu'à l'échelle du tronçon, le lit est morphologiquement peu actif (15 à 20 cm d'amplitude maximum sur moins de 10% des surfaces étudiées) ce qui est cohérent avec nos observations sur la dynamique sédimentaire. Durant les périodes de reproduction, en l'absence de crues, cette activité morphologique est présente dans des amplitudes comparables à celles observées en période de crue (érosion et accumulation entre 10 et 20cm) et localisée au droit des nids de lamproie. En retour, durant les périodes de crues, ce sont également les zones de frayères (actives durant la période précédente ou plus anciennes) qui enregistrent la plupart des modifications topographiques observées sur le tronçon, dans le sens d'un lissage partiel du lit : les dépressions en amont se comblent et les monticules sont érodés. Les sédiments mobilisés sur le nid parcourent des distances faibles (1m environ) ce qui entraîne plus une translation du dôme toujours visible dans la topographie globale qu'un lissage complet. Il est à noter que les modifications topographiques intervenues durant la période B2 ne sont pas plus importantes que durant B1 et le sens de ces modification (érosion en amont des nids et accumulation en aval) nous indique que la courte crue biennale enregistrée durant cette période n'a pas contribué à modifier visiblement la topographie du lit (en tous cas moins que le facteur lamproie.)

Les suivis topographiques à haute résolution spatiale permettent de mieux identifier et quantifier la nature de ces changements et leur saisonnalité très marquée. Ils sont néanmoins très coûteux en temps d'acquisition. D'autres méthodes comme la bathymétrie par échosondeur bi-fréquence seraient probablement complémentaires.

4.1.3 Granulométrie

L'activité des lamproies en période de reproduction participe à diversifier la granulométrie du lit. Nous avons en effet observé que la granulométrie du lit était beaucoup plus hétérométrique en fin de période de reproduction (B2) qu'en fin de période de hautes eaux (H2) alors même que les débits enregistrés lors de H2 n'ont pas montré fortes crues. Cette hétérométrie à la fin de B2 est observable sur tous les sites et correspond à la mise en place de faciès sableux systématiquement en amont des nids, dans les dépressions creusées par les

Rôle des espèces ingénieuses

lamproies. L'homométrie observée à la fin de H2 laisse supposer que la situation était identique en fin de H1, les crues ayant été plus fréquentes et plus fortes durant cette période.

Ainsi, en déplaçant les sédiments grossiers à la surface du lit, les lamproies contribuent à exposer la matrice sableuse présente en subsurface durant leur phase de reproduction. Le courant diminuant au fond de la dépression, il est aussi probable qu'une fraction du sable dérivant s'y retrouve piégé. Lors de l'acte de reproduction, le couple frétille vivement juste au-dessus de la dépression ce qui a pour conséquence la remise en suspension du sable en même temps que la femelle expulse ses gamètes et le mâle sa laitance. Les ovules sont très rapidement fécondés, et, très collants, ils adhèrent alors au sable qui sert de lest contribuant à limiter la dérive des œufs avec le courant et favorise leur pénétration puis leur maintien dans le monticule de sédiments grossiers où ils pourront se développer à l'abri pendant une quinzaine de jours. La survie des œufs dans la frayère est très élevée (90% selon Manion 1968; Manion and Hanson 1980 cités dans Docker 2019) mais une fraction importante peut être expulsée du nid et se déposer ailleurs ou leur taux de survie est alors très faible (Smith and Marsden 2009).

Lors des automnes et hivers suivants, cette matrice sableuse est soit recouverte à nouveau par les apports de sédiments grossiers soit exportée/dispersée en aval contribuant à rendre le lit totalement graveleux et à rendre visible plus de blocs dans le chenal.

Étant donné la stabilité topographique observée sur le tronçon de Bois d'Ardenes en dehors des nids lors des périodes H1 et H2, nous pouvons supposer que le chenal n'a pas, hormis lors de crues exceptionnelles, la capacité hydraulique pour réaliser de tels remaniements verticaux du substrat. Ces remaniements sont importants pour la dynamique écologique du cours d'eau et bénéficient aux autres espèces, en créant de la diversité d'habitats que ce soit en terme granulométrique qu'hydrologique. Hogg et al. (2014) et Dhamelinourt et al. (2022) ont montré que la diversité de macro-invertébrés benthiques bénéficiait de la diversité des habitats produits par l'activité des lamproies. Par ailleurs, l'action des lamproies tend à réduire le colmatage, problème récurrent dans les rivières anthropisées soumises à des pollutions organiques ou inorganiques, en remettant en suspension les particules les plus fines insérées dans la matrice. Bien que cela n'ait pas été démontré, l'effet positif sur les habitats d'autres espèces comme les salmonidés frayant dans des habitats similaires voir identiques est très probable.

4.2 Effets indirects liés la présence des nids

4.2.1 Mobilité des sédiments (taux de mobilité, distance)

Les lamproies modifient la topographie en construisant des nids du lit et cela affecte la mobilité des sédiments en réponse à l'hydrologie. En particulier, les sédiments accumulés sur le monticule du nid sont surexposés au courant et sont donc plus mobiles. Sur le site du Bateau, les taux de mobilité des traceurs déposés sur les dômes des nids F3 et F4 lors de la période H1 sont plus forts (56% et 50%) que ceux des traceurs déposés sur le lit hors nid (19 et 28%). Cette observation ne se confirme pas durant la période H2 car les débits n'ont pas suffisamment dépassé les débits seuils de mise en mouvement pour pouvoir tirer de conclusion. Il convient également de rester prudent sur ces conclusions étant donné le faible nombre de particule concerné.

Rôle des espèces ingénieuses

L'influence de la surexposition des sédiments déposés sur les nids par les lamproies sur les distances parcourues par les traceurs sont plus difficiles à évaluer notamment du fait du faible nombre de traceurs mobiles. Un test complémentaire a été réalisé sur une frayère en amont du site de Bois d'Ardenne durant la période H1 afin de tester l'effet de la présence des nids sur le contrôle des distances réalisées par les sédiments lors de crues (Figure 29).

Quelle que soit la ligne d'injection des traceurs et donc la distance au dôme, nous observons que les sédiments arrêtent leur trajet au niveau de la même zone d'accumulation en aval du monticule du nid de lamproie. Les sédiments, une fois le monticule dépassé se déposent juste en aval au niveau d'une zone de plus faible hydraulicité et de décélération générées par le monticule. Ces résultats sont cohérents avec l'hypothèse d'un contrôle du déplacement des sédiments par la topographie des nids et la surexposition des particules.

Étant donné que les résultats des suivis topographiques montrent que la modification topographique d'une frayère reste visible tant que certaines conditions hydrologiques ne sont pas atteintes, cet effet peut potentiellement durer plusieurs hivers sans que la frayère ne soit nécessairement réutilisée par les lamproies.

Des tests complémentaires menés lors de la période H1 sur une frayère en amont du secteur du Bois d'Ardenne montre enfin que le relief généré par le nid participe à contrôler la distance de déplacement des particules mobilisées lors des crues (Figure 29). Nous avons ainsi observé durant cette crue que quelle que soit la ligne d'injection des traceurs (et donc la distance initiale au nid), les particules mobilisées se regroupaient majoritairement juste en aval du nid. Une fois le monticule dépassé, une zone d'abris où les contraintes hydrauliques deviennent très faibles favorise le dépôt des traceurs. Cette observation est corrélée avec l'enregistrement d'une accumulation sur la même zone. Cette zone d'accumulation est ainsi alimentée non seulement par les particules surexposées sur le nid mais aussi par les sédiments provenant de l'amont. L'effet de contrôle exercé par le nid sur la mobilité sédimentaire concerne alors jusqu'à 2,5m de linéaire en amont du dôme.

Rôle des espèces ingénieuses

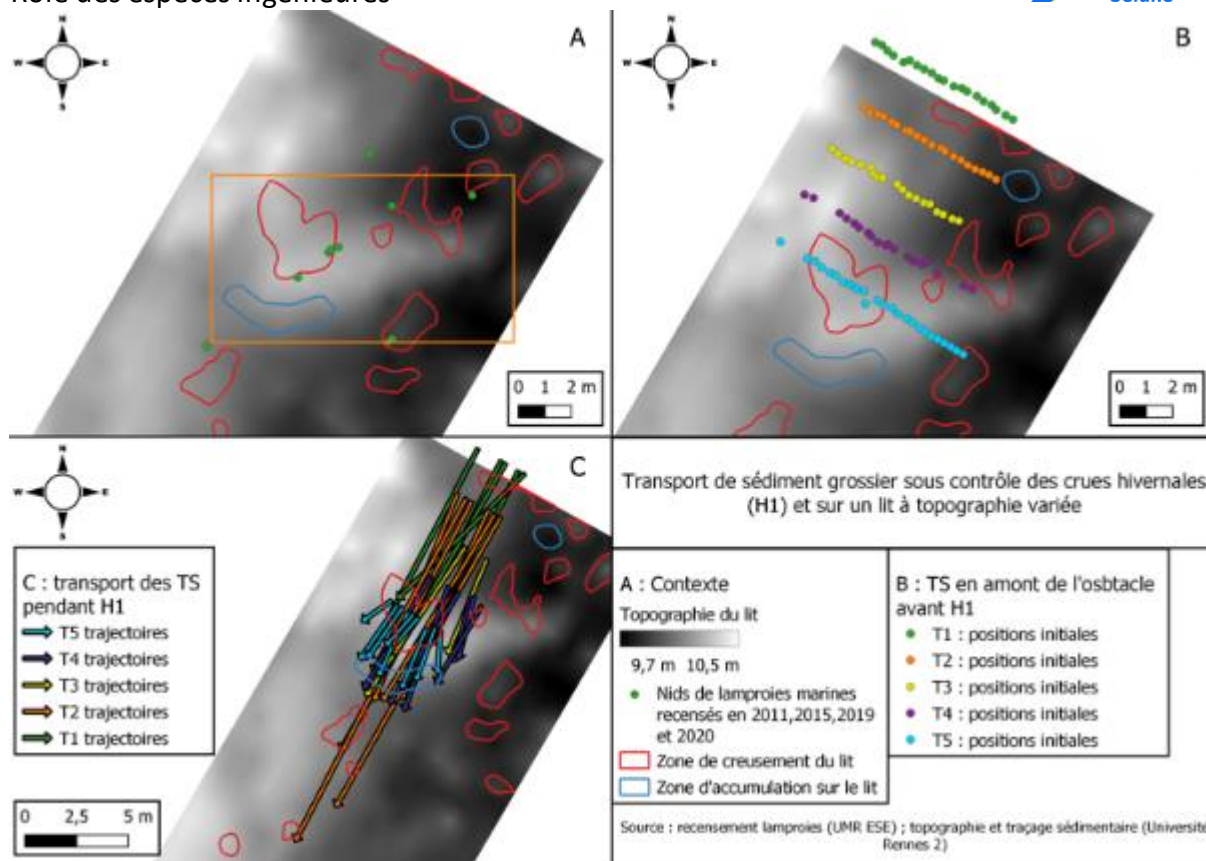


Figure 29 : Évolution topographique du fond du lit et déplacement des sédiments tracés lors de la période H1 sur une frayère à l'amont du site de Bois d'Ardennes.

4.2.2 Récurrence des lamproies (rétroaction positive)

Nos résultats montrent que les nids ne sont pas remaniés totalement lors des crues (même biennale) et leur effet peut donc perdurer plus d'une année.

Les lamproies déplacent globalement les sédiments d'amont en aval sur des distances de 1,4m en moyenne. Des déplacements vers l'amont peuvent être constatés lors de l'observation directe des lamproies, mais la faible proportion de sédiments équipés de traceurs ne permet pas de le mesurer ici.

Le cas de la frayère F1 (Bois d'Ardennes) illustre que les frayères peuvent être reprises d'une année à l'autre, mais aucune mention de ce phénomène n'est trouvée dans la littérature, probablement parce que seules des approches de microtopographie dGPS comme celle utilisée ici permet d'avoir la précision nécessaire. Les frayères F3 et F4 n'ont pas été reprises (absence de modification topographique allant dans ce sens) mais nous observons la construction d'une nouvelle frayère à proximité immédiate de F3. Toutefois, il est délicat d'attribuer avec certitude la récurrence de la présence de lamproies à un effet rétroactif des activités passées ou à un simple effet des caractéristiques de l'habitat (hydrologie, nature du substrat), les deux étant intimement liés. Les lamproies construisent préférentiellement leur frayère en queue de faciès plat, typiquement en amont de radier et ce sont donc ces habitats qui sont favorisés, entraînant une proximité entre les frayères d'une année à une autre (Figure

Rôle des espèces ingénieuses

30). Le suivi des habitats néo-colonisés dans la partie amont du bassin versant permettrait certainement d'avancer sur ce point (c'était d'ailleurs un des objectifs initiaux du projet).

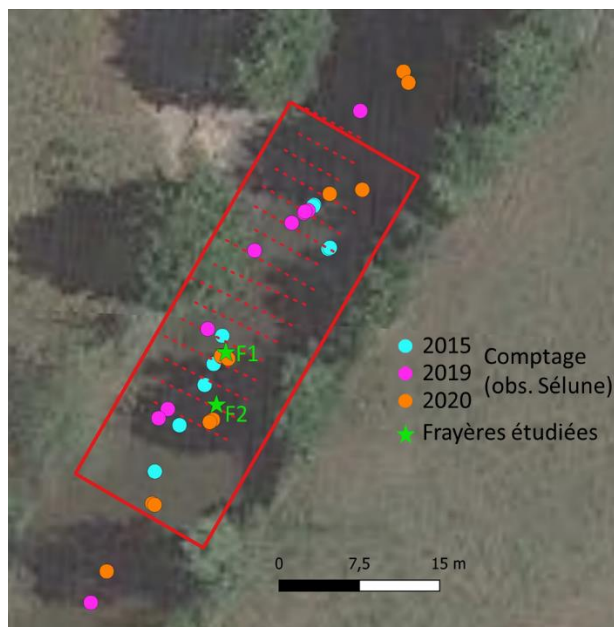


Figure 30 : Géolocalisation des frayères dénombrées dans le cadre de l'observatoire Sélune (NB : la forte turbidité de l'eau en 2021 n'a pas permis d'effectuer le comptage) et position des deux frayères de 2020 suivies en 2020 et 2021 durant cette étude. NB : les positions relevées dans le cadre de l'observatoire sont moins précises que dans le cadre de cette étude, l'erreur étant probablement d'ordre supra métrique).

4.3 Contribution des lamproies à la dynamique morpho-sédimentaire

L'influence directe et indirecte de l'activité des lamproies sur la morphologie du lit et la mobilité sédimentaire que nous démontrons dans le cadre de cette étude ne participe pas de processus ni de très forte amplitude ni sur des surfaces importantes. L'activité morphologique des lamproies nous semble néanmoins un facteur important de la dynamique globale des lits fluviaux.

La localisation des modifications topographiques du lit lors des périodes H1 et H2 montre une relation spatiale forte entre ces modifications et les zones modifiées par les lamproies. Ainsi, l'activité des lamproies contribue à générer directement des formes mais contrôle également la dynamique morphologique au moment des crues. Étant donné la stabilité topographique en dehors des secteurs de nid, il apparaît que l'activité des lamproies accentue les dynamiques morphologiques liées aux crues.

Même s'ils sont de faible amplitude, les processus observés (modification de la topographie du lit, déplacement des sédiments) ont une amplitude similaire voire supérieure à ceux observés lors de la période hautes eaux H2. Mais contrairement aux processus liés au fonctionnement hydrologique, ces processus interviennent systématiquement chaque printemps alors que les crues morphogènes, comme on peut l'observer sur les chroniques de débit, ne sont pas de fréquence annuelle mais plutôt bisannuelle.

Nous observons également que l'action des crues morphogènes a un effet contraire sur la diversité des formes générées par la lamproie en homogénéisant partiellement les conditions morphologique et granulométrique du lit. Ces modifications topographiques ne sont pas totalement atténuées lors des périodes de crue. Leurs effets indirectes (surexposition des particules, diversification de la topographie) peuvent ainsi perdurer plusieurs années selon l'hydrologie.

Rôle des espèces ingénieuses

Sur la période 2015-2020, l'abondance de frayères sur le secteur englobant les sites de bois d'Ardenne et de Pont du Bateau (secteur compris entre le Pont de Signy et le Pont du Bateau) a pu être estimée par des comptages visuels en fin de période de reproduction dans le cadre de l'observatoire Sélune (INRAE, U3E ; Tableau 2). Ces effectifs estimés sur un linéaire assez réduit de 2,8km sont non négligeables si on compare à d'autres rivières (ex : Scorff, Lasne et al. 2015). Ainsi, si la contribution individuelle à la dynamique morpho sédimentaires est relativement faible (mais significative), à l'échelle de l'ensemble des frayères, la contribution est forte. L'absence de pavage (le sertissage des particules dans le lit et qui est théoriquement attendu dans un tel contexte hydrologique) observé sur la Sélune en aval des barrages est ainsi probablement due à l'action des lamproies.

Tableau 2 : Effectifs de frayères dénombrées dans le cadre de l'observatoire Sélune sur le secteur Pont de Signy-Pont du Bateau (env. 2,8km).

Année	Nombre de frayères
2015	374
2019	178
2020	440
2021	non réalisé (forte turbidité)

4.4 Limites méthodologiques

En travaillant simultanément à plusieurs échelles spatiales (frayères, tronçon) et temporelles (période de frai, période de crue), ce travail a montré que le rôle biogéomorphologique des lamproies marine est loin d'être insignifiant dans de petits systèmes fluviaux tel que celui de la Sélune. Cependant, des limites sont posées quant à la généralisation des observations à partir de ces résultats.

D'un point de vue méthodologique, les processus ciblés (reproduction, mobilité sédimentaire et morphogenèse du lit) peuvent être proches des marges d'erreur et/ou affectés par des conditions environnementales particulières. Par exemple, les particules équipées de PIT-tags sont détectées avec une précision estimée à 66 cm alors que beaucoup des sédiments déplacés par les lamproies le sont sur une distance entre 1 et 2 m. Les évolutions morphologiques enregistrées, qui sont proches de la dizaine de cm sont également affectées par la marge d'erreur verticale de 5 cm dans les mesures topographiques au tachéomètre. Cette proximité entre les valeurs mesurées et les marges d'erreur rendent nos résultats parfois difficilement interprétables. C'est en croisant plusieurs approches (temporelles, spatiales) et indicateurs (mobilité des sédiments, topographie) que nous parvenons malgré tout à fournir des résultats significatifs

De plus, la probabilité que les lamproies saisissent des sédiments marqués était aléatoire et nous ne pouvions compenser cela par une multiplication trop importante des traceurs sans augmenter le risque de collision dans les signaux de détection de ces derniers. Cette limitation

Rôle des espèces ingénieures

méthodologique explique le faible nombre de traceurs effectivement mobilisés observés dans le cadre de cette étude qui ne permet pas de réaliser de traitements statistiques robustes.

Enfin, étant donné la densité moyenne de lamproie marine sur la Sélune, il nous a été difficile de cibler précisément les secteurs sur lesquels de l'activité biologique allait être observée durant notre étude. Nous ne sommes pas parvenus à travailler sur les secteurs les plus densément fréquentés par cette espèce. Des résultats encore plus démonstratifs auraient pu être collectés sur d'autres sites en déplaçant notre protocole de quelques mètres. Nos résultats ne sont donc pas représentatifs des secteurs de plus forte densité de lamproie marine de la Sélune.

5. Conclusions

Les processus morphologiques observés sur ce cours d'eau sont globalement de faible amplitude, que ce soit la mobilité sédimentaire ou encore les ajustements topographiques même lors de crues considérées habituellement comme morphogènes (Q2). Ces observations sont cohérentes avec la faible énergie spécifique de la Sélune ($< 25W.m^{-2}$) et permettent de souligner la contribution des espèces ingénieures dans ces contextes de faible énergie.

Les résultats produits dans le cadre de ce projet montrent ainsi que **la lamproie marine contribue significativement sur la Sélune aux processus morpho-sédimentaires dans le chenal :**

- en participant à la diversification des micro-formes fluviales
- en remaniant verticalement le substrat
- en influençant la mobilité sédimentaire (en déplaçant les sédiments en dehors des périodes de crue et en favorisant la mise en mouvement des sédiments par leur sur-exposition sur les nids)

L'activité des lamproies est le seul facteur morphogène en dehors des périodes de crue et la présence de frayère participe à la diversification du substrat durant les périodes de basses eaux. Les formes générées par cette espèce participent à accentuer les dynamiques morphologiques pendant les crues : la mobilité sédimentaire observée au niveau des nids est plus importante que celle des sédiments en dehors des nids (par exemple 50 à 56% de taux mobilité sur les nids contre 19 à 28% sur le reste du lit) et les ajustements topographiques significatifs (supérieurs à nos marges d'erreur) interviennent pour l'essentiel au droit des zones de fraie.

Même s'ils sont de faible amplitude, **les processus d'origine biologique** observés (modification de la topographie du lit, déplacement des sédiments) **peuvent avoir une amplitude similaire voire supérieure à ceux observés lors des crues les plus modestes**. Les crues morphogènes ont un effet contraire sur la diversité des formes générées par la lamproie

Rôle des espèces ingénieures

en homogénéisant partiellement les conditions morphologiques et granulométriques du lit. Ces modifications topographiques ne sont pas totalement atténuées lors des périodes de crue de faible intensité. **L'effet indirect des frayères (surexposition des particules, diversification de la topographie) peut ainsi perdurer plusieurs années** selon l'hydrologie. De plus, la contribution des lamproies est assurée annuellement quand le retour des crues morphogènes n'est que biennuel ; voire encore moins fréquent sur certaines périodes pluri-annuelles.

La contribution individuelle liée à la création d'un nid de lamproie sur la dynamique morpho-sédimentaire est significative (supérieure à la marge d'erreur de nos mesures) mais demeure relativement faible à l'échelle du cours d'eau. Nous pouvons cependant raisonnablement envisager que ce que nous observons à l'échelle du nid soit directement et proportionnellement extrapolable à une échelle supérieure. Sur le secteur de 2.8km de long et d'une largeur moyenne de 10m où se situent les deux sites d'étude, 440 frayères ont été dénombrées en 2020 (source : Observatoire Sélune). Dans ce cas, si l'on considère une surface de nid de 1m², c'est approximativement 1.6% de la surface totale des habitats aquatiques qui est directement modifié par les lamproies, et cela n'inclue pas les effets indirects, et les effets à plus long terme (persistance des nids d'une année à l'autre). **La lamproie marine peut ainsi être considérée comme un agent actif contribuant à la diversification des habitats aquatiques**, et, comme cela a pu être montré par ailleurs, à la biodiversité aquatique (Dhamelincourt et al. 2022). Par exemple, l'absence de pavage (le sertissage des particules dans le lit et qui est théoriquement attendu sur un tronçon en déficit sédimentaire) observé sur la Sélune en aval des barrages est ainsi probablement due à l'action des lamproies.

6. Appui aux politiques publiques

D'un point de vue opérationnel, favoriser la recolonisation des secteurs amont serait un moyen intéressant de restaurer passivement des habitats aquatiques et des formes fluviales dynamiques diversifiées. Les premières prospections post-arasement menées été 2022 en amont des anciens barrages dans le cadre de l'Observatoire Sélune ont révélé la présence de frayères de lamproies marines en abondance sur le cours principal de la Sélune aux alentours de Saint Hilaire du Harcouët et en encore en amont, y compris sur des affluents comme la Cance. Un total de 130 frayères a été ainsi localisé, mais l'ensemble des habitats potentiels n'ayant pas été prospecté, ce chiffre est un minimum. L'intensité de l'attraction des lamproies étant en partie liée à la concentration en phéromones émises par les larves issues des reproductions précédentes (Wagner et al. 2009), on s'attend donc à une rétroaction positive sur la colonisation du bassin versant de la Sélune dans les prochaines années.

Cependant, à l'échelle nationale, les populations de lamproies marines sont globalement en déclin et leur rôle dans le fonctionnement de l'écosystème Sélune pourrait être remis en question. Evaluer les pressions qui pèsent sur les lamproies marines dans la Sélune et identifier des leviers d'action pour les protéger reste donc plus que jamais nécessaire. Il s'agit 1- de garantir la présence, la qualité et l'accessibilité des habitats essentiels pour l'ensemble des phases du cycle biologique se déroulant en eau douce (zones de reproduction et zones de croissance juvénile) et 2- de veiller à ce que des prédateurs comme silure, dont les

Rôle des espèces ingénieuses

signalements dans la partie basse de la Sélune se multiplient depuis l'arasement des barrages, ne limitent pas la population comme cela a été suggéré par ailleurs (Bouletreau 2020).

Ce projet a permis d'initier une dynamique collective réellement interdisciplinaire qui n'existait pas jusque-là sur la place Rennaise, ce qui s'est concrétisée par deux autres projets entre les UMR DECOD et LETG ainsi que le pôle de Recherche et Développement [MIAME](#).

Il a fait l'objet de valorisation diverses :

- Communication orale (Colloque international IS River 2022, Lyon, France)
- Communication auprès de gestionnaires (atelier avril 2023, Rencontre « Restauration de la continuité écologique de la Sélune » les 14-15 septembre 2023 organisée par l'ATBVB)
- Un article dans une revue scientifique spécialisée (en cours)

7. Table des illustrations

Figure 1 : Mobilisation des sédiments grossiers par les lamproies (A) pour la construction de leur nids composé d'une dépression à l'amont et d'un monticule de particules grossières à l'aval (B).....	5
Figure 2 : Mécanismes d'action de la lamproie sur le substrat évalué dans le cadre de cette étude.	7
Figure 3 : Situation géographique de la Sélune et localisation des sites d'études. En bas, de Gauche à droite : Bois d'Ardennes, Bateau, Virey.	8
Figure 4 : Effectif cumulé des frayères recensées entre 2011 et 2020 (source : INRAE).....	10
Figure 5 : Schéma méthodologique de l'acquisition et du traitement des données.....	11
Figure 6 : Insertion des traceurs (PIT-tag) dans les particules exogènes. I- réalisation d'une entaille dans la particule, II- positionnement du traceur dans l'entaille, III- scellement à la colle chimique du traceur.....	12
Figure 7 : Comparaison de la granulométrie (selon l'axe b) des échantillons de sédiments équipés de PIT tag (PIT) avec la granulométrie de surface des sites sur lesquels ils ont été injectés (Lit). Pour chaque boxplot, le nombre d'individu est donné (n) ainsi que la fraction de matrice interstitielle (m) pour chaque échantillon de granulométrie de surface.	12
Figure 8 : Positionnement des traceurs (particules équipées de PIT-tag) injectés sur le site de Bois d'Ardenne.....	13
Figure 9 : Positionnement des traceurs (particules équipées de PIT-tag) injectés sur les frayères du site de Bateau.....	14
Figure 10: A) Localisation de chaque traceur à l'aide d'une antenne Aquartis, B) géolocalisation des traceurs à l'aide d'un récepteur dGPS Trimble Geo 7X GNSS et d'une antenne Zephyr 2 d'une précision centimétrique.	14
Figure 11 : Les 2 types de maillages de référence utilisés en fonction de l'objet ciblé pour réaliser les relevés topographiques sur le site de bois d'Ardennes. Les 2 rectangles formés par un maillage de point plus dense correspondent aux frayères F1 et F2.	16
Figure 12 : Construction des MNT à partir des relevés topographiques réalisés sur le site de Bois d'Ardennes.....	17
Figure 13 : Détection diachronique des changements morphologiques du lit.....	17
Figure 14 : Débits moyens journaliers enregistrés à la station de Signy durant l'étude (avril 2020 - Avril 2022). Les périodes en vert correspondent aux périodes de basses eaux et de reproduction des lamproies, celle en bleue aux périodes des hautes eaux automnales et hivernales.	18
Figure 15: déplacement des sédiments grossiers à l'échelle d'un tronçon sous influence des lamproies marines (Bois Ardennes) et sans lamproies marines (Vire). Pour le site du Bois	

Rôle des espèces ingénieures

d’Ardennes, la mobilité est donnée pendant les saisons de reproduction des lamproies (B1, B2) et pendant les périodes de crues hivernales (H1 et H2). Pour chaque observation, le nombre d’individu est données (n) ainsi que le taux de mobilité (« tm »)..... 19

Figure 16 : Trajectoires de déplacements des particules ayant dépassé le seuil de mobilité (0.66 m) sur le tronçon du Bois d’Ardennes. Les lignes rouges représentent les transects d’injections des sédiments équipés de PIT. 20

Figure 17 : Azimut des trajectoires suivies par les traceurs mobiles durant les périodes de reproduction (A) B1 et (C) B2 et durant les périodes de hautes eaux H1 (B) et H2 (D). La valeur 0 d’azimut se réfère au Nord géographique. 21

Figure 18 : Relation entre la taille des particules mobilisées et les distances parcourues durant (A) les périodes de reproduction des lamproies (B1 et B2)) et durant les périodes de hautes eaux (H1 et H2) sur le site de bois d’Ardennes. 22

Figure 19 : Trajectoires de déplacements des particules ayant dépassé le seuil de mobilité (0.66 m) sur les frayères F3 et F4 du site du Bateau. Les trajectoires des sédiments déposées sur le monticule (en blanc) et autour de la frayère (en gris) sont différenciés..... 22

Figure 20 : Mobilité des sédiments sur la frayère F3 (A) et F4 (B). La mobilité des sédiments est mesurée sur le monticule et aux alentours de la frayère (Lit) pour 3 observations (H1, B2, H2). Pour chaque observation, le nombre d’individu est données (n) ainsi que le taux de mobilité (tm). 23

Figure 21 : Variation topographique du fond du lit durant les périodes de reproduction (B1, B2) et les périodes de hautes eaux hivernales (H1 et H2) 24

Figure 22 : Évolution morphologique du lit au droit des frayères F1 et F2 sur le site du Bois d’Ardennes 26

Figure 23 : Évolution morphologique du lit au droit des frayères F3 et F4 sur le site de Bateau. 27

Figure 24 : Profil altimétrique longitudinale traversant le centre des frayères (A) F1 et B) F2 du site de Bois d’Ardennes. Le profil vert représente la surface au début de chaque période (B1,B2,H1,H2) et le jaune représente le profil altimétrique en fin de période. 29

Figure 25 : Profil altimétrique longitudinale traversant le centre des frayères A) F3 et B) F4 du site de Bateau. Le profil vert représente la surface au début de chaque période (B1, B2, H1, H2) et le jaune représente le profil altimétrique en fin de période 30

Figure 26 : Granulométrie de surface caractérisée pour chaque point de levé topographique à la fin de la période B2 (après reproduction) et à la fin de la période H2 (après crue hivernale). La flèche bleue représente la direction de l’écoulement et la représentation est en plan. Chaque carreau représente une surface de 25 cm²..... 31

Figure 27 : Mobilité des traceurs sédimentaires et évolution topographique sur le site de bois d’Ardennes lors de la période B1 33

Rôle des espèces ingénieures

Figure 28 : Mobilité sédimentaire et évolution topographique du lit sur la frayère F3 durant les périodes H1, B2 et H2. 34

Figure 29 : Évolution topographique du fond du lit et déplacement des sédiments tracés lors de la période H1 sur une frayère à l'amont du site de Bois d'Ardenes. 38

Figure 30 : Géolocalisation des frayères dénombrées dans le cadre de l'observatoire Sélune (NB : la forte turbidité de l'eau en 2021 n'a pas permis d'effectuer le comptage) et position des deux frayères de 2020 suivies en 2020 et 2021 dans cette étude. NB : les positions relevées dans le cadre de l'observatoire sont moins précises que dans le cadre de cette étude, l'erreur étant probablement d'ordre supra métrique). 39

8. Bibliographie

- Bouletreau, Stéphanie, Carry, Laurent, Meyer, Elise, Filloux, Damien, Menchi, Olivier, Mataix, Vincent, Santoul, Frédéric. 2020. High predation of native sea lamprey during spawning migration. *Scientific Report* 1:1-9.
- Butler, David R. 1995. *Zoogeomorphology: Animals as Geomorphic Agents*. Cambridge University Press.
- Chapuis, Margot, Christina J. Bright, John Hufnagel, et Bruce MacVicar. 2014. « Detection Ranges and Uncertainty of Passive Radio Frequency Identification (RFID) Transponders for Sediment Tracking in Gravel Rivers and Coastal Environments ». *Earth Surface Processes and Landforms* 39 (15): 2109-20. <https://doi.org/10.1002/esp.3620>.
- DeVries, Paul. 2012. « Salmonid Influences on Rivers: A Geomorphic Fish Tail ». *Geomorphology*, Special Issue Zoogeomorphology and Ecosystem Engineering Proceedings of the 42nd Binghamton Symposium in Geomorphology, held 21-23 October 2011, 157-158 (juillet): 66-74. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2011.04.040>.
- Dhamelincourt, Marius, Jacques Rives, Marie Pons, Aitor Larrañaga, Cédric Tentelier, et Arturo Elosegui. 2022. « Sea Lamprey Nests Promote the Diversity of Benthic Macroinvertebrate Assemblages ». *PLOS ONE* 17 (12): e0274719. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0274719>.
- Docker, Margaret F., F. William H. Beamish, Tamanna Yasmin, Mara B. Bryan, et Arfa Khan. 2019. « The Lamprey Gonad ». In *Lampreys: Biology, Conservation and Control: Volume 2*, édité par Margaret F. Docker, 1-186. Fish & Fisheries Series. Dordrecht: Springer Netherlands. https://doi.org/10.1007/978-94-024-1684-8_1.
- Forget, Guillaume, Jean-Luc Bagliniere, Frédéric Marchand, Arnaud Richard, et Marie Nevoux. 2018. « A new method to estimate habitat potential for Atlantic salmon (*Salmo salar*): predicting the influence of dam removal on the Sélune River (France) as a case study ». *ICES Journal of Marine Science* 75 (6): 2172-81.
- Gottesfeld, Allen S., Marwan A. Hassan, et J. F. Tunnicliffe. 2008. « Salmon bioturbation and stream process ». In *American Fisheries Society Symposium*, 65:175-93.
- Gottesfeld, Allen S., Marwan A. Hassan, Jon F. Tunnicliffe, et Ron W. Poirier. 2004. « Sediment Dispersion in Salmon Spawning Streams: The Influence of Floods and Salmon Redd Construction1 ». *JAWRA Journal of the American Water Resources Association* 40 (4): 1071-86. <https://doi.org/10.1111/j.1752-1688.2004.tb01068.x>.
- Hassan, Marwan A., Allen S. Gottesfeld, David R. Montgomery, Jon F. Tunnicliffe, Garry K. C. Clarke, Graeme Wynn, Hale Jones-Cox, et al. 2008. « Salmon-Driven Bed Load Transport and Bed Morphology in Mountain Streams ». *Geophysical Research Letters* 35 (4). <https://doi.org/10.1029/2007GL032997>.
- Hogg, Robert S., Stephen M. Coghlan, Joseph Zydlewski, et Kevin S. Simon. 2014. « Anadromous Sea Lampreys (*Petromyzon Marinus*) Are Ecosystem Engineers in a Spawning Tributary ». *Freshwater Biology* 59 (6): 1294-1307. <https://doi.org/10.1111/fwb.12349>.
- Kondolf, G. Mathias, et M. Gordon Wolman. 1993. « The Sizes of Salmonid Spawning Gravels ». *Water Resources Research* 29 (7): 2275-85. <https://doi.org/10.1029/93WR00402>.
- Lamarre, Helene, Bruce MacVicar, et Andre G. Roy. 2005. « Using passive integrated transponder (PIT) tags to investigate sediment transport in gravel-bed rivers ». *Journal of Sedimentary Research* 75 (4): 736-41.

Rôle des espèces ingénieures

- Lasne, E., M.-R. Sabatié, N. Jeannot, et J. Cucherousset. 2015. « The Effects of DAM Removal on River Colonization by Sea Lamprey *Petromyzon Marinus* ». *River Research and Applications* 31 (7): 904-11. <https://doi.org/10.1002/rra.2789>.
- Létondot, Rémi. 2019. « Capacités de résilience d'un système fluvial de faible à moyenne énergie: le cas de l'ouverture du barrage de Vezins sur la Sélune (50) ».
- Manion, Patrick J. 1968. « Production of Sea Lamprey Larvae from Nests in Two Lake Superior Streams ». *Transactions of the American Fisheries Society* 97 (4): 484-86. [https://doi.org/10.1577/1548-8659\(1968\)97\[484:POSLLF\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1577/1548-8659(1968)97[484:POSLLF]2.0.CO;2).
- Manion, Patrick J., et Lee H. Hanson. 1980. « Spawning Behavior and Fecundity of Lampreys from the Upper Three Great Lakes ». *Canadian Journal of Fisheries and Aquatic Sciences* 37 (11): 1635-40. <https://doi.org/10.1139/f80-211>.
- Moore, Jonathan W. 2006. « Animal Ecosystem Engineers in Streams ». *BioScience* 56 (3): 237-46. [https://doi.org/10.1641/0006-3568\(2006\)056\[0237:AEEIS\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1641/0006-3568(2006)056[0237:AEEIS]2.0.CO;2).
- Polvi, Lina E., et Judith M. Sarneel. 2018. « Ecosystem Engineers in Rivers: An Introduction to How and Where Organisms Create Positive Biogeomorphic Feedbacks ». *WIREs Water* 5 (2): e1271. <https://doi.org/10.1002/wat2.1271>.
- Rice, Stephen P. 2021. « Why so skeptical? The role of animals in fluvial geomorphology ». *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water* 8 (6): e1549.
- Rollet, Anne Julia, Bruce Macvicar, Herve Piegay, et Andre Roy. 2008. « A comparative study on the use of Passive Integrated Transponders to estimate sediment transport : first results ». *La Houille Blanche* 94 (4): 110-16. <https://doi.org/10.1051/lhb:2008047>.
- Smith, Stephen J., et J. Ellen Marsden. 2009. « Factors Affecting Sea Lamprey Egg Survival ». *North American Journal of Fisheries Management* 29 (4): 859-68. <https://doi.org/10.1577/M07-196.1>.
- Sousa, R., M. J. Araújo, et C. Antunes. 2012. « Habitat Modifications by Sea Lampreys (*Petromyzon Marinus*) during the Spawning Season: Effects on Sediments ». *Journal of Applied Ichthyology* 28 (5): 766-71. <https://doi.org/10.1111/j.1439-0426.2012.02025.x>.
- Taverny, C. 2004. « Suivi et évolution des stocks exploités des lamproies migratrices du bassin Gironde-Garonne-Dordogne ».
- Wagner, C. Michael, Michael B. Twohey, et Jared M. Fine. 2009. « Conspecific cueing in the sea lamprey: do reproductive migrations consistently follow the most intense larval odour? » *Animal Behaviour* 78 (3): 593-99. <https://doi.org/10.1016/j.anbehav.2009.04.027>.
- Wolman, M. Gordon. 1954. « A method of sampling coarse river-bed material ». *EOS, Transactions American Geophysical Union* 35 (6): 951-56.

Rôle des espèces ingénieures

Annexe 1 :

Protocoles prévus initialement (extrait du projet proposé, novembre 2018)

Protocole 1

Le premier protocole vise à caractériser l'effet des processus de fraie sur la mobilité de la charge de fond. Elle est appliquée sur des zones de frayères déjà actives en aval du barrage de Vezins qui seront sélectionnées en fonction de la densité des nids présents sur chaque site afin d'obtenir un gradient de bioturbation. Au sein de chaque frayère, 100 traceurs (galets dont l'axe $b > 32\text{mm}$) équipés de transpondeurs passifs (PIT tags) seront répartis régulièrement puis suivis annuellement durant les 3 années du projet. Il s'agit ainsi de comparer les fréquences de mise en mouvement et distances de migration de ces traceurs selon leur mobilisation ou non lors de la fraie.

Protocole 2

Le deuxième protocole vise à identifier puis caractériser des sites potentiels de fraie et évaluer la résilience morphologique (temps de retours, structuration des formes fluviales) au sein de l'ancienne retenue du barrage de Vezins. Trois sites de 280 m chacun (14 fois la largeur à plein bord) correspondant à trois modalités de restauration sont retenus : un site de restauration semi-passive (léger retalutage des berges) en amont du pont de la République, un site de restauration très active (retalutage/curage/intervention sur le tracé du chenal) en amont du pont des Biards et un site de restauration passive au droit du centre de loisir de la Mazure. Sur chacun des sites, il s'agit d'identifier les zones potentielles de fraie (radiers, plat-courants), étudier les modalités de leur retour/mise en place (vitesse de recréation, fréquence, etc...) puis de les caractériser finement en termes de granulométrie, traçage sédimentaire (PIT-tag ; Figure 1), champs de vitesses, topographie transversale et pente. L'étude granulométrique est l'occasion de tester de nouveaux outils méthodologiques basés sur l'acquisition d'images sub-aquatiques en cours de développement (technique de photogrammétrie). L'évolution des formes fluviales hors influence des espèces migratrices (le barrage de La Roche Qui Boit étant toujours en place) sera suivie durant deux années consécutives. La dynamique morphologique des radiers (hors influence des lamproies et saumons encore bloquées en aval du barrage de La Roche Qui Boit) sera mise en perspective avec la dynamique des radiers sous influence des lamproies suivis dans le cadre du protocole 1.

Protocole 3

Le troisième protocole consiste à poursuivre le suivi des zones potentielles de fraie dans l'ancienne retenue après l'effacement du barrage de La Roche Qui Boit, c'est-à-dire après la ré-ouverture du secteur restauré à la migration des poissons amphihalins. Il s'agit ainsi d'établir (1) si le potentiel de frayère précédemment observé (cf protocole 2) se traduit par une recolonisation effective des radiers mais également (2) de mettre en évidence des trajectoires de recolonisation potentiellement différentes en fonction des types de restauration plus ou moins interventionnistes menées sur les 24 km de retenues. En ce qui concerne les lamproies qui se reproduisent à une période où les conditions d'observations sont en théorie assez favorables, des comptages de nids à différents moments de la saison de reproduction entre avril et juin seront réalisés et les habitats seront caractérisés pour

Rôle des espèces ingénieures

identifier les secteurs colonisés prioritairement. Les conditions hydrologiques pendant la reproduction du saumon, entre novembre et décembre, ne permettront pas un suivi exhaustif. Il s'agit enfin (3) d'établir si l'activité de fraie se traduit ou non par une modification des fréquences ou amplitudes des processus morphologiques (principalement mobilité de la charge grossière) suivis dans le cadre du protocole 2, en d'autres termes, si l'activités des lamproies et des saumons contribue significativement à la morphogénèse.

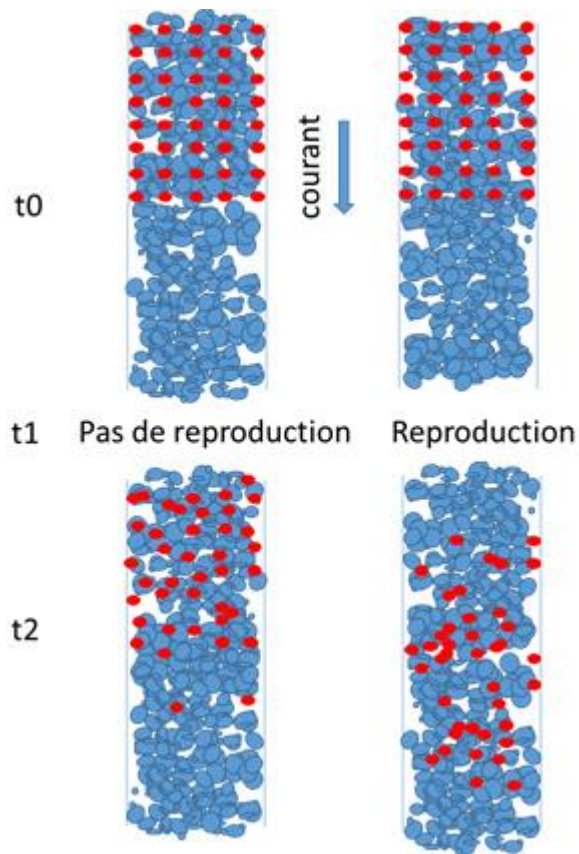


Figure 1 : Représentation schématique du protocole de traçage des flux particulaires grossier utilisé dans les protocoles 1, 2 et 3). Sur des zones témoins (sans reproduction) et des sites bioturbés (reproduction), le suivi d'éléments minéraux grossiers marqués et positionnés individuellement par implantation de pit-tag et localisation par dGPS permettra la quantification de la contribution des poissons à la mobilité du fond du cours d'eau. L'hypothèse de travail est que les secteurs bioturbés par les poissons présentent des flux particulaires originaux modifiant la morphologie du cours d'eau. Des mesures complémentaires (granulométrie, champs de vitesses, topographie transversale et pente) seront également réalisées