



HAL
open science

Dynamique fluviale : Géomorphologie [Programme Sélune - Rapport bilan 2013-2015]

Anne-Julia Rollet, Alain Crave, Axel Beauchamp, Laurent Lespez, Claude Le
Gonidec

► **To cite this version:**

Anne-Julia Rollet, Alain Crave, Axel Beauchamp, Laurent Lespez, Claude Le Gonidec. Dynamique fluviale : Géomorphologie [Programme Sélune - Rapport bilan 2013-2015]. [Rapport de recherche] INRA; Agence de l'Eau Seine-Normandie (AESN). 2016, pp.55. hal-03408338

HAL Id: hal-03408338

<https://hal.science/hal-03408338>

Submitted on 29 Oct 2021

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.



Distributed under a Creative Commons Attribution 4.0 International License



INRA
SCIENCE & IMPACT



GÉOSCIENCES
Rennes



Programme Sélune

Phase pré-arasement

Rapport bilan 2013-2015

Dynamique fluviale

Volet 2

Géomorphologie

Auteurs

Rollet A.-J.³, Crave A.², Beauchamp A.³, Lespez L.³, Le Gonidec C.¹

¹: UMR INRA-Agro campus Ouest, Sol Agro hydro système Spatialisation (SAS)

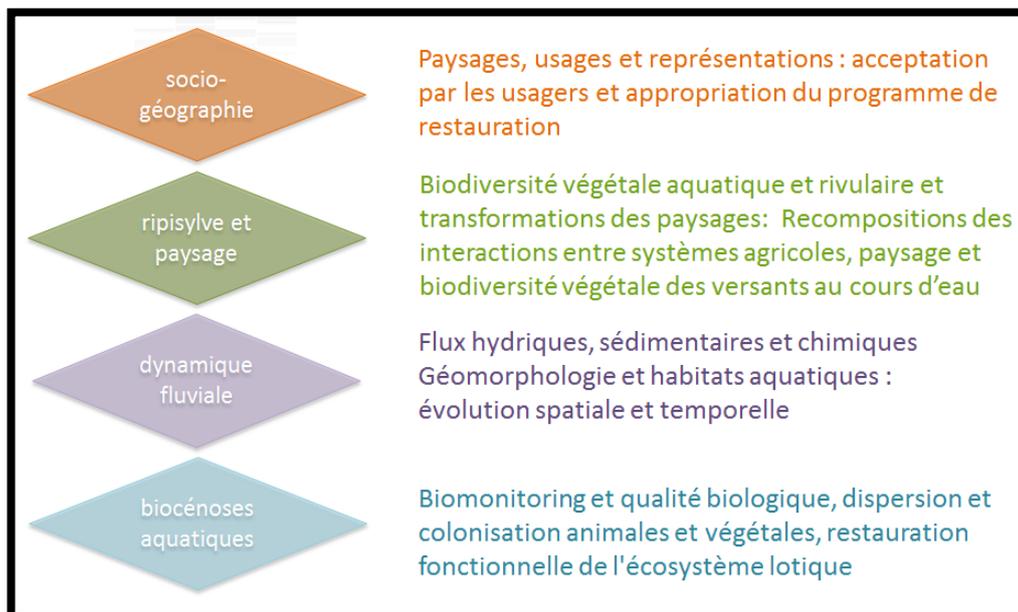
²: UMR CNRS-Université de Rennes 1, Géosciences Rennes

³: UMR CNRS-Université de Caen Basse-Normandie, LETG-Caen-Géographie Physique et Environnement (GÉOPHEN)

Février 2016

Introduction

Le programme scientifique du suivi de l'arasement des barrages sur la Sélune, coordonné par l'INRA, a débuté en 2012. Il est actuellement organisé en quatre thèmes interdépendants :



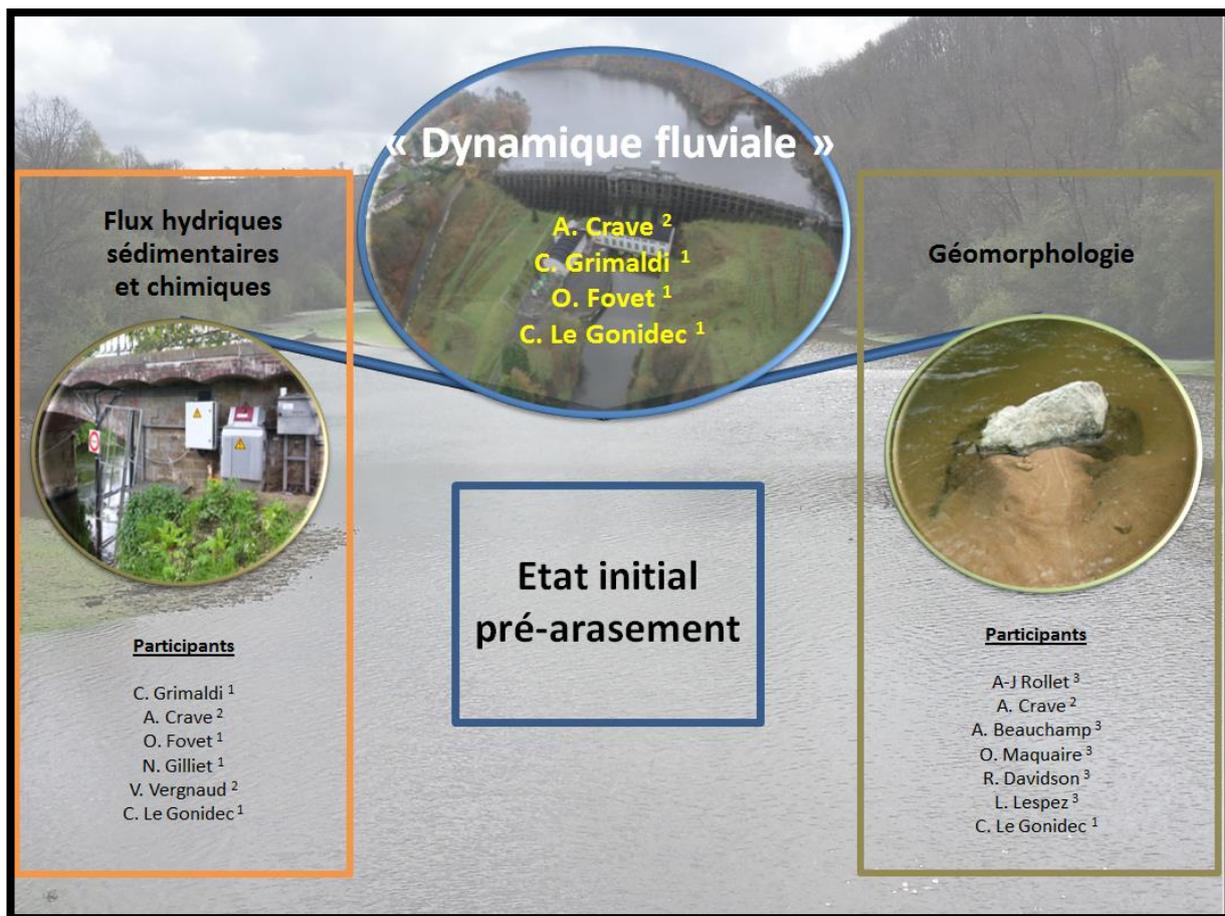
Les présents rapports concernent le thème Dynamique fluviale.

Les barrages constituent une barrière physique affectant diversement les flux hydriques, sédimentaires et chimiques, ainsi que la géomorphologie du fleuve Sélune. Une bonne connaissance des flux, actuels et futurs, permettra de mettre en évidence par comparaison l'intensité des perturbations apportées par l'ouverture des barrages. Cette connaissance passe par une quantification des flux mesurés, mais aussi par la compréhension de leur dynamique (origine des flux, processus de transfert et conditions hydrodynamiques, variabilité saisonnière et événementielle) afin de distinguer leurs déterminants climatiques, des conséquences de l'arasement des barrages. L'impact des barrages sur la géomorphologie de la Sélune ne se réduit pas à la zone ennoyée. Leur rôle dans la régulation des débits et du transport solide a des conséquences directes, particulièrement à l'aval, sur les processus fluviaux et les structures sédimentaires grossières, qui façonnent la morphologie actuelle du lit.

Le thème Dynamique fluviale du programme s'articule en trois volets :

1. L'étude des flux hydriques, sédimentaires et chimiques
2. L'étude de la géomorphologie dynamique de la rivière à deux échelles de temps (contemporaine et temps longs)
3. L'étude de la relation avec les habitats aquatiques

Le volet 3 concernant la relation avec les habitats aquatiques n'a jusqu'à présent pas été beaucoup développé. Le bilan de l'état initial pré arasement concerne uniquement les volets 1 et 2. Plusieurs unités sont impliquées dans le suivi des flux hydriques sédimentaires et chimiques (volet 1) et la géomorphologie (volet 2), suivant leurs thématiques de recherche et les compétences des différents membres. La figure ci-dessous présente les volets 1 et 2 du thème Dynamique fluviale, les personnes et unités concernées :



Personnes impliquées dans le thème dynamique fluviale pour les volets 1 et 2 de la phase pré arasement

¹: UMR INRA-Agro campus Ouest, Sol Agro hydro système Spatialisation (SAS)

²: UMR CNRS-Université de Rennes 1, Géosciences Rennes

³: UMR CNRS-Université de Caen Basse-Normandie, LETG-Caen-Géographie Physique et Environnement (GEOPHEN)

La première année du suivi pré-arasement (2013) a été essentiellement consacrée à l'acquisition de matériels, à l'installation des dispositifs de mesures, ainsi qu'à quelques observations préliminaires (Rapport d'étape 2013). L'année 2014 a permis de recueillir les premiers résultats (Rapport d'étape 2014). L'année 2015 a permis de poursuivre les travaux engagés en intégrant de nouvelles études et en renforçant les campagnes débutées en 2013 et 2014.

Pour plus de lisibilité, nous avons choisi de réaliser deux rapports distincts, le premier sur le volet du suivi des flux hydriques, sédimentaires et chimiques, le deuxième sur le volet géomorphologie à deux échelles de temps (Contemporaine et temps longs).

Le présent rapport constitue un bilan de l'état initial pré-arasement pour la Géomorphologie de la Sélune. Il est divisé en deux chapitres. Le premier chapitre s'intéresse à la dynamique contemporaine, le deuxième chapitre à la dynamique temps long.

Sommaire

1 – GEOMORPHOLOGIE : DYNAMIQUE CONTEMPORAINE DE LA RIVIERE	6
1.1 - CONTEXTE.....	7
1.2 – DIAGNOSTIC GEOMORPHOLOGIQUE DE LA RIVIERE	7
1.2.1 - MATERIEL ET METHODES.....	8
1.2.1.1 - Caractérisation du profil en long du tronçon à l’aval de la Roche qui Boit.....	8
1.2.1.2 - Etude de la mobilité en plan.....	9
1.2.1.3 –LIDAR aéroporté.....	9
1.2.1.4 – LIDAR terrestre : suivi des dépôts sédimentaires en amont des barrages.....	11
1.2.2 - RESULTATS.....	12
1.2.2.1 - Caractérisation de l’évolution du profil en long du tronçon à l’aval de la RQB	12
1.2.2.2 - Etude de la mobilité en plan.....	14
1.2.2.3 –LIDAR aéroporté.....	15
1.2.1.4 – LIDAR terrestre : suivi des dépôts sédimentaires en amont des barrages.....	16
1.3 – CARACTERISATION DES SEDIMENTS GROSSIERS (> 5 MM)	17
1.3.1 – MATERIEL ET METHODES	17
1.3.2 - RESULTATS.....	18
1.4 - ETUDE DU TRANSPORT DES SEDIMENTS GROSSIERS (PIT TAGS)	20
1.4.1 - MATERIELS ET METHODE	21
1.4.1.1 – Présentation de la méthode	21
1.4.1.2 - Choix des stations	22
1.4.1.3 - Caractéristiques morphologiques des stations.....	24
1.4.1.4 - Caractéristiques granulométriques des stations	25
1.4.1.5 - Caractéristiques granulométriques des traceurs.....	25
1.4.1.6 - Perspectives.....	25
1.5 – CARACTERISATION DES SEDIMENTS SABLEUX (<2MM)	26
1.5.1 – MATERIEL ET METHODES	26
1.5.1.1 – Choix des sites.....	26
1.5.1.2 - Matériel	27
1.5.2 – RESULTATS.....	28
1.5.2.1 - Distribution spatiale de la distribution granulométrique	28
1.5.2.2 - Evolution temporelle de la distribution granulométrique.....	29
1.5.3 - SYNTHESE SEDIMENTS SABLEUX	29
1.6 – ETUDE DU TRANSPORT DES SEDIMENTS SABLEUX (UB-FLOW)	30
1.6.1 - EXPLORATION DES CONDITIONS HYDRODYNAMIQUES PAR VELOCIMETRIE	30
1.6.2 - EXPLORATION DES CONFIGURATIONS DU VELOCIMETRE UBFLOW	30
1.6.2.1 - Expérimentation en canal.....	31
1.6.2.2 - Mesures effectuées dans le Sélune	32
1.6.2.3 - Conception et installation d’une structure porteuse du vélocimètre	33
1.7 – CONCLUSION ET PERSPECTIVES.....	34
2 – GEOMORPHOLOGIE : DYNAMIQUE TEMPS LONGS.....	37
2.1 - CONTEXTE.....	37
2.2 - RAPPELS METHODOLOGIQUES ET SYNTHESE DES TRAVAUX DE 2014.....	38
2.3 - RESULTATS 2015	41
2.3.1 - SITE DE VEZINS	41
2.3.1.1 - Principes de la méthode de datation au césium 137 et au plomb 210.....	45
2.3.2 - SITE DU PONT-DU-BATEAU.....	48
2.4 – PERSPECTIVES 2016	54
2.4.1 - TERRAIN	54
2.4.2 - ANALYSE	54
REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES.....	55

Table des figures et liste des tableaux

Figure 1 : Méthode de mesure des hauteurs de berge (Mirloup 2014).....	9
Figure 2 : Principe de mesure du LIDAR aéroporté (en haut), exemple de données brutes (en bas).....	10
Figure 3 : Profil en long de la Sélune en aval du barrage de la Roche qui Boit (Fond du lit et ligne d'eau).....	12
Figure 4 : Points de mesure des hauteurs de berge (juillet 2015)	13
Figure 5 : Evolution de la hauteur des berges en fonction de la distance au barrage de La Roche Qui Boit (Colin, 2015) ..	14
Figure 6 : Cartographie des érosions de berges et des abreuvoirs	14
Figure 7 : Exemple de données acquises lors du premier vol sur la Sélune., zoom sur le secteur du barrage de la Roche qui Boit.....	15
Figure 8 : Nuage de points TLS de la campagne de Juillet 2015, vue vers l'amont du Pont de la République (en haut) et vue vers l'aval (en bas)	16
Figure 9 : axe de mesure d'une particule (Chapuis 2012).....	17
Figure 10 : Localisation des radiers échantillonnés pour le suivi des sédiments grossiers	17
Figure 11 : Evolution longitudinales en fonction de la distance au barrage des A) D 10, B) D50 et C) D90 de la distribution granulométrique grossière (> 5 mm) en tête et milieu de radiers entre le barrage de LRQB et le seuil de Quincampoix... 18	
Figure 12 : Evolution longitudinale de l'indice de tri entre le barrage de LRQB et le seuil de Quincampoix	19
Figure 13 : Ecarts pondérés entre déciles de têtes et milieux de radiers	20
Figure 14 : Carte de localisation de la station 1	23
Figure 15: Photo station 1, vue amont (à gauche) et vue aval (à droite).....	23
Figure 16 : Carte de localisation des station 2 et 3	24
Figure 17 : Photos des stations 2 et 3, à gauche (station 2 : vue amont); au milieu (station 2 : vue aval)	24
Figure 18 : Distribution granulométrique des stations	25
Figure 19 : Distribution granulométrique des sédiments composants les radiers (noir) et des traceurs (gris).....	25
Figure 20 : Localisation des points d'échantillonnage des sables, campagne du 17-18/07/2014 et du 21/05/2015	26
Figure 21 : A gauche, drague utilisée pour l'échantillonnage ; au milieu, lancé de la drague au milieu de la section ;	27
Figure 22 : Distribution granulométrique, campagne du 17-18/07/2014 (en haut) ; campagne du 21/05/2015 (au milieu) ; échantillons sur les transects latéraux aux sections de rivière (en bas)	28
Figure 23 : Distribution granulométrique des échantillons correspondants au piège.....	29
Figure 24 : Chenal de l'Agrocampus de Rennes et installation de l'UB-Flow sur la section droite du chenal	31
Figure 25 : UB-Flow en rivière. La nécessité d'effectuer des enregistrements de plusieurs minutes, implique l'utilisation d'un support stable pour maintenir l'horizontalité de l'appareil	32
Figure 26 : Structure porteuse en inox pour l'UB-Flow.....	33
Figure 27 : Localisation des sites d'étude dans le bassin de la Sélune.....	38
Figure 28 : Aperçu du site de Virey et de son moulin	39
Figure 29 : Modèle d'interprétation de l'évolution hydromorphologique de la Sélune	40
Figure 30 : Zoom sur les sites d'étude	41
Figure 31 : Localisation des sondages réalisés à l'exutoire de l'Isolant	42
Figure 32 : transects stratigraphiques dans le bouchon sédimentaire de l'Isolant	42
Figure 33 : Log stratigraphique des carottes C1 et C2	43
Figure 34 : Activités surfaciques de CS137 potentiellement présente dans les sols français en 2007 (IRSN, 2009)	45
Figure 35 : Log C1 avec les courbes isotopiques de Cs ¹³⁷ et Pb ²¹⁰ ainsi que les datations radiocarbone réalisées	46
Figure 36 : Localisation des carottages sur le site du Pont-du-Bateau	48
Figure 37 : reconstitution des transects d'après les carottages de 1961.....	49
Figure 38 : Transect stratigraphique de la plaine alluviale de la Sélune en amont du pont du bateau.....	51
Figure 39 : Evolution diachronique de la Sélune au cours de l'Holocène	53
Figure 40 : Localisation des sondages envisagés pour 2016.....	54

Tableau 1: Résumé des caractéristiques par secteur	12
Tableau 2 : Seuils d'interprétation de l'indice de tri.....	19
Tableau 3 : Avantages et inconvénients de la méthode PIT tags.....	21
Tableau 4 : Recensement d'études sur le traçage de particules en rivière par transpondeur passif PIT tags (Arnaud 2012)	22
Tableau 5 : Caractéristiques spécifiques à chaque lieu de dépôt	24
Tableau 7: Caractéristiques des échantillons prélevés dans le piège	29
Tableau 8 : Datations radiocarbone du site de Vezins	44
Tableau 9 : datations radiocarbone du site de Vezins.....	50

1 - Géomorphologie : dynamique contemporaine de la rivière

1.1 - Contexte

Les conséquences des ouvrages hydroélectriques sur le fonctionnement morphologique des tronçons fluviaux en aval sont aujourd'hui bien connues. Dans la plupart des cas documentés, le transfert sédimentaire grossier étant interrompu, elles se traduisent par un déficit sédimentaire et par conséquent un excédent d'énergie potentielle du chenal en aval. La traduction géomorphologique de cet excédent s'observe le plus souvent à travers une incision se propageant d'amont en aval. Cette incision s'accompagne souvent d'une augmentation significative de la taille des sédiments composant le fond du lit et d'une perte de la mobilité latérale du chenal (Williams et Wolman 1984, Kondolf 1997, Petts et Gurnell, 2005)

Dans le cadre du projet de suppression des ouvrages de Vézins et de La Roche Qui Boit sur la Sélune, l'objectif de la présente étude est double.

Dans un premier temps elle vise à comprendre la dynamique morpho-sédimentaire actuelle du tronçon fluvial en aval des ouvrages et plus particulièrement l'empreinte des ouvrages sur différents paramètres morphologiques. Cette empreinte est fondamentale pour appréhender la sensibilité de ce système fluvial aux aménagements et, à plus long terme, aux actions de suppression à venir.

Dans un second temps, cette étude permet d'établir un premier état morphologique initial de ce tronçon et permettra à terme d'observer et de quantifier les ajustements consécutifs aux suppressions envisagées. Il s'agit alors d'établir un état de référence sur lequel pourront s'appuyer les suivis à venir et d'établir le succès ou les limites des différentes actions de restauration ainsi que d'amener des éléments de connaissance fondamentale sur les capacités de résilience des systèmes fluviaux de l'Ouest français.

1.2 - Diagnostic géomorphologique de la rivière

Ce diagnostic morphologique repose sur différentes méthodes en amont et en aval des barrages :

- Des mesures directes sur le tronçon à l'aval du barrage de la Roche qui Boit. Ce tronçon est le plus sensible aux ajustements géomorphologiques provoqués par la présence des barrages. Nous avons réalisé des mesures de hauteurs de berges, la caractérisation de l'évolution du profil en long et l'étude de la mobilité en plan.
- Des mesures LIDAR sur un périmètre plus étendu. Une campagne de LIDAR aéroporté a été réalisée en amont et en aval des barrages (Saint Hilaire du Harcouët – Ducey). Des campagnes de LIDAR terrestre ont été menées pour suivre les dépôts sédimentaires exondés à l'amont des barrages.

1.2.1 - Matériel et méthodes

1.2.1.1 - Caractérisation du profil en long du tronçon à l'aval de la Roche qui Boit

Le profil en long du cours d'eau a été abordé sous deux aspects différents. Tout d'abord par la mesure d'un profil en long (ligne d'eau et fond) afin de calculer l'énergie dont dispose le cours d'eau pour exercer son action morphogène mais également pour établir une sectorisation du tronçon en sous-tronçon présentant potentiellement les mêmes dynamiques morphologiques. Cette première approche a été complétée par des mesures systématiques de hauteur de berge pour essayer d'observer l'incision éventuelle du cours d'eau en aval des ouvrages, les berges pouvant être « anormalement » plus haute en secteur incisé.

❖ Levé d'un profil en long du fond du lit et de la ligne d'eau et estimation des puissances spécifiques

L'objectif de ce profil est double : (I) disposer d'une caractérisation fine de la pente du cours d'eau actuel, (II) avoir un profil actuel permettant une comparaison éventuelle avec des profils historiques dont le profil des grandes forces hydrauliques (1930) levé en conditions d'étiage (juillet-août) ou encore avec les profils réalisés une fois l'arasement effectué. Il était initialement prévu de réaliser ce profil au moyen d'un DGPS mais étant donné la densité de la canopée de la ripisylve en berge, nous avons dû procéder à un lever à la lunette topographique à lecture automatique.

Le profil en long a été réalisé entre le 15 et le 21 juillet 2014 lors d'un débit d'étiage (Débit journalier entre 4 et 6 m³/s). Chaque rupture de pente visuellement identifiée a été relevée. Ce profil couvre ainsi un linéaire de 5,6 km et comporte 214 points pour le profil de ligne d'eau et 222 pour le profil de fond soit une résolution d'environ 1 point tous les 25 mètres. Sa précision verticale est de l'ordre de +/- 1cm.

La mesure des pentes du cours d'eau nous permet également de calculer les puissances spécifiques du cours d'eau. Le concept de puissance fluviale correspond à la transformation de la perte de l'énergie potentielle entre l'amont et l'aval d'un tronçon en énergie cinétique (Rubey, 1933, Knapp, 1938). Cette notion s'impose comme une variable de première importance notamment pour la prédiction des capacités de transport d'un cours d'eau, des styles fluviaux, des dynamiques des plaines alluviales mais aussi pour déterminer les capacités d'ajustement, de dynamique fluviale d'un secteur. Plus un tronçon dispose d'une puissance fluviale importante plus il est théoriquement en mesure de manifester de l'activité morphogène. Ainsi dans un contexte de restauration de cours d'eau rectifiés et chenalés, un lit est capable de s'ajuster par instabilité des berges si sa puissance spécifique excède 35 W.m⁻² ou de recouvrer sa sinuosité initiale au-delà de 100 W.m⁻² (Brooks, 1987, 1988). Il s'agit donc d'un indicateur pertinent pour prédire les ajustements potentiels d'un tronçon à la suite de suppression d'ouvrages.

Cette puissance s'exprime sous la forme suivante (Richards, 1982) :

$$\Omega = \rho g Q S_e \text{ (W.m}^{-1}\text{)}$$

Où ρ correspond à la masse volumique du fluide, g correspond à l'accélération de la pesanteur, Q (m³.s⁻¹) au débit liquide et S_e (m.m⁻¹) à la pente de la ligne d'énergie que l'on admet généralement comme voisin de la pente de la ligne d'eau.

Cette puissance est généralement rapportée à l'unité de surface des parois du lit. Cette puissance spécifique est la plus couramment utilisée car elle rend possible les comparaisons de fonctionnement morphodynamique de lits de taille différente (Ferguson, 1981).

Cette puissance spécifique est alors donnée par l'équation :

$$\omega = \rho g Q S_e / w \text{ (W.m-2)}$$

Où $w(m)$ correspond à la largeur de la surface en eau.

Ne disposant pas de mesures de débits continus sur l'ensemble du linéaire étudié, nous avons extrapolé les débits de plein bord à partir du débit biennal calculé à la station de Signy (Banque Hydro) à partir de l'équation suivante :

$$q = Q (a/A) 0.8$$

où q correspond au débit recherché, Q au débit connu, a à la superficie du bassin versant à l'amont du profil étudié et A à la superficie du bassin versant à la station de mesure hydrologique. Les superficies de bassin versant ont été obtenues par traitement SIG à partir d'un MNT (IGN) à 25 mètres de résolution. Cette méthode, utilisée par la DREAL est fiable pour des cours d'eau dont le bassin versant est inférieure à 2 000 km² (Bravard et Petit, 1997) ce qui est le cas sur notre secteur d'étude.

❖ Mesure des hauteurs de berge

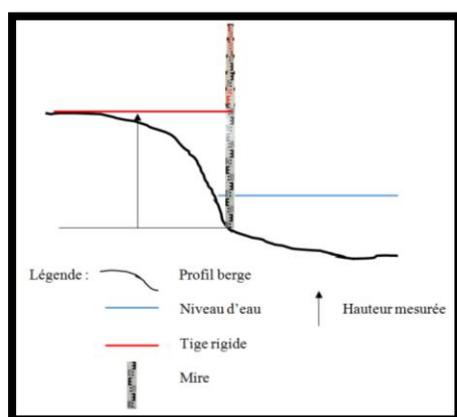


Figure 1 : Méthode de mesure des hauteurs de berge (Mirloup 2014)

Des mesures de hauteurs de berge ont été effectuées environ tous les 200 mètres ou dès qu'un changement important de hauteur a été rencontré. Ainsi 173 mesures de hauteur de berge (83 en rive gauche et 90 en rives droites) soit environ 0.028pts/m de berge ont été effectuées sur le tronçon barrage de la Roche Qui Boit- seuil de Quincampoix à l'aide d'une mire (Fig.1). En rive gauche, la Sélune vient buter contre des reliefs encaissants dont la hauteur peut localement excéder 5m, ce qui explique le nombre de points de mesure plus faible en rive gauche.

1.2.1.2 - Etude de la mobilité en plan

Un état des lieux des phénomènes visibles témoignant d'une mobilité latérale du cours d'eau a également été réalisé (Colin, 2015). Une cartographie des érosions et des protections de berges a été menée sur le tronçon en aval du barrage de la Roche Qui Boit. Les zones d'abreuvoirs ont également été répertoriées pour avoir des indications sur l'origine des sédiments sur le tronçon en aval des barrages.

1.2.1.3 - LIDAR aéroporté

L'opération de suivi de l'évolution de la Sélune est l'occasion de mettre en œuvre pour la première fois au monde un nouveau type d'instrument aéroporté utilisant la technologie laser pour le suivi des environnements aquatiques : le lidar aéroporté topo-bathymétrique. Cette technique de mesure 3D à très haute résolution offre une continuité de mesure depuis la topographie émergée et la végétation, jusque dans les zones ennoyées peu profondes. En se substituant aux méthodes traditionnelles limitées spatialement, le lidar topo-bathymétrique offrira une mesure synoptique inédite des changements de la Sélune en amont et en aval des barrages et des données nouvelles pour mieux comprendre et suivre la réponse des écosystèmes aquatiques et la dynamique de repeuplement de la ripisylve dans les zones exondées.

Le lidar topographique aéroporté est une technique courante utilisant un laser infrarouge balayant le paysage pour mesurer la distance entre l'avion et le sol et produire une représentation tridimensionnelle des paysages en haute définition. Les instruments de dernière génération permettent de réaliser jusqu'à 500000 tirs laser par seconde depuis une altitude typique de 1000 m et de mesurer jusqu'à 20 points par m² au sol. La précision des points mesurés est inférieure à 10 cm verticalement et 20 cm horizontalement. La mesure laser, sans danger vu les puissances en jeu, permet en particulier de traverser la végétation pour fournir une imagerie en 3 dimensions (3D) de la végétation et suivre la croissance et l'extension du couvert végétal. Vu leur richesse, les données de lidar topographique sont de plus en plus couramment utilisées dans les domaines nécessitant une information précise sur la géométrie 3D paysages : aménagement, suivi environnemental, urbanisme, archéologie, sylviculture, risques naturels....

En utilisant un laser infra-rouge (1064 nm ou 1550 nm) fortement absorbé par l'eau, les lidars topographiques traditionnels sont aveugles sous l'eau. Dans le cadre d'opération de suivi de milieux aquatiques continentaux, il fallait donc utiliser des méthodes de mesure bathymétrique traditionnelles : levé à la perche ou au sonar depuis un bateau qui multipliaient les coûts tout en n'offrant pas la résolution et la précision des données émergées. En utilisant un laser vert (532 nm), une des longueurs d'onde les moins absorbées par l'eau, le lidar nouvelle génération peut mesurer les surfaces immergées peu profondes, tout en mesurant par ailleurs la topographie. On parle alors de lidar aéroporté topo-bathymétrique dont le nombre se limite actuellement à 3-4 exemplaires au monde. Les **Universités de Rennes (OSUR) et Nantes (OSUNA)** viennent d'acquérir le premier instrument de ce type en France (Optech Titan DW). Il est opéré dans le cadre d'un consortium de recherche public/privé avec la société **Fit-conseil**.

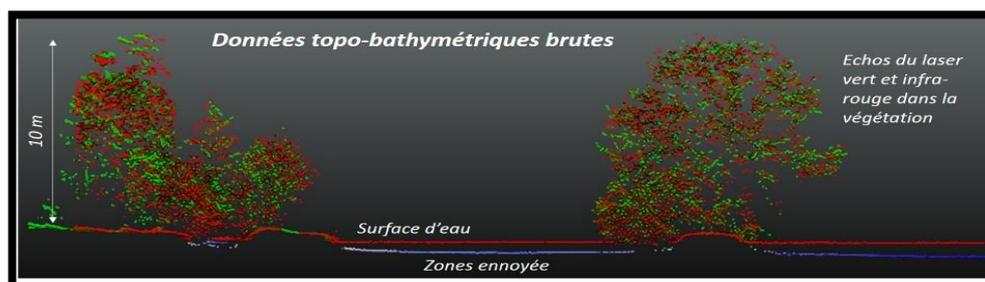
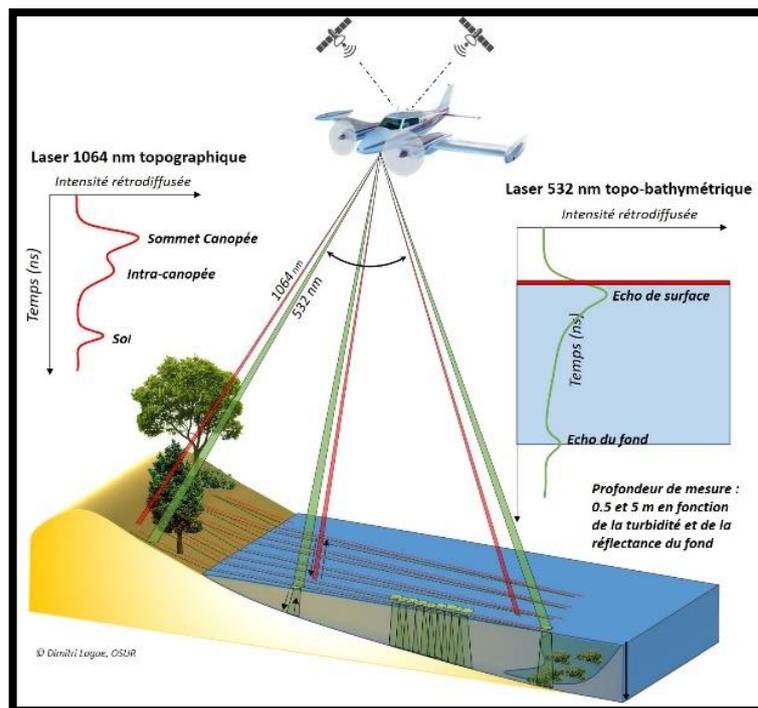


Figure 2 : Principe de mesure du LIDAR aéroporté (en haut), exemple de données brutes (en bas)

De par la continuité topo-bathymétrique 3D qu'il offre et sa haute définition, le lidar topo-bathymétrique permet de suivre l'évolution d'un cours d'eau et de ses abords sur tout son linéaire avec précision. L'application de cet outil de haute technologie pour le suivi des cours d'eau est une première mondiale. La réussite de ce projet passe en grande partie par le développement d'outils de traitement basée sur une compréhension fine du signal laser, de manière à faire de cet instrument innovant, un outil réellement opérationnel d'aide à la décision et au suivi des opérations de restauration des milieux aquatiques. La Sélune faisant partie des sites tests pour la mise en œuvre du lidar aéroporté topo-bathymétrique.

Cet instrument a été déployé sur la Sélune en juin 2015 pour obtenir un stade de référence et déterminer la profondeur mesurable par l'instrument. En effet, la profondeur de pénétration du laser reste un paramètre très difficile à prédire en milieu fluvial. Au même titre que le fond de la rivière n'est plus visible à nos yeux lorsque l'eau se trouble durant une crue, les zones les plus profondes de la Sélune ne seront pas forcément mesurées par le laser vert si durant le vol, l'eau est chargée en matière en suspension d'origine détritique (argiles) ou biologique (phytoplancton). C'est le cas par exemple des retenues en amont des barrages dont l'eau est trop trouble pour que l'on puisse en mesurer la profondeur, alors même que l'instrument a réussi à mesurer des profondeurs de 10 mètres d'eau dans des eaux très claires. Si le fond est sombre ou couvert de végétation aquatique les chances sont moindres d'avoir un écho de fond détecté par l'instrument. L'application du lidar topo-bathymétrique en contexte fluvial restant inédite, un des enjeux du projet de suivi sur la Sélune est donc de mieux comprendre l'interaction entre le laser vert, la tranche d'eau et le type de fond dans les conditions typiques de la Sélune pour améliorer les capacités opérationnelles de l'instrument. Cette compréhension est nécessaire pour optimiser la période de déploiement, améliorer la précision et la profondeur des mesures bathymétriques, et utiliser tout le signal enregistré par le laser pour aider à la caractérisation des conditions hydrauliques et la nature du lit.

1.2.1.4 - LIDAR terrestre : suivi des dépôts sédimentaires en amont des barrages

Afin de contrôler les conditions, fréquence et volumes des érosions des stocks sédimentaires en tête de retenue, un suivi des dépôts sédimentaires exondés a été initié de part et d'autres du pont de République en amont de la retenue de Vézins (400m en amont / 400 m en aval). Ce suivi à très haute résolution spatiale (400 pt/m²) et haute précision (1 à 3 cm) a été réalisé au moyen **d'un LIDAR terrestre multi-onde Riegl VZ- 400**. La comparaison diachronique de ces levés est permise grâce à un système de repères fixes (référéncé en absolu au DGPS) mis en place sur le pont et de balises (13 à 14 balises) dont la position relative est établie au théodolite pour chaque campagne. Actuellement 2 campagnes de mesure ont été réalisées en juillet 2014 et Juillet 2015 (Fig.8).

1.2.2 - Résultats

1.2.2.1 - Caractérisation de l'évolution du profil en long du tronçon à l'aval de la RQB

❖ Profil en long du fond du lit et de la ligne d'eau

Le profil en long de la ligne d'eau (Fig.3) présente une pente moyenne de 0.0011 m/m. Il peut être découpé en 4 grands secteurs topographiquement homogènes dont les pentes varient de 0.0018 m/m sur le secteur le plus pentu (S2) à 0.0007 m/m sur le secteur aval (S4) probablement sous l'influence hydraulique du seuil de Quincampoix (Tab.1 et Fig.3). Sur ce profil ressort le fonctionnement particulier du secteur du bois d'Ardennes (secteur 3).

Le profil de fond présente une forte variabilité et permet d'observer les alternances radiers-mouilles qui rythment ce profil.

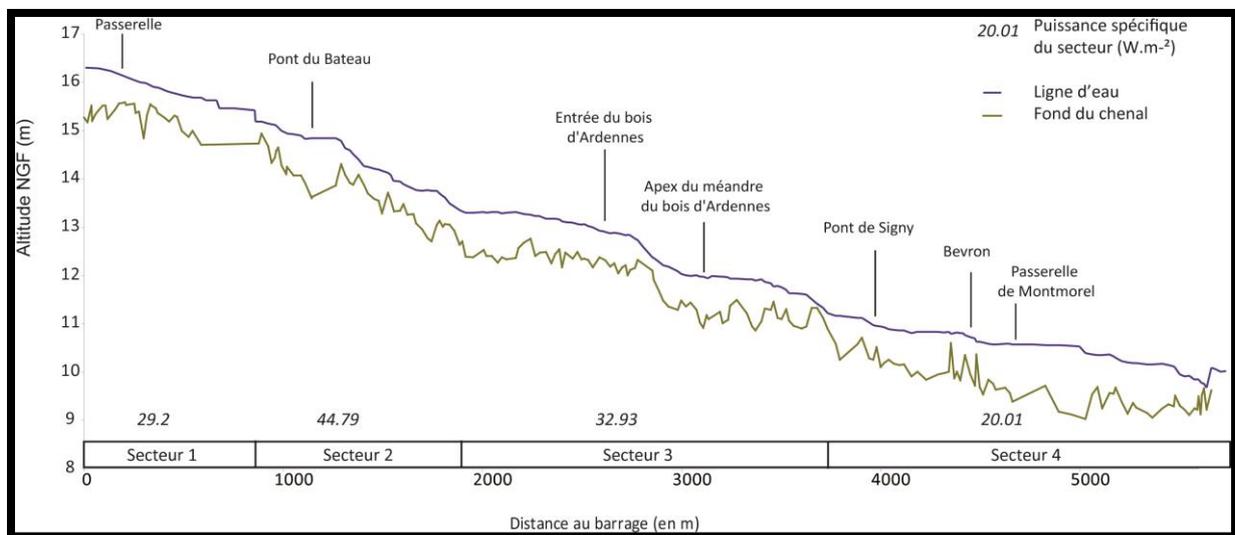


Figure 3 : Profil en long de la Sélune en aval du barrage de la Roche qui Boit (Fond du lit et ligne d'eau)

La Sélune entre le barrage de LRQB et le seuil de Quincampoix présente une puissance spécifique moyenne de 33 W.m^{-2} , ce qui en fait un cours d'eau de relativement faible énergie, une grande partie du linéaire (45%) ayant une puissance inférieure 30 W.m^{-2} .

Tableau 1: Résumé des caractéristiques par secteur

	BV (km ²)	largeur (m)	Qpb (m ³ .s ⁻¹)	pente (m.m ⁻¹)	puissance (W.m ⁻²)
S1	760.5	16.00	46.54	0.00102	29.20
S2	761.2	18.58	46.57	0.00182	44.79
S3	771.1	19.17	47.06	0.00137	32.93
S4	901.7	18.35	53.33	0.00070	20.01
Tronçon total	920.0	18.50	54.19	0.00117	33.62

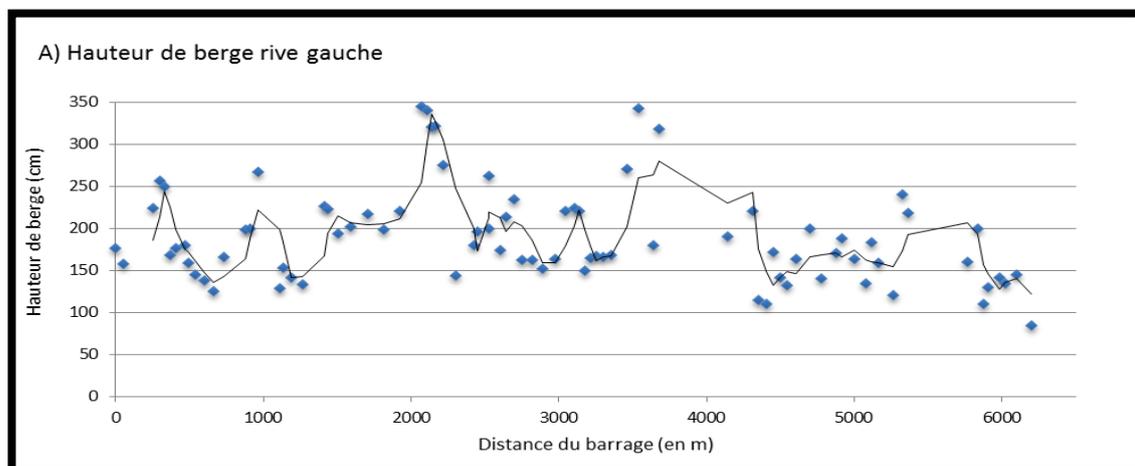
❖ Mesure des hauteurs de berge



Figure 4 : Points de mesure des hauteurs de berge (juillet 2015)

L'analyse des berges en rive droite et rive gauche montre que les hauteurs de berge sont globalement comprises entre 1m et 3,5m. Nous observons une certaine dissymétrie entre les deux berges, celles de rive gauche étant globalement plus élevées (1.89m en moyenne) que celles de rive droite (1.61 en moyenne). Nous observons également sur les deux rives l'absence de relation entre la hauteur des berges et la distance aux barrages (Fig.5). Il semble effectivement que le secteur compris entre 2500 et 4000m en aval de LRQB, soit entre l'aval du pont des bateaux et le pont de Signy (le grand méandre traversant le bois d'Ardenne), présente des hauteurs de berges significativement plus importantes (1.83m en moyenne) que le secteur en amont ou en aval (respectivement 1.53 et 1.51 m en moyenne).

Il semble ainsi que les berges ne sont pas particulièrement importantes en amont, ce qui exclue théoriquement une incision forte du chenal à l'aval des ouvrages. Ces premiers résultats mettent néanmoins en évidence la particularité morphologique du méandre du bois d'Adennes.



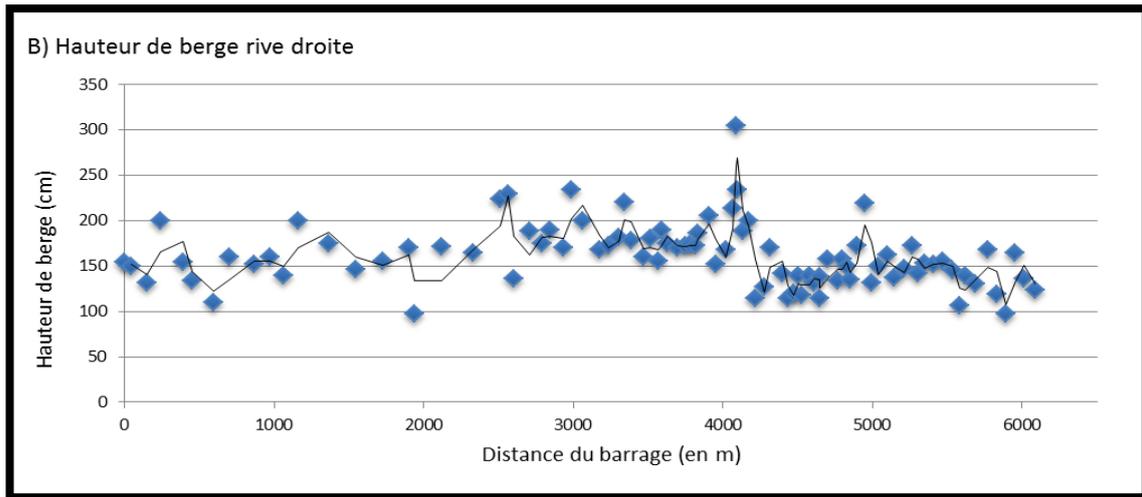


Figure 5 : Evolution de la hauteur des berges en fonction de la distance au barrage de La Roche Qui Boit (Colin, 2015)
(Trait noir : moyenne mobile de rang 3 (A) et de rang 2 (B))

1.2.2.2 - Etude de la mobilité en plan

Une rapide comparaison diachronique des tracés de la Sélune a montré la relative stabilité latérale du chenal, malgré des puissances localement importantes ($> 40 \text{ W.m}^{-2}$). Nous avons néanmoins relevés sur le terrain des traces d'érosion des berges sans que ces processus aient pu être quantifiés. La cartographie de ces observations (Fig.6) montre que la répartition des secteurs d'érosion semble principalement répondre à des paramètres locaux (abreuvoirs, concavités, végétation...) et non à l'influence des ouvrages hydro-électriques. Il ne semble également pas qu'il y ait une corrélation entre la fréquence ou l'intensité de ces marques d'érosion et la puissance spécifique moyenne des tronçons. Cette conclusion nécessiterait néanmoins d'être renforcée en confrontant les érosions observées et les puissances spécifiques locales.

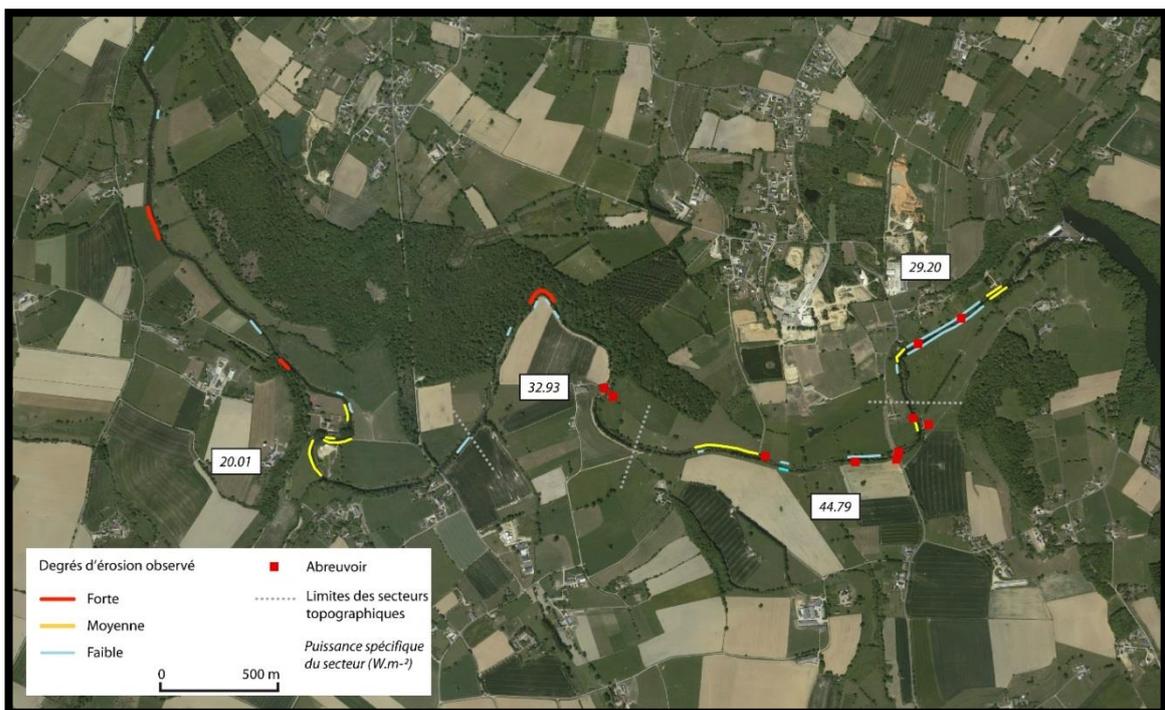


Figure 6 : Cartographie des érosions de berges et des abreuvoirs

1.2.2.3 - LIDAR aéroporté

Le premier vol sur la Sélune, réalisé en Juin 2015, a produit plus de 10 milliards de points ! Il faut pouvoir traiter automatiquement ces données afin de séparer la végétation du sol, suivre le développement de la ripisylve, extraire la position des berges des rivières, cartographier les habitats halieutiques, détecter les zones en érosion ou sédimentation... Ces travaux nécessitent une approche pluridisciplinaire impliquant des spécialistes de l'hydro-géomorphologie fluviale, des écosystèmes aquatiques, du traitement du signal et des mathématiques appliquées pour venir à bout du problème.

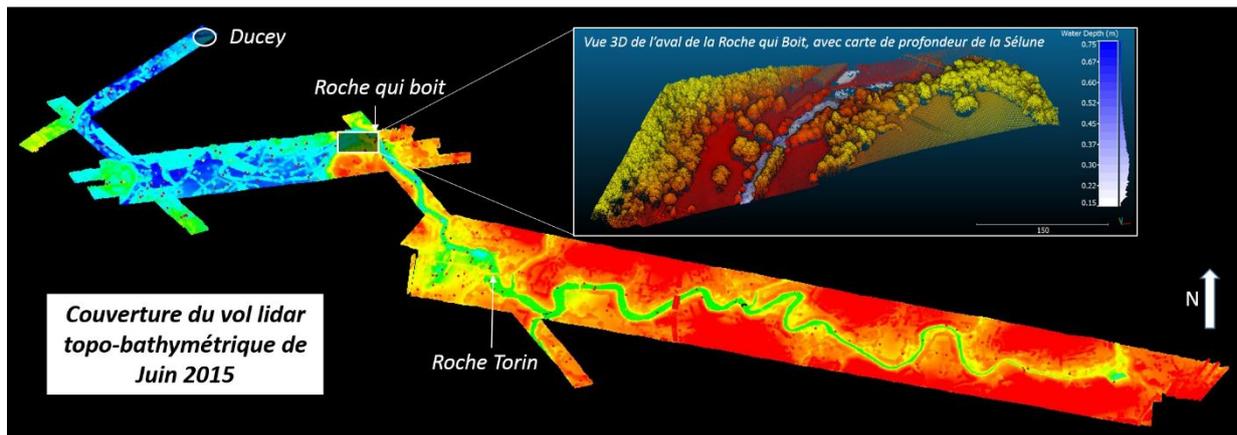


Figure 7 : Exemple de données acquises lors du premier vol sur la Sélune., zoom sur le secteur du barrage de la Roche qui Boit

Les résultats préliminaires du premier vol en juin (Fig.7) indiquent, comme attendu, qu'une grande partie de la bathymétrie du lit de la Sélune en aval des barrages est mesurable par lidar bathymétrique (profondeur atteinte de 1 à 2 m), mais que les périodes hivernales entre crues sont probablement plus optimales pour limiter la présence de végétation aquatique qui bloque fortement la pénétration du laser et limiter l'ombrage produit par les feuilles de la ripisylve pour améliorer la densité de points sur les berges.

L'analyse automatique des données nécessite le développement de logiciels spécifiques pour le traitement du retour d'onde complet et du temps pour les traiter, autrement dit des moyens humains indisponibles pour le moment. Ce premier vol, financé principalement par l'OSUR, avait pour principal objectif d'évaluer les problèmes de mise œuvre spécifique à la Sélune et les coûts afférents pour la mise en place d'un programme de campagnes ultérieures. Le déploiement du Lidar et l'analyse des données dans le cadre du suivi de recherche de la Sélune fait l'objet d'un projet spécifique (projet Alisé).

1.2.1.4 - LIDAR terrestre : suivi des dépôts sédimentaires en amont des barrages

Comme pour le LIDAR aéroporté, les bases de données topographiques générées par le Lidar terrestre sont extrêmement denses et leur traitement est encore en cours. On distingue nettement le cours principal de la Sélune, la ripisylve et les bancs de sédiments exondés au niveau du pont de la République (Fig.8)

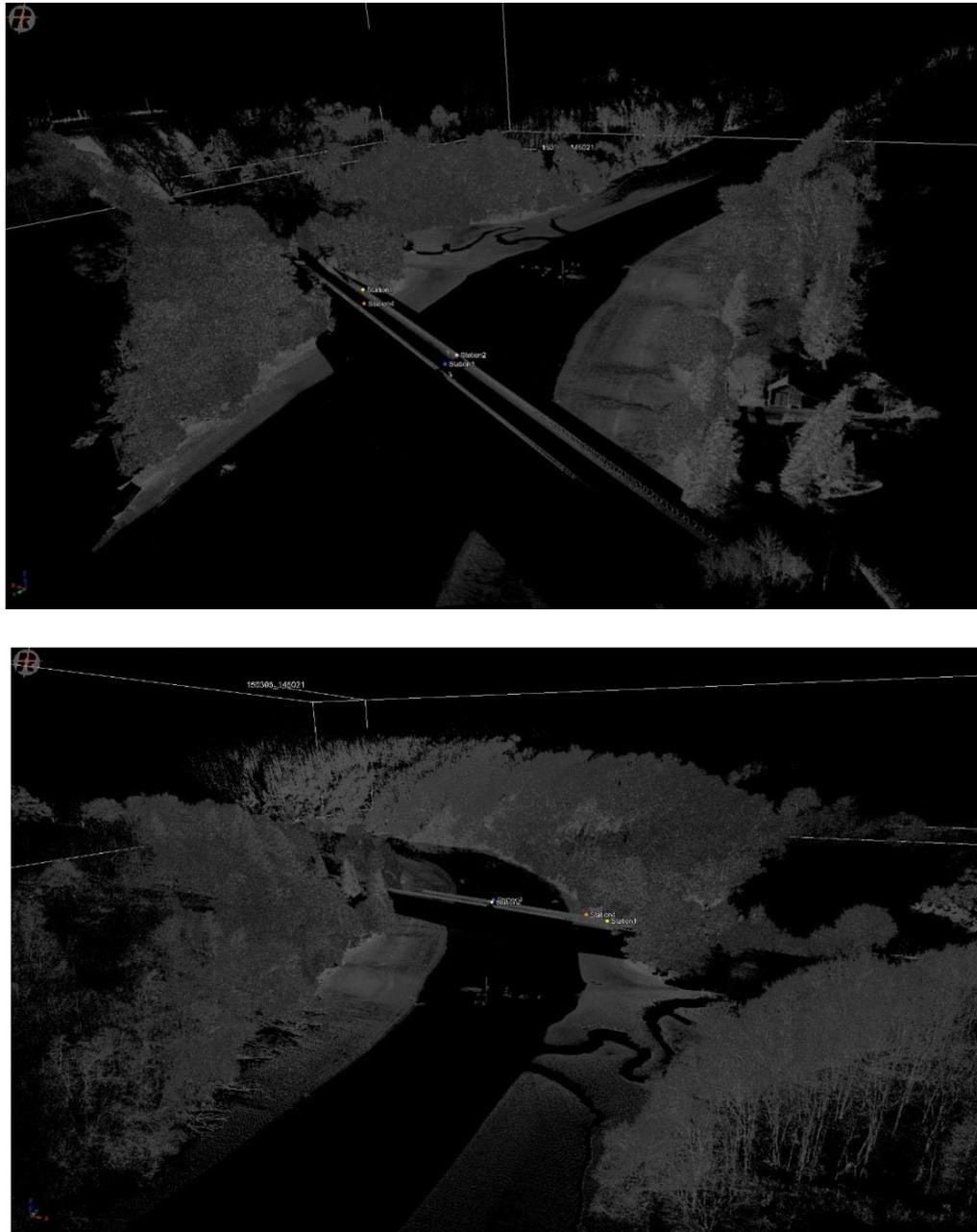


Figure 8 : Nuage de points TLS de la campagne de Juillet 2015, vue vers l'amont du Pont de la République (en haut) et vue vers l'aval (en bas)

1.3 - Caractérisation des sédiments grossiers (> 5 mm)

1.3.1 - Matériel et méthodes

Dans le but de caractériser un éventuel déficit sédimentaire en aval des ouvrages, nous avons cherché à établir si un processus de pavage s'était développé depuis les infrastructures (augmentation artificielle de la taille des sédiments du fait de l'exportation progressive des particules les plus petites qui ne sont plus remplacées par des apports amont). Nous avons donc procédé à une analyse granulométrique longitudinale en utilisant la méthode d'échantillonnage aléatoire de Wolman (1954) à 100 particules par site échantillonné. Les mesures n'ont été effectuées que sur les radiers afin de ne pas intégrer la variabilité inhérente aux différences granulométriques entre seuils et mouilles (Rollet 2007). L'intérêt tout particulier pour l'analyse des radiers est dû à l'homogénéité de leurs caractéristiques (Hauteur d'eau inférieure à 60 cm, vitesse du courant supérieure à 30 cm.s^{-1} et une surface de l'eau frisée) (J.R. Malavoi, Y. Souchon, 2002). A contrario, l'analyse des mouilles est possible avec cependant de nombreuses contraintes théoriques et pratiques (hauteur d'eau...).

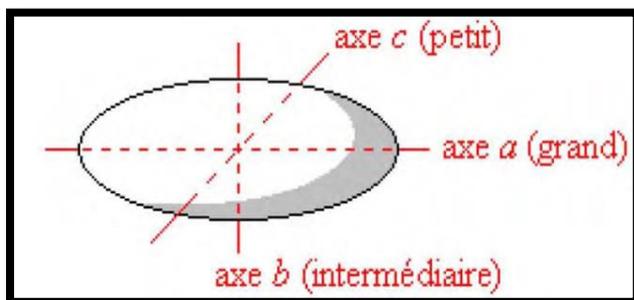


Figure 9 : axe de mesure d'une particule (Chapuis 2012)

17 radiers (têtes et milieu de radiers pour chaque entité repérée) ont été ainsi échantillonnés (Fig.10) et les axes B (Fig.9) des particules ont été mesurés. Différents indices de distribution granulométriques ont été calculés tels que le sorting, skewness, kurtosis ainsi que différents déciles caractéristiques (D10, D50 et D90).

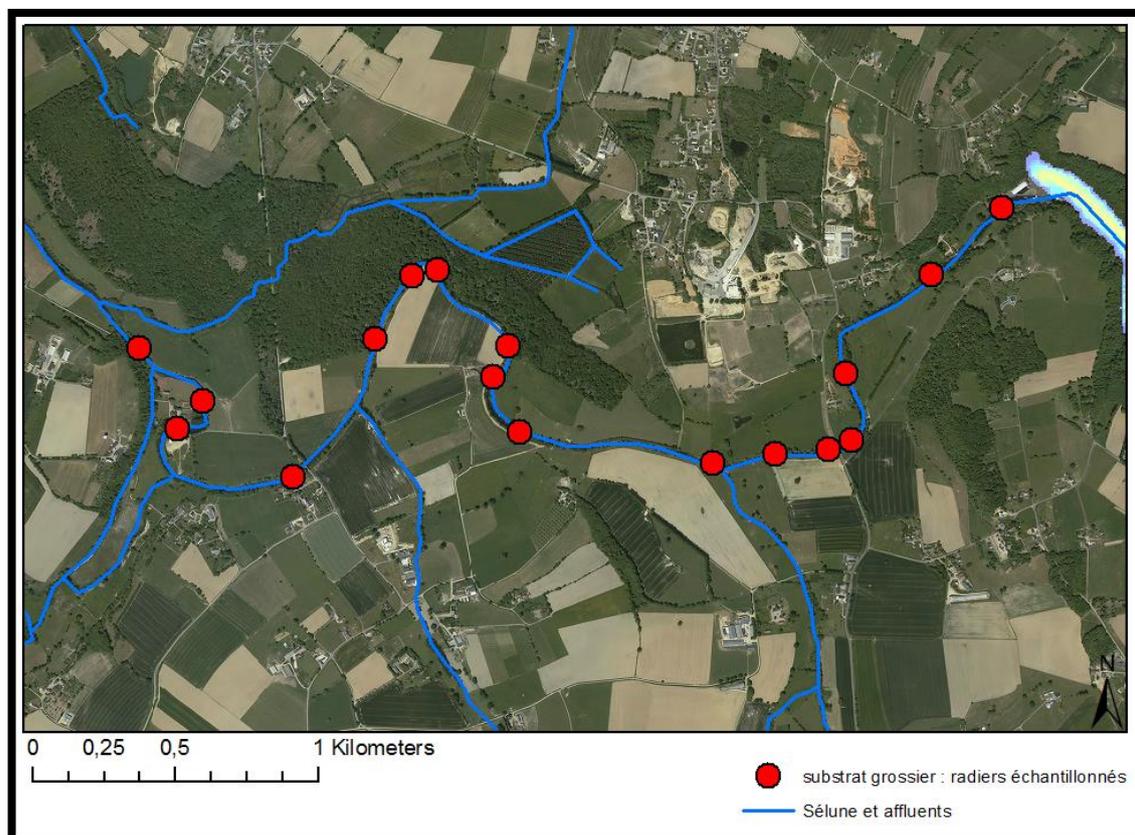


Figure 10 : Localisation des radiers échantillonnés pour le suivi des sédiments grossiers

1.3.2 - Résultats

Quelques soient les fractions considérées, Les résultats concernant les distributions granulométriques des têtes et milieu de seuil ne semblent pas indiquer de gradient longitudinal net, que ce soit dans le sens d'un affinement granulométrique naturel vers l'aval ou dans le sens d'un développement d'un secteur pavé particulièrement grossier en aval des ouvrages lié à un éventuel déficit sédimentaire grossier.

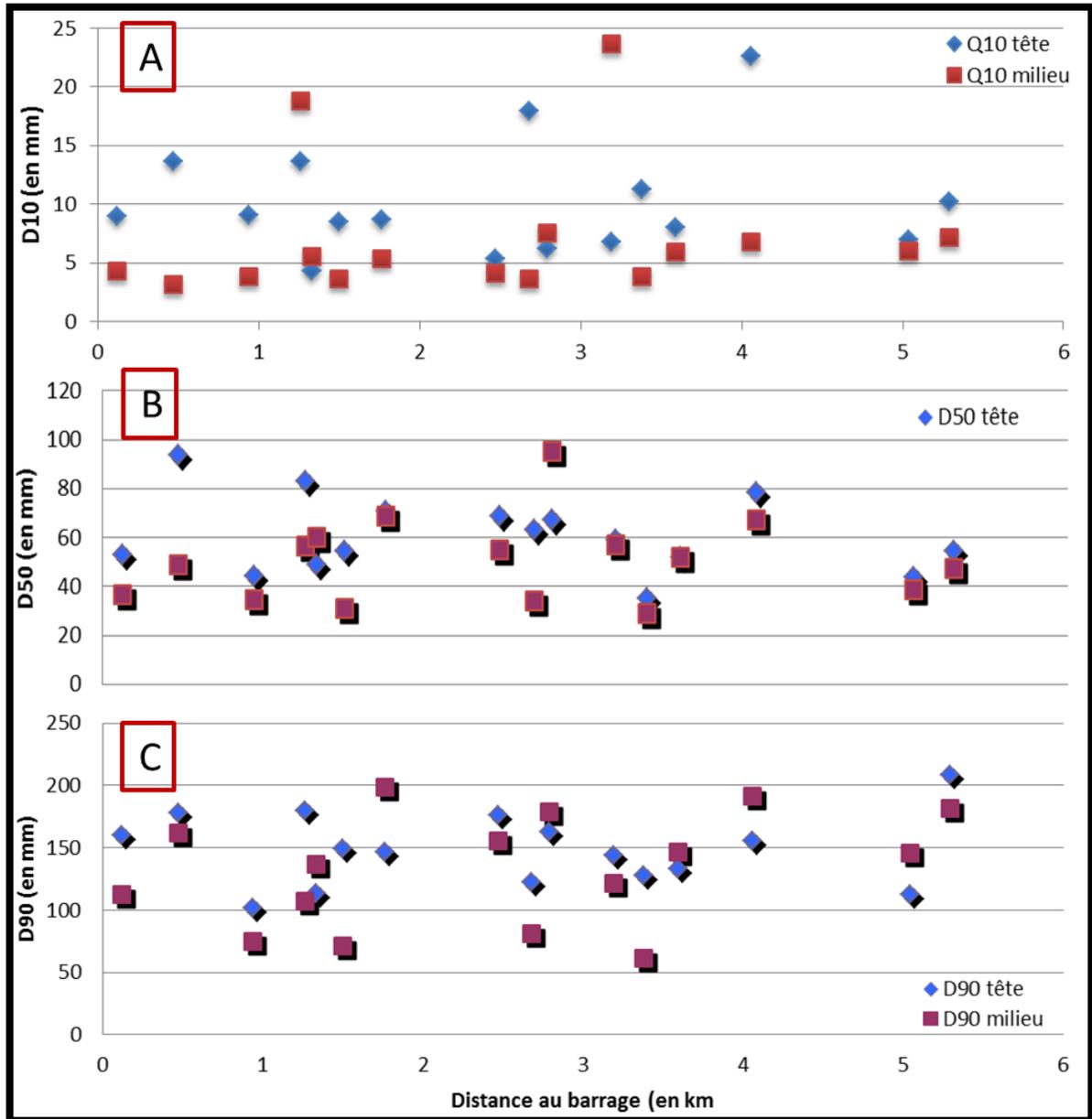


Figure 11 : Evolution longitudinales en fonction de la distance au barrage des A) D 10, B) D50 et C) D90 de la distribution granulométrique grossière (> 5 mm) en tête et milieu de radiers entre le barrage de LRQB et le seuil de Quincampoix

Nous avons complété ces observations par le calcul de l'indice de tri granulométrique (sorting, Fig.12) pour chaque placette échantillonnée. Cet indice permet d'apprécier si ces placettes sont plus ou moins homogènes. En théorie, en aval des ouvrages les dépôts sédimentaires sont soit très homogènes (tous les sédiments mobilisables ont été transportés et ne restent que les sédiments les plus grossiers) soit très hétérogènes (ne restent que les sédiments les plus grossiers colmatés par

des dépôts sableux qui parviennent à franchir les ouvrages). Sur notre tronçon nous observons que l'indice de tri se situe autour de valeurs moyennes (moyenne de 47 en milieu et 53 en tête de radier) sans qu'aucun écart longitudinal sensible ne soit enregistré (Fig.12 et Tab.2). Ce résultat confirme l'absence de structure granulométrique longitudinale perturbée (ou non) par un déficit sédimentaire amont.

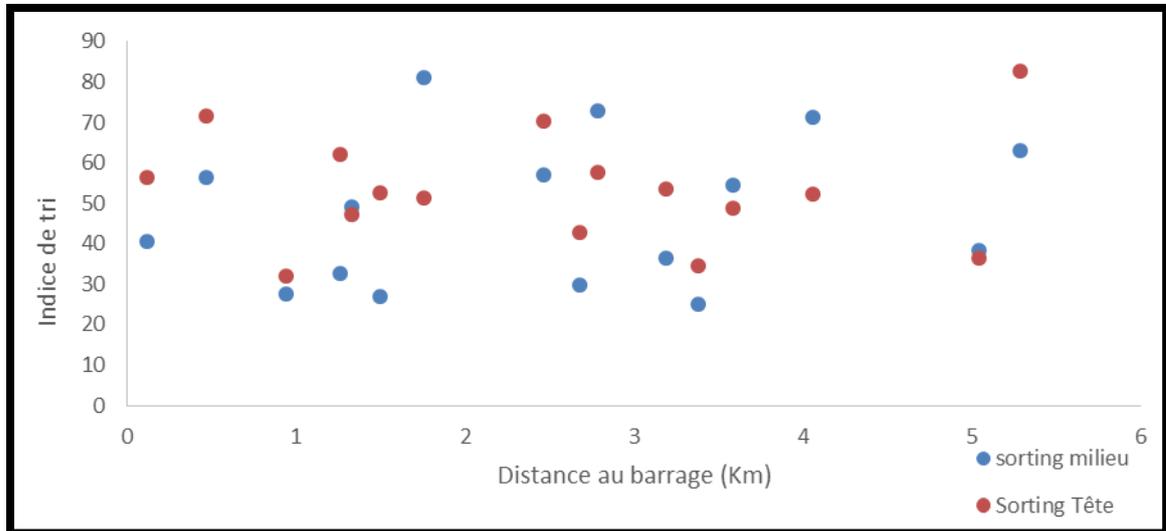


Figure 12 : Evolution longitudinale de l'indice de tri entre le barrage de LRQB et le seuil de Quincampoix

Tableau 2 : Seuils d'interprétation de l'indice de tri

Indice de tri	Interprétation
< 35	Très bien classé
35 – 50	Bien classé
50 – 71	Moyenne à bien classé
71 – 100	Moyennement classé
100 – 200	Mal classé
200 – 400	Très mal classé

Plusieurs éléments sont susceptibles d'expliquer ces observations :

- Une puissance fluviale relativement faible qui ne permet pas l'expression de ce tri granulométrique dans les fractions grossières ;
- La faible longueur du tronçon considéré (environ 6km), trop court pour permettre l'observation de ces tendances ;
- La forte densité d'aménagements sur le tronçon (pont, passerelles, élargissement liés aux abreuvoirs, anciens seuils etc...) qui perturbent d'éventuels gradients ;
- La perturbation biologique des structures granulométrique liée notamment à l'importante activité des lamproies qui en déplaçant les sédiments grossiers favorisent un remaniement verticale des structure granulométrique du fond du lit.

Nous avons enfin travaillé sur la structuration granulométrique surfacique interne des secteurs de radiers en analysant l'écart (pondéré par la taille des sédiments) entre les déciles caractéristiques des têtes et milieux de radiers (Fig.13).

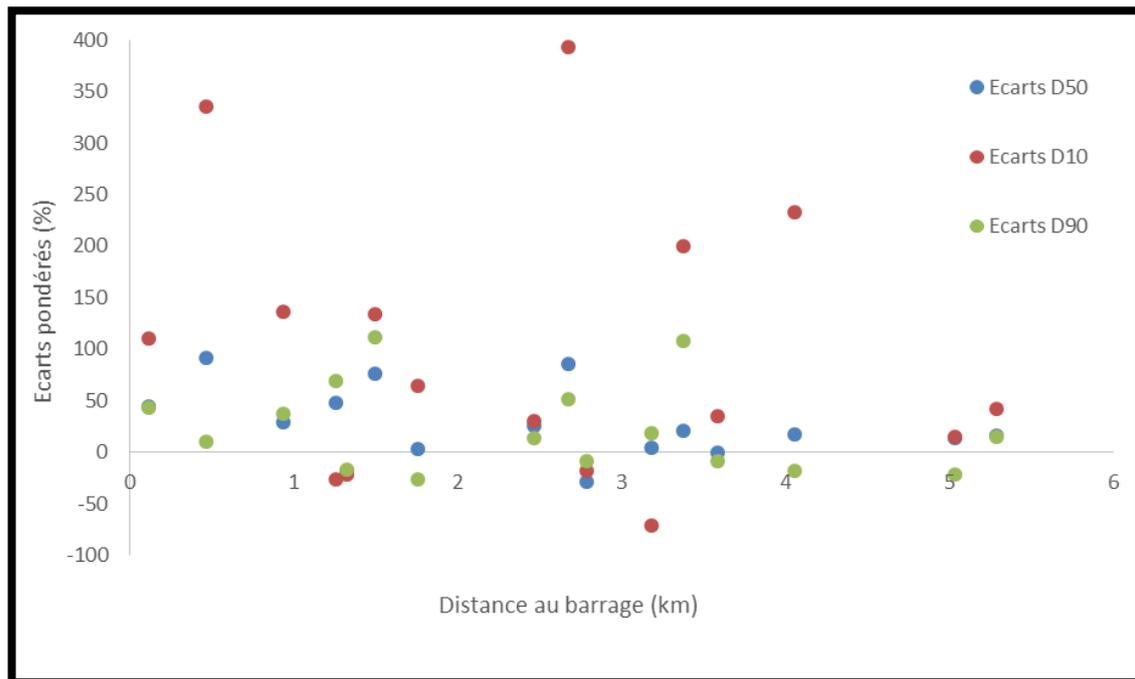


Figure 13 : Ecarts pondérés entre déciles de têtes et milieux de radiers

Si nous considérons les fractions granulométriques les plus grossières (D50 et D90), les résultats montrent que l'écart granulométrique entre têtes et milieux de radiers sont relativement importants en amont du tronçon étudiés (amont du PK 3 – Apex du méandre du bois d'Ardenne) et se trouvent fortement réduits sur la moitié aval (aval pk3). Ainsi dans la partie amont, les têtes de radiers sont en moyenne 27 à 35 % en moyenne plus grossières si on considère respectivement les D50 et D90 que les centres de radiers. A l'inverse les têtes de radiers ne sont plus que 14 et 16% en moyenne plus grossières que les centres de radiers dans la moitié aval. Il s'avère ainsi que les radiers présentent des structures granulométriques plus nettes en amont qu'en aval du tronçon. Ce résultat reflète une fois encore le contraste topographique et donc hydraulique existant au sein de notre tronçon avec une pente moyenne de 0.14% en amont du pk3 contre 0.07% en aval (Tab.1).

1.4 - Etude du transport des sédiments grossiers (PIT tags)

Le transport sédimentaire joue un rôle dans la dynamique morphologique des cours d'eau. On peut noter qu'à travers le dernier siècle, de nombreuses méthodes ont vu le jour en ce qui concerne le suivi spatio-temporel du transport sédimentaire. En effet, nous pouvons voir apparaître les premières formes de traçages sédimentaires en 1902 (Richardson) sur Chesil Beach, au Sud de l'Angleterre. Depuis les années 1950, l'utilisation de ces techniques n'a cessé d'augmenter, tout en se diversifiant dans la technique mais aussi dans le type de suivi. On peut voir une diversité importante de méthodes, qui ont toutes leurs avantages et leurs inconvénients, selon des critères de coût, de durabilité, de distance de détection et de taux de retour (Peinture, radio transmetteurs, noyau de fer, traceurs magnétiques et transpondeurs passifs).

Les objectifs de la caractérisation du transport de la charge de fond de la Sélune sont :

- Déterminer le débit pour que les particules constituant la charge de fond entrent en mouvement
- Analyser la dynamique de la charge de fond avant et après l'arasement (mobilité, distance de déplacement etc...)

1.4.1 - Matériels et méthode

1.4.1.1 - Présentation de la méthode

La méthode utilisée pour la caractérisation du transport de la charge de fond de la Sélune est celle du transpondeur passif, ou PIT tags (*Passive Integrated Transponders*), développés par TIRIS Technology et distribués par Texas Instrument. Ce sont des traceurs RFID (*Radio Frequency Identification*), utilisés à la base pour le suivi des populations de poissons puis pour le suivi sédimentaire. Les PIT tags sont constitués d'une micro-puce reliée à un solénoïde situé dans une capsule en verre. Le modèle choisi fait 23,1 mm de long et a un diamètre de 3,85 mm, avec une fréquence de 134 kHz. Le choix de la version RI-TRP-WR3P est la plus adaptée à notre étude puisqu'il est possible d'attribuer un identifiant à chacune des capsules (Rollet, 2007).

Ces PIT tags réagissent dès lors que le système de détection est à moins de 50 cm. Dans ce cas, le signal électromagnétique émis par l'unité de contrôle vient toucher le PIT tag qui émet à son tour son identifiant au système de détection. Le système de détection est constitué d'une antenne de 50 cm de diamètre, d'une unité de contrôle et de lecture, d'une batterie de 12 V, d'un écran et d'un casque d'écoute.

Cette méthode semble être adaptée à notre site d'étude. De plus, il existe un historique sur cette méthode. En effet, de nombreuses références ont déjà pu démontrer sa qualité. Les intérêts de cette méthodes sont multiples (Tab.3).

Tableau 3 : Avantages et inconvénients de la méthode PIT tags

Avantages	Inconvénients
Détection de particules enfouies dans la masse sédimentaire	Identification difficile si particules trop proches les unes des autres
Faible coût (3,82 euros l'unité)	Particules > 3 cm pour contenir le PIT tag
Individualise chaque particule	Forage des particules difficile si particules trop dures
Résistante	Détection impossible si particule enfouie à plus de 25 cm
Durable	
Non polluante	

L'intérêt principal de cette méthode est bien entendu le taux de retour dans des conditions où le cours d'eau ne présente pas de fortes modifications morphologiques (Tab.4), mais aussi la possibilité de suivre individuellement la trajectoire de chaque particule équipée.

Tableau 4 : Recensement d'études sur le traçage de particules en rivière par transpondeur passif PIT tags (Arnaud 2012)

Référence	Cours d'eau (largeur, m)	Nbre de PIT tags	D ₅₀ PIT tags (mm)	Antenne de détection		Protocole de déploiement des PIT tags	Protocole de recherche des PIT tags			Taux de retour (%)	Distance de transport (m)	
				Taille (cm)	Portée (cm)		Durée (mois)	Nbre. recherches / épisodes de crue	B/C ⁽¹⁾			
Lamarre <i>et al.</i> , 2005	Moras	7	204	85	50	25	un par un sur 36 transects dans le lit + aléatoirement	8	2 / 2	B, C	96-87	nr
Rollet, 2007	Ain	100	400	79	50	25	2*4 amas de 50 PIT sur 2 transects sur le banc	12	1 / 2 (> Q _{1,5})	B	36	moy. 40
Rollet, 2007	Ain	75	150	99	50	25	3 amas de 50 PIT dans le chenal	12	1 / 2 (> Q _{1,5})	C	25	moy. 30
Lamarre <i>et Roy</i> , 2008	Spruce Creek	6	196	86	50	25	un par un aléatoirement dans le lit	42	5 / 5 (> 0,5 Q _{pb})	B, C	83-57	moy. 2-8
Rollet <i>et al.</i> , 2008	Moras	6	214	80	50	25	un par un aléatoirement dans le lit	27	4 / plrs. épisodes compétents	B, C	87-90	max. > 500
Camenen <i>et al.</i> , 2010	Arc	70	300	nr	50	25	6 amas de 50 PIT sur le banc + bordure de chenal II + enterré	10 et 1	3 / 3 lâchers	B	80-12	max. > 100
Houbrechts <i>et al.</i> , 2011	Rulles	10	100	75	nr	nr	nr	24	8 crues (> Q _c)	nr	nr	max. 33
Chapuis, 2012	Durance	250	232	49	84	45	un par un sur 5 transects sur le banc + galets peints	5	1 / 1 (Q ₄)	B	41	moy. 90
Liébault <i>et al.</i> , 2012	Bouinenc	24	451	53	60	80	un par un sur 8 transects dans le lit + galets peints	26	3 / 3 (17 évts. > Q _c)	B, C	89-45	moy. 336-75
Arnaud, 2012	Rhin	100	1494	71	50 et 50 * 100	25 et 100	un par un sur 30 transects + 19 amas de 50 PIT sur 7 transects sur le site d'injection	11	2 / 4 (Q ₂ + 3 évts. > Q _c)	B, C	42	moy. 147 max. 665

⁽¹⁾ B : recherche sur les bancs ; C : recherche dans le chenal
nr : non renseigné

Pour cela, nous avons placé un décimètre et déposé chaque particule à une distance du prochain caillou en fonction de la largeur du cours d'eau à ce lieu. Grâce à cette répartition, nous pourrions voir la variation des mouvements entre le milieu et les côtés par exemple, ou bien entre une zone de vitesse et une zone de mouille. Les cailloux sont placés en moyenne à 25 cm les uns des autres (pour éviter le masquage entre particules lors de la recherche avec l'antenne) en ayant toujours commencé par la rive droite. Cela signifie par exemple que sur la station 2, le caillou 51 est le long de la rive droite et le 100 est le long de la rive gauche.

Pour permettre un suivi sur plusieurs années, nous avons mis en place des clous de géomètre dans les arbres de chaque côté des trois transects afin de référencer le plus précisément possible la position initiale des traceurs.

1.4.1.2 - Choix des stations

Nous avons choisi trois stations (deux en aval des barrages et un en amont) pour introduire nos traceurs (50 traceurs /station). Les caractéristiques de ces trois lieux en font des endroits propices à la mise en place de ce protocole. En effet, il est important de ne pas avoir de mouille profonde à l'aval immédiat des stations pour ne pas piéger trop rapidement les particules et pouvoir rapidement les détecter avec l'antenne. Nous avons choisi de mettre 100 particules en aval et 50 en amont afin de voir s'il existe une différence, et par conséquent un impact des barrages, sur le transport solide de la Sélune. De plus, comme l'arasement des barrages est prévu pour 2018, les particules mises en aval et en amont seront encore sur site après les travaux d'arasement. Nous pourrions donc avoir un état ante- et post-suppression, qui montrera l'impact ou non du barrage sur le transport sédimentaire grossier.

La première station se situe aux coordonnées GPS **48°34'18.9"N 1°06'56.2"W**, en amont des deux barrages et est ainsi non soumise à leur influence (Fig.14).



Figure 14 : Carte de localisation de la station 1



Figure 15: Photo station 1, vue amont (à gauche) et vue aval (à droite)

Nous avons choisi de placer la deuxième et la troisième station en aval des deux barrages, juste en aval du pont du Bateau. Nous pourrions ainsi analyser l'impact de l'arasement des barrages sur la dynamique sédimentaire le plus longtemps possible mais en évitant le secteur des « caves » profondes entre le barrage de la Roche Qui Boit et le pont des Bateaux où les traceurs risquent d'être piégés (Fig.16).

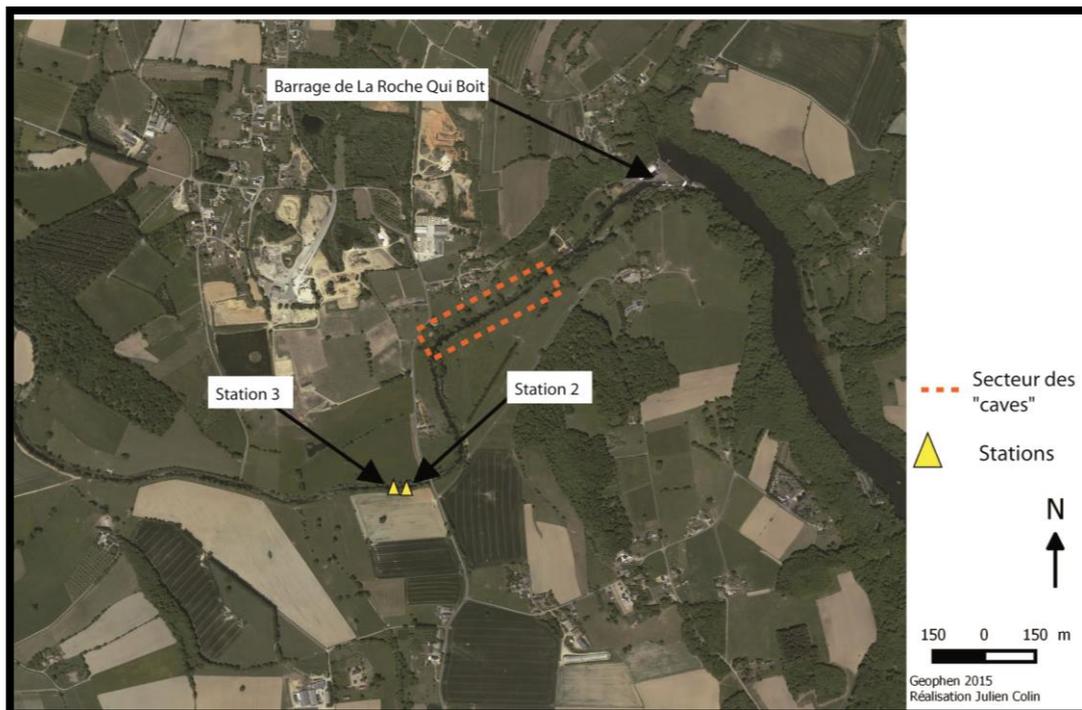


Figure 16 : Carte de localisation des station 2 et 3

La station 2 se situe aux coordonnées GPS **48°34'18.9"N 1°06'56.2"W** à précisément 36 m du pont du Bateau. La station 3 est située à 40,75 m en aval de la station 2 (**48°35'51.0"N 1°16'06.6"W**).



Figure 17 : Photos des stations 2 et 3, à gauche (station 2 : vue amont); au milieu (station 2 : vue aval) à droite (station 3 : vue amont)

1.4.1.3 - Caractéristiques morphologiques des stations

Pour chacune des stations, les caractéristiques morphologiques (géométrie, pente granulométrie) ont été relevées et la puissance fluviale a été calculée.

Tableau 5 : Caractéristiques spécifiques à chaque lieu de dépôt

	largeur à plein bord (m)	BV (km ²)	pente (m/m)	Débit de plein bord	Puissance spécifique (W.m ⁻²)
Station 1	17,1	627	0,0032	39,87	73,19
Station 2	21	761	0,0023	46,56	50,03
Station 3	17,4	761	0,0023	46,56	60,38

Afin de positionner les traceurs sur le fond du lit en respectant au mieux les conditions naturelles d'imbrication des particules, nous avons dû choisir des secteurs de radiers ce qui explique les puissances particulièrement élevées (50 à 73 w.m⁻²) au droit de ces stations. Ce positionnement en contexte particulier sera à considérer lors du premier relevé dans le cadre du suivi.

1.4.1.4 - Caractéristiques granulométriques des stations

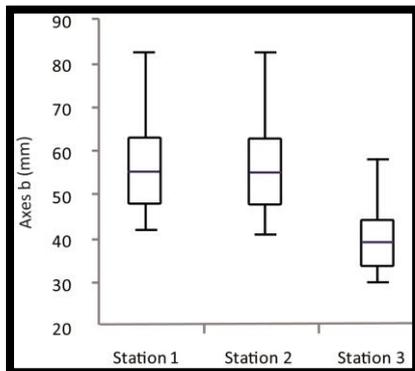


Figure 18 : Distribution granulométrique des stations

La granulométrie de chacun des sites a été définie par la méthode du « Grid Sampling » (Wolman, 1954), sur la base de 100 particules échantillonnées par station. L'axe b des particules a été mesuré au gabarit.

Les stations 1 et 2 présentent un D50 autour de 55 mm et alors que la station 3 comporte une granulométrie sensiblement plus fine (39 mm).

1.4.1.5 - Caractéristiques granulométriques des traceurs

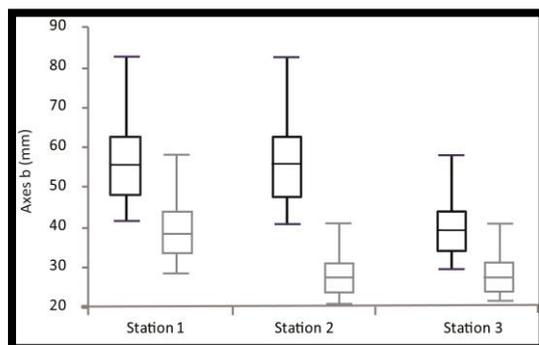


Figure 19 : Distribution granulométrique des sédiments composants les radiers (noir) et des traceurs (gris)

Afin d'utiliser des traceurs présentant les caractéristiques les plus proches de celles composant le fond du lit, nous avons commencé par récupérer des particules présentes sur le site mais compte tenu de leur nature leurs percages n'a pas été possible. En effet, la roche représentative de la zone d'étude est souvent cornéenne, roche métamorphique particulièrement résistante. Nous avons ainsi été amené à trouver dans le commerce des roches beaucoup plus facile à percer et présentant les mêmes caractéristiques en termes de masses volumiques et d'angularité. Cet échantillon a été complété par des particules du site que nous avons malgré tout réussi à percer. Au total 150 particules ont été percées puis équipées de transpondeurs. Chaque particule a été pesée et ses trois axes mesurés (Fig.9). Elles ont été ensuite réparties sur chacun des sites (50/station).

Comme les stations sélectionnées pour l'introduction des traceurs correspondent à des radiers où la puissance spécifique est relativement élevée (et présentant donc une distribution granulométrique plus grossière que celle composant la charge de fond susceptible d'être la plus mobile), nous avons choisi de retenir une granulométrie plus fine que celle des radiers pour insérer nos transpondeurs (Fig.19). Nous espérons ainsi être plus représentatifs des fractions les plus fines de la charge de fond.

1.4.1.6 - Perspectives

L'intérêt que présente cette méthode est de suivre les trajectoires individuelles des particules et permet ainsi de déterminer les distances et fréquences de mise en mouvement des sédiments composant le fond du lit constituant la charge grossière de la Sélune. Le suivi de ces éléments est fondamental pour établir l'importance des transferts de sédiments grossiers sur le fond des cours d'eau et de caractériser ainsi la dynamique de la charge grossière si importante dans la constitution des habitats et zones de reproduction piscicoles (notamment des espèces migratrices). Il y a donc tout intérêt à pérenniser ce suivi qui semble pouvoir répondre à des problématiques de temps et d'échelle, tout en appuyant l'état initial de la morphologie du cours d'eau.

1.5 - Caractérisation des sédiments sableux (<2mm)

Afin d'étudier l'influence des barrages sur les dynamiques spatiales et temporelles de la distribution granulométrique des sables, la fraction sableuse des sédiments présents dans la Sélune est suivie régulièrement. Le protocole appliqué est différent de celui pour la fraction grossière (§ 1.3).

1.5.1 - Matériel et méthodes

1.5.1.1 - Choix des sites

L'échantillonnage est réalisé de façon systématique sur les zones de dépôt de sables le long d'un transect de 8,2 km entre le barrage de la Roche qui Boit et le pont de Ducey. L'échantillonnage est soit manuel quand les niveaux d'eau le permettent, soit réalisé à l'aide d'une drague lancée depuis la berge (cf. matériel) Deux campagnes sont effectuées, la première les 17 et 18 juillet 2014 et la seconde le 21 Mai 2015 (Fig.20)

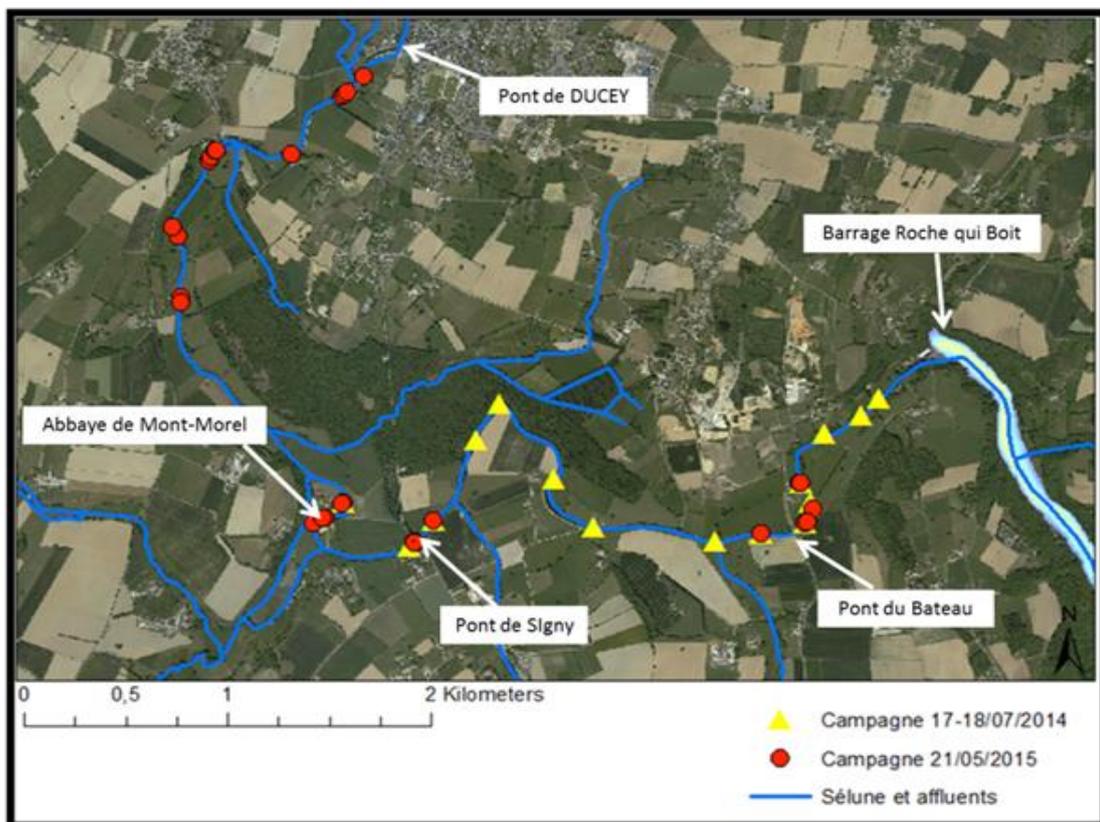


Figure 20 : Localisation des points d'échantillonnage des sables, campagne du 17-18/07/2014 et du 21/05/2015

Le choix des sites est principalement imposé par la présence de sable dans le cours d'eau qui est ponctuelle sur la Sélune. La Sélune depuis La Roche Qui Boit jusqu'au l'Abbaye de Mont-Morel présente un radier composé essentiellement de gravier et galets de taille minimale centimétrique avec très peu de composante sableuse. Dans ce tronçon, les dépôts de sable sont localisés à des points particuliers où la vitesse de l'eau diminue (derrière des obstacles : troncs, blocs, piles de pont). A l'aval de l'Abbaye de Mont-Morel, la profondeur de l'eau est de l'ordre de 2 à 3 m de manière stable jusqu'au pont de Ducey (exception faite du Moulin de Quincampoix). Il en découle une chute de la vitesse et un fond de rivière composé de graviers et sables. Dans ce tronçon les échantillons ont été effectués de manière plus régulière depuis la berge.

Afin d'étudier la distribution latérale, deux transects sont réalisés en aval immédiat du pont de Signy, le premier le 28/10/2015 (6 échantillons) et le second le 21/05/2015 (4 échantillons). Cette zone est choisie en raison de l'hétérogénéité de ces faciès d'écoulement provoquée par la présence des piles du pont.

Pour étudier la dynamique temporelle des distributions granulométriques au niveau des zones de dépôt, certains points sont échantillonnés lors des deux campagnes (17 et 18/07/2014 et 21/05/2015).

Un piège à sable est installé en aval immédiat du pont de Signy, sur une période de deux mois (du 05/11/2014 au 07/01/2015) avec différents régimes hydrologiques (débits mesurés au pont de Signy). Le piège est relevé de façon hebdomadaire au cours du premier mois puis une dernière fois après un mois de piégeage. Au total 5 échantillons sont prélevés pour analyse

Au total 46 échantillons sont prélevés pour analyse

1.5.1.2 - Matériel

- **Prélèvements**

Sur le terrain les prélèvements sont effectués soit manuellement soit à l'aide d'une drague lestée lancée depuis le bord. Une fraction représentative de l'échantillon est ensuite conservée dans un pilulier (Fig.21).



Figure 21 : A gauche, drague utilisée pour l'échantillonnage ; au milieu, lancé de la drague au milieu de la section ; à droite, sous échantillonnage des sédiments collectés

- **Préparation des échantillons et analyse**

L'ensemble des échantillons sont conditionnés au laboratoire. L'étude concerne les sables, seule la fraction sableuse est conservée (50-2000 μm), les échantillons sont donc tamisés pour éliminer la matière organique et les fractions minérales fines (argiles et limons) et grossières (cailloux). Les échantillons sont finalement séchés à l'étuve pendant 4 jours à 105°C. La distribution granulométrique des échantillons est obtenue à l'aide d'un granulomètre laser *Cilas 1180*. La taille maximale des grains admissible pour l'analyse à l'aide du Cilas 1180 est de 2 mm. On notera que pour les échantillons de la campagne du 17-18/07/2014 seule la fraction inférieure à 500 μm est analysée au granulomètre laser. La distribution granulométrique des sables (jusqu'à 2000 μm) est complétée grâce à trois tamis à 500, 1000 et 2000 μm .

1.5.2 - Résultats

1.5.2.1 - Distribution spatiale de la distribution granulométrique

Les résultats des analyses granulométriques mettent en évidence deux modes principaux de taille de grain. L'un est centré autour de 300 μm avec un écart-type d'environ 100 μm et le deuxième mode est centré selon l'échantillon à 900, 1100, 1400 μm avec un écart-type d'environ 250 μm (Fig.22). Notons que ce deuxième mode n'est présent que sur certains échantillons. A noter que la granulométrie des sables étant caractérisée par deux modes de tailles, il n'est pas pertinent de décrire cette granulométrie à l'aide de valeurs médianes ou de quantiles telles que les D50, D10 ou D90. Critères classiquement proposée pour caractériser la granulométrie d'un site (§ 1.3).

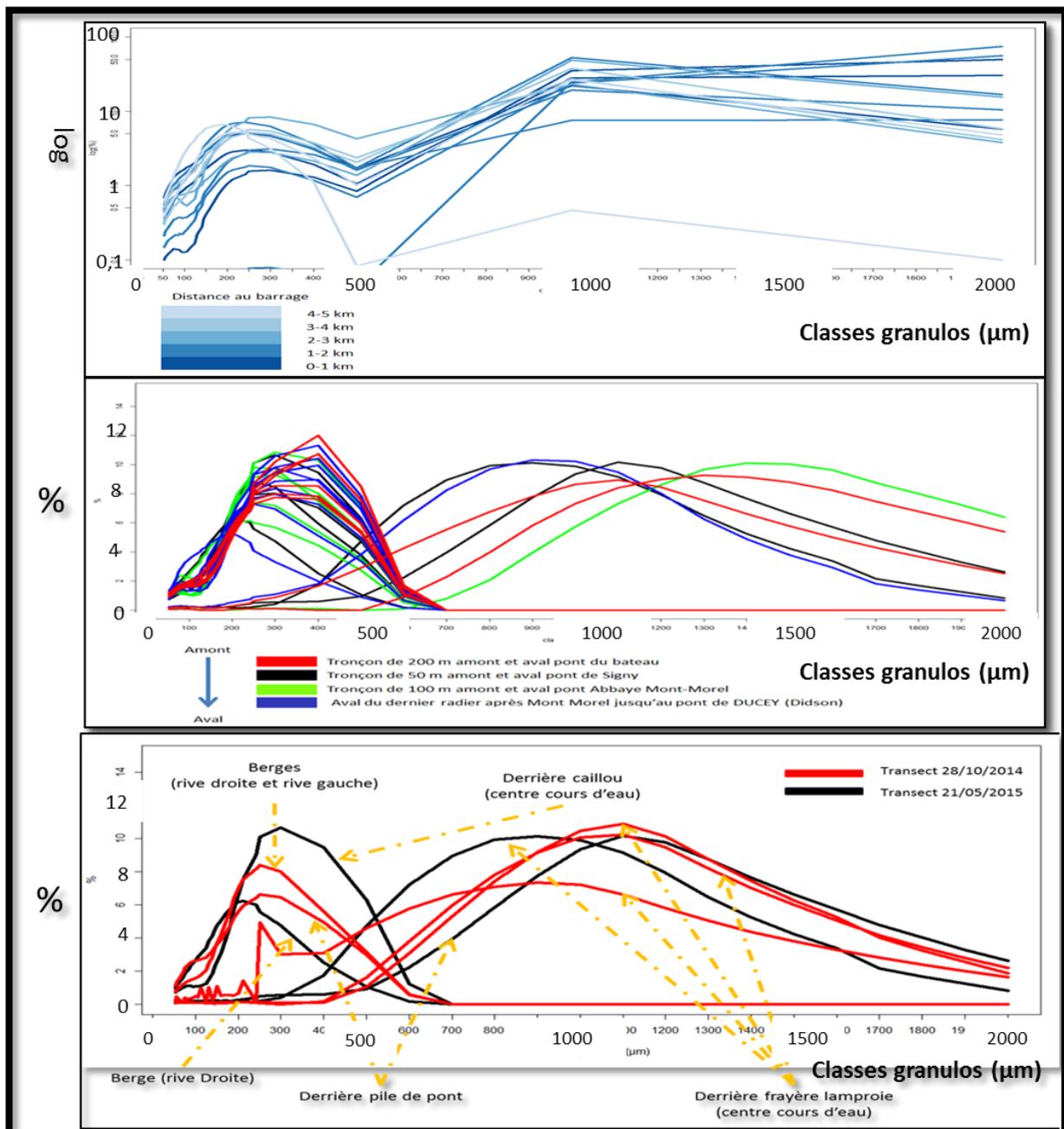


Figure 22 : Distribution granulométrique, campagne du 17-18/07/2014 (en haut) ; campagne du 21/05/2015 (au milieu) ; échantillons sur les transects latéraux aux sections de rivière (en bas)

On n'observe pas de variation longitudinale ou latérale significatives des granulométries en fonction de la distance à l'aval de la Roche Qui Boit.

1.5.2.2 - Evolution temporelle de la distribution granulométrique

Certaines zones de dépôt sont échantillonnées deux fois au cours de la même campagne ou au cours de campagnes différentes pour suivre l'évolution temporelle et spatiale des distributions sur une même zone. Les analyses ne montrent pas de variation temporelle de granulométrie des sables significatives si nous tenons compte de la variabilité spatiale observée. La stabilité dans le temps des modes granulométrique sont illustrés par les résultats obtenus sur le piège positionné à l'aval du pilier de la rive droite u pont de Signy. Au total, 4 échantillons sont prélevés sur une période de deux mois dans différentes conditions hydrologiques.

Tableau 6: Caractérisitiques des échantillons prélevés dans le piège

Ech	Pose du piège	Relevé du piège	Durée échantillonnage (en jours)	Q moy (m ³ /s)	Q max (m ³ /s)
P1	13/11/2014	19/11/2014	6	6	9,5
P2	19/11/2014	28/11/2014	9	6,7	11,1
P3	28/11/2014	03/12/2014	5	5,5	9,3
P4	03/12/2014	07/01/2015	35	13,3	28,7

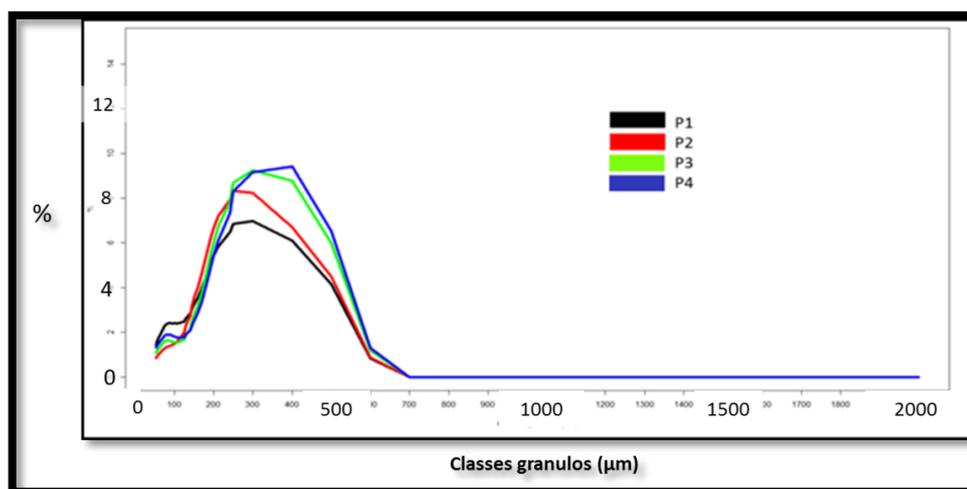


Figure 23 : Distribution granulométrique des échantillons correspondants au piège

A cet endroit, seul le mode centré sur 300 μm est présent et ne varie pas sur des périodes durant lesquelles le débit d'eau maximale varie entre 9 et 29 m³/s. (Fig.23).

1.5.3 - Synthèse sédiments sableux

A l'aval du barrage de La Roche Qui Boit il y a peu de dépôt de sables. Quelques sites, du fait de conditions hydrauliques particulières, présentent des dépôts superficiels de sable. La granulométrie des sables trouvés sur ces sites est caractérisée par deux modes de taille. Ces deux modes sont présents à plusieurs endroits entre le barrage et le pont de Ducey sans évolution spatiale ou temporelle notable. Ils peuvent être considérés comme une signature de la granulométrie des sables de la Sélune à l'aval des barrages. Pour le moment, il n'y a pas encore assez d'éléments pour savoir si cette signature est propre à la source sédimentaire à l'aval des barrages ou si elle est propre au régime hydrologique induit par les barrages ou à la source de sédiment à l'amont des barrages. Ce point fera l'objet d'investigations futures.

1.6 - Etude du transport des sédiments sableux (UB-Flow)

1.6.1 - Exploration des conditions hydrodynamiques par vélocimétrie

Une des variables physiques importantes dans l'équilibre physique, chimique et biologique d'un cours d'eau est la variabilité spatiale et temporelle des vitesses de l'eau. Cette variabilité conditionne les phases de transport et de dépôt des particules et des éléments dissous présents dans le cours d'eau et, à ce titre, modifie le milieu avec une récurrence plus ou moins rapide selon les processus d'évolution du système aquatique.

Les sédiments présents sur les berges, dans le lit du cours d'eau ou provenant des versants lors des épisodes de ruissellement sont ainsi directement impactés par les champs de vitesses de l'eau et sa variabilité à différentes échelles de temps et d'espace.

Dans le cadre de la Sélune, les barrages modifient la variabilité naturelle des débits et empêchent le transit aval des sédiments. Ils engendrent un contexte particulier qui sera sans doute modifié lors de leurs dérasements. Suivre l'évolution des conditions hydro-sédimentaires est un des objectifs du groupe en charge du suivi des flux.

La littérature spécialisée sur le transport sédimentaire fournit plusieurs modèles qui relient les variables hydrodynamiques à leur efficacité en termes de sédiments transportés selon leurs granulométries (voir HDR Recking, 2013 pour synthèse). L'ensemble de ces modèles se base sur l'hypothèse de conditions stables d'écoulement et de sources de sédiments inépuisables. Deux conditions rarement vérifiées en milieux naturels. Dans bien des cas, l'application des modèles théoriques implique l'utilisation de paramètres calibrés de manière empirique et permettent de réduire l'hydraulique complexe d'un cours d'eau à des conditions équivalentes aux hypothèses appliquées dans les modèles.

Deux observables sont néanmoins centrales dans la compréhension et la modélisation des processus d'érosion, de transport et de dépôt de sédiments. La contrainte cisailante du fluide appliquée en un point donné du cours d'eau, τ , et une variable qui caractérise la résistance à la mise en suspension des grains (généralement la taille des grains, d , mais pas seulement). Si le suivi de d fait l'objet du chapitre sur le suivi de la géomorphologie fluviale, le suivi de τ nécessite une caractérisation précise des gradients de vitesses notamment dans les 50 cm proches du fond.

L'utilisation d'un vélocimètre de haute précision se place dans cette perspective. L'UBFlow est en effet le seul appareil permettant de mesurer des profils de vitesses avec une résolution centimétrique sur une plage de 50 cm. Le programme de mise en œuvre de l'UBFlow comprend : (i) une phase de test et d'entraînement à la configuration de l'appareil selon les conditions hydrauliques, (ii) la conception d'une structure porteuse qui permet de positionner l'appareil dans la rivière en poste fixe pendant la période des crues. Pendant les années 2014 et 2015, l'utilisation de l'UBFlow a été centrée sur ces deux points.

Nous oublions délibérément dans ce rapport la présentation du vélocimètre UBFlow qui a déjà été décrite dans le précédent compte rendu d'activité de 2014. Le lecteur pourra trouver sur le site du constructeur Ubertone (<http://www.ubertone.com/>) des informations complémentaires et détaillées de l'appareil et de ces différentes versions.

1.6.2 - Exploration des configurations du vélocimètre UBFlow

L'UBFlow est un appareil très « ouvert » en termes de configuration, ce qui permet d'optimiser la mesure en fonction des caractéristiques hydrosédimentaires de la Sélune. Une phase d'apprentissage est donc nécessaire pour maîtriser les paramètres possibles de réglage. Dans le cadre d'un stage de Master 2 (Romain Cardot, 2015), nous avons exploré la gamme de configurations possibles en milieu contrôlé (canal ouvert en béton) et sur la Sélune. Les principales observations sont présentées ci-dessous.

1.6.2.1 - Expérimentation en canal

Cette première série de manipulations intervient afin d'effectuer quelques essais sur l'appareil avant son utilisation sur le terrain. Il s'agit notamment d'effectuer des tests d'installation et de paramétrage. Pour ce faire, la gamme des réglages possibles est explorée et les profils obtenus sont analysés.



Figure 24 : Canal de l'Agrocampus de Rennes et installation de l'UB-Flow sur la section droite du canal

Les essais sont effectués dans un canal expérimental extérieur bétonné à section trapézoïdale située sur le site de l'Agrocampus Ouest/INRA de Rennes (Fig.24). Le tronçon d'étude, d'une longueur d'environ 20 m, est rectiligne. L'écoulement y est de type fluvial ($0.05 < Fr < 0.17$) et turbulent ($7\ 000 < Re < 34\ 000$). Un déversoir rectangulaire est placé à l'aval du tronçon pour maintenir un tirant d'eau d'une vingtaine de centimètres. L'UB-Flow est placé au milieu du tronçon, à mi-largeur, en position horizontale sur un support. L'horizontalité est vérifiée à l'aide d'un niveau à bulle. Le débit est maintenu constant et mesuré en amont du tronçon par passage dans un canal Parshall. Plusieurs types de rugosité de fond ont été appliqués: une rugosité correspondant au béton du canal (< 2 mm) et des lits de graviers de taille pluri-millimétrique à centimétrique. L'UBF est testé sous différentes conditions d'écoulement. Pour ce faire, des acquisitions continues d'une durée de 60 secondes sont imposées à l'appareil. En terminologie « constructeur », il s'agit d'acquisitions de un *bloc* composé d'un nombre variable de *profils*, composés chacun de 128 répétitions de mesures.

En termes de configurations optimales, on peut retenir que :

- Le transducteur 1 permet la mesure des vitesses dans la tranche d'eau proche du fond avec une grande plage de configurations possible. Il présente cependant des limites de précisions à basse vitesses (7 cm.s^{-1}),
- Pour une vitesse faible (7 cm.s^{-1}), les mesures effectuées avec les deux transducteurs de l'appareil sont différentes d'environ 30% ; les mesures faites en parallèle avec un vélocimètre ponctuel sont similaires à celles obtenues avec le transducteur 3, contrairement à celles du transducteur 1 ;
- Pour les mesures de vitesses dans les tranches de 35 et 50%, le transducteur 1 permet une gamme de réglage plus étendue que le transducteur 3. Le choix d'une configuration donnée nécessitera cependant de se référer aux abaques établis lors de ces tests pour s'adapter au mieux aux conditions d'écoulement.

1.6.2.2 - Mesures effectuées dans le Sélune

L'UBFlow in-situ est un vélocimètre qui jusqu'à présent n'avait jamais été déployé en rivière. Il est donc nécessaire d'étudier la stratégie d'utilisation de l'appareil pour effectuer une étude spatialisée des profils de vitesses en rivière. Un des inconvénients majeurs de l'appareil est de ne disposer d'un retour visuel sur les mesures qu'à l'aide d'un ordinateur. Condition inapplicable pour un travail en rivière. Nous avons donc testé plusieurs stratégies de prise de mesures en « aveugle » afin de palier à cette difficulté. Nous présentons ci-dessous la mise en œuvre qui pour le moment nous semble la plus pratique.

L'UBFlow est fixé sur un support horizontal, lui-même fixé sur une perche équipée d'une nivelle sphérique à bulle. Les tirs des faisceaux sont dirigés vers le fond du cours d'eau, face au courant. Il est installé à une distance comprise entre 30 et 35 cm au-dessus du pied de la perche. Une fois l'acquisition de la zone lancée, les mesures sont effectuées en différents points permettant un quadrillage d'une section de cours d'eau en suivant le protocole suivant (Fig.25):



Figure 25 : UB-Flow en rivière. La nécessité d'effectuer des enregistrements de plusieurs minutes, implique l'utilisation d'un support stable pour maintenir l'horizontalité de l'appareil

1. La perche est positionnée au niveau du point de mesure. La verticalité est contrôlée à l'aide de la nivelle sphérique, puis la position est bloquée à l'aide d'un trépied à pince.
2. L'appareil est orienté dans le sens du courant le plus important grâce à un indicateur de l'orientation de l'écoulement : une ficelle dérivant librement à l'arrière du dispositif.
3. Un chronomètre est déclenché pour une durée d'acquisition. Ce laps de temps est nécessaire pour obtenir une moyenne significative du signal.
4. Une fois le temps écoulé, l'instrument est émergé pendant environ 1 minute. Cette étape permet de marquer la chronique de signal enregistré avec une dégradation du SNR, de l'amplitude reçue et des vitesses. Elle est essentielle pour le post-traitement des données. Les heures de début et de fin de la mesure sont également conservées pour contrôler le traitement ultérieur.
5. La mesure suivante peut ensuite être effectuée.

Trois secteurs de plusieurs dizaines de mètres carrés ont été étudiés à 200 m en amont du pont de Signy. L'objectif est de mesurer une diversité d'écoulements en couvrant différentes rugosités et formes du lit. Nous avons ainsi explorés un lit relativement homogène, composé essentiellement de galets ; un lit composé par endroits de sables, de galets, voire de petits blocs décimétriques à pluri-décimétriques ; un lit avec des frayères de lamproies.

La diversité des formes et de la qualité des profils mesurés a amené à une première typologie de profils à proximité du fond. Lorsqu'une partie logarithmique était observée, la vitesse de cisaillement a été déterminée en suivant la loi de Prandtl-Von Karman. Les valeurs de vitesse de cisaillement ainsi calculées seront ensuite comparées aux vitesses de cisaillement théoriques seuils théorique de mise en suspension des granulométries observées dans le fond de la rivière. Elle nécessite cependant une documentation assez précise (échelle centimétrique) de la rugosité du fond de la rivière.

Plusieurs tests sont actuellement en cours pour obtenir une image en 3 dimensions du fond de la rivière qui permettrait une analyse automatique de la granulométrie par analyse de forme.

Lors de ces tests en rivière, il n'a pas été possible d'utiliser le potentiel de l'appareil à donner des informations sur la direction des vitesses dans le plan 2D vertical. En effet les deux transducteurs n'ont jamais donné de signaux de bonne qualité de manière synchrone. Condition nécessaire pour remonter aux deux composantes de la vitesse dans le plan de mesure vertical. Des discussions sont en cours avec le constructeur pour palier à ce problème en explorant d'autres configurations possibles.

Un des points limitant majeurs reste l'impossibilité de visualiser la mesure en temps réel dans un milieu non protégé des intempéries. Dans le cas de la configuration fixe envisagée près du pont de Signy ce point est résolu avec la possibilité d'utiliser les équipements de la station de mesure pour dialoguer avec l'appareil à distance.

1.6.2.3 - Conception et installation d'une structure porteuse du vélocimètre

Pendant 6 mois (octobre 2014 – mai 2015), une structure métallique a été ancrée sur le fond de la rivière à 15 m à l'aval du pont de Signy équipée d'un accéléromètre. L'objectif était de tester si le dispositif d'ancrage assurait la stabilité de la structure pendant la saison des crues avant d'installer l'UBFlow sur la structure.

Les données de l'accéléromètre montrent que la structure est restée immobile sur toute la période d'essai, ce qui valide le concept envisagé pour la structure porteuse du vélocimètre. De ce fait, une version en inox de la structure a été réalisée et installée à l'endroit du test en septembre 2015 avec le vélocimètre avant la période des crues d'automne et d'hiver (Fig.26)



Figure 26 : Structure porteuse en inox pour l'UB-Flow

L'UBFlow est installé sur cette structure depuis octobre 2015. Une ligne téléphonique et un accès internet installés à la station de mesure du pont de Signy (station de suivi des flux hydriques, sédimentaires et chimiques) permet de dialoguer en temps réel avec l'appareil depuis un poste d'ordinateur éloignée du site. Il est ainsi possible d'adapter la configuration de l'appareil aux conditions d'écoulement sans intervenir physiquement sur l'installation. Nous espérons ainsi explorer sur une gamme importante de débit, le potentiel de mesure de l'UBFlow.

1.7 - Conclusion et perspectives

- **Conclusion**

Cette étude a permis d'établir une première sectorisation géomorphologique sur le tronçon fluvial en aval du barrage de La Roche Qui Boit. Cette sectorisation montre que les variabilités morphologiques sont principalement dues à des paramètres locaux (particularité notamment du secteur du bois d'Ardenne) et non à des modifications des paramètres de contrôle en amont du site (modification du débit liquide et solide).

Cette première caractérisation du fonctionnement morphologique actuel de la Sélune en aval des ouvrages ne nous a ainsi pas permis de mettre en évidence les conséquences morphologiques de l'interruption du transfert sédimentaire grossier par les ouvrages. Ces résultats ne sont pas très surprenants compte tenu de la relativement faible énergie de ce cours d'eau (notamment dans sa partie aval). A cette faible énergie s'ajoutent les conséquences des modifications du régime hydrologique naturel (notamment concernant la fréquence des débits de plein bord) qui restent encore à analyser. Il en résulte des processus morphologiques relativement lents et de faible amplitude. Il reste néanmoins à déterminer si l'absence visible d'ajustements liés aux ouvrages résulte de la forte résilience du système du fait de sa faible puissance ou d'un transport solide initialement faible et donc que peu perturbé par la construction des ouvrages.

Concernant la dynamique sédimentaire grossière, seule la poursuite du traçage pourra confirmer la faible mobilité du fond du lit et donc des processus morphogènes. La poursuite de ce suivi est également fondamentale pour la collecte d'éléments de connaissance du fonctionnement de la charge de fond dans la perspective d'opérations visant la restauration de la continuité sédimentaire sur ce tronçon. A ce titre, une étude des conditions de fonctionnement géomorphologique du cours d'eau en amont des ouvrages serait également pertinente, au moins pour caractériser l'importance du transport solide de fond en conditions « naturelles » et le type de continuité sédimentaire potentiellement restaurée après suppression des ouvrages.

- **Perspectives**

1/ Mesure du transport de sédiments grossiers dans la Sélune, responsable : Anne-Julia Rollet

Nous avons initié l'étude du transport de sédiments grossiers par marquage à l'aide de pigtags de galets. Cette méthode consiste à introduire des transpondeurs passifs sur un nombre conséquent de galets de différentes tailles. Leurs déplacements au cours du cycle hydrologique sont suivis à l'aide d'une antenne que l'on déplace manuellement en parcourant la rivière. Un premier test sur plusieurs centaines de galets est en cours.

2/ Suivis morphologiques au niveau du lac de Vézins (versants et dépôts sédimentaires), responsables : Olivier Maquaire, Anne-Julia Rollet

Il s'agit ici de procéder à des suivis morphologiques réguliers (1 à 2 par an) au moyen d'un Lidar terrestre qui permet l'acquisition de nuages de points topographiques à très forte résolution spatiale et très haute précision. Ce suivi a un double objectif. Le premier est de suivre les stocks sédimentaires fins aujourd'hui exondés afin d'établir leur mobilité ou non avant et après les opérations de restauration. Le second vise à observer l'incidence éventuelle des fluctuations des niveaux d'eau dans la retenue liées aux opérations de restauration sur la stabilité des versants afin d'appréhender tout risque morphologique mais également d'observer l'apparition de nouvelles sources sédimentaires grossières particulièrement favorables à la restauration de la charge de fond sur les anciens secteurs aménagés.

3/ Suivi de la déformation de la topographie liée à la décharge des barrages et de la nappe phréatique, responsable : Laurent Longuevergne

La vidange des barrages induisent de facto une décharge hydraulique de plus de 30 m d'eau sur la nappe adjacente aux barrages et par là même une modification sensible des volumes d'eau et de masse dans le sol et sous-sol. Une telle variation a plusieurs conséquences d'ordre physique avec, entre autre, un abaissement de la hauteur de nappe, une déformation de la topographie relative à la distance au barrage et une modification des échanges nappes/rivière. Quantifier les déformations de la topographie et le champ de gravimétrie autour du barrage au cours de leurs vidanges permettra d'établir l'impact d'une vidange sur les masses d'eau dans le sol et le sous-sol et des temps de réponse de la nappe à cette nouvelle condition hydraulique. Un programme de suivi a donc été envisagé afin de profiter de cette opération exceptionnelle à l'échelle européenne.

Cette action couple des informations issues des images du satellite GRACE, de mesures de nivellement et de gravimétrie précises au sol afin de quantifier la déformation centimétrique de la topographie à l'échelle pluri-kilométrique. Ces données permettront de connaître les propriétés mécaniques du sous-sol et la dynamique de la réponse de la nappe (niveaux et flux vers la rivière) suite à l'abaissement du niveau d'eau dans les barrages.

Le matériel de géodésie, l'analyse des images GRACE, et des données de nivellement dans le temps sont déjà financées par le programme CRITEX et le financement d'une bourse de doctorat du ministère de l'éducation nationale (thèse de Luca Guillemot). L'ensemble de ces investissements, hors salaires des permanents, correspond à un auto-financement de 150 k€.

4/ Mesure des échanges hyporhéiques nappe-rivière et modification des « habitats aquatiques » : responsables Alain Crave et Olivier Bour

L'objectif est de mesurer et analyser l'impact de l'effacement des barrages la Roche qui Boit et Vezins sur le système hydrologique (échange nappe-rivière) de la Sélune à travers la mesure de température de l'eau, de conductivité et d'oxygène dissous en différents points du lit de la rivière. Les eaux de nappe et de surface n'ont en effet pas les mêmes caractéristiques physico-chimiques. Le suivi temporel permet de comprendre les facteurs de contrôle des échanges nappe-rivières et de leurs évolutions en fonction des conditions hydrologiques sur le bassin.

L'un des points importants est de placer judicieusement les points de mesures aux endroits correspondant à de forts gradients de températures et de conductivité. Afin d'obtenir une information spatialisée avec une bonne résolution, nous envisageons des campagnes d'imagerie de la température sur tout le linéaire de la Sélune en utilisant une caméra thermique embarquée sur un avion léger (prix d'une campagne = 400 €). Une première campagne aurait lieu pendant l'été 2016, période où la contribution de la nappe au débit de la rivière est la plus importante de l'année. Nous pourrions ainsi localiser les biefs les plus intéressants pour déployer 700 m de fibre optique dans et sur le lit de la rivière. La mesure de température à l'aide d'une fibre optique est bien développée dans le milieu pétrolier offshore et commence, dans quelques laboratoires, à être utilisée pour suivre les champs de température en milieux naturels. Nous espérons ainsi pouvoir suivre 100 m² de rivière avec une résolution spatiale 0,5 m².

La mise en œuvre de cette technique nécessite néanmoins, en plus de la fibre optique, l'utilisation de matériels électroniques qui seront mobilisés sur la Sélune 2 ou 3 fois par an sur une durée d'une à deux semaines en fonction des variables hydrologiques et biologiques intéressantes. La fibre optique restant en place sur plusieurs années. L'acquisition temporelle continue des paramètres physiques étant assurée par un jeu de capteurs ponctuels (10 sondes autonomes de température, 4 sondes de conductivité et d'oxygène). S'ajoute à ces données, l'apport de la vélocimétrie déjà en cours d'acquisition sur la Sélune pour caractériser les conditions mécaniques d'érosion et de dépôts.

L'ensemble des données recueillies constituera la base d'un travail de thèse dont l'objectif sera d'étudier les propriétés de perméabilité hydraulique du lit de la rivière et l'impact des événements hydrologiques sur les échanges nappe-rivière et notamment ceux induit par l'arasement des barrages.

5/ Projet Alisé (Analyse Lidar de la Sélune) :

Le projet d'arasement des barrages sur la Sélune est un contexte intéressant de développement et d'application de cette technologie de par le déploiement de mesures in-situ complémentaires sur une période longue (16 ans). Les données Lidar bathymétrique à retour d'onde complet de par leur nouveauté nécessitent un travail de recherche conséquent d'interprétation et de validation pour exploiter tout leur potentiel. Le caractère innovant et fondamental de ce travail spécifique d'interprétation du signal lidar fera l'objet d'une thèse et d'un postdoctorat dans ce projet.

Ce projet est précurseur sur plusieurs points :

- Sur le plan de la recherche fondamentale, en ce qui concerne :
 - a. l'interprétation du signal Lidar en termes d'état du radier (végétation aquatique, granulométrie), de la charge en suspension et de l'état de la végétation;
 - b. le transfert d'échelle de données Lidar (Lidar aéroportés vs TLS) pour le suivi géomorphologique des rivières ;
 - c. l'acquisition de données sur les processus d'érosion et de sédimentation avec l'intégration de données hydrauliques, géomorphologiques, biologiques et anthropiques à des résolutions inégales sur un linéaire de cours d'eau;
- Sur le plan de la recherche opérationnelle avec :
 - a. le développement de méthodes automatiques de classification des données Lidar qui permettent de distinguer les informations obtenues de manière simultanée sur la végétation, la topographie, la bathymétrie et les niveaux d'eau le long d'un cours d'eau ;
 - b. le développement d'une méthodologie de mesure des cours d'eau et de leurs marges à très haute résolution spatiale et temporelle qui ouvre des perspectives nouvelles sur les protocoles la définition de critères de suivi pertinents .

Le projet d'arasement des barrages de la Sélune pourra ainsi bénéficier dès sa mise en place d'une technologie d'observation qui ne manquera pas d'être développée dans un avenir proche. L'application de cette technologie avant la phase d'arasement permettrait d'avoir une base de données homogène sur le suivi de l'hydromorphologie et de la ripisylve de la Sélune sur l'ensemble de la période d'observation (16 ans). L'arasement des barrages sur la Sélune est un projet d'ingénierie environnemental d'importance à l'échelle européenne. Il serait donc logique qu'il soit précurseur dans l'utilisation de technologies d'observation des cours d'eau novatrices et adaptées à l'échelle du projet.

2 - Géomorphologie : dynamique temps longs

Le suivi de la géomorphologie de la Sélune selon la dynamique temps longs, s'inscrit dans le cadre de la thèse d'Axel Beauchamp, « *Impact des aménagements hydrauliques sur les systèmes fluviaux bas-normands depuis 3000 ans : approche géomorphologique et géoarchéologique* ».

Elle est réalisée sous la direction de Laurent Lespez et Daniel Delahaye au laboratoire LETG de Caen. Le bassin versant de la Sélune est un des sites d'étude suivis dans le cadre de cette thèse.

2.1 - Contexte

La compréhension du système alluvial passe nécessairement par la capacité à restituer la dynamique des flux sédimentaires et des formes alluviales à différents pas de temps. L'enjeu consiste à déterminer la part des héritages morphologiques et sédimentaires afin d'apprécier leur rôle potentiel dans la dynamique du système restauré après le démantèlement.

Concrètement, le travail sur les formations alluviales entrepris dans le cadre de l'étude des dynamiques géomorphologiques de la Sélune a un double objectif :

1. Déterminer les stocks re-mobilisables dans les fonds de vallée ennoyés ou affectés par les remous hydrauliques engendrés par les ouvrages. En effet, leur connaissance est nécessaire pour déterminer l'ajustement latéral potentiel du système restauré. Celui-ci va dépendre de la nature, de l'épaisseur des sédiments holocènes mobilisables qui vont conditionner leur érodabilité et le poids potentiel des remobilisations des stocks sédimentaires hérités du détritisme holocène.
2. Déterminer les états de référence du système fluvial étudié à partir de l'analyse des archives sédimentaires capable de restituer la dynamique des formes et d'en déduire le changement d'équilibre entre les flux liquides et solides responsables de la dynamique de l'ajustement morphologique. Trois états sont pris en considération : (1) la situation avant les barrages (état 17^e-début du 20^e s.) qui correspond à un bassin versant agricole largement mis en valeur pour des pratiques encore en partie vivrières et une rivière exploitée pour des usages domestiques et sa force hydraulique (REF1) ; (2) La situation dans un système moins aménagé (5^e-10^e s ap. J.-C.) qui correspond à une mise en valeur agricole moins complète du bassin versant et à l'émergence des aménagements hydrauliques (REF2) ; (3) La situation du milieu de l'Holocène (6000-4000 av. J.-C.) qui correspond à un bassin versant et surtout un fond de vallée peu impacté par les sociétés et un cours d'eau dont le régime de fonctionnement devait être proche du régime naturel caractéristique des périodes interglaciaires (REF3).

Ce double objectif s'appuie sur un important travail de terrain (sondages et carottages) et des analyses de laboratoire (sédimentologie, micromorphologie, analyse géochimique (XRF), datations). Le calendrier du travail de terrain qui permet l'acquisition des données est défini en fonction des différentes étapes de la vidange des deux ouvrages.

Pour les années 2014 et 2015, les investigations concernent l'amont de la Sélune et l'aval de l'Isolant en tête du plan d'eau du barrage de Vezins et affecté par ses battements saisonniers et à l'aval de la retenue de la Roche-qui-Boit. Les tronçons choisis correspondent à ceux envisagés pour le suivi des dynamiques contemporaines afin de contribuer à caractériser globalement des tronçons représentatifs de différentes situations.

2.2 - Rappels méthodologiques et synthèse des travaux de 2014

En 2014 les recherches sur l'évolution holocène de la Sélune avaient été entamées au niveau du site de Virey à l'amont de la retenue du barrage de Vezins. Cette étude a permis de comprendre l'évolution morphosédimentaire de la Sélune et de sa plaine d'inondation ainsi que son fonctionnement suite à l'implantation du moulin de Virey depuis au moins le XVII^e siècle ap. J.-C.

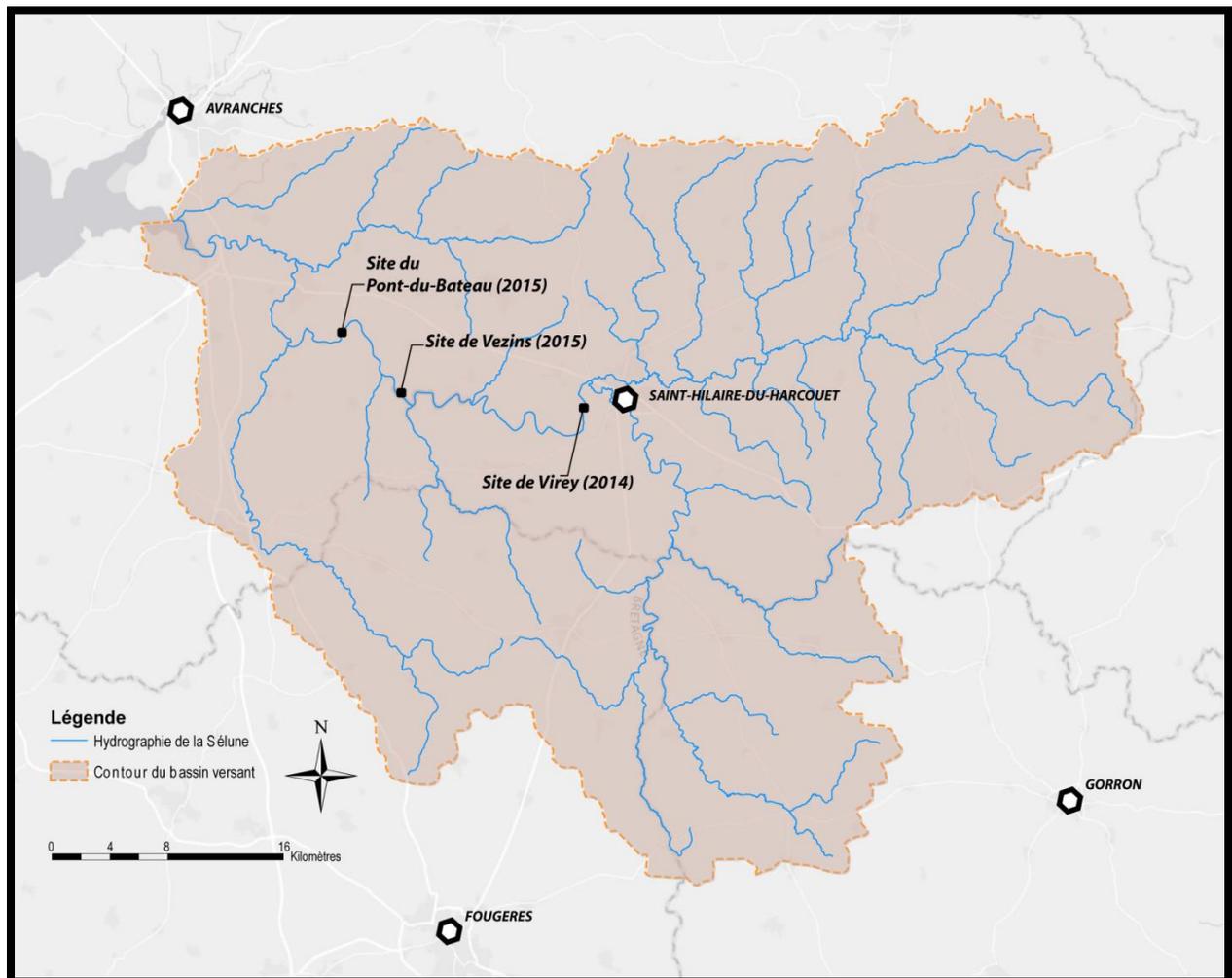


Figure 27 : Localisation des sites d'étude dans le bassin de la Sélune.

Ces investigations se sont faites sous la forme de sondages mécaniques réalisés sur toute la largeur de la plaine d'inondation. Ils ont été effectués avec le carottier à percussion du laboratoire LETG-Caen Geophen. Ces carottages permettent de sonder la totalité du remplissage sédimentaire holocène de la plaine alluviale de la Sélune et de prélever la totalité de la carotte sédimentaire pour effectuer des analyses complémentaires en laboratoire (granulométrie, micromorphologie, analyses physiques et chimiques). L'analyse de ces sédiments permet de reconstituer l'histoire hydrosédimentaire de la Sélune et des analyses radiocarbone au ^{14}C permettent de caler cette histoire chronologiquement.

Ces investigations sont accompagnées d'une étude historique du site à partir d'archives anciennes (cartes anciennes, photos aériennes, archives départementales...) qui permettent d'affiner l'histoire du site d'étude pour les périodes les plus récentes (du XVIIIe siècle à aujourd'hui).

L'histoire morphosédimentaire de la Sélune sur le site de Virey peut être résumée ainsi :

La majeure partie de l'Holocène (du Boréal à la fin de l'Antiquité) est dominée par des processus érosifs. Ainsi peu ou pas de sédiments ne sont déposés dans le fond de vallée et on observe uniquement un remaniement des sédiments hérités de la fin du Pléistocène par un chenal qui reste divaguant dans la largeur du fond de vallée. Cela s'explique par une forte couverture végétale du bassin versant qui empêche l'érosion des sédiments des versants et leur transport jusqu'au cours d'eau.

À partir du Moyen-âge, on assiste à un alluvionnement graduel limono-sableux et à une chenalisation progressive du cours de la Sélune avec la mise en place d'un bras secondaire intermittent.

Au cours des époques moderne et contemporaine, on observe une accélération très rapide de l'alluvionnement (1,5 à 2 m) correspondant à la mise en place d'un chenal étroit à berge haute au sein de la plaine alluviale dans la position qu'elle occupe actuellement. Cette transformation rapide correspond sans doute à une transformation importante des mises de mise en valeur agricole à l'échelle du bassin versant et la plaine alluviale et caractérisée par des aménagements hydrauliques (moulin, canal) en relation avec l'équipement hydraulique progressif du la Sélune.



Figure 28 : Aperçu du site de Virey et de son moulin

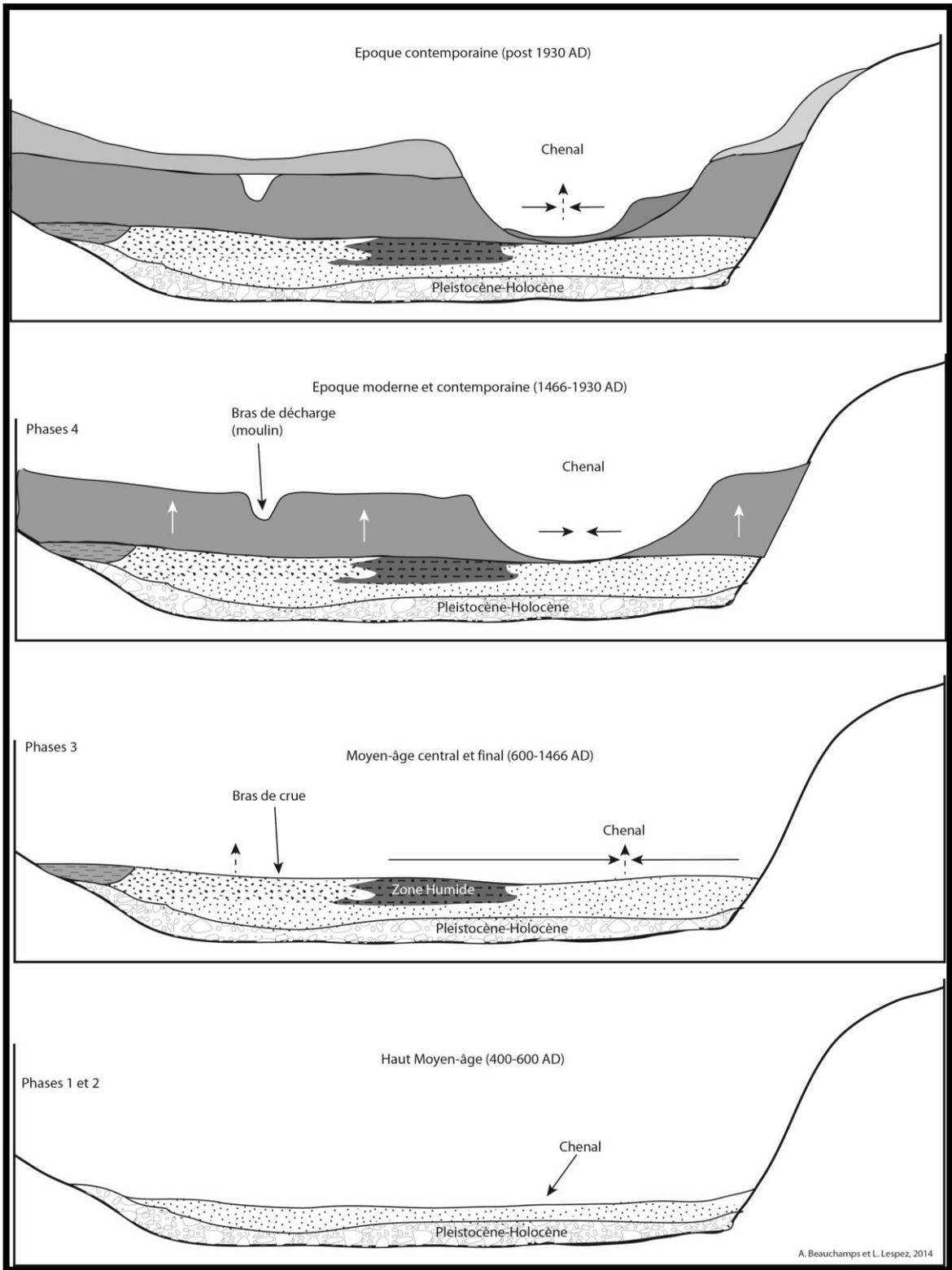


Figure 29 : Modèle d'interprétation de l'évolution hydromorphologique de la Sélune

2.3 - Résultats 2015

Cette année, les recherches ont été poursuivies dans la vallée de la Sélune. Suite aux investigations effectuées l'an passé dans la partie moyenne de la vallée sur le site de Virey, de nouvelles recherches ont été réalisées cette année plus en aval au niveau du site de Vezins et du Pont-du-bateau (Figure 30).

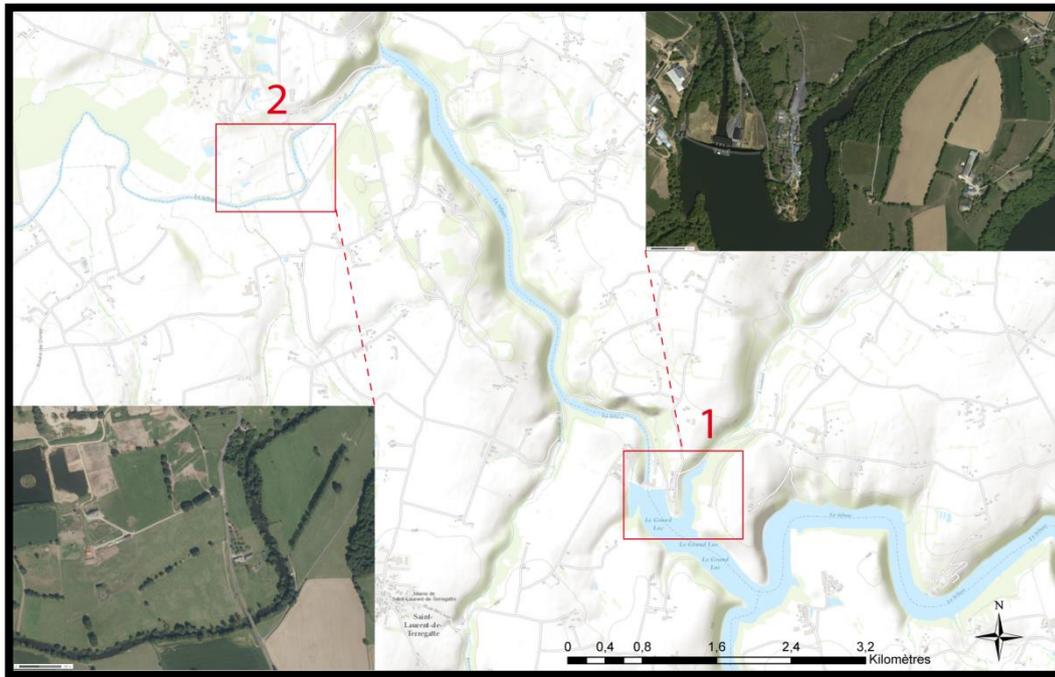


Figure 30 : Zoom sur les sites d'étude

2.3.1 - Site de Vezins

Le premier site investigué cette année est situé au niveau de la confluence de l'Isolant avec la Sélune dans la retenue du barrage de Vezins (Figure 30 et t31). L'objectif de ces sondages est de quantifier et dater les apports sédimentaires issus d'un petit bassin secondaire, piégés dans la retenue du barrage de Vezins depuis sa construction il y a 80 ans ainsi que les niveaux sous-jacents déposés au cours de l'Holocène. Pour cela, des sondages au carottier mécaniques ainsi que des sondages à la tarière à main ont été réalisés dans le fond de la vallée de l'Isolant au niveau de la confluence avec la Sélune où un maximum de sédiment a pu être piégé par la retenue du barrage (Fig.31 et 33). Au total, 34 sondages ont été réalisés à la tarière à main sur la zone émergée de la retenue suite au premier abaissement du plan d'eau. Ils ont été réalisés sous forme de transect en travers le fond de vallée de part et d'autre du chenal de l'Isolant (Fig.32).

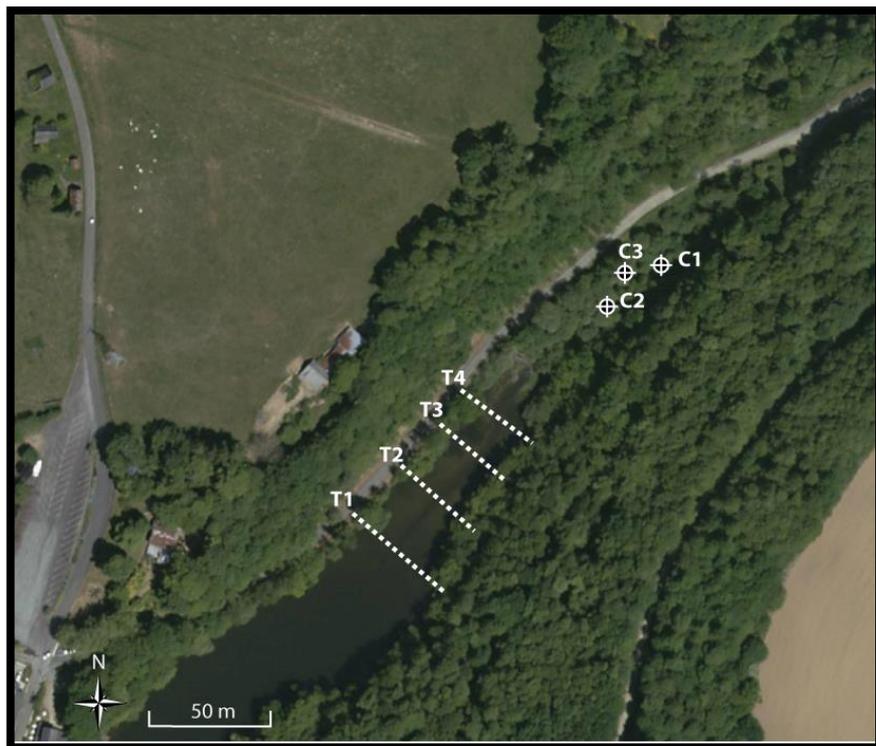


Figure 31 : Localisation des sondages réalisés à l'exutoire de l'Isolant

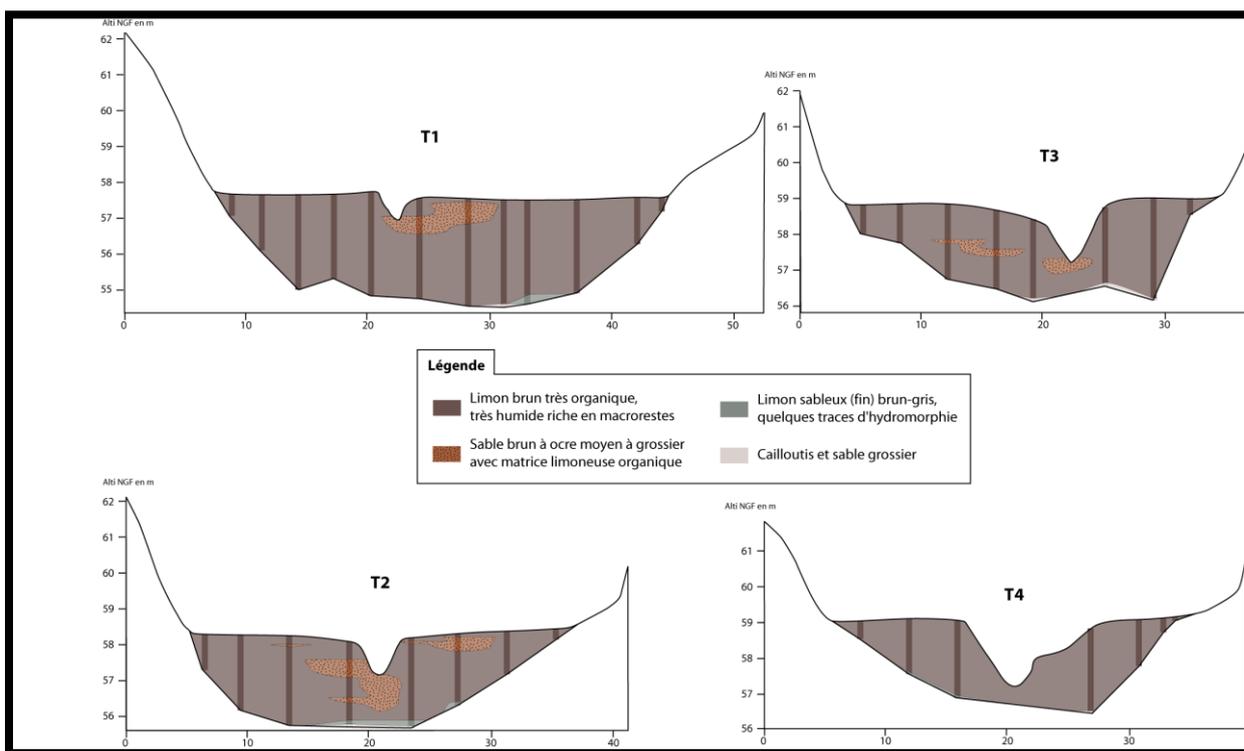


Figure 32 : transects stratigraphiques dans le bouchon sédimentaire de l'Isolant

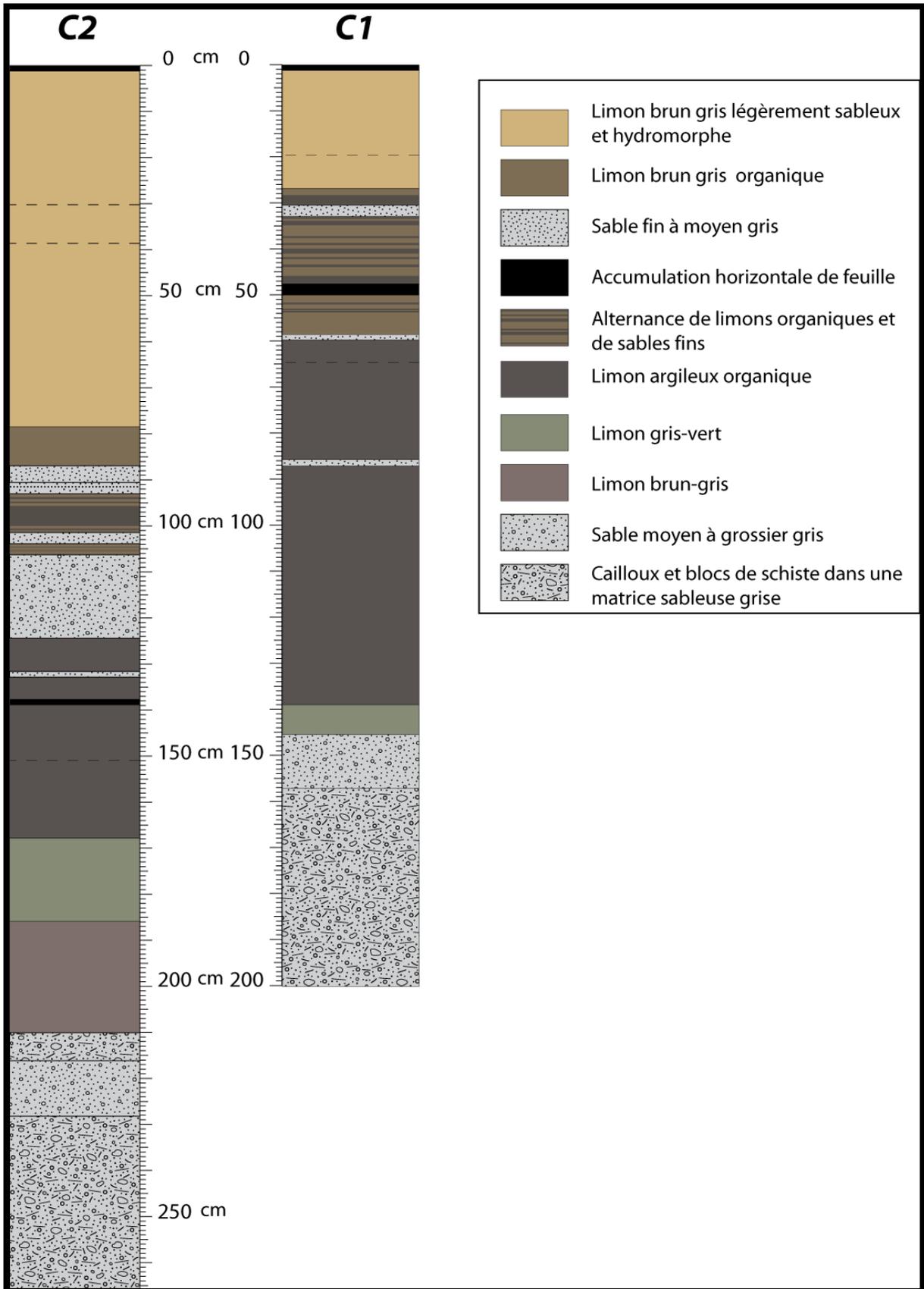


Figure 33 : Log stratigraphique des carottes C1 et C2

Les sondages ont permis d'explorer la majeure partie des sédiments apportés par l'Isolant qui se sont stockés au cours des dernières 80 années. Ils forment une stratigraphie homogène de plus de 3m d'épaisseur composée principalement de limon brun foncé très organique et humide contenant de nombreux macrorestes de matière organique. Ces sédiments limoneux très organiques se sont déposés par décantation dans la retenue du barrage. Ils sont entrecoupés par le chenal sableux de l'Isolant qui semble avoir divagué dans la largeur de la vallée au fil des années en suivant une aggradation progressive au fur et à mesure que les dépôts limoneux latéraux se mettaient en place. On retrouve à la base de ces dépôts des sédiments limono-sableux gris hydromorphes déposés par l'Isolant avant la construction du barrage correspondant aux premiers dépôts détritiques issus de l'érosion des plateaux et versants alentours à partir du Moyen-âge.

Ces sondages à la tarière ont été complétés par une série de trois carottages réalisés plus en amont (Fig.31). Ces sondages réalisés au carottier mécanique ont permis de prélever 3 carottes dont deux ont été ouvertes pour analyse (Fig.33) et la dernière a été gardée comme archive.

Des datations radiocarbone au C¹⁴ ont été pratiquées sur des échantillons prélevés sur les carottes C1 et C2 afin de comprendre la chronologie sédimentaire ainsi que les vitesses de sédimentation. Ces analyses ont été pratiquées au laboratoire radiocarbon de Poznan et au laboratoire Beta Analytic de Miami (Tableau 7).

Tableau 7 : Datations radiocarbone du site de Vezins

Site	Sample name	Lab. No.	Profondeur (cm)	Materiel	Age 14C (1σ)	Dates Calibrées (2σ) (IntCal13, Reimer et al. 2013)
Vezins	VeZ C1 110cm	Poz-74938	110	Bois	153.72 ± 0.38 pMC	1968 - 1970 cal AD
Vezins	VeZ C1 135cm	Beta - 407980	135	Bois	540 ± 30 BP	1389 - 1436 cal AD
Vezins	VeZ C1 150cm	Poz-74939	150	Bois	165 ± 30 BP	1720 - 1819 cal AD
Vezins	VeZ C1 155cm	Beta - 407981	155	Bois	210 ± 30 BP	1734 - 1806 cal AD
Vezins	VeZ C2 168cm	Poz-74851	168	Fibre végétale	110 ± 30 BP	1802 - 1938 cal AD
Vezins	VeZ C2 230cm	Poz-74852	230	Bois	270 ± 30 BP	1617 - 1668 cal AD

Afin de compléter ces datations radiocarbone, et du fait de la très faible ancienneté des sédiments piégés dans la retenue (moins de 100 ans) il a été réalisé une analyse des isotopes Cs¹³⁷ et Pb²¹⁰ sur la carotte C1 afin d'obtenir une datation plus précise des sédiments. Ces analyses ont été réalisées au laboratoire Chrono-Environnement UMR 6249 de Besançon.

2.3.1.1 - Principes de la méthode de datation au césium 137 et au plomb 210

- **Césium 137**

Ce radioélément artificiel permet l'obtention de deux repères chronologiques sur l'archive sédimentaire à savoir 1986 (Tchernobyl) et 1963 (arrêt des essais nucléaires atmosphériques dans le Sahara). Suivant les régions de France, le signal ^{137}Cs est plus ou moins marqué en raison de la grande variabilité des conditions de contamination en 1986.

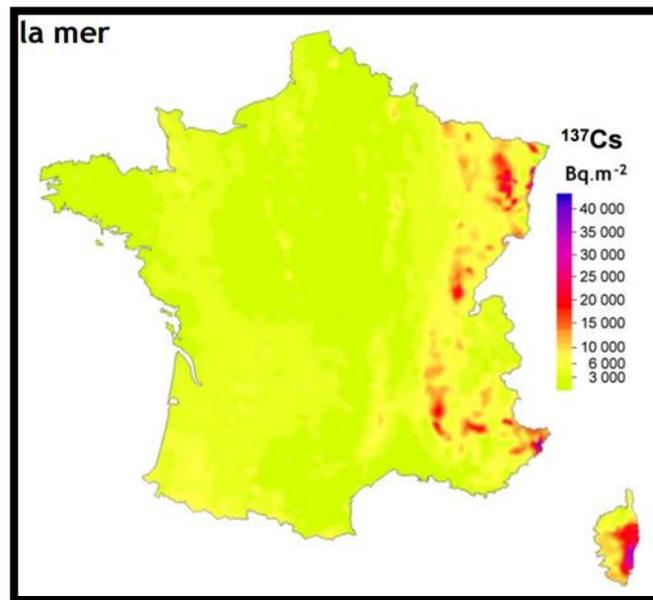


Figure 34 : Activités surfaciques de ^{137}Cs potentiellement présente dans les sols français en 2007 (IRSN, 2009)

- **Plomb 210**

Les ruptures d'équilibre radioactif sont déterminantes pour les études de géochimie dans l'environnement. Un exemple d'application des ruptures d'équilibre est celle du radon 222. Ce radioélément est le sixième descendant de l'uranium 238. Il est gazeux et s'échappe pour cette raison de la surface de roches contenant de l'uranium. Le radon, libéré dans l'atmosphère, est emporté par les vents et se retrouve au bout de quelques jours transformé en un isotope beaucoup plus stable, le plomb 210 de période 22.3 années. Les atomes de plomb 210, fixés par des aérosols, sont ramenés au sol. La surface terrestre est ainsi soumise à une minuscule, mais constante pluie de ces atomes radioactifs. Dans des milieux où les dépôts s'accumulent, la surface exposée s'enfonce progressivement et avec elle les atomes de plomb-210 qu'elle contient qui se retrouvent ainsi isolés. Ils disparaissent alors selon une loi simple de désintégration radioactive permettant de connaître l'âge du dépôt et la vitesse de sédimentation. La mesure du radium 226 (mesure du descendant en équilibre le plomb 214) permet de connaître la quantité de plomb 210 créé au sein même du sédiment qui peut contenir également de l'uranium 238 et de corriger la valeur en plomb 210 uniquement issu des aérosols de surface.

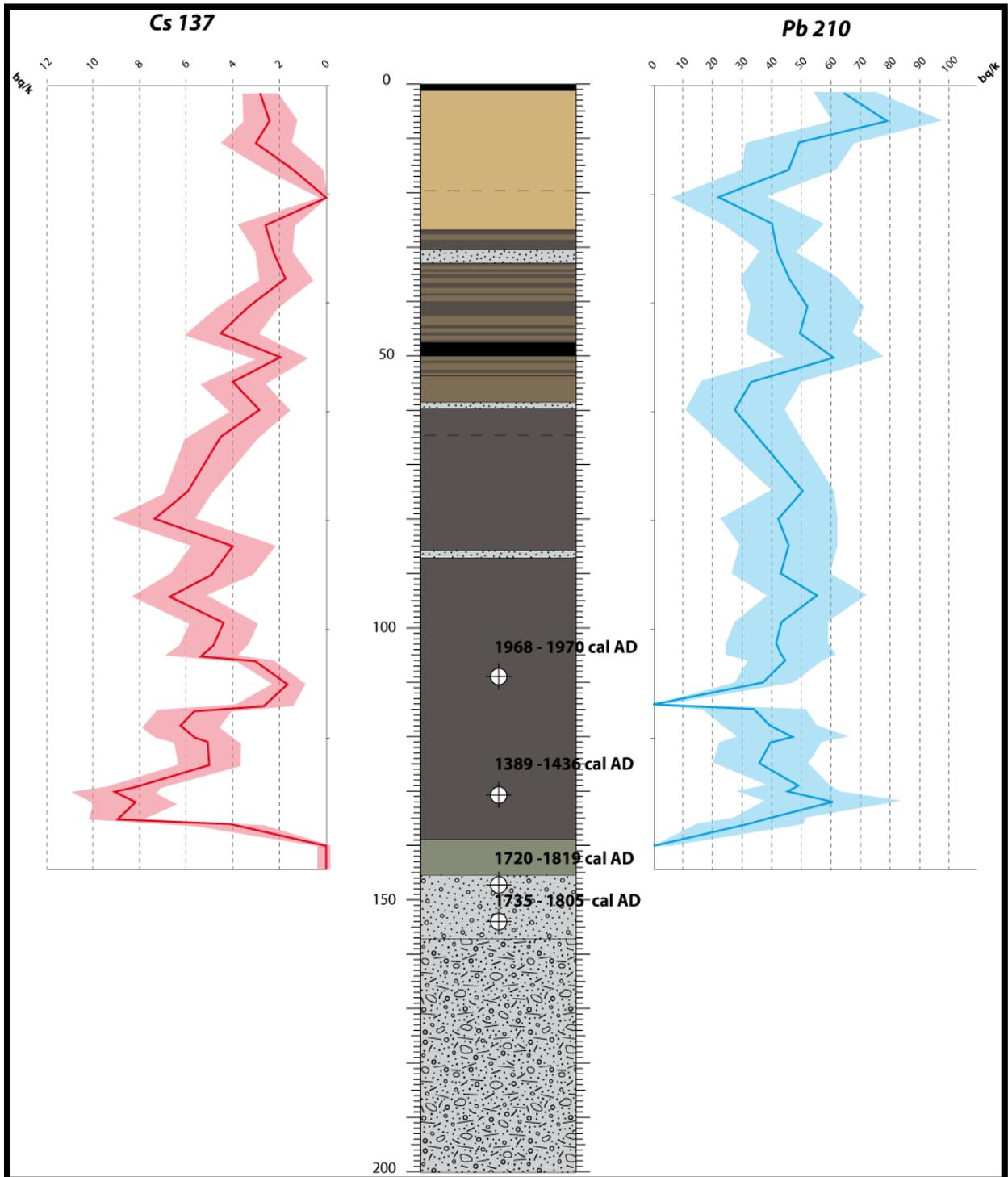


Figure 35 : Log C1 avec les courbes isotopiques de Cs^{137} et Pb^{210} ainsi que les datations radiocarbone réalisées

Les résultats de ces analyses peuvent se synthétiser de la manière suivante. La courbe isotopique du Plomb 210 ne permet pas de créer un modèle cohérent et robuste sur ces sédiments en raison des diverses perturbations relevées dans les couches notamment entre -25 et -60 cm. En effet, ce modèle devrait présenter une décroissance exponentielle régulière de la radioactivité du Pb^{210} pour les sédiments de plus en plus profonds. Cette fonction aurait permis de construire un modèle d'âge pour la totalité de la carotte échantillonnée. Cependant on observe des perturbations récurrentes de la radioactivité en Pb^{210} avec sur certaines zones, une augmentation de la radioactivité. Cette irrégularité apporte tout de même quelques informations.

En effet, elle peut s'expliquer par des crises détritiques (crues) qui provoquent des inversions stratigraphiques régulières. Il peut exister aussi une migration des atomes de plomb dans la colonne sédimentaire, ce qui provoque des anomalies isotopiques dans certains horizons.

Cependant, l'analyse de la courbe isotopique du Cs137 peut-être plus significative. Bien que les niveaux en césium soit très bas, on distingue 2 zones de forte radioactivité pouvant correspondre aux années 1986 (-80, -90 cm) et 1963 (- 130cm). De plus, la stabilisation de la courbe à 0 bq/k pour les deux derniers échantillons (140 et 145 cm) pourrait indiquer que ces niveaux se sont déposés avant 1945 (premiers essais atomiques aériens). Cette Chronologie est corroborée par la datation C14 effectuée à - 110 cm qui date l'horizon à la fin des années 1960.

Un modèle d'âge précis ne peut pas encore être proposé, mais une interprétation chronostratigraphique peut être avancée.

- Phase 1 : Une sédimentation grossière se met en place dans le fond de la vallée. Celle-ci est héritée de la sédimentation Weichsélienne et se trouve remaniée jusqu' à la fin de la Période moderne (1800 ap. J.-C.).
- Phase 2 : Sur cette sédimentation alluviale grossière se met en place au XIXe siècle une sédimentation détritique plus fine. Elle provient de la redistribution par le cours d'eau de sédiments limoneux issus de l'érosion des sols lœssiques présents sur la partie amont du bassin de l'Isolant. Cet horizon limoneux se retrouve bien aussi sur la carotte C2 et correspond certainement aux premières arrivées massives de limon probablement en lien avec un changement de pratique agricole et d'ouverture du paysage.
- Phase 3 : Ce niveau de sol va être ensuite ennoyé lors de la mise en eau du barrage en 1932 et il se met en place ensuite une sédimentation limono-argileuse très organique par décantation dans la retenue du barrage. Ces dépôts sont interrompus par des périodes d'exondation probablement lors des vidanges complètes de la retenue. Ainsi sur la carotte C1, l'horizon sableux intercalé dans les limons argileux organiques (-86 cm) peut être interprété comme la trace de ruissèlement de l'Isolant lors de la vidange de 1982 juste avant la catastrophe de Tchernobyl marquée par le pic de césium à -80 cm.
- Phase 4 : Suite à cette longue période d'enneigement, la surface du sol rattrape le niveau de la retenue d'eau et il se trouve dans la zone de battement de la queue de la retenue. Cet épisode est marqué par une alternance très fine de limon organique et de sables fins gris qui témoigne d'une alternance annuelle de basses-eaux estivales et de hautes-eaux hivernales. Cette sédimentation s'est probablement mise en place au cours de la décennie 90.
- Phase 5 : Cette dernière phase correspond à la mise en place d'une sédimentation limoneuse homogène. Ces sédiments amenés par l'Isolant proviennent de l'érosion des surfaces agricoles du bassin versant et se trouvent redistribués ensuite par le cours d'eau. Ils se sont mis en place sur une plaine d'inondation hors d'eau, mais toujours affectée par les battements de la nappe (hydromorphie). Cela correspond certainement à une période comprise entre le début des années 2000 et l'actuel. En effet, depuis l'hiver 2000/2001, EDF a baissé la cote d'exploitation du plan d'eau de Vezins de 1 mètre ce qui a entraîné l'exondation de terres immergées en queue de retenue.

2.3.2 - Site du Pont-du-Bateau

Après avoir sondé l'année dernière et cette année les sédiments de la plaine alluviale de la Sélune en amont et dans la retenue du barrage de Vezins, une campagne de sondage a été menée en aval des deux barrages (Vezins et Roche-qui-Boit). Ces sondages permettent de connaître le remplissage sédimentaire du fond de vallée directement en aval du barrage de la Roche-qui-Boit (Figure 30).



Figure 36 : Localisation des carottages sur le site du Pont-du-Bateau

Leur implantation fait suite à la reprise de travaux hydrogéologiques réalisés au début des années 60 en vue de la création d'une station de pompage d'eau potable pour l'alimentation de la ville de Ducey. Cette opération comprenait la réalisation de carottages en travers la plaine d'inondation dans les parcelles en aval du Pont-du-Bateau (Figure 36). La reprise de ces travaux a permis l'élaboration de trois transects sédimentaires successifs de la plaine d'inondation en aval du Pont-du-Bateau (Figure 37). Ainsi en 2015, un nouveau transect sédimentaire a été réalisé en amont du pont afin d'avoir une image spatialisée de l'évolution des sédiments de la Sélune sur un tronçon de près de 700 m de longueur.

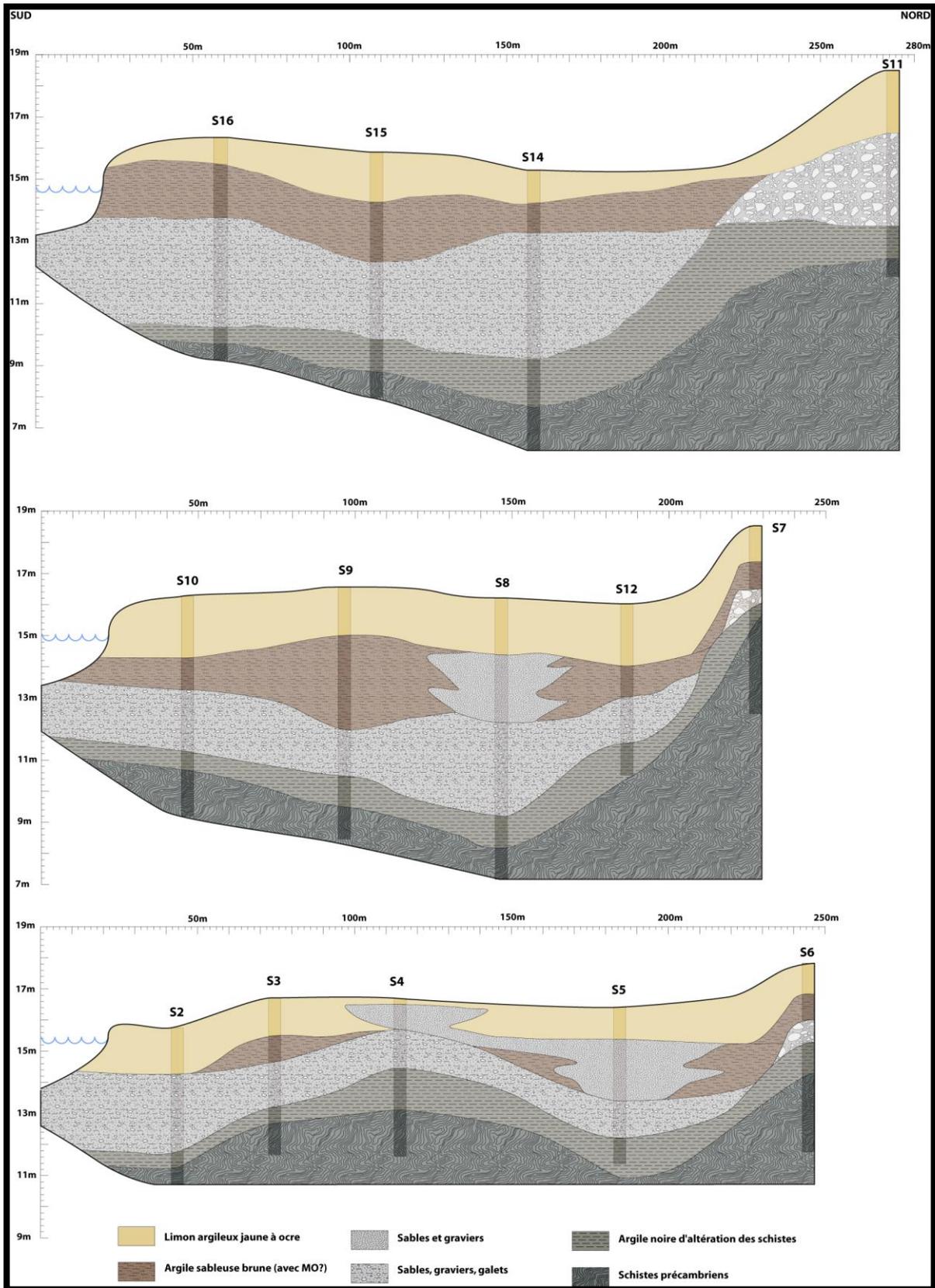


Figure 37 : reconstitution des transects d'après les carottages de 1961

Ainsi, l'analyse des transects de 1961 met en évidence une évolution de la Sélune et de sa plaine alluviale en plusieurs étapes au cours de l'Holocène.

- La base du remplissage constituée d'une grave très grossière certainement mise en place à la fin du Pléistocène lors des prémices de réchauffement climatique lors du dernier épisode glaciaire. Cette grave est venue inciser les dépôts sédimentaires antérieurs ainsi qu'une partie du socle schisteux du fond de vallée.
- Par-dessus ces dépôts grossiers se développe une sédimentation argilo-sableuse. Elle marque vraisemblablement la première sédimentation détritique dont l'origine provient de l'érosion des versants et plateaux alentour suite à la mise en place des premières pratiques agropastorales dans le secteur. Associé à ces dépôts, on observe la mise en place d'un chenal grossier dans la partie nord de la plaine alluviale (S5 et S8). Celui se développe progressivement vers le haut accompagnant l'aggradation de la plaine alluviale environnante.
- Dans une troisième phase, l'ancien chenal de la Sélune se déporte contre le flanc sud de la plaine alluviale trouvant la position qu'il occupe actuellement. La présence d'un bras secondaire a pu perdurer après ce changement de situation en témoigne les dépôts sableux observés sur le sondage S4.
- Enfin, une sédimentation limoneuse homogène est venue sceller complètement les formations sédimentaires antérieures. Elle s'est très probablement mise en place lors des débordements successifs de la Sélune sur sa plaine d'inondation déposant à chaque fois ces limons de débordements par effet de décantation des particules transportées par la Sélune en crue.

Cette évolution chronostratigraphique permet de dresser un premier aperçu de l'évolution de la Sélune et de sa plaine d'inondation en aval du Pont-du-Bateau. Suite à ces premières conclusions, une nouvelle campagne de sondage a été réalisée dans la partie amont du Pont-du-Bateau afin de tout d'abord confirmer cette histoire sédimentaire, mais aussi de permettre de la dater. Ainsi, six sondages ont été réalisés au carottier mécanique sous la forme d'un transect sur la rive gauche de la Sélune (Figure 36 et 38).

Tableau 8 : datations radiocarbones du site de Vezins

Site	Sample name	Lab. No.	Profondeur (cm)	Materiel	Age 14C (1σ)	Dates Calibrées (2σ) (IntCal13, Reimer et al. 2013)
Pont du Bateau	RQB 2015 C2-1 87 cm	Poz-74841	87	Charbon	220 ± 30BP	1735 - 1806 cal AD
Pont du Bateau	RQB 2015 C3-1 74 cm	Poz-74842	74	Charbon	2770 ± 40 BP	1009 - 828 cal BC
Pont du Bateau	RQB 2015 C3-2 90 cm	Poz-74844	190	Charbon	910 ± 30 BP	1033 - 1190 cal AD
Pont du Bateau	RQB 2015 C4-1 64 cm	Poz-74845	64	Charbon	1655 ± 30 BP	328 - 431 cal AD
Pont du Bateau	RQB 2015 C5-1 67 cm	Poz-74846	67	Charbon	2175 ± 30 BP	361 - 163 cal BC
Pont du Bateau	RQB 2015 C6-1 39 cm	Poz-74847	39	Charbon	7130 ± 50 BP	6078 - 5899 cal BC
Pont du Bateau	RQB 2015 C6-2 75 cm	Poz-74848	175	Charbon	3265 ± 35 BP	1625 - 1491 cal BC
Pont du Bateau	RQB 2015 C6-2 46 cm	Poz-74849	146	Charbon	5580 ± 40 BP	4488 - 4347 cal BC
Pont du Bateau	RQB 2015 C6-2 29 cm	Poz-74850	129	Bois	2980 ± 35 BP	1301 - 1076 cal BC

La description macroscopique des carottes sédimentaires ainsi que la réalisation de 9 datations radiocarbone au laboratoire de Poznan permet de dresser une histoire hydrosédimentaire du secteur prospecté.

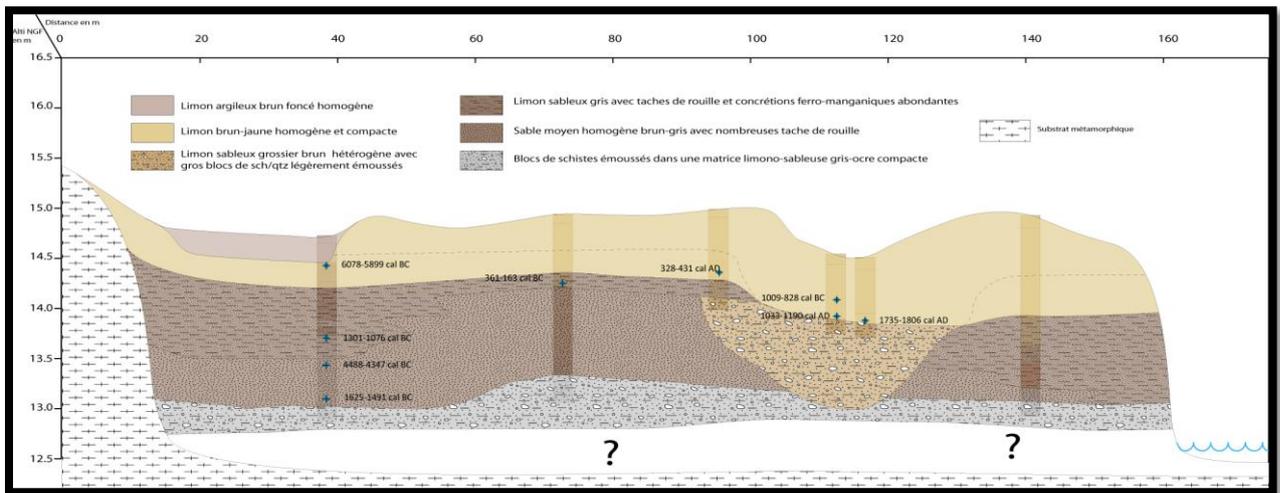


Figure 38 : Transect stratigraphique de la plaine alluviale de la Sélune en amont du pont du bateau

L'évolution du chenal et de la plaine d'inondation peut être découpée en six phases qui se succèdent au cours de l'holocène.

- Phase 1 : Une grave pléistocène grossière héritée des dynamiques de la dernière période froide sert de base au chenal historique.
- Phase 2 : La première moitié de l'Holocène ne n'est pas marqué par un enregistrement sédimentaire dans le fond de la vallée et celui-ci ne débute qu'à partir de l'âge du Bronze ancien. En effet, à cette période, une sédimentation constituée de sable moyen à grossier gris se met en place sur toute la largeur de du fond de vallée. Elle témoigne d'un alluvionnement modéré alimenté par un chenal qui semble divagant dans le lit majeur.
- Phase 3 : Au cours de l'âge du Bronze, l'alluvionnement va s'accélérer. Le chenal de la Sélune se rétracte progressivement dans le centre de la vallée. La plaine alluviale limono-sableuse s'aggrave en même temps que le chenal, elle est alimentée par des apports sédimentaires issus directement du versant (colluvion) ainsi que du chenal lors des crues (alluvion).
- Phase 4 : Au cours de l'âge du Fer, le chenal de la Sélune va s'inciser dans les horizons inférieurs et se trouver déconnecté de la plaine d'inondation. L'aggradation de la plaine d'inondation va continuer lentement notamment par des apports limono-sableux des versants et du chenal.

- Phase 5 : Pendant la période antique, le chenal continue de s'inciser. Il ne présente plus de mobilité latérale et va s'aggraver progressivement avec la mise en place de sédiments gravelo-sableux jusqu'au Moyen-âge central. Il se met en place aussi à cette période un alluvionnement limoneux dans la plaine d'inondation qui résulte des dépôts successifs de limon de débordement lors des crues de la Sélune. Ce détritisme daté de la fin de l'antiquité et du début du Moyen-âge marque un changement de dynamique sédimentaire dans le bassin versant probablement suite à un changement important des pratiques agropastorales dans le bassin versant. Cette transformation, déjà observée en 2014 sur la partie moyenne de la Sélune, intervient plus précocement, ce qui pourrait indiquer une hétérogénéité spatiale et temporelle de la mise en valeur agricole du bassin versant.
- Phase 6 : Au cours de l'Époque moderne, on observe une défluviation complète du chenal de la Sélune. Celui-ci va être déporté, probablement de façon artificielle, au pied du versant droit de la plaine alluviale. L'origine de cette défluviation n'est pas encore bien comprise aujourd'hui, mais elle est certainement liée à l'aménagement d'un seuil en travers le chenal dans le méandre de la Roche et/ou au réaménagement de la D78 durant cette période. Ce changement de chenal est accompagné par une accélération de l'alluvionnement limoneux de la plaine alluviale (limons de débordement) témoin d'une érosion accrue des surfaces agricoles environnantes. La Sélune trouve alors la forme qu'elle occupe actuellement avec le développement d'une petite zone humide au pied du versant gauche témoin d'un possible petit bras de décharge actif au début de l'Époque contemporaine.

Ainsi, ces nouvelles investigations sur le secteur du Pont-du-Bateau permettent de compléter les connaissances sur l'évolution holocène de la Sélune. Elle s'insère bien dans les rythmes hydrosédimentaires holocènes connus pour les cours d'eau bas-normands avec une chronologie détritique plus récente que ce qui avait été observé en 2014. Cependant on retrouve très bien la transformation récente du fond de la vallée au cours du dernier millénaire, avec une défluviation de la Sélune d'origine anthropique. Celle-ci est associée à la mise en place d'un chenal étroit entouré de haute berge limoneuse qui représente la situation actuelle de la Sélune.

De nouvelles investigations seront engagées l'année prochaine afin de confirmer ces premiers résultats dans ce secteur, mais surtout d'approfondir les connaissances de l'évolution de la Sélune plus en aval. Ainsi, avec une vision complète et continue du remplissage de la basse vallée de la Sélune, l'histoire des changements de cette rivière au cours des millénaires derniers sera enrichie. D'autre part, la compréhension du rôle de l'Homme dans ces changements par l'aménagement pluriséculaire de la Sélune sera améliorée à la suite de ces nouvelles recherches.

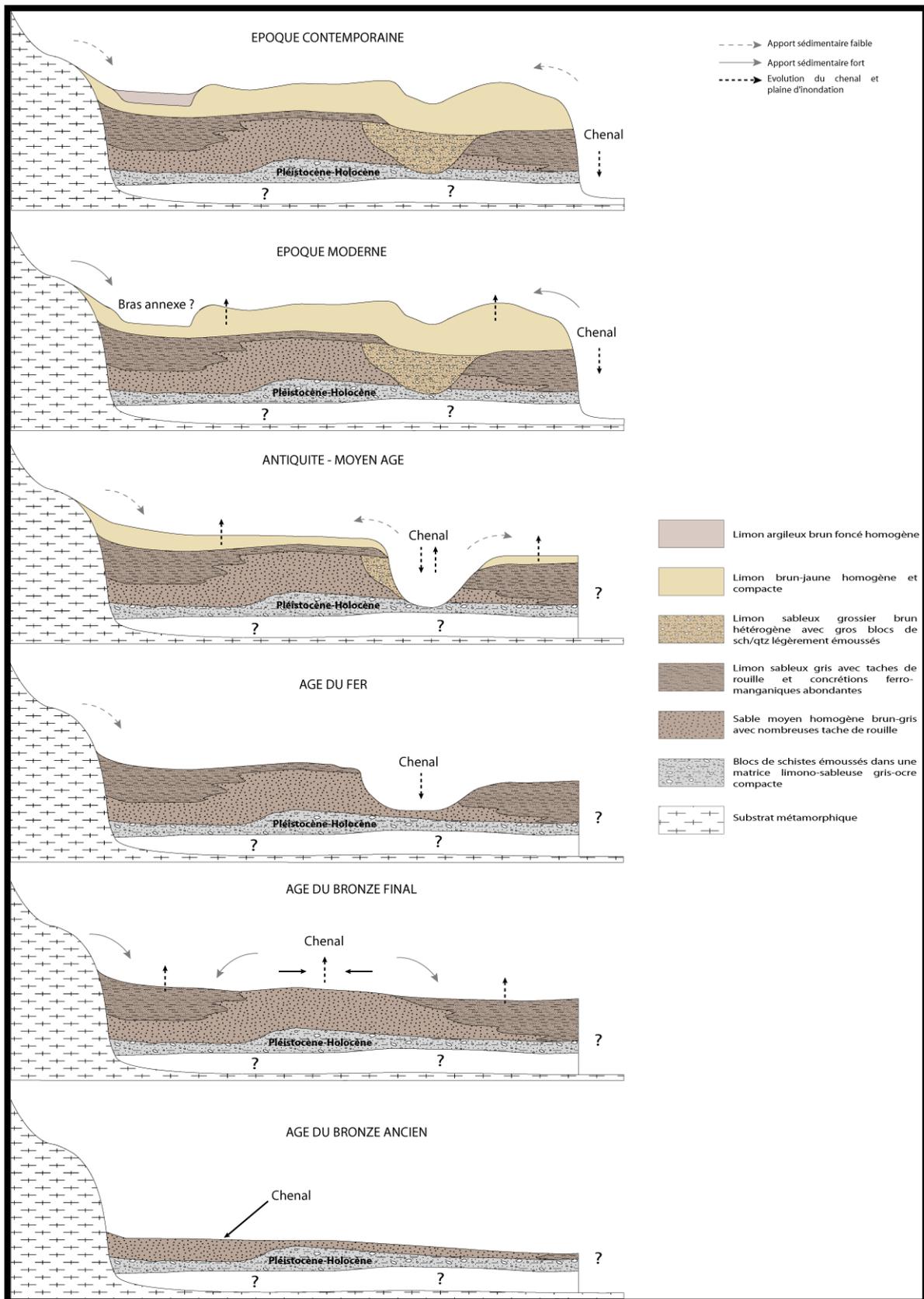


Figure 39 : Evolution diachronique de la Sélune au cours de l'Holocène

2.4 - Perspectives 2016

2.4.1 - Terrain

Les recherches sur l'évolution de la Sélune sur le temps long vont être intensifiées lors de l'année 2016. Ainsi sur le site de Montmorel, la réalisation d'un transect réalisé au carottier est envisagée. Celui-ci sera effectué en amont du moulin de Montmorel dans la plaine alluviale du Beuvron. Ce site présente une dérivation du Beuvron (seuil+bief) permettant l'alimentation du moulin de l'Abbaye fondée au XII^e siècle.

Dernier affluent de rive droite, l'étude remplissage sédimentaire de la plaine alluviale du Beuvron permettant de mieux appréhender les apports sédimentaires des affluents de la basse-vallée de la Sélune. Cela permettra aussi de comprendre l'impact de la structuration de cet affluent par des aménagements (32 moulins au minimum) sur l'évolution du remplissage sédimentaire.



Figure 40 : Localisation des sondages envisagés pour 2016

2.4.2 - Analyse

En laboratoire, de nouvelles analyses sont envisagées sur les sédiments récoltés lors des campagnes de terrain 2015 et 2016.

Des datations radiocarbones AMS seront effectuées sur les sédiments issus des transects de Montmorel afin de dater le remplissage sédimentaire. Ces datations (au nombre de 15) seront faites par le Laboratoire Radiocarbonate de Poznan (Pologne).

De nouvelles analyses du Plomb 210 et du Césium 137 sont envisagées afin de compléter les analyses faites en 2015 sur les sédiments de la confluence Isolant/Sélune échantillonnés en 2014. Celles-ci permettent de déterminer les vitesses de sédimentation du remplissage supérieur présent dans l'ancienne retenue du lac de Vezins (<100 ans) qui ne sont pas datables par la méthode radiocarbonate. Ces datations (10 échantillons) seront effectuées au Laboratoire Chrono-environnement - UMR 6249 de Besançon.

Références bibliographiques

- Bravard J.P. et F. Petit (1997). Les cours d'eau, dynamique du système fluvial. Armand Colin, Paris, 222 p
- Brookes A. 1987; River channel adjustments downstream from channelization work in England and Wales. *Earth Surface Processes and Landform* 12 : 337-351
- Brookes A. 1988. Channelized Rivers. Perspectives for Environmental Management. Wiley: New York; 326.
- Cardot R., 2015. Etude d'un profileur acoustique Doppler pour la mesure in-situ des contraintes de cisaillement. Mémoire de Master 2, Université François Rabelais de Tours. 53 p.
- Ferguson R.I. 1981. Channel form and channels changes. In Lewin J. (ed) : *British Rivers* : 90-125, George Allen and Unwin
- Knapp R. T. 1938. Energy balance in streams-flows carrying suspended load. *Am. Soc. Mech. Engineers Trans* : 501-505
- Kondolf G.M. (1997) - Hungry water: effects of dams and gravel mining on river channel. *Environmental Management*, 21 (4), 533-551.
- Malavoi J.R. & Souchon Y., 2002 - Description standardisée des principaux faciès d'écoulement observable en rivière Note technique - *Bulletin Français de Pêche et de Pisciculture*, 365/366 : 357-372.
- Mirloup M., 2014. Etude geomorphologique préliminaire à l'arasement de deux barrages sur la selune : caractérisation de l'état initial et rôle des barrages dans le fonctionnement actuel. Mémoire de Master 1, Université de Rennes 1. 26 p.
- Petts G.E. et A.M. Gurnell (2005). Dams and geomorphology : research progress and future directions. *Geomorphology*, 71 : 27-47.
- Richards K. 1982. Rivers. Form and process in alluvial channels. Methuen and Co. 358 pp.
- Rollet A.J. (2007) - Etude et gestion de la dynamique sédimentaire sur une section fluviale à l'aval d'un barrage : le cas de la basse vallée de l'Ain. Thèse de Doctorat en géographie, Université Lyon 3, 305p.
- Rubey W.W. 1933. Equilibrium conditions in debris-laden streams. *Am. Geophys. Union Trans.* 14th Annual Meeting : 49-505
- Williams G.P. et G.P. Wolman (1984). Downstream effects of dams on alluvial rivers. USGS circular 781, 48 p.
- Wolman M.G. (1954). A Method of Sampling Coarse River Bed Material. *Transactions of the American Geophysical Union*, 35 (6) : 951-956.