



HAL
open science

Capacités de résilience d'un système fluvial de faible à moyenne énergie : le cas de l'ouverture du barrage de Vezins sur la Sélune (50)

Rémi Létondot

► To cite this version:

Rémi Létondot. Capacités de résilience d'un système fluvial de faible à moyenne énergie : le cas de l'ouverture du barrage de Vezins sur la Sélune (50). Géographie. 2019. dumas-02482650

HAL Id: dumas-02482650

<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-02482650v1>

Submitted on 18 Feb 2020

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.



UNIVERSITÉ
CAEN
NORMANDIE



Mémoire de recherche en Géographie

« Capacités de résilience d'un système fluvial de faible à moyenne énergie : le cas de l'ouverture du barrage de Vezins sur la Sélune (50) »



Rémi Létondot – M1 GAED, Parcours Environnement Diagnostic des Territoires

Travail encadré par Candide Lissak Maître de conférence à l'Université de Caen-Normandie et Anne-Julia Rollet Maître de conférence à l'Université de Rennes



UNIVERSITÉ
CAEN
NORMANDIE



Mémoire de recherche en Géographie

« Capacités de résilience d'un système fluvial de faible à moyenne énergie : le cas de l'ouverture du barrage de Vezins sur la Sélune (50) »

Photographies de couverture : Le barrage de Vezins après la vidange, Le Pont de la République, Trace d'une ancienne pêcherie.

Rémi Létondot – M1 GAED, Parcours Environnement Diagnostic des Territoires

Travail encadré par Candide Lissak Maître de conférence à l'Université de Caen-Normandie et Anne-Julia Rollet Maître de conférence à l'Université de Rennes

Remerciements

La lecture de ce mémoire ne peut débuter sans que les personnes ayant contribué à sa réalisation et à sa finalisation soient amplement remerciées.

Ainsi, je voudrais tout d'abord exprimer mes plus sincères remerciements à mes tutrices, **Anne-Julia Rollet et Candide Lissak** sans qui ce travail ne serait pas ce qu'il est aujourd'hui. Je ne saurais dire combien de temps elles ont passé à m'aider et à me soutenir tout au long de cette année mais je leur suis infiniment reconnaissant de me l'avoir accordé. Je les remercie également pour leur gentillesse et leurs très précieux conseils, mais aussi pour m'avoir transmis leur goût du terrain et de l'hydromorphologie et pour avoir su rendre ce travail inoubliable, j'espère avoir pu répondre à leurs attentes. Il n'est ici pas possible de faire la liste entière de toutes les raisons pour lesquelles je referais ce même choix d'encadrantes sans hésiter une seule seconde mais toutes aboutissent au même mot : Merci.

Mes remerciements vont ensuite directement et sans détour à **Nina Cassignat** qui a accepté de me suivre dans absolument toutes mes campagnes de terrain et qui, plus impressionnant encore, à réussi à me supporter durant toutes ces journées de dérive (et ce depuis la L1), je n'en changerais aucune, quoique... Il aurait très difficile de produire la plupart des données de ce travail sans elle et sa contribution n'est pas ici quantifiable ni qualifiable avec de simples mots.

Je souhaiterais également remercier toutes les autres personnes ayant pris le temps et ayant bien voulu m'accompagner sur mon terrain afin d'en faciliter les relevés. Ainsi, merci à **Alizée Cée** (surtout pour le soutien face à certaines difficultés), **Florent Demilly** (un historien rappelons le) et merci aux étudiantes de Rennes **Mathilde Guillemois** et **Zoé Joly** (même si ça n'a finalement pas marché).

Un merci tout spécial à **Léna Jégat** dont l'aide a largement dépassé les relevés de terrain et dont les compétences statistiques sont ici implicitement représentées. J'espère qu'elle acceptera de nouveau de m'accompagner sur des terrains quelque peu dangereux..., voire encore plus loin.

Merci aux différentes personnes qui ont accepté de m'aider ou de me fournir des données qui ont été très utiles pour ce mémoire. Je pense notamment à **Paul Vrchovsky** à qui, je l'espère, mes données serviront, à **Mamadou Ndom** de l'INRA de Rennes dont les réponses furent très rapides, à **Damien Carbon** pour le temps qu'il m'a fait gagner grâce à ses méthodes et **Mohand Medjkane** pour m'avoir expliqué la photogrammétrie même si celle-ci n'a finalement pas été utilisée.

Un grand merci à **Robert Davidson**, ingénieur au laboratoire de Caen, pour avoir pris le temps de préparer et de m'expliquer le fonctionnement des outils qui ont été mobilisés dans ce mémoire.

Je me souviendrais également du soutien et des encouragements de **toutes les personnes présentes lors des Journées Nationales des Hydrosystèmes** qui ont eu lieu cette année sur la Sélune. J'aimerais donc encore une fois remercier leurs organisateurs et particulièrement **Marie-Anne Germaine** dont le travail autour de la Sélune m'a été d'une aide précieuse.

Merci à tout **mes collègues de Master 1** qui ont partagé plusieurs de mes journées de travail et qui en ont rendu certaines un peu moins sérieuses que prévues...

Enfin, un grand merci à **ma famille** et surtout à **mes parents** pour leur soutien moral et matériel, pour avoir eu la bonne idée d'acheter un canoë-kayak deux places il y a dix ans et pour avoir accepté de relire ce mémoire afin d'en corriger les fautes et maladresses.

Et à tous ceux que j'aurais pu oublier et que je ne voudrais surtout pas vexer : merci !

« La rivière perce le rocher non pas par sa force mais par sa persévérance »

Auteur inconnu

Sommaire

Introduction.....	6
I. Les barrages dans le système fluvial.....	9
1.1. Les cours d'eau : des systèmes dynamiques en perpétuelle évolution.....	9
1.2. Impacts des barrages sur les milieux physiques et biologiques du cours d'eau.....	14
1.3. L'arasement/dérasement d'ouvrage en milieu de faible à moyenne énergie.....	20
II. La Sélune : un fleuve entravé par deux grands barrages.....	31
2.1. Contexte géographique : la Sélune et son bassin versant.....	31
2.2. Les barrages de Vezins et de la Roche-qui-boit : une dynamique fluviale bouleversée.....	37
2.3. Historique de la décision de dérasement et suivi scientifique de l'opération.....	45
III. Méthodologie de la recherche.....	49
3.1. Échelles de travail et choix des sites pour l'étude hydromorphologique.....	49
3.2. Définition de l'état initial ante-ouverture du barrage.....	56
3.3. Estimer les capacités de résilience du fleuve Sélune.....	61
3.4. Déterminer le potentiel réel de réajustement face aux contraintes anthropiques.....	72
3.5. Évaluer la possible recolonisation piscicole liée aux nouveaux faciès d'écoulement.....	83
IV. Résultats et analyses.....	90
4.1. Un cours d'eau influencé par les barrages pendant 90 ans.....	90
4.2. Les capacités de résilience théoriques de la Sélune.....	94
4.3. Un cours d'eau anthropisé : les contraintes aux réajustements.....	108
4.4. Conséquences de l'opération en terme de recolonisation piscicole potentielle.....	126
V. Discussions et perspectives.....	136
5.1. Limites de l'étude et compléments potentiels.....	136
5.2. Le début d'une opération de restauration : quel avenir pour la vallée ?.....	144
Conclusion.....	150
Table des figures.....	154
Bibliographie.....	157
Annexes.....	161
Table des matières.....	171

Introduction

44,8 %, ce pourcentage représente la part des cours d'eau français considérés comme **au moins en bon état écologique** en 2015 (Eau France, 2019). Une valeur qui peut paraître importante mais qui signifie cependant que **plus de 55 %** de ces derniers sont encore dans **un état potentiellement néfaste à leur équilibre global**. Les cours d'eau sont en effet **très fragiles** et subissent aujourd'hui une **pression anthropique extrêmement forte** et souvent ancienne (chenalisation, prélèvements d'eau, ouvrages en travers...). Malgré cela, la véritable prise de conscience de **la nécessité de restaurer et de préserver la qualité de ces milieux** ne date, en France, que des années 1960 avec la première loi sur l'eau votée en 1964. C'est surtout depuis l'adoption de la **Directive Cadre sur l'Eau** (DCE) par l'Union Européenne en 2000, qui fixe des objectifs d'atteinte, ou de maintien, du bon état général des cours d'eau, que la **tendance au rétablissement de leur continuité écologique** se met en place. Ce concept est défini selon l'article R214-109 du Code de l'environnement comme « *la libre circulation des organismes vivants et leur accès aux zones indispensables à leur reproduction, leur croissance, leur alimentation ou leur abri, le bon déroulement du transport naturel des sédiments ainsi que le bon fonctionnement des réservoirs biologiques* » (FNE, 2014). Nous comprenons ici l'importance de cette notion qui regroupe bien plus d'éléments que le simple aspect écologique et qui constitue **la principale motivation de la mise en place des politiques environnementales actuelles**.

Dans ce contexte législatif, il apparaît que **les ouvrages en travers**, et notamment les barrages qui « *barrent plus que le lit mineur du cours d'eau* » (ONEMA, 2010), sont des **obstacles majeurs à ces objectifs d'atteinte du bon état écologique des rivières** européennes. Leurs impacts sur la **dynamique fluviale** menacent en effet la **qualité biologique, physico-chimique et hydromorphologique** des milieux aquatiques, trois paramètres qui permettent de déterminer le niveau (très bon, bon, moyen, médiocre et mauvais) de cet état écologique (Eau France, 2019). Aujourd'hui, ce sont des **dizaines de milliers de kilomètres de linéaires hydrographiques** qui sont influencés par ces obstacles à l'écoulement en France (ONEMA, 2010). Les constructions de ces infrastructures se sont **accélérees depuis les années 1950** dans une période de croissance des besoins en eau (agriculture, alimentation en eau potable, énergie...) et elles étaient alors considérées comme des progrès majeurs, particulièrement en ce qui concerne les barrages hydroélectriques. Toutefois, les **études concernant leurs impacts physiques et biologiques** ont vite démontré que, dans le cadre de l'obligation de restauration du bon état écologique des cours d'eau, **la meilleure solution résidait dans le dérasement voire dans l'arasement complet de ces ouvrages**.

Ainsi, suite à la parution des travaux de Galay en 1983 ou encore de William et Wolman en 1984 (Rollet, 2007) qui ont mis en avant la **perturbation des processus géodynamiques** induite par les ouvrages en travers, **ces opérations se sont multipliées**. La rivière n'est plus considérée dans sa seule dimension hydraulique et les milieux aquatiques comme « *supports d'habitat pour la faune et la flore* » (Lespez et Germaine, 2016) devient **un aspect majeur de la gestion fluviale**. La question de la suppression des seuils et des barrages prend alors une place centrale dans ces nouveaux modes de gestion. Les premiers dérasements et arasements de ces ouvrages sont initiés par les États-Unis et se propagent ensuite en Europe avec la DCE et notamment **en France depuis la Loi sur l'Eau et les Milieux Aquatiques** (LEMA) de 2006 (Lespez et Germaine, 2016). Cependant, ces opérations ne concernent essentiellement que des **ouvrages de petites tailles** (inférieurs à 5 mètres de hauteur) et bien souvent, **le suivi post-intervention est négligé**. De ce fait, encore **mal connues sont leurs conséquences** sur le milieu. En étant tout de même conscient des **risques d'ordre écologique et hydromorphologique** entraînés par ces suppressions d'ouvrages (Fagot, 2012) et sachant que **les cours d'eau sont des systèmes ayant la capacité de se réajuster suite à une perturbation**, il semble primordial d'étudier leurs réponses suite aux travaux de restauration afin **d'accroître les connaissances dans ce domaine**.

Chaque suivi, si il est réalisé convenablement, deviendra alors une **référence supplémentaire pour les futurs projets** de restauration de la continuité écologique des cours d'eau.

C'est pour ces raisons que les **démantèlements des barrages hydroélectriques de Vezins et de la Roche-qui-Boit** sur la Sélune, officialisés en 2017 par l'ancien ministre de la transition écologique et solidaire, doivent impérativement **faire l'objet d'un suivi scientifique à des échelles spatiales et temporelles variées**. La Sélune est un fleuve du Sud-Manche de faible à moyenne énergie dont la puissance était exploitée par ces barrages depuis les années 1930. Tout deux d'une **hauteur supérieure à 15 mètres**, ils peuvent être qualifiés selon la définition de la Commission Internationale des Grands Barrages, de **grands barrages** (ICOLD/CIGB). De ce fait, cette opération est considérée comme **une première européenne** voire internationale. En effet, « *aucune situation strictement comparable à la Sélune ne peut être retrouvée* » (SDD Vallée de la Sélune - DDTM 50) puisque **les seuls exemples français d'arasement concernent des ouvrages bien moins importants** tel que le barrage de Kernansquillec (2001) ou celui de Pierre Glissote (2015). Concernant les étapes du projet, une **première vidange du lac** de Vezins a eu lieu durant l'été 2018 avant une **temporaire remise en eau** à partir du mois de novembre de la même année. Une **seconde vidange est effectué** au mois d'avril 2019 et le démantèlement de l'usine hydroélectrique débute peu de temps après. La suppression du barrage de la Roche-qui-boit n'est quant à elle prévue qu'en 2021.

L'objectif de l'arasement du barrage de Vezins qui nous intéresse donc dans ce suivi, est **la restauration des processus hydromorphologiques** du fleuve qui conditionnent son état écologique. L'hydrogéomorphologie regroupe trois paramètres relatifs au cours d'eau que sont **le régime hydrologique** (débit, connexion aux nappes), les **conditions morphologiques** (formes fluviales) et la **continuité écologique** (faunistique et sédimentaire) (Melun, 2012 ; Michler, 2018). C'est donc sur cette **dynamique fluviale** que se concentrera ce mémoire de recherche. Il s'agira de **caractériser les capacités de résilience de la Sélune**, c'est à dire son potentiel de réajustement post-arasement d'ouvrage. En effet, suite à la disparition de la zone de retenue en amont du barrage, **l'hydromorphologie du cours d'eau sera complètement modifiée** et ce sans compter les **travaux de restauration** qui vont plus ou moins contraindre les processus « naturels » du fleuve. Cela permettra d'**estimer les véritables conséquences de ce type d'opération** tant sur plan physique que biologique. Nous chercherons donc à répondre à deux questions principales concernant cette **restauration physique, normalement passive, du cours d'eau** :

Quelles sont les capacités de résilience du fleuve Sélune ? L'objectif est ici de savoir si les variables hydromorphologiques auront, suite à la nouvelle dynamique fluviale induite par l'ouverture du barrage de Vezins, la capacité de se réajuster. La Sélune étant un système considéré comme de faible à moyenne énergie la question des temporalités de ces réajustements sera également importante.

Dans quelles mesures les travaux de remaniements sont-ils efficaces en terme de restauration de la dynamique fluviale ? Ce second questionnement fait écho au premier dans le sens où les travaux de remaniements et l'anthropisation ancienne en amont du barrage auront une influence sur les capacités de résilience réelles du fleuve. Il s'agira donc d'évaluer l'efficacité des travaux dans la restauration des processus géodynamiques afin de déterminer si le mode de gestion de cette opération pourrait être réemployé et si ce dernier nécessite des compléments.

Une troisième question, fortement liée aux deux précédentes, sera également traitée dans ce travail de recherche, celle des **habitats aquatiques**. En effet, l'objectif étant l'atteinte du bon état écologique du cours d'eau, l'étude de la possible recolonisation piscicole de ce fleuve classé comme rivière salmonicole, est essentielle. Nous chercheront donc à savoir **si les réajustements permettront, ou non, la réémergence de faciès d'écoulement variés** et plus spécifiques aux espèces aquatiques lotiques.

Pour répondre à ces problématiques la présente étude se concentrera sur **trois sites en amont du barrage de Vezins** et qui ont connu des remaniements plus ou moins importants notamment en ce qui concerne le stockage des sédiments. Ces sites sont localisés au niveau du **Pont de la République, du Pont des Biards et de la base de loisir de la Mazure**. L'idée étant la réalisation d'une **comparaison inter-sites** des capacités de résilience du fleuve en fonction du **gradient de restauration**.

Un premier temps sera consacré au **rappel des définitions** les plus importantes concernant le système fluvial et l'hydrogéomorphologie. Les **impacts des barrages** seront détaillés afin de mieux comprendre les raisons qui ont poussé à l'émergence d'un contexte législatif préconisant leur arasement. Les **conséquences de ces opérations dans des milieux de faible à moyenne énergie** comme la Sélune seront donc également développées. Cela permettra de poser les bases de l'analyse et de montrer la nécessité d'effectuer le suivi hydromorphologique de cette opération.

La seconde partie concernera **le contexte général de la Sélune et de son bassin versant** qui possède des caractéristiques qui auront une influence sur les capacités de résilience du fleuve et qu'il convient de connaître avant toute mesures sur le terrain. Cette partie comportera également **une présentation des barrages de Vezins et de la Roche-qui-boit**, leurs impacts sur la dynamique fluviale du fleuve depuis leur construction et l'historique de la décision de leur arasement.

La **méthodologie du travail de recherche** sera détaillée dans une troisième partie. Il s'agira d'explicitier les différentes méthodes qui ont été employées pour **déterminer les capacités de résilience de la Sélune** et l'évolution potentielle future de son lit. Ces méthodes relèveront de **l'analyse d'imagerie** (photographies aériennes, LIDAR), de **traitements SIG** ainsi que de la réalisation de nombreuses **mesures et relevés sur le terrain**. Souvent complémentaires elles offrent l'avantage de cerner le fonctionnement hydromorphologique de la Sélune dans sa quasi-globalité.

Les **résultats obtenus** feront l'objet d'une quatrième partie dans laquelle tous les traitements et mesures effectués seront mis en relation afin de montrer **la dimension systémique de l'étude**. Des paramètres comme la puissance spécifique, l'érodabilité des berges, les apports en charge solide, la morphologie du lit, la présence de formes spécifiques ou les faciès d'écoulement seront donc estimés. Ces données, qui seront **illustrées par des documents cartographiques et statistiques**, permettront de **répondre aux problématiques posées** précédemment et donc **d'évaluer l'efficacité de l'opération d'arasement** concernant la restauration de l'équilibre global du fleuve.

Une dernière et cinquième partie portera sur **les limites et les perspectives** de ce travail de recherche. Les méthodes employées ainsi que les résultats obtenus seront donc critiqués afin de montrer **les biais de l'étude** mais également **les compléments** qui pourraient y être apporté. De plus, il s'agira de montrer que cette opération d'effacement de barrage est encore dans ses débuts et que la résilience du fleuve Sélune sera **conditionnée par la suite des interventions** et notamment celle du **dérasement du barrage de la Roche-qui-boit**, plus en aval prévue pour 2021.

I. Les barrages dans le système fluvial

1.1. Les cours d'eau : des systèmes dynamiques en perpétuelle évolution

1.1.1. Le système fluvial et l'hydrosystème : deux concepts clés en hydrologie

Dans l'**approche systémique** des cours d'eau, deux concepts complémentaires faisant référence aux interdépendances entre les différents éléments de ce dernier sont essentiels : le système et l'hydrosystème fluvial.

Le **système fluvial** (*in* Rollet, 2007 et Melun, 2012, Schum, 1977) se caractérise par l'importance et la dynamique des flux liquides (eau) et solides (sédiments) au sein **d'un bassin versant**, l'espace géographique dont les précipitations sont drainées par le cours d'eau (ONEMA). Ce système comporte notamment **une dimension longitudinale** qui représente le transfert sédimentaire d'amont en aval du cours d'eau (Figure 1.1). L'atténuation progressive de la pente et la diminution des capacités de transport qui en résulte permettent ainsi de distinguer trois zones où s'opèrent des processus hydro-sédimentaires spécifiques :

- La **zone de production**, située en tête de bassin versant et dans laquelle sont produits les sédiments en plus ou moins grande quantité selon l'intensité des agents d'érosion et de la nature du substratum.
- La **zone de transfert**, en pente décroissante, qui permet l'évacuation de ces sédiments et leur transport vers l'aval.
- La **zone de stockage** où ces sédiments vont venir se déposer et façonner des formes d'accumulation sédimentaires variées.

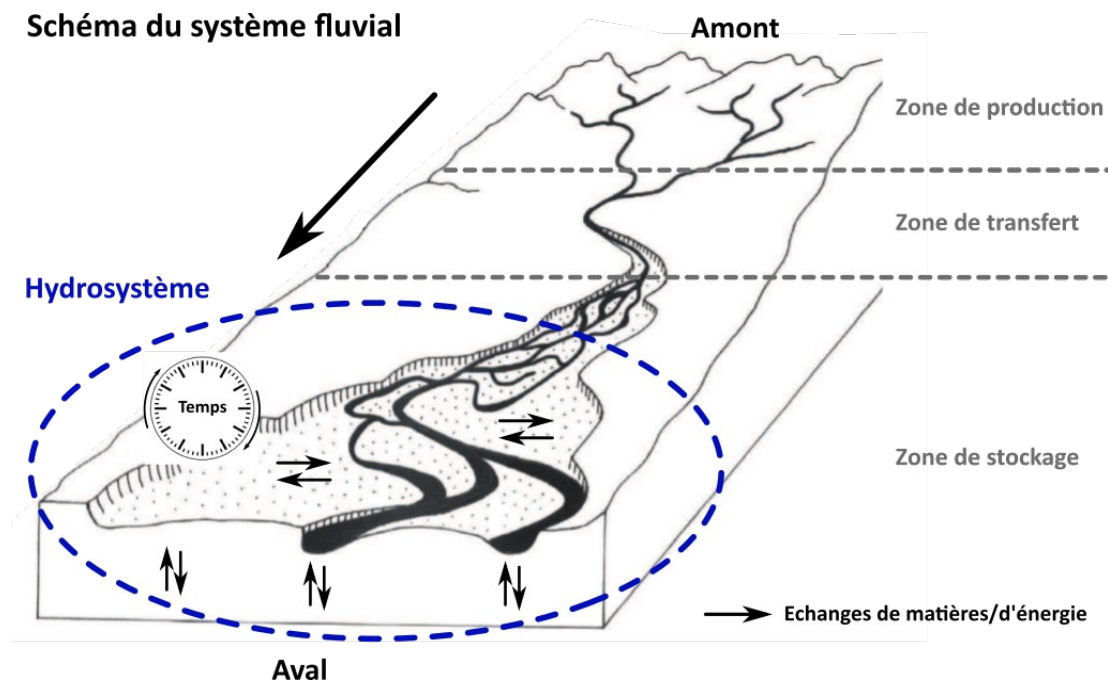


Figure 1.1 : L'emboîtement de l'hydrosystème au sein du système fluvial (D'après Schum 1997)

L'étude du système fluvial va permettre de mieux comprendre **l'évolution spatiale du cours d'eau** avec la présence de versants en forte pente en amont puis l'apparition progressive d'une plaine alluviale de plus en plus large vers l'aval (*in* Rollet, 2007, Schum 1997). Toutefois, dans l'étude de la résilience d'un cours d'eau, il est nécessaire de **changer d'échelle** et de s'intéresser aux sous-ensembles de ce système fluvial qui ont été qualifiés par Amoros et Petts en 1993 d'hydrosystèmes fluviaux (*in* Rollet, 2007, Melun, 2012).

L'**hydrosystème fluvial** est une entité géomorphologique qui fonctionne également de manière systémique mais selon **trois dimensions d'échanges spatiaux**, longitudinale, transversale et verticale auxquelles s'ajoute une **dimension temporelle** (Figure 1.1). Il se divise en **unités hiérarchisées, emboîtées et en constante interaction** que sont les secteurs fonctionnels (tronçons du cours d'eau de même style), les ensembles fonctionnels (écosystèmes aux dynamiques similaires) et les unités fonctionnelles (unités homogènes formant des biotopes spécifiques) (Rollet, 2007).

Toutes ces notions sont essentielles dans la compréhension des **échanges de matières et d'énergie entre le cours d'eau et son bassin versant** mais également **entre le cours d'eau et sa plaine alluviale**. Elles permettent de contextualiser les tronçons à différentes échelles afin de déterminer **les variables entrant dans leur constante évolution**. Ces dernières pouvant être internes ou externes au chenal.

1.1.2. Les notions d'équilibre dynamique et de résilience du cours d'eau

Le système et l'hydrosystème fluvial sont régis par **deux flux principaux** que sont le débit liquide et le débit solide du cours d'eau qui sont qualifiés de variables de contrôles. Celles-ci, conditionnées par des **variables indépendantes** (relief, climat, géologie, occupation du sol...) vont influencer les **variables dites d'ajustement** définissant la morphologie fluviale telles que la pente, la largeur, la profondeur ou la sinuosité du lit. Ce sont ces variables qui vont, par un système de processus-réponse, déterminer le style fluvial (rectiligne, méandrique, en tresse ou anastomosé) ainsi que les formes géométriques du lit (Bravard et Petit, 1997 ; Michler, 2018). Les variables de contrôles évoluant régulièrement suite à des **perturbations** d'origine diverses dans le système, le cours d'eau connaît une fluctuation constante autour d'un état moyen appelée **équilibre dynamique**. L'attribut dynamique signifiant ici qu'en raison de la non-égalité des entrées et des sorties d'eau et de sédiments dans le système, les variables géométriques du lit connaissent des **réajustements perpétuels** (*in* Michler, 2018, Knighton, 1984). Ce **mécanisme d'autorégulation** est illustré par la balance de Lane (1955) qui modélise les impacts de la modification du débit liquide et/ou solide sur les variables d'ajustement (Figure 1.2).

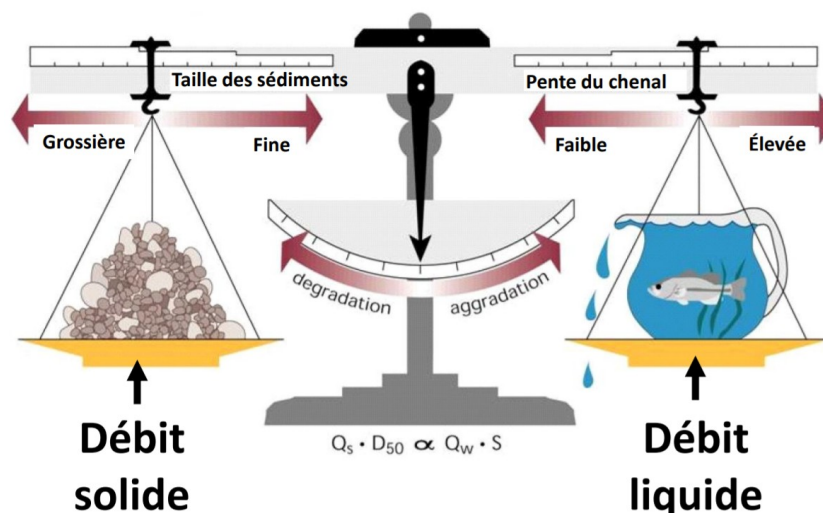


Figure 1.2 : La balance de Lane en équilibre (D'après Lane, 1955)

Ainsi, chaque **augmentation ou diminution du débit liquide et/ou solide** va entraîner des modifications dans la géométrie du lit et donc dans les formes hydromorphologiques. La capacité du cours d'eau à revenir à un état proche de l'origine, suite à cette possible perturbation, est alors appelée **la résilience**. Cette notion est essentielle car elle regroupe tous les processus qui permettront le

rétablissement d'une dynamique fluviale stable. Cependant, si certains seuils (extrinsèques et intrinsèques) sont dépassés et que la perturbation est trop forte pour un retour à cet état originel, la notion de **métamorphose fluviale** convient mieux (*in* Rollet, 2007, Schumm, 1997).

La dimension temporelle de l'hydrosystème prend une place particulièrement importante puisque les réajustements post-perturbation dépendront, d'une part des capacités de résilience du cours d'eau, mais également de la durée pendant laquelle les variables de contrôles ont été modifiées. On distingue alors trois phases qui correspondent au **temps de réponse** total du cours d'eau (*in* Melun, 2012, Brunsden 1980) : le **temps de réaction** durant lequel les réajustements se mettent en place, le **temps de relaxation** nécessaire au rétablissement de l'équilibre dynamique et le **temps du nouvel équilibre** qui dure jusqu'à la prochaine perturbation (Figure 1.3).

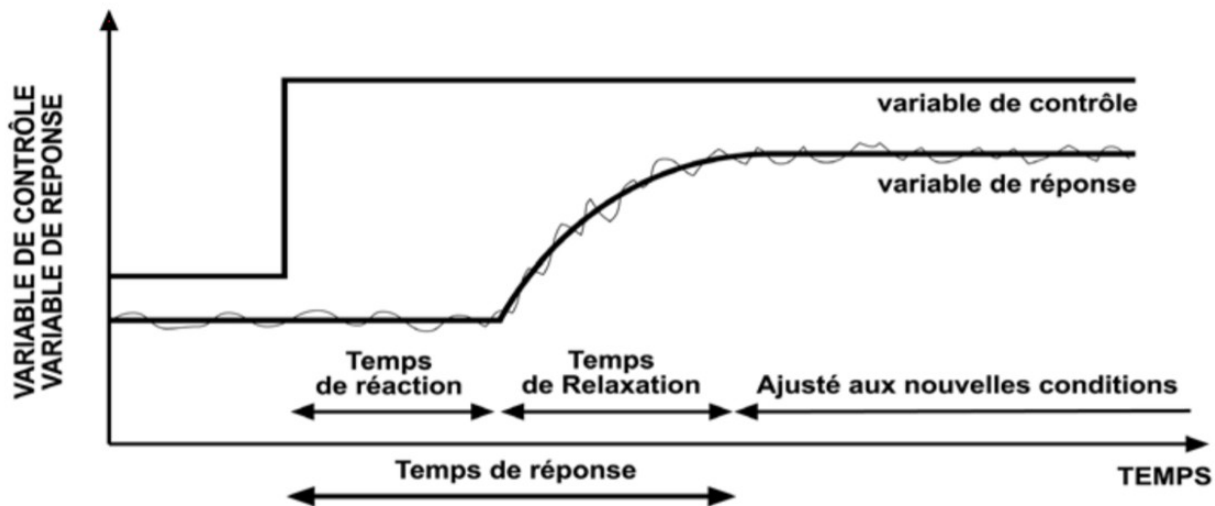


Figure 1.3 : Temps de réponse du cours d'eau après perturbation
(*in* Rollet, 2007 d'après Brunsden et Thornes, 1979)

La géométrie du lit et des berges sera donc fortement dépendante de la **fluctuation des débits liquide et solide** et du **temps de résilience du cours d'eau**. Toutefois, cette évolution suit ici un modèle théorique qui ne prend pas en compte tous les paramètres du système. C'est notamment le cas des **actions anthropiques**, importantes dans ces milieux, qui ont de forts impacts tant sur l'ampleur des réajustements du fleuve que sur leur temporalité (Rollet, 2007).

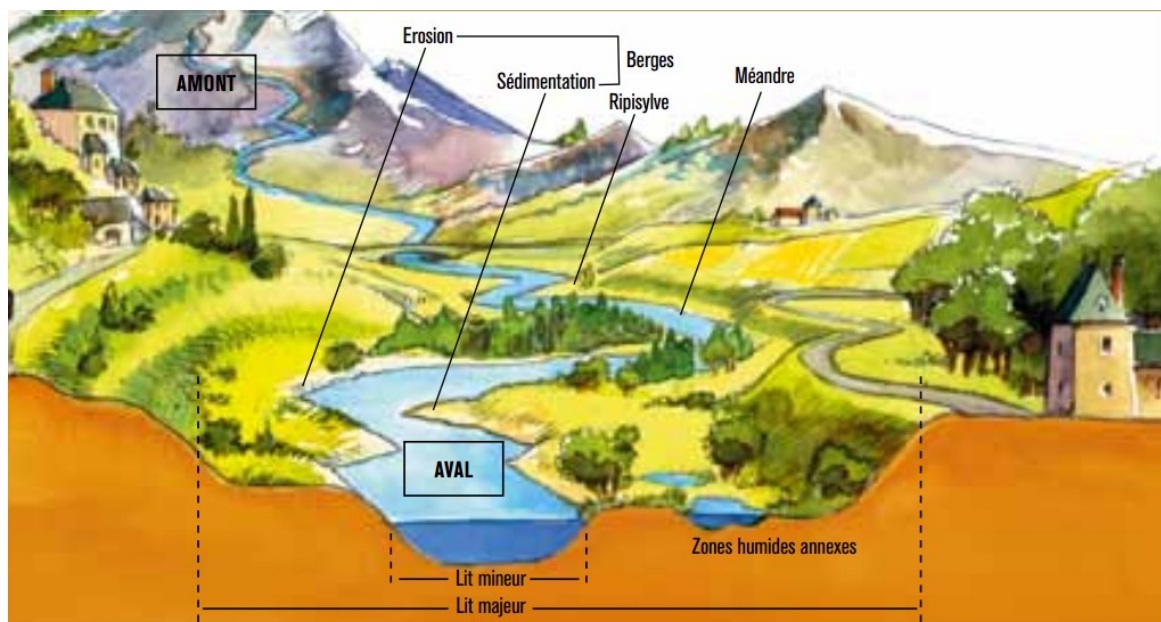
Selon cette dynamique nous comprenons alors que **l'hydromorphologie** du cours d'eau n'est pas fixe ni spatialement ni temporellement. L'atteinte d'un bon état écologique s'avère, dans ces conditions, relativement complexe. En effet, **l'équilibre biologique** du cours d'eau dépend fortement de sa dynamique et de la présence de formes fluviales variées. Il est alors nécessaire de comprendre en quoi **la géomorphologie du fleuve conditionne la vie aquatique**, notamment par la dépendance entre les faciès d'écoulement et les habitats (Malavoi et Souchon, 2001).

1.1.3. L'importance de l'hydromorphologie dans la viabilité du système

Se rassemble dans **l'hydromorphologie** le régime hydrologique, la continuité écologique et les formes fluviales. En connaissant la définition de la continuité écologique et les processus géodynamiques cités précédemment, l'importance du premier élément ainsi que du second ne semble pas avoir besoin d'une justification. Concernant les **formes fluviales**, il convient d'explicitier leur **rôle dans le bon fonctionnement du système** et leur importance pour la **biodiversité**. En effet, la morphologie d'un fleuve constitue un des principaux paramètres jouant sur la qualité physique du cours d'eau (France Nature Environnement, 2010 ; Eau France, 2018).

Il est possible d'évaluer cette qualité physique selon 5 compartiments (France Nature Environnement, 2010) qui sont donc étudiés lorsqu'on cherche à caractériser les réajustements morphologiques d'un fleuve (Figure 1.4) :

- Le **lit mineur** dans le lequel s'écoule le cours d'eau habituellement, en dehors des périodes de crues. Ce dernier peut être mobile et se déplacer au sein du lit majeur (France Nature Environnement, 2010 ; Degoutte, 2012).
- Ce **lit majeur** correspond à la plaine d'extension de ses crues et sur laquelle on peut retrouver différentes **annexes hydrauliques**. On y observe des dépôts sédimentaires importants ainsi que des échanges hydriques avec la nappe alluviale (France Nature Environnement, 2010 ; Degoutte, 2012).
- Les **berges**, à ne pas confondre avec les rives, façonnées par le cours d'eau et subissant les processus d'aggradation et de dépôts selon l'énergie disponible et la présence d'une **ripisylve** plus ou moins marquée. Leur géométrie peut évoluer rapidement selon la puissance érosive du cours d'eau (France Nature Environnement, 2010 ; Degoutte, 2012).
- La **ligne d'eau** qui se réfère ici à la dynamique d'écoulement (vitesse, hauteur...) mais qui ne prend pas en compte le débit (France Nature Environnement, 2010).
- La **continuité écologique** mais pas seulement dans sa dimension longitudinale mais également latérale (entre le cours d'eau et la plaine alluviale) et verticale (entre le cours d'eau et le substrat et la nappe) (France Nature Environnement, 2010).



La rivière et son bassin versant - © Dominique Charron

Figure 1.4 : Les compartiments morphologiques du cours d'eau (France Nature Environnement, 2010)

Ce sont tous ces éléments qui vont déterminer ce qu'il est possible de qualifier de « **faciès d'écoulement** ». Ces faciès sont considérés comme des « unités fondamentales » du cours d'eau (*in* Malavoi et Souchon, 2001, O'Neil et Abrahams, 1984) et représentent, pour les hydrobiologistes, des **méso-habitats**. Il s'agit en fait d'un tronçon du cours d'eau qui possède des attributs (écoulement, géométrie, granulométrie...) homogènes sur une distance plus ou moins importante. Les habitats aquatiques dépendent de ces caractéristiques physiques et c'est pourquoi « *une bonne qualité morphologique est indispensable au bon déroulement du cycle de vie des espèces vivantes* » (France Nature Environnement, 2010). En effet, les différentes espèces, notamment de poissons mais également de macro-invertébrés, requièrent des conditions de vie (abris, reproduction, nourriture...) que **seules des formes spécifiques peuvent leur fournir**.

Dans ces formes, **l'alternance de radiers et de mouilles** (Malavoi et Bravard, 2010) joue un rôle très important dans **la diversité des habitats**. Les radiers sont des zones de dépôts des sédiments grossiers caractérisés par une diminution de la hauteur d'eau et une accélération du courant et les mouilles correspondent quant à elle à des « fosses » bien plus profondes dans lesquelles la vitesse d'écoulement s'amenuise. Ces deux entités morphologiques, et leur enchaînement, **reflètent la dynamique fluviale du cours d'eau** et constituent des zones favorables, par leur granulométrie, à la reproduction des poissons qui y trouvent **un espace de frai**.

Par conséquent, la **viabilité du système tout entier repose sur l'équilibre hydromorphologique** du fleuve. Celui-ci aura une grande importance pour le développement d'une biodiversité riche et de qualité. Plus les faciès d'écoulement seront diversifiés, plus les habitats le seront également et l'état écologique n'en sera que meilleur. La **morphologie fluviale se doit donc d'être étudiée** tout autant que la biologie ou la physico-chimie du cours d'eau qui constituent les deux autres paramètres, selon la DCE, à la base d'un bon état global du milieu (Eau France, 2018).

Transition :

Cette première partie montre que le fonctionnement des cours d'eau doit être appréhendé à plusieurs échelles comme **un véritable système**. Contrôlé par deux variables principales, ce système possède **sa propre capacité de résilience** qui lui permettra **d'ajuster ses paramètres**, notamment morphologiques, pour retrouver **un nouvel équilibre suite à la perturbation**. Cette perturbation peut être d'ordre naturel (changement climatique par exemple) mais également artificiel comme **la construction d'un barrage**. Ces infrastructures, pouvant atteindre des proportions démesurées, sont d'ailleurs considérées comme **les principales causes d'altérations de l'hydromorphologie des cours d'eau** (Malavoi, 2007 ; France Nature Environnement, 2010). Ce paramètre étant **essentiel pour le développement de la vie**, il est nécessaire d'expliquer les raisons de la l'installation de tels ouvrages et de montrer de **quelle manière ils peuvent engendrer une dégradation du milieu**.

1.2. Impacts des barrages sur les milieux physiques et biologiques du cours d'eau

1.2.1. Historique et usages des barrages

Les traces écrites de la construction des **premiers barrages hydrauliques** remontent à **cinq millénaires** (Rollet, 2007 ; CFBR, 2013 ; EDF, 2019). En effet, les civilisations mésopotamiennes et égyptiennes possédaient déjà la technique nécessaire pour exploiter les rivières et créer des retenues d'eau leur servant à l'irrigation. Toutefois, les véritables preuves de l'existence de ce type d'ouvrage, notamment en Syrie, en Irak et Iran ne datent que du **13^{ème} siècle avant Jésus-Christ**. Ces infrastructures se répandent ensuite dans **l'Europe méditerranéenne sous l'Empire romain** et certaines sont encore en service comme le barrage de Cornalbo situé en Espagne et érigé au 2^{ème} siècle (CFBR, 2013 ; EDF, 2019). Dans le même temps, ces ouvrages se développent également dans le monde indien et l'Extrême-Orient (CFBR, 2013). **En France, comme dans le reste de l'Europe, il faut attendre le Moyen-Age**, période d'aménagement intense des cours d'eau, pour voir apparaître de nombreux petits barrages sur tout le réseau hydrographique du pays. Les retenues permettaient alors d'actionner les roues des dizaines de milliers de moulins construits durant cette période (Rollet, 2007 ; CFBR, 2013). L'essor de la métallurgie et de la sidérurgie engendrera l'augmentation de **ces constructions qui seront de plus en plus imposantes et sophistiquées** dans les siècles qui suivirent.

L'hydroélectricité ne fait son apparition que dans la **seconde moitié du 19^{ème} siècle** et devient la principale motivation de la construction des barrages (CFBR, 2013). Cette technique est basée sur la **transformation de l'énergie cinétique du cours d'eau**, engendrée par la différence de hauteur entre l'amont et l'aval du barrage, en énergie mécanique, puis électrique grâce à l'action successive d'une turbine, d'un alternateur et d'un transformateur (Figure 1.5).

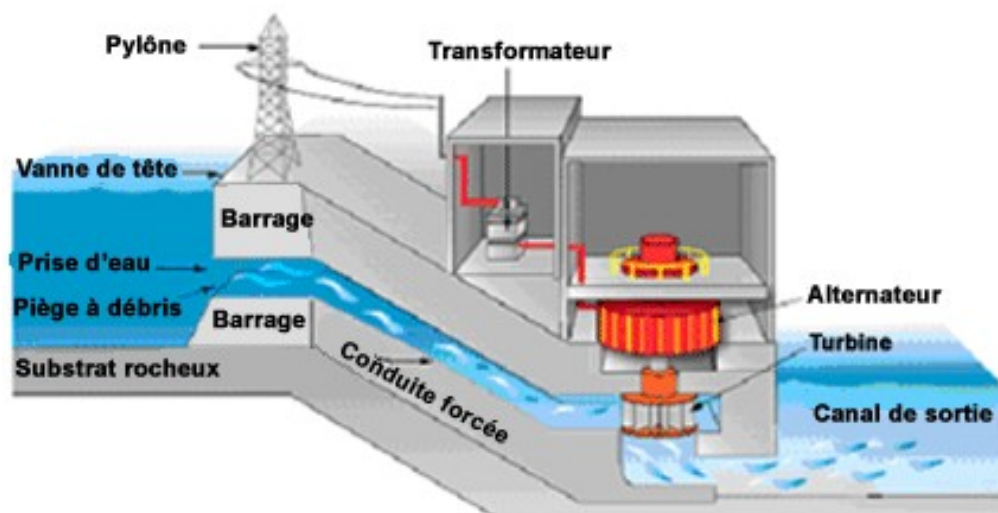


Figure 1.5 : Fonctionnement d'une centrale hydroélectrique (Teach Nuclear, 2019)

Dès lors, **les constructions de barrages hydroélectriques se multiplient**, surtout dans les régions montagneuses où les centrales alimentent des usines au fil de l'eau (Michler, 2018). Cette tendance connaît **une accélération à partir des années 1950** dans le monde entier (Rollet, 2007 ; CFBR, 2013) et alors que seulement 5268 grands barrages (plus de 15m de haut) sont recensés par la Commission Internationale des Grands Barrages (CIGB) cette année là (*in* Rollet, 2007, Brandt, 2000), ce sont **aujourd'hui plus de 59 000 ouvrages** de ce type qui barrent le lit des cours d'eau de la planète (CIGB, 2019).

Ce nombre regroupe **toutes les sortes de barrages qui existent** dans le monde telles que les barrages poids, les barrages voûte ou encore les barrages en remblai (CIGB, 2019). La plupart d'entre eux ont été construits dans le but de **garantir une réserve d'eau assez importante pour l'irrigation des terres agricoles ou pour la production d'énergie**. On leur trouve également des fonctions de contrôle des crues, d'approvisionnement en eau potable, de navigation ou encore de loisirs. Ces ouvrages sont alors **considérés comme des progrès majeurs** dans le domaine et leur construction devient une priorité, notamment en Europe. Toutefois, **cette image positive change très rapidement** suite aux premières études concernant le risque qu'ils représentent et leurs impacts sur le cours d'eau. En effet, au début des années 1980 plusieurs chercheurs commencent à **montrer les différents ajustements subis par le système fluvial suite à l'implantation d'un barrage** (Rollet, 2007), c'est le cas de Galay en 1983 ou de William et Wolman en 1984.

Depuis, les nombreuses études réalisées sur le sujet ont permis de **comprendre comment les barrages modifiaient la dynamique fluviale du cours d'eau** et de quelle manière cela pouvait nuire à son équilibre biologique (Rollet, 2007). Ces modifications, notamment d'ordres hydromorphologiques, doivent donc être explicitées pour **mieux cerner les raisons des décisions de suppression d'ouvrage**.

1.2.2. La perturbation des flux et ses effets sur la morphologie fluviale

Dans l'explication de l'incidence des barrages sur le système fluvial il est courant d'évoquer dans un premier temps **les modifications des variables de contrôle** (débit liquide et solide), qui vont engendrer un changement des processus d'érosion à l'amont comme à l'aval de l'ouvrage. De ce fait, la dynamique fluviale du cours d'eau en sera bouleversée et on observe alors différents **ajustements hydromorphologiques** résultant de cet « effet point-dur » induit par le barrage (Rollet, 2007, Melun, 2012, Fagot, 2012).

Concernant le débit liquide, la création d'un **lac de retenue au niveau du barrage** et le rejet d'une quantité d'eau variable en aval va entraîner un changement dans le régime du cours d'eau (INSA). La fréquence des débits de crue et d'étiage ainsi que leur intensité temporelle en seront notamment modifiées (Rollet, 2007 ; Melun, 2012). En effet, le barrage cause la « *réduction de l'amplitude et de la fréquence des débits extrêmes (minimum et maximum)* » (in Michler, 2018, Petts, 1979) et peut provoquer une « désaisonnalisation » (in Michler, 2018, Balland, 2004) des débits notamment dans le cas de production hydroélectrique, l'ouverture des vannes variant selon les besoins en eau. Par conséquent, ces ouvrages vont aussi jouer sur **la variabilité temporelle des écoulements en aval** à des échelles journalières ou horaires en raison de la variation de la quantité d'eau relâchée. Notons que ces effets sur le débit liquide sont plus ou moins marqués selon le type de barrage qui barre le lit du cours d'eau.

Les **débits solides seront également influencés** par la présence d'un barrage qui constitue une entrave dans la continuité longitudinale du transfert sédimentaire (in Michler, 2018, Kondolf 1997). La quasi-totalité des sédiments transportés (charge de fond et matières en suspension) est alors piégée dans la retenue en amont et du barrage provoquant un **déficit sédimentaire en aval** (in Rollet, 2007, Phillips *et al.*, 2005). On estime qu'au moins 50 % des flux sédimentaires seraient bloqués en amont des barrages dans les bassins versants régulés (in Rollet, 2007, Vörösmarty *et al.*, 2003).

Ces changements dans la dynamique des variables de contrôles vont donc venir **altérer les processus d'érosion et de dépôt** du cours d'eau et, par un système de processus-réponse et provoquer des **ajustements morphologiques du lit**. Toutefois, les **réponses du cours d'eau dans ce domaine sont complexes** en raison du nombre d'éléments rentrant en compte (variables indépendantes, type de barrage, quantité de sédiments en entrée...) (in Rollet, 2007, Petts, 1979). Les nombreuses études

réalisées ont tout de même mis en évidence deux évolutions principales suite à la construction d'un barrage : **une évolution verticale du lit** et une **évolution en plan de la bande active** (in Rollet, 2007, Church, 1995).

Ainsi en **amont de l'ouvrage**, la réduction de la vitesse d'écoulement et le blocage des sédiments aura tendance à entraîner un **exhaussement du lit par aggradation** et de par cette diminution de la profondeur, la **bande active quant à elle s'élargira** (Melun, 2012) provoquant une baisse de la sinuosité. En revanche, **en aval**, le déficit sédimentaire causera une reprise de l'érosion et **une incision verticale et latérale du chenal** (in Rollet, 2007 et Melun, 2012, Galay, 1983 ; Williams et Wolman, 1984). Il est alors possible, dans certains cas, d'observer un **pavage du fond du lit** (in Rollet, 2007, Kondolf, 1997). Bien évidemment, ces processus ne possèdent jamais la même ampleur et sont **liés aux modifications des débits liquide et solide** citées précédemment. En effet, les ajustements de la géométrie du lit sont différents en fonction de la manière dont les flux du système fluvial fluctuent (in Rollet, 2007 et Melun, 2012, Petts et Gurnell, 2005).

De plus, **d'autres variables**, plus secondaires, viennent influencer sur la nature de ces ajustements post-construction du barrage. La **granulométrie du cours d'eau** (lit et berges) va par exemple jouer un rôle dans les possibilités d'érosion verticale et latérale (in Melun, 2012, Gaeuman *et al.* 2005). La **présence d'une ripisylve** pourra également impacter les dynamiques d'érosion car celle-ci permet de stabiliser les berges et force le dépôt des sédiments (Laslier, 2018). **Les affluents**, dont le niveau de base sera modifié par la présence du barrage pourront renforcer, ou au contraire diminuer, l'ampleur de ces réajustements (in Melun, 2012, Leopold et Bull, 1979). Ceux situés en amont de l'ouvrage verront leur pente se réduire ce qui va réduire leur capacité de transport alors que l'inverse se produira sur ceux positionnés en aval (Melun, 2012). **Les apports solides** ayant une fonction importante dans les processus d'érosion, l'évolution de la morphologie des affluents peut être déterminante dans la dynamique fluviale suite à la construction du barrage (in Melun, 2012, Marston *et al.* 2005).

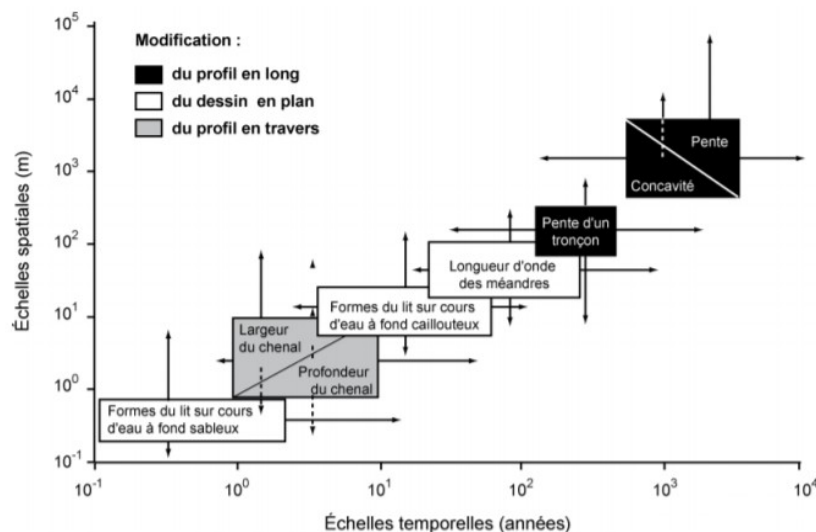


Figure 1.6 : Échelle temporelle des réajustements suite à la construction d'un barrage (in Rollet, 2007 d'après Knighton, 1984)

Il convient de préciser que **l'évolution temporelle de ces réajustements sera toujours différente** d'un cours d'eau à l'autre. Celle-ci sera déterminée par le type de modification du débit, le type du cours d'eau (style fluvial, énergie...) et le type de l'ajustement (in Rollet, 2007, Grams et Schmidt, 2005). Toutefois, nous l'avons vu, dans tous les cas les **paramètres du profil en long, du dessin en plan et du profil en travers** se réajusteront suite à la perturbation matérialisée par le barrage et un essai de théorie de la spatialité et de la temporalité de la modification des formes fluviales peut être théorisé (Figure 1.6).

Comme cela a été expliqué précédemment, **ces formes fluviales sont essentielles pour le maintien d'un équilibre hydromorphologique** de qualité dans le système fluvial. Dès lors, leur ajustement suite à la mise en place de l'ouvrage en travers provoquera également **une perturbation dans les conditions de vie des espèces vivantes du cours d'eau**. D'autant plus que d'autre ajustement que nous ne détaillerons ici que très brièvement vont également avoir **un impact sur la biodiversité du milieu**. C'est notamment le cas de la modification physico-chimique des eaux ou de la modification du niveau piézométrique de la nappe alluviale (Rollet, 2007 ; Souchon et Nicolas, 2011 ; Melun 2012).

1.2.3. Entrave à la continuité écologique et modification des habitats

L'ensemble des effets physiques (hydrologiques, morphologiques, physico-chimiques...) sur le cours d'eau induit par la construction d'un barrage va engendrer **une perturbation des flux biologiques et des habitats aquatiques** au sein du lit mineur et, par le système d'interactions, dans l'ensemble du fond de vallée (*in* Melun, 2012, Meybeck *et al.*, 1998). L'étude de ces modifications représente **un enjeu majeur** dans les décisions de restauration de la continuité écologique des cours d'eau puisqu'elles sont bien souvent à l'origine de la **décision de suppression d'ouvrages** (Souchon et Nicolas, 2011).

Plus ou moins directs, les impacts des barrages sur l'écologie du cours d'eau se rapportent notamment à la **continuité écologique** pour laquelle l'ouvrage représente un obstacle majeur (Souchon et Nicolas, 2011). Les ajustements hydrologiques, morphologiques mais également physico-chimiques induits par cette perturbation **transformeront alors totalement le fonctionnement du système** et sa biodiversité (Figure 1.7).

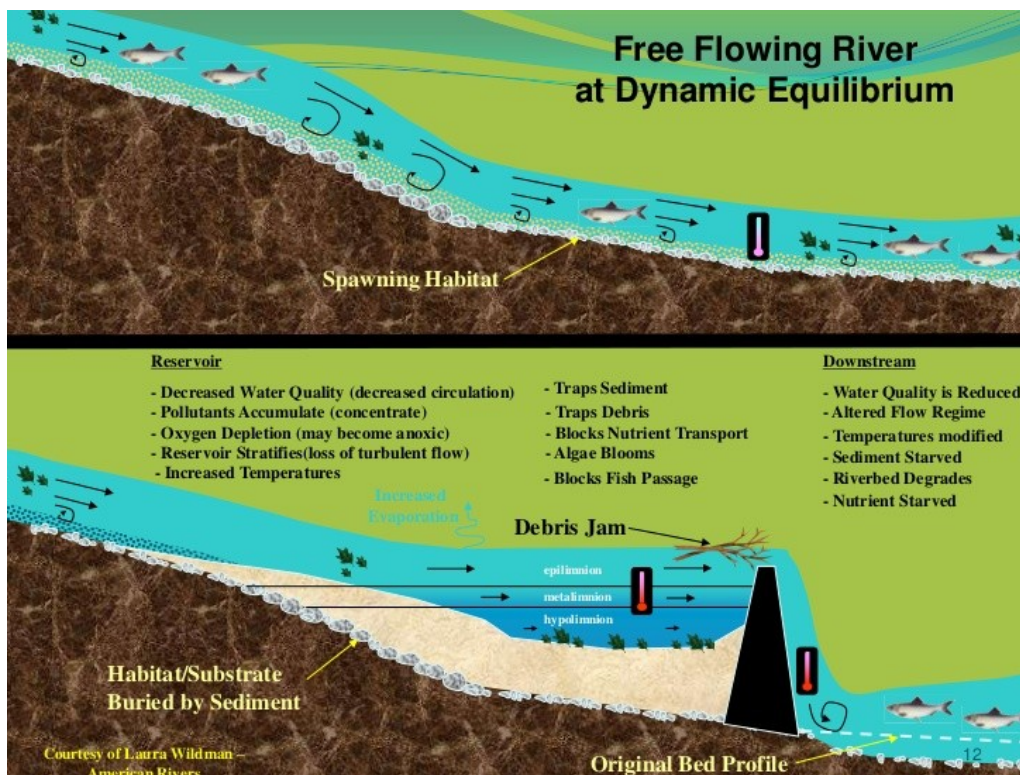


Figure 1.7 : Impacts de la construction d'un barrage sur la continuité écologique et les habitats (University of New Hampshire, date?)

Les **effets biotiques directs** concernent les migrations piscicoles qui vont être entravées par un obstacle souvent dépourvu de passe à poissons. Les saumons seront **bloqués dans leur remontée saisonnière**, notamment dans les fleuves, tout comme les autres salmonidés qui se déplacent entre l'aval et l'amont du cours d'eau (truite fario par exemple) pour s'y reproduire (Souchon et Nicolas,

2011). Ces populations vont donc être amenées à disparaître alors, qu'en raison de la création d'une retenue d'eau, des espèces plus lacustres (poissons blancs, carnassiers...) coloniseront le milieu et modifieront la chaîne alimentaire (*in* Rollet, 2007, Power *et al.*, 1996). Toujours au niveau faunistique, la **fragmentation du transfert des nutriments** et la **fluctuation de la température de l'eau** dans la retenue peuvent entraîner une eutrophisation qui aura une influence néfaste sur les espèces de macro-invertébrés très sensibles à ces perturbations, mêmes minimales (*in* Rollet, 2007, Wootton *et al.*, 1996). En ce qui concerne la végétation, son potentiel de colonisation sera fortement réduit de par **l'enneigement d'une grande partie du lit majeur** du cours d'eau.

Plus indirectement, la perturbation du débit solide (blocage des sédiments en amont) va provoquer la **dégradation des habitats aquatiques** nécessaire au maintien d'une biodiversité riche. Ces habitats sont considérés comme « l'interface entre hydromorphologie et biologie » et la création d'une retenue d'eau va entraîner un lissage dans les vitesses d'écoulement, les hauteurs d'eau ou la géométrie en travers (Souchon et Nicolas, 2011). Les faciès d'écoulement s'homogénéiseront ce qui favorisera le développement d'espèces parfois nuisibles et provoquera une altération de la biodiversité existante (Rollet, 2007 ; Souchon et Nicolas, 2001 ; Melun, 2012). Le piégeage de la charge sédimentaire au pied du barrage va en effet **réduire les zones de frayères**, lieux de reproduction des poissons et le processus de pavage du lit en aval (Bravard et Petit, 1997) empêchera la mobilisation de particules nécessaires à leur construction. Le passage des sédiments les plus fins pourra également, par le colmatage du substrat, venir **modifier la structure des habitats benthiques** (*in* Rollet, 2007, Wilcock *et al.*, 1996). Un barrage **affectera donc l'ensemble des conditions de vie** de la faune aquatique dans le lit mineur du cours d'eau et sera à l'origine, dans la plupart des cas, d'une **diminution de l'abondance des espèces**.

Cependant, le lit mineur ne sera pas le seul à être influencé par ces ouvrages et **les dynamiques du lit majeur seront également bouleversées**. Les changements dans les débits hydrologiques et la diminution de l'expansion des crues vont entraîner une **déconnexion du chenal avec sa plaine alluviale**, une interaction dont dépendent certains écosystèmes (*in* Rollet, 2007, Collins et Dunne, 1990). Ainsi, des milieux hygrophiles se retrouvent privés de leur apport régulier en eau et des espèces tant végétales qu'animales adaptées à ces milieux humides disparaissent de ces espaces.

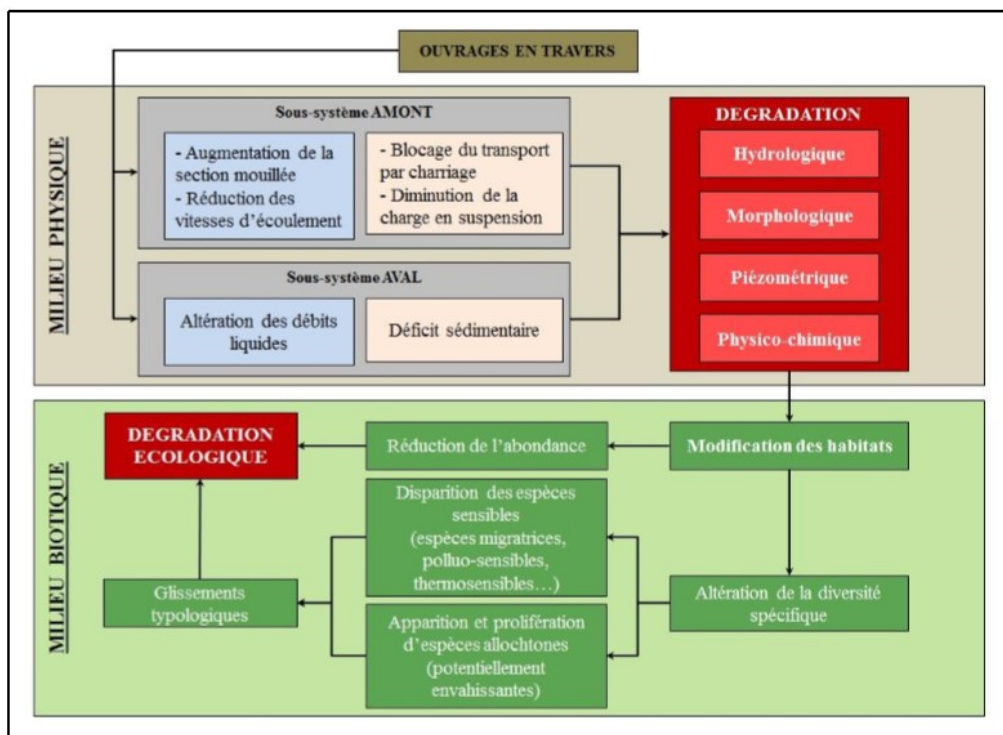


Figure 1.8 : Synthèse des impacts physiques et biologiques d'un barrage (*in* Melun, 2012)

Les **perturbations des processus physiques** du cours d'eau apportées par la construction d'un barrage sont nombreuses et se **répercutent sur les écosystèmes en place** (Figure 1.7). Toutes les composantes biologiques en seront affectées et de nouvelles espèces viendront coloniser le milieu au détriment des populations originelles. **Ces ouvrages impactent donc toutes les composantes du système fluvial et en modifient la dynamique et l'hydrogéomorphologie.** L'organigramme suivant (Figure 1.8) permet d'illustrer les **interactions existantes entre les impacts des barrages sur le milieu physique du cours d'eau et le milieu biotique.** Il convient de préciser que ces ajustements écologiques s'étalent sur un temps plus ou moins long en fonction de la **temporalité des réajustements morphologiques** et ne suivent pas une progression linéaire (Rollet, 2007). Bien que ces conséquences ne soient pas toujours négatives, elles posent tout de même la **question du dérasement de ces ouvrages pour rétablir la dynamique hydromorphologique et la continuité écologique du cours d'eau.**

Transition :

Les barrages sont donc des ouvrages dont l'histoire remonte à **l'âge des premières civilisations** et qui ont continué à se moderniser et à se répandre dans le monde encore aujourd'hui. Leurs usages sont variés et **ils ont longtemps représenté de véritables opportunités de développement** notamment dans le domaine de l'énergie. Cependant, des études de plus en plus nombreuses ont démontré que **leurs impacts sur l'ensemble de l'hydrosystème n'étaient pas négligeables** et ces ouvrages seraient **la cause d'une forte dégradation des écosystèmes aquatiques.** Cette balance coûts-bénéfices a entraîné une certaine prise de conscience de la part des gouvernements, notamment en Europe, qui ont par conséquent **initié une politique de l'eau centrée sur la restauration et la préservation de ces milieux** (Eau France, 2019). Les arasements/dérasements de barrages se sont donc multipliés depuis quelques années en suivant la législation de plus en plus stricte concernant ces structures. Toutefois, **les conséquences de ces opérations sont encore mal connues**, en particulier dans les milieux de faible à moyenne énergie tels que la Sélune. Il est donc nécessaire de savoir **comment réagissent ces systèmes face au désaménagement.**

1.3. L'arasement/dérasement d'ouvrage en milieu de faible à moyenne énergie

1.3.1. Une tendance de plus en plus générale au démantèlement : la législation en vigueur

La **tendance à l'arasement** (abaissement partiel) et au **dérasement** (effacement total) des ouvrages en travers, néfastes à l'équilibre hydromorphologique des cours d'eau débute dans les années 1960. S'ensuit alors **une série de lois et de directives** dans le but de rétablir, entre autre, la continuité écologique des cours d'eau à l'échelle européenne et française (Figure 1.9) (Eau France, 2019).

En ce qui concerne les barrages, et plus généralement depuis 1990 tous les ouvrages en travers (Melun, 2012), plusieurs de ces textes réglementaires ont une importance cruciale (Figure 1.9). Bien que la **première loi sur l'eau en France date de 1964**, la prise en compte des barrages comme menace pour les écosystèmes commence réellement au début des **années 1980 avec des classements en « rivière réservée »** qui interdisent la construction de nouveaux ouvrages hydrauliques sur certains tronçons de cours d'eau (Barraud et Germaine, 2011). Quatre ans plus tard, **la loi sur la pêche de loisir en** oblige la mise en place, sur les ouvrages spécifiés, d'aménagements destinés à permettre ou à faciliter le passage des poissons (Barraud et Germaine, 2011). Après plusieurs directives concernant la pollution des eaux ou les habitats faune-flore, c'est en **1992 qu'une nouvelle loi sur l'eau, qui instaure la gestion écologique intégrée** (Barraud et Germaine, 2011) est votée dans l'objectif de préserver les écosystèmes aquatiques notamment par la **création des Schémas Directeurs d'Aménagement et de Gestion des eaux (SDAGE)** (Gesteau, 2017).

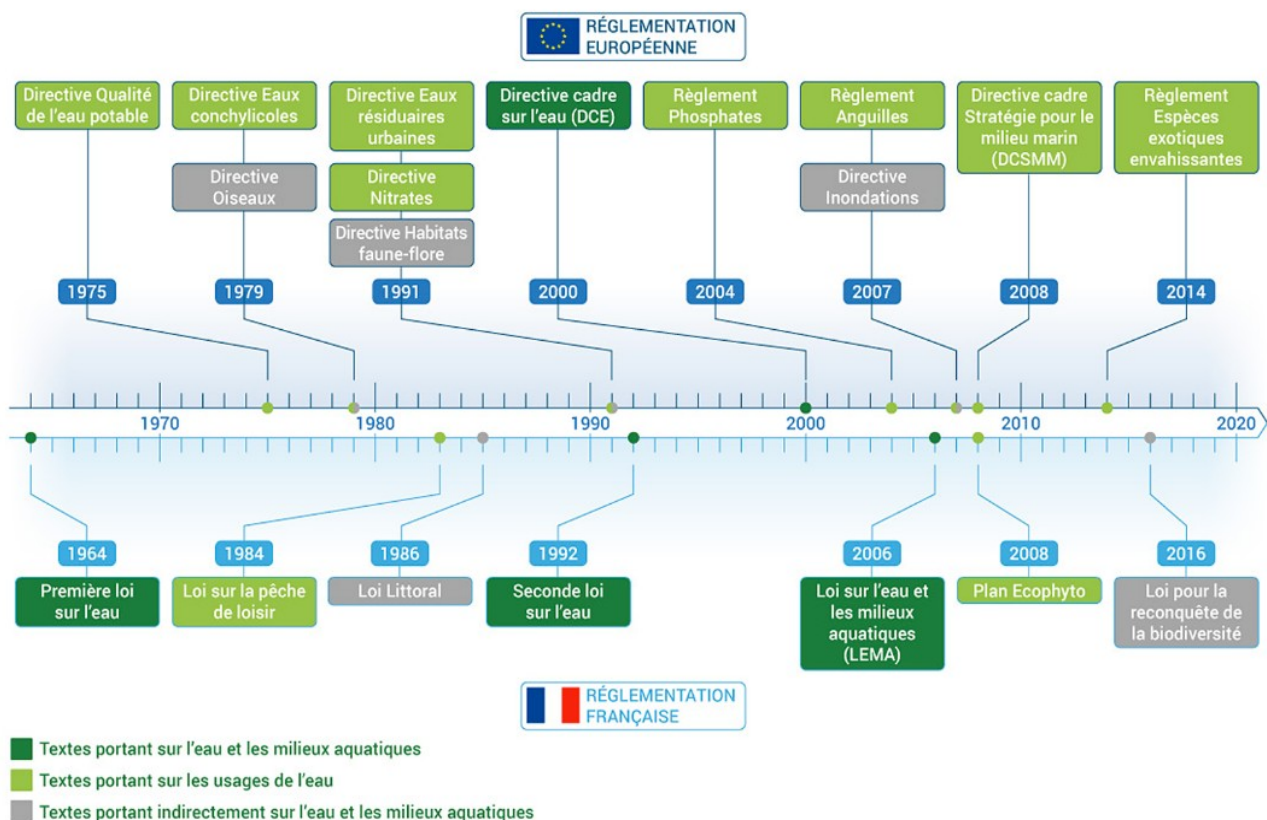


Figure 1.9 : Chronologie des textes réglementaires sur les milieux aquatiques (Eau France, 2018)

Le principal texte de loi est promulgué en 2000 alors que « la Commission Internationale des Grands Barrages reconnaît le démantèlement comme une option envisageable » (Barraud et Germaine, 2011), il s'agit de la **Directive Cadre sur l'Eau**. Celle-ci fixe comme objectif de « rétablir, ou de maintenir, le bon état écologique des milieux aquatiques » (Eau France, 2019) au niveau européen.

Pour cela elle oblige les états à mettre en œuvre des « *plans de gestion* » ainsi que des « *programmes de mesures* » (Eau France, 2019) pour rétablir la qualité des paramètres physico-chimiques, écologiques et hydromorphologiques des milieux aquatiques. La réalisation de ces objectifs, organisés sur des périodes de six ans de 2009 à 2027, est confiée à **des acteurs sur toutes les échelles** de territoire, le Comité National de l'Eau, les Comités de Bassin en charge des **SDAGE** et les Commissions Locales de l'Eau (CLE) (Eau France 2019). Les dérasements de barrages s'inscrivent dans cette directive car ils sont un des moyens de rétablir la continuité écologique des cours d'eau en leur permettant de **retrouver un bon état écologique par la restauration de la dynamique fluviale** (Eau France, 2019).

Au niveau Français la **Loi sur l'Eau et les Milieux Aquatiques (LEMA) de 2006** découle de la DCE pour faire respecter les objectifs de cette dernière. Elle crée de nouveaux outils pour la gestion de l'eau et la reconquête du bon état général des milieux aquatiques (Eau France, 2019) et s'accompagne de la **création de l'Office Nationale de l'Eau et des Milieux Aquatiques (ONEMA)** dans le but d'établir des études concernant l'état des cours d'eau français (Eau France, 2019). Cet organisme, dont les compétences sont mutualisées avec **l'Agence Française pour la Biodiversité depuis 2017**, publiera d'ailleurs, en 2012, un manuel d'hydromorphologie (Barraud et Germaine, 2011). Depuis, plusieurs autres directives, tant au niveau européen que français, ont été mises en place pour continuer d'insister sur **la nécessité de préserver les milieux aquatiques** de nuisances extérieures tels que le règlement « anguille » (2007) ou la Loi pour la reconquête de la biodiversité (2016...) (Figure 1.9) (Eau France 2019).

Les barrages représentent donc aujourd'hui des **obstacles au rétablissement de ce bon état écologique** des cours d'eau et leur arasement/dérasement se fait de plus en plus en fréquent. Il est alors essentiel de s'intéresser aux différentes opérations, aujourd'hui achevées, qui sont autant d'exemples pour comprendre **de quelles manières les cours d'eau se réajustent suite à leur décroissement**. Les conséquences de l'effacement d'ouvrage peuvent en effet être positives comme négatives et leur étude permettra d'appréhender avec plus de recul **les processus de résilience des systèmes fluviaux de faible énergie** tels la Sélune.

1.3.2. Les réajustements hydromorphologiques théoriques post-effacement

L'accélération de la tendance à l'arasement ou au dérasement d'ouvrage s'est accompagnée de **l'augmentation des études concernant les réajustements post-effacement** qui ont permis de mieux comprendre les processus hydromorphologiques faisant suite à ces opérations (Melun, 2012 ; Michler 2018).

Ce mouvement, qui prend le nom de « Dam Removal », est **initié par les États-Unis** et s'intensifie depuis les années 1990 (Lespez et Germaine, 2016 ; Bellmore *et al.* 2016). On dénombre en effet aujourd'hui dans ce pays, plus de 900 opérations d'effacement, dont 450 depuis 1993. Toutefois, il est à noter que cela ne représente que 0,5 % des ouvrages recensés par le National Inventory of Dams (Melun, 2012 ; Lespez et Germaine, 2016 ; Bellmore *et al.* 2016) et que **très peu on fait l'objet d'un suivi** global sur les réajustements du cours d'eau (*in* Melun, 2012, Hart *et al.*, 2002). De l'autre côté de l'Atlantique, **l'Europe fait également partie des régions qui ont mis en place des politiques de restauration écologique par la suppression des ouvrages en travers** représentant une menace pour les écosystèmes ou devenant obsolètes (Lespez et Germaine, 2016). C'est surtout à partir des années 2000, avec la DCE et le Réseau Natura 2000 qu'il est possible d'observer une augmentation de ce type d'opération, notamment en **France** (Lespez et Germaine, 2016). Il est donc important d'exposer **les réajustements hydromorphologiques**, positifs comme négatifs, faisant **suite à l'effacement d'ouvrage dans le sous-système amont** du cours d'eau qui nous intéresse dans le cadre de ce travail. Cela permettra par la suite de **compléter la théorie** avec des **exemples plus concrets** qui, bien qu'encore

relativement récents par rapport aux temporalités d'ajustement des systèmes fluviaux, peuvent apporter plus d'informations sur la réaction des fleuves au contexte similaire à celui de la Sélune.

Dans un premier temps, l'effacement du barrage va provoquer **une reprise brutale des flux hydriques et sédimentaires** entre l'amont et l'aval du cours d'eau. La vidange de la retenue entraînera ainsi « *un abaissement de la ligne d'eau proportionnellement à la hauteur effacée de l'ouvrage* » (in Melun, 2012, Chang, 2005) et cette ligne d'eau s'alignera petit à petit sur le nouveau linéaire ainsi créé. On constate donc **une augmentation de la pente et de la puissance des écoulements**, en partie à l'origine des réajustements morphologiques. De même, la suppression de l'ouvrage va permettre la **réactivation du transport sédimentaire** (in Melun, 2012 et Michler, 2018, Cheng, 2005) qui s'accumulait alors dans la zone de remous. Les particules fines seront ainsi d'abord remobilisées avant les sédiments plus grossiers déposés dans les couches inférieures ou en queue de retenue (in Melun, 2012, Cheng, 2005).

De la même façon que la construction d'un barrage va entraîner des réajustements du cours d'eau par le système de processus-réponse, on estime que, suite au **rétablissement de la dynamique « naturelle » des variables de contrôle**, la suppression de ce dernier engendrera **des réajustements proportionnels mais inverses** à ceux constatés lors du cloisonnement du linéaire hydrographique concerné (in Michler, 2018, Doyle *et al.*, 2005). C'est sur ce principe théorique que repose d'ailleurs la **notion de résilience** qui correspond alors à la **restauration des conditions dites « naturelles »** d'écoulement (Melun, 2012). Le cours d'eau aura donc la capacité de retrouver un état proche de l'état « originel » par le rétablissement de ses dynamiques hydro-sédimentaires (in Melun, 2012, Knighton, 1984) (Figure 1.10)

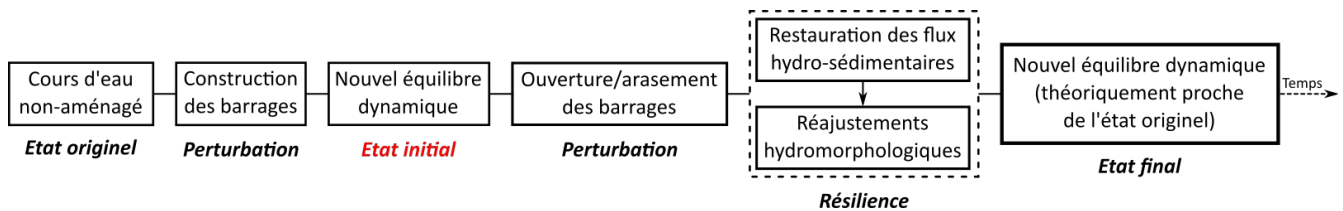


Figure 1.10 : Schéma théorique de la résilience d'un fleuve après perturbation (R. Létondot, 2019)

Nous nous intéresserons donc ici aux **réajustements morphologiques du sous-système amont** du cours d'eau se mettant en place suite à la suppression d'un ouvrage en travers. En effet, la présente étude ne portant pas sur le sous-système aval il ne semble pas nécessaire de détailler les impacts des opérations de dérasement dans cette zone.

Ainsi, **cette résilience du cours d'eau peut être découpée en six phases** dans ce sous-système (in Melun, 2012 ; Michler, 2018, Doyle *et al.*, 2003), la première correspondant à **l'état cloisonné ante-dérasement** (Stade I, Figure 1.11). L'opération de vidange va ensuite entraîner une **forte baisse de la hauteur d'eau** au sein de la retenue et une **accélération de la vitesse d'écoulement** favorisant la remobilisation des particules fines déposées dans la zone de remous et donc l'augmentation de la turbidité (Stade II, Figure 1.11) (in Melun, 2012 ; Michler, 2018, Doyle *et al.*, 2003). **Cette amplification de la capacité de transport du cours d'eau** va alors permettre la reprise d'une dynamique érosive régressive vers l'amont et l'incision du chenal au sein des sédiments (Stade III, Figure 1.11) (in Melun, 2012, Leopold et Bull, 1979). Cette **contraction du cours d'eau** prendra fin lorsque la hauteur des berges critiques sera atteinte ce qui provoquera cette fois une érosion latérale de celles-ci et donc un **élargissement du lit** (Stade IV, Figure 1.11) (in Melun, 2012, Thorne, 1999). C'est l'apport progressif de particules plus grossières, provenant de l'amont, qui va venir peu à peu **déterminer la sinuosité du cours d'eau et réduire la pente du lit** (in Michler, 2018, Evans, 2007) (Stade V, Figure 1.11) ce qui va déterminer son nouveau tracé général dans sa dimension verticale et horizontale.

L'ampleur de ces ajustements dépendra fortement du **volume initial d'alluvions présents, de l'hétérogénéité de leur granulométrie et de leur cohésion** (in Melun, 2012, Doyle *et al.*, 2003). En effet, plus les berges seront argileuses ou limoneuses plus l'incision du lit sera importante alors que si ces dernières sont majoritairement sableuses l'érosion latérale dominera (in Melun, 2012, Simon et Darby, 1997). La nature des berges et celle de la végétation riparienne conditionneront donc la situation de quasi-équilibre final **déterminante dans la diversité des faciès d'écoulement et donc des potentiels habitats aquatiques** (Stade VI, Figure 1.11) (in Michler, 2018, Doyle *et al.*, 2003). De même, il est important de préciser que les différentes caractéristiques de l'hydrosystème (énergie, granulométrie, occupation du sol...) viendront également **influencer les temporalités de ces réajustements** (in Michler, 2018, Doyle *et al.*, 2003). **Le temps de résilience** des cours d'eau connaît donc **une grande variabilité** ce qui doit rentrer en compte dans les modes de gestion de ces opérations.

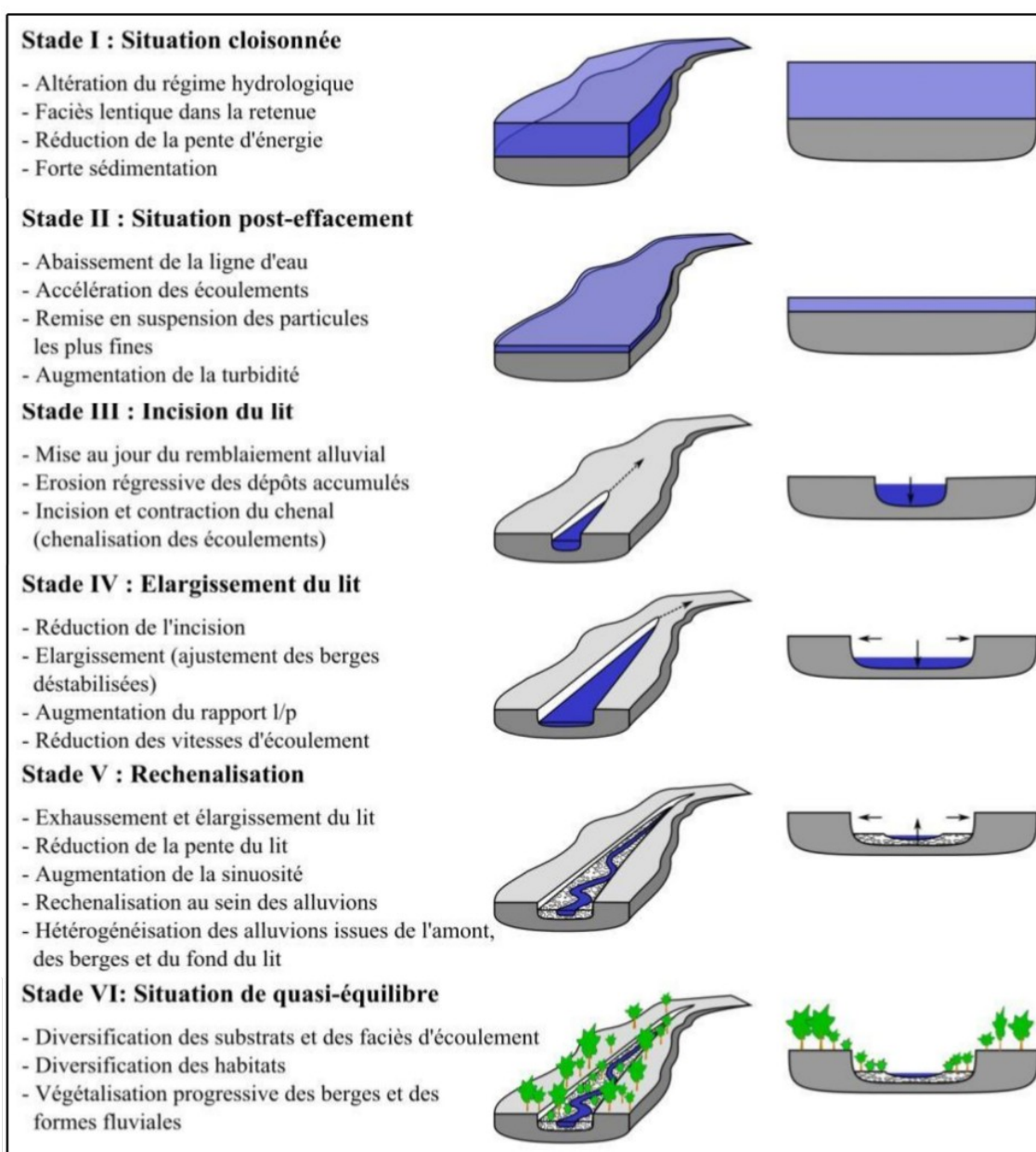


Figure 1.11 : Réajustements théoriques post-effacement d'ouvrage dans le sous-système amont du cours d'eau (in Melun, 2012, Doyle *et al.*, 2003)

	Impacts physiques et écologiques post-effacement	
	Négatifs	Positifs
Débit Liquide	Abaissement du niveau d'eau dans le chenal, risques accrus de période de sécheresse estivale	Augmentation des vitesses d'écoulements et restauration du débit naturel En amont et en aval
Débit Solide	Remise en suspension des sédiments fin en amont et en aval	Suppression de l'effet « point dur » en amont et restauration du transport sédimentaire en aval
Morphologie	Érosion régressive du lit et déstabilisation des berges en amont Risque de remblaiement temporaire du lit par des particules fines	Rétablissement de la dynamique fluviale naturelle. Ajustement de la géométrie aux nouvelles conditions de débit : contraction du lit et rechenalisation au sein des alluvions. Diversification de la charge de fond
Piézométrie de la nappe	En amont : abaissement du toit de la nappe d'accompagnement et risque de déconnexion des captages.	Reconnexion nappe-chenal en aval
Physico-Chimie	Risque temporaire de forte dégradation dû à la remobilisation brutale des sédiments accumulés dans la retenue (↑ concentration en MES, ↑ concentration en substances nutritives, et toxiques). Risque de réduction du pouvoir de dénitrification .	Déstratification thermique et chimique en amont. Réoxygénation des eaux , réduction de l'eutrophisation et amélioration globale de la qualité des eaux en amont et en aval du tronçon restauré.
Écologie	En amont, réduction du volume aquatique habitable et risque de déconnexion des zones humides riveraines entraînant un dépérissement de la végétation en place et affectant les biocénoses. En aval, risque de dépérissement de la végétation inhérent au recouvrement sédimentaire dans le lit majeur	Restauration de la continuité écologique et libre circulation des biocénoses du lit mineur. Glissement typologique global marqué par la réduction du nombre d'espèces lenticques et la réémergence d'espèces lotiques dans le lit mineur. Diversification des habitats qui permet une augmentation de la diversité spécifique faunistique et floristique en amont et en aval, et dans les lits mineur et majeur. Restauration de zones de frayères dans Le lit mineur.

Figure 1.12 : Réajustements négatifs et positifs potentiels faisant suite à l'effacement d'ouvrage
(D'après Melun, 2012 ; Malavoï et Salgues, 2011)

En étudiant **les autres impacts** (piézométriques, physico-chimique et écologique) du dérasement d'un barrage, positifs comme négatifs, on remarque que la suppression d'ouvrage en travers serait **majoritairement profitable**, à long terme, à la dynamique des cours d'eau notamment en ce qui concerne **la restauration d'une biodiversité abondante par la rediversification des habitats** (Figure 1.12). Cependant, **les effets négatifs** de dégradation de l'environnement et du système fluvial lors des opérations d'effacement ne sont pas négligeables et doivent **être prises en compte** (Melun, 2012). Théoriquement, **la résilience du cours d'eau** vers son état *ante*-cloisonnement paraît donc envisageable. Toutefois, il est extrêmement **difficile d'évaluer l'ampleur des réajustements hydromorphologiques** avant l'opération de dérasement en raison de **la grande variabilité, spatiale et temporelle, des réponses des systèmes fluviaux** qui possèdent chacun des caractéristiques propres, notamment en terme d'énergie (Bravard et Petit, 1997). Il est donc pertinent de **s'intéresser aux spécificités des cours d'eau de faible à moyenne énergie**, dont fait partie la Sélune, pour comprendre comment leur résilience, qui doit ici être comprise comme **la capacité du cours d'eau à retrouver un équilibre** suite à une perturbation, se met en place et si celle-ci est réellement envisageable (*in* Melun, 2012, Doyle *et al.*, 2005).

1.3.3. Les spécificités des cours d'eau de faible à moyenne énergie : quels exemples ?

Il existe une **multitude de type de cours d'eau** qui se distinguent entre eux par leurs caractéristiques hydrologiques (débit liquide et solide) et leur morphologie (pente, largeur, sinuosité...). Ces éléments vont être déterminants dans les potentialités hydrauliques de la rivière et sa capacité de travail (Bravard et Petit, 1997). Grâce au **calcul de la puissance spécifique** (exprimée en W/m^2), il est alors possible de classer les cours d'eau selon **leur énergie**. C'est en partie la valeur de cette puissance qui déterminera **si des réajustements hydromorphologiques sont envisageables** après une perturbation ou la suppression de celle-ci.

Selon la valeur de cette puissance, des seuils ont été définis par Brooks en 1987 (Malavoi et Bravard, 2010). Se dégage ainsi **un premier seuil à $35 W/m^2$** , au dessus duquel le retour à une géodynamique originelle est possible, et un **second à $25 W/m^2$** en dessous duquel aucun réajustements n'est à priori possible (Figure 1.13) (Malavoi et Bravard, 2010). Notons cependant que ces réajustements dépendent également d'autres facteurs. Ainsi, **l'érodabilité des berges** (caractéristiques sédimentologiques) et **les apports solides directs ou indirects** rentrent également en compte dans **les potentiels de résilience du cours d'eau**. Une rivière d'une puissance spécifique forte mais avec des berges cohésives n'aura donc pas forcément les mêmes capacités de réajustements qu'une rivière avec une puissance plus faible mais des berges plus meubles (Malavoi et Bravard, 2010).

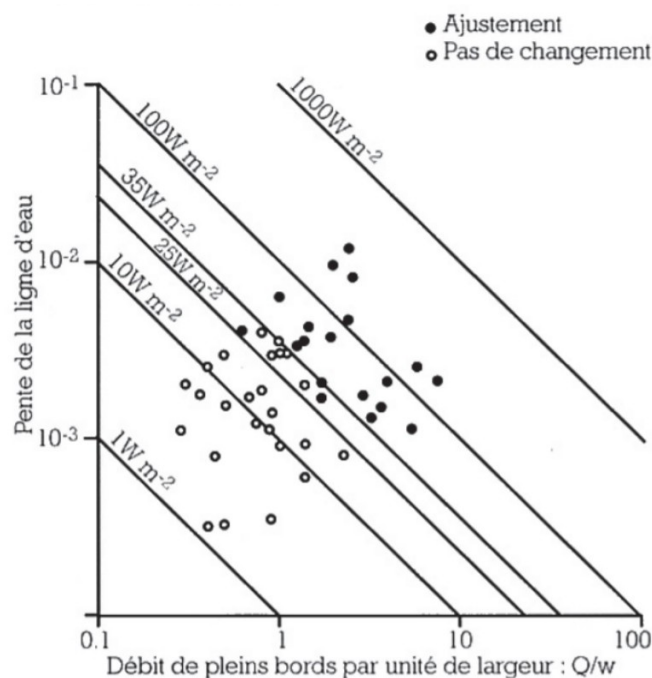


Figure 1.13 : Capacités de réajustements selon la puissance spécifique
(in Malavoi et Bravard, 2010 d'après Brookes, 1987)

Nous ne nous intéresserons donc ici qu'aux **systèmes de faible à moyenne énergie** (puissance spécifique pouvant dépasser légèrement le seuil de $35 W/m^2$) souvent localisés en plaine et possédant une faible pente tel que la Sélune. La **charge solide de ces rivières est majoritairement constituée de MES** (in Michler, 2018, Meybeck, 1984) ce qui va avoir une influence sur leur morphologie. Ainsi, ils possèdent souvent **un chenal étroit et profond** avec une **large plaine alluviale** formée par les dépôts de sédiments lors des crues (in Michler, 2018, Schumm, 1960). De même, la **granulométrie des berges** influencera les possibilités de déplacement latéraux de ces cours d'eau et leur méandrage. Ils seront généralement **peu enclins à des réajustements très importants** dans le temps, même si l'effacement

d'un ouvrage en travers viendra tout de même, par les travaux de remaniement du chenal, entraîner des ajustements pouvant être importants.

C'est pour ces raisons que **les opérations de dérasement dans ces milieux ont été beaucoup moins étudiées que celles ayant lieu dans des systèmes plus dynamiques** et restent « *très rares en France comme en Europe* » (Lespez et Germaine, 2016). Plus fréquentes aux États-Unis il est pourtant très difficile d'y trouver des démantèlements d'ouvrage dans des milieux de faible à moyenne énergie ou de grande taille avec un suivi sur le long terme avec seulement 9 % des opérations ayant fait l'objet d'une étude scientifique (Lespez et Germaine, 2016 ; Bellmore et al 2016). Toutefois, certaines opérations peuvent être prises comme référence afin d'émettre des hypothèses sur **la potentielle évolution hydromorphologique de la Sélune après destruction des barrages**, la France étant pionnière dans ce domaine avec plusieurs renaturation de cours d'eau ayant débuté à la fin des années 1990.

On retrouve notamment des **opérations relativement conséquentes au sein du Bassin Loire Bretagne**, dans le cadre de du Plan Loire Grandeur Nature (barrage de Saint-Etienne-du-Vigan, de Maisons-Rouges ou de Kermansquillec) (Lespez et Germain, 2016) mais également sur d'autres cours d'eau comme **l'Yonne** (barrage de Pierre Glissote) voire même dans **d'autres pays européens** (Dam Removal, 2019). Il s'agira donc de décrire les premiers résultats qui ont été observés sur ces différents linéaires de cours d'eau tant en **terme de réajustements morphologiques qu'en terme de diversification des habitats et de recolonisation piscicole**.

Le premier projet de dérasement d'ouvrage relativement comparable à celui de la Sélune concerne le **barrage de Kermansquillec**, d'une hauteur de 15 mètres, se trouvant sur le Léguer un fleuve qui se jette dans la Manche d'un débit de 6m³/s. Le mauvais état de cet ouvrage et **l'obstacle qu'il représente pour la migrations des poissons amphihalins** amène la question de son effacement dès 1965 et les travaux débutent en 1996 pour se terminer en 2001 (AFB, 2010 ; Dam Removal, 2019). Toutefois, **aucun état initial n'est effectué et le suivi post-opération est quasiment absent** (AFB, 2010 ; Dam Removal, 2019). Des études ont tout de même montré **l'efficacité de cette restauration de la continuité écologique** en démontrant la **stabilisation des berges** et la **mise en place du nouvel équilibre hydromorphologique** avec notamment la réapparition de l'alternance radier-mouille dans le lit mineur (AFB, 2010). Les populations de poissons diadromes ont également pu **recoloniser le milieu petit à petit sur un linéaire de 27 km** malgré la présence d'autres ouvrages en travers en aval et la qualité physico-chimique de l'eau s'est fortement améliorée (AFB, 2010 ; Dam Removal, 2019). Sur ce projet, malgré **de nombreux conflits d'usages** suite à l'annonce de la décision, la valorisation de la vallée a permis aux riverains de se réapproprier cet espace maintenant dédié à la randonnée (AFB, 2010 ; Dam Removal, 2019).

Le **barrage de Saint-Etienne-du-Vigan**, mesure quant à lui 14 m de haut et se situe sur l'Allier un affluent de la Loire relativement dynamique d'un module de 10,5 m³/s (AFB, 2010). Ce cours d'eau était entravé depuis 1895 par un ouvrage ne possédant pas d'appareil pour le franchissement des poissons migrateurs (AFB, 2010 ; Dam Removal, 2019). C'est en raison de **ses impacts sur la continuité écologique** qu'il fut décidé en 1994, lors du lancement du Plan Loire Grandeur Nature, de déraser cette structure et en raison de la configuration des lieux, le barrage est dynamité en juin 1998 (Figure 1.14) (Dam Removal). Un **suivi de la qualité de l'eau et de la stabilité des berges** est alors entrepris jusqu'à 3 ans après les travaux de restauration et depuis un relevé du nombre de frayères est effectué chaque année en collaboration avec l'ONEMA (AFB, 2010). Les **résultats de cette opération sont plutôt encourageants** au niveau biologique et hydromorphologique mais l'aspect revalorisation de la vallée n'a pas été concluant (AFB, 2010 ; Dam Removal, 2019).



Figure 1.14 : Le dynamitage du barrage de Saint-Etienne du Vigan en juin 1998 (Dam Removal, 2019)

La suppression du **barrage de Maisons-Rouges** sur la Vienne, également affluent de la Loire d'un module cette fois plus important de $198 \text{ m}^3/\text{s}$, résulte de motivations similaires (Figure 1.15). Bien que sujet à plus de débats en raison des emplois qu'il induisait, le dérasement de cet ouvrage de 3,80 mètres de haut est tout de même décidé en juin 1998 (AFB, 2010 ; Dam Removal, 2019). Cette opération a fait l'objet d'un **suivi hydromorphologique, biologique et sédimentologique** de 1995 à 2009 soit jusqu'à 10 ans après la fin des travaux. Ce suivi a permis de mettre en évidence la **rediversification des habitats aquatiques et une recolonisation significative des poissons migrateurs** (lamproie, saumon...) sur le linéaire anciennement inaccessible (Dam Removal, 2019). Malgré certains impacts négatifs dus à la remobilisation des sédiments de la retenue (colmatage en aval...), le **bilan de cette restauration reste donc globalement positif** (AFB, 2010 ; Dam Removal, 2019). Cependant, la faible hauteur de ce barrage ne permet pas une véritable comparaison avec les opérations d'ampleur plus importante dont il est question ici. De plus, aucune compensation n'a été prévue sur le plan socio-économique tout comme à Saint-Etienne-du-Vigan.



Figure 1.15 : Le barrage de Maisons-Rouges avant/après son dérasement (Dam Removal, 2019)

La dernière opération de dérasement d'ouvrage en France dont nous parlerons ici est beaucoup plus récente et se situe dans le bassin versant de la Seine. C'est sur l'Yonne, un cours d'eau fortement anthropisé d'un module de $92,3 \text{ m}^3/\text{s}$ (Banque Hydro, 2019) que le **barrage de Pierre Glissote** d'une hauteur de 7,3 mètres commença à être arasé en 2015 (Gilet *et al*, 2016). Le problème résidait dans le comblement total de la retenue par des sédiments et, encore une fois, le blocage de la continuité écologique (Gilet *et al*, 2016). La destruction de l'infrastructure est réalisée en deux phases et un **suivi hydromorphologique très précis est mis en place** notamment en ce qui concerne la

remobilisation des sédiments (Gilet *et al.*, 2016). Depuis, **le nouvel équilibre dynamique se met peu à peu en place** avec une **reprise des dynamiques d'érosion et de dépôt** même si des études doivent encore être faites sur le long terme pour confirmer l'amélioration de l'état global du cours d'eau (Gilet *et al.*, 2016).

La France n'a tout de même pas le monopole des opérations d'effacement et on retrouve plusieurs **démantèlements de barrage dans d'autres pays européens** (Dam Removal). Malgré le fait que ces derniers soient plus récents et qu'il soit plus difficile de savoir exactement dans quels contextes ils ont été entrepris, il est tout de même intéressant de montrer que, **même si les modes de gestion diffèrent, les réajustements morphologiques et biologiques sont observés** (Dam Removal).

Il est ainsi possible de citer le **barrage de Krebsbach** sur la rivière Elbe en Allemagne, d'une hauteur de 18,5 mètres, qui a été démantelé en 2007. Il fut décidé de **rechenaliser complètement le cours d'eau** en amont pour limiter les risques liés à l'effacement et dans le but de restaurer une biodiversité riche (Dam Removal, 2019) (Figure 1.16). Cette opération semble avoir porté ses fruits puisque un an après les travaux **le chenal était stable et les processus d'érosion limités** (Dam Removal). De même, le suivi mis en place a permis de constater **l'augmentation du nombre de macro-invertébrés et des espèces piscicoles**, la qualité de l'eau s'améliorant au fil des années (Dam Removal, 2019).



Figure 1.16 : La rechenalisation du cours d'eau en amont du barrage de Kresbach (Dam Removal, 2019)

Au Danemark, pays au relief peu marqué, c'est sur la rivière Gudenaa que le **barrage de Viholt** de taille modeste (4m) a été supprimé en 2008 après 20 ans de débat (Dam Removal). Cette opération qui a fait l'objet d'un **programme de recherche menée par l'Université du Danemark**, a permis de restaurer les habitats favorables aux zones de frai avec la **réémergence de radier à la granulométrie rentrant dans les tailles mobilisables par les poissons migrateurs** et la baisse de la hauteur d'eau (Dam Removal).

Enfin, il est possible de citer l'opération d'effacement du **barrage de Retuerta** en Espagne sur la rivière Aravalle (Figure 1.17). D'une hauteur de 14 mètres un sabotage de l'ouvrage en 2012 entraîne une forte mortalité piscicole en aval et en amont (Dam Removal). Il est alors décidé de le détruire en 2013 suite à l'expiration de la licence d'exploitation et un suivi est mis en place dans le but **d'évaluer l'évolution de l'état écologique** (Dam Removal). Celui-ci a déjà permis de mettre en évidence **l'amélioration de la qualité de l'eau** par la recolonisation de nombreux macro-invertébrés malgré le fait que l'opération est encore récente à l'échelle des réajustements hydromorphologiques (Dam Removal, 2019).



Figure 1.17 : Le début du démantèlement du barrage de Retuerta en Espagne (Dam Removal, 2019)

Ces différents exemples, dont la liste n'est pas ici exhaustive, nous montrent que **les opérations de démantèlement de barrage comparable à l'ampleur de celle de la Sélune sont rares** et aucune ne réunit vraiment les mêmes caractéristiques (hauteur d'ouvrage, énergie du cours d'eau...). De plus, **les suivis ont souvent été négligés** et on possède aujourd'hui peu d'informations sur les conséquences de ces dérasements (AFB, 2010). Il est donc **nécessaire d'effectuer une étude complète** avant, pendant et après les travaux de restauration. Cela permettra de **vérifier l'atteinte des objectifs de restauration du bon état écologique** fixés par la DCE et de **fournir des références pour les futurs projets d'arasement/dérasement** d'ouvrage en travers. De même, ce suivi sera un moyen **d'apprécier les liens entre hydromorphologie et biologie** ainsi que de **comprendre les processus des réajustements du système qui font suite à la suppression du barrage** (AFB, 2010). Une attention particulière doit également être portée aux risques inhérents à ce type d'opération tels que l'érosion régressive, la déconnexion nappe-chenal ou la dégradation temporaire des habitats.

C'est pour toutes ces raisons que le **démantèlement des barrages de Vezins et de la Roche-qui-boit doit faire l'objet d'un suivi scientifique multiscalaire et sur le long terme**. En effet, étant une première en Europe cette opération se doit « *d'être exemplaire* » comme l'a déclaré la secrétaire d'état à l'écologie le 9 novembre 2009 lors du Grenelle de l'Environnement (Sélune Hypothèse).

Conclusion partielle/Transition :

Nous l'avons vu, les **cours d'eau sont des milieux très sensibles** qui fonctionnent comme des systèmes dynamiques dans lesquels les variables sont interdépendantes. De ce fait, la venue d'une perturbation aura des conséquences sur l'ensemble des paramètres de ce système et entraînera **un déséquilibre dans la dynamique fluviale**. On trouve parmi ces perturbations **la construction de barrages qui cause une forte altération de l'état hydromorphologique**. Ces ouvrages se sont multipliés dans le monde en raison de leurs usages multiples comme la production hydroélectrique, mais aujourd'hui cette tendance s'inverse progressivement. En effet, les études concernant leurs impacts sur le cours d'eau ont montré qu'ils étaient **une des causes principales de la dégradation des écosystèmes** et qu'ils représentaient un risque pour la qualité des eaux de surfaces. C'est d'ailleurs pour cela que l'Europe, et plus spécifiquement la France, s'est munie **de lois et d'outils dans le but de rétablir la continuité écologique des fleuves et rivières** sur lesquels les barrages sont obsolètes ou qu'ils représentent un risque environnemental trop important.

Cependant, alors que ces opérations d'arasement/dérasement sont bien connues sur les cours d'eau dynamiques, elles le sont beaucoup moins en ce qui concerne les systèmes de faibles à moyenne énergie. On ne trouve que **très peu de retour d'expériences sur des dérasement de barrages dans ces contextes** et aucune conclusion ne peut alors être émise sur l'ampleur et les temporalités des réajustements, positifs comme négatifs, qui feront suite à la suppression de l'ouvrage. Par conséquent, **un suivi global s'avère impératif lorsque des opérations de démantèlement de barrage** de grande envergure ont lieu dans ces milieux. C'est pourquoi, **le choix du terrain d'étude** de ce projet de recherche fut évident puisque **la suppression du barrage de Vezins d'une hauteur de 36 mètres**, officialisé en 2017, sur la Sélune est considéré comme **une première Européenne**. Une présentation du bassin versant de ce fleuve et de ses barrages s'impose donc pour comprendre **ses spécificités** et les raisons qui ont poussé à **son désaménagement**.

II. La Sélune : un fleuve entravé par deux grands barrages

2.1. Contexte géographique : la Sélune et son bassin versant

2.1.1. Localisation et situation de la Sélune

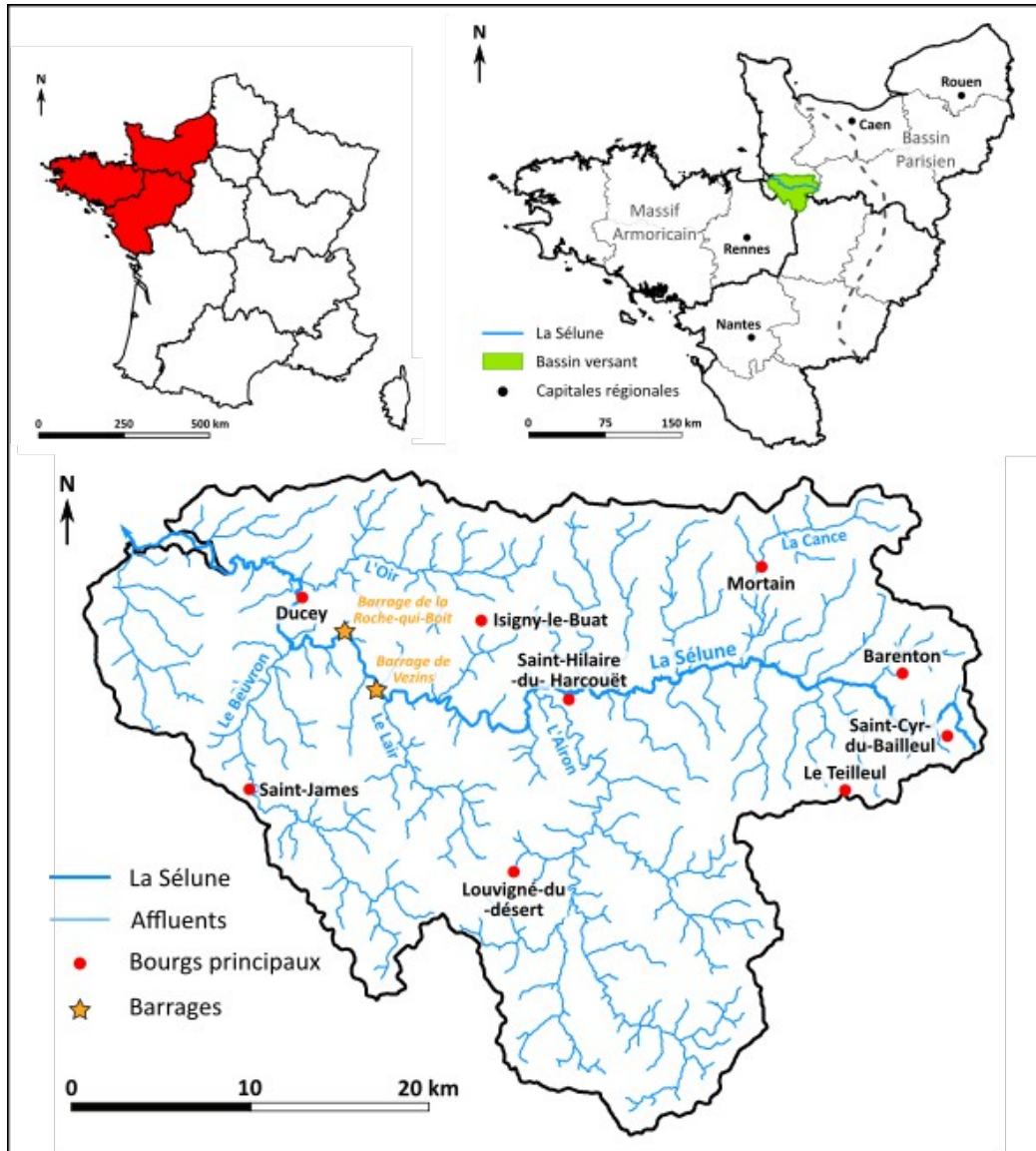


Figure 2.1 : Carte de localisation du bassin versant de la Sélune (R. Létondot, 2019)

La **Sélune** est un fleuve situé dans le Nord-Ouest de la France dans le département de la Manche . D'une **longueur d'environ 90 kilomètres** (Laslier, 2018), son **bassin versant s'étend sur 1014 km²** et concerne deux autres départements, l'Ille et Vilaine en Bretagne et la Mayenne dans les Pays de la Loire (Figure 2.1). La Sélune prend sa source à Saint-Cyr-du-Bailleul dans la Manche à environ 140m d'altitude (l'altitude maximum étant de 336m) et se jette dans **la Baie du Mont-Saint-Michel** classée au patrimoine mondial de l'UNESCO depuis 1979 (SAGE Sélune, 2001). Elle possède de **nombreux affluents**, avec une densité de drainage supérieure en rive gauche, dont les principaux sont la Cance, l'Airon, le Lair, le Beuvron et l'Oir (Germaine, 2015) (Figure 2.1). Son bassin versant est majoritairement constitué de **paysages ruraux et agricoles** (culture d'élevage, production hors-sol...) et ne comporte que quelques bourgs principaux tels que Saint-Hilaire-du-Harcouët, Mortain, Ducey ou Saint-James (Germaine, 2013). La particularité de ce cours d'eau réside dans la **présence de deux grands barrages**

hydroélectriques, celui de **Vezens** et de **la Roche-qui-boit** dans la partie amont du bassin versant (Figure 2.1). Ce sont ces deux ouvrages, et le projet de leur arasement, qui ont motivé le choix de l'étude de ce bassin versant au contexte physique particulier.

2.1.2. Un contexte physique typique du Massif Armoricain...

Le bassin versant de la Sélune est constitué de plusieurs ensembles topographiques et géologiques distincts et **caractéristiques du Massif Armoricain** tout comme ses conditions climatiques qui sont propres à cette région.

Topographie :

Carte topographique du bassin versant de la Sélune

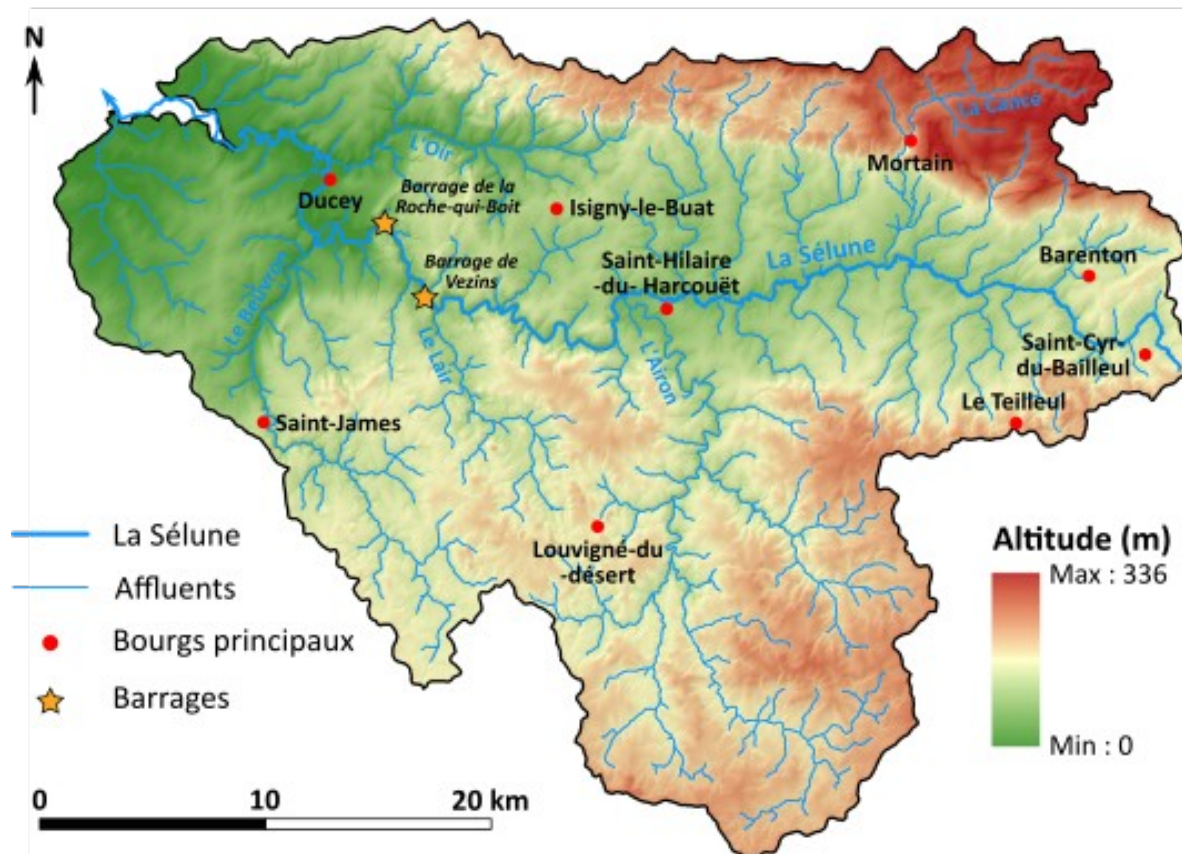


Figure 2.2 : Carte topographique du bassin versant de la Sélune (d'après le MNT 25m, R. Létondot, 2019)

Son relief (Figure 2.2), est **relativement peu accentué** et diminue progressivement de l'Est vers l'Ouest jusqu'à atteindre le zéro marin à l'embouchure de la Sélune au niveau de la Baie du Mont-Saint-Michel, une dépression d'environ 500 km² subissant l'influence des grandes marées de cette région (SAGE Sélune, 2001). On trouve au Nord-Est du bassin versant, **le synclinal de Mortain qui culmine à plus de 300 mètres** puis, plus à l'Ouest, un espace constitué de collines pouvant atteindre 250 mètres de haut et dont les altitudes diminuent progressivement vers la mer (SAGE Sélune, 2001) (Figure 2.2). **Au Sud, le relief reste vallonné et incisé** de nombreux cours d'eau malgré des altitudes plus modérées (180 mètres en moyenne) (Figure 2.2). Enfin, **la partie médiane du bassin versant est caractérisée par un relief beaucoup moins prononcé** dans lequel la Sélune s'incise parfois fortement comme aux abords des retenues des barrages où **des gorges se forment** (SAGE Sélune, 2001, Germaine, 2013).

Géologie :

En ce qui concerne la géologie de cet espace (Figure 2.3) un découpage similaire peut être effectué. On retrouve au Nord, dans le **synclinal de Mortain**, les **schistes et grès** datant du paléozoïque suivi plus à l'Ouest les **granites de Saint-Barthélemy**, issus d'un magmatisme Cadomien à Varisque dont les **auréoles sont constituées de schistes tachetés et de cornéennes** (SAGE Sélune, 2001) (Figure 2.3). Le Sud est également marqué par la présence de **différentes sortes de roches granitiques** (leucogranites, monzogranites...) autour desquels on observe ces mêmes auréoles de roches métamorphiques (SAGE Sélune, 2001) (Figure 2.3). Le reste du bassin versant, et notamment **la partie dans laquelle s'écoule la Sélune, se caractérise par une alternance schisto-gréseuse** formée durant le Néoprotérozoïque et plus précisément pendant le Briovérien (SAGE Sélune, 2001) (Figure 2.3). C'est cette géologie qui explique, en partie, le relief décrit précédemment (Figure 2.2).

Carte géologique du bassin versant de la Sélune

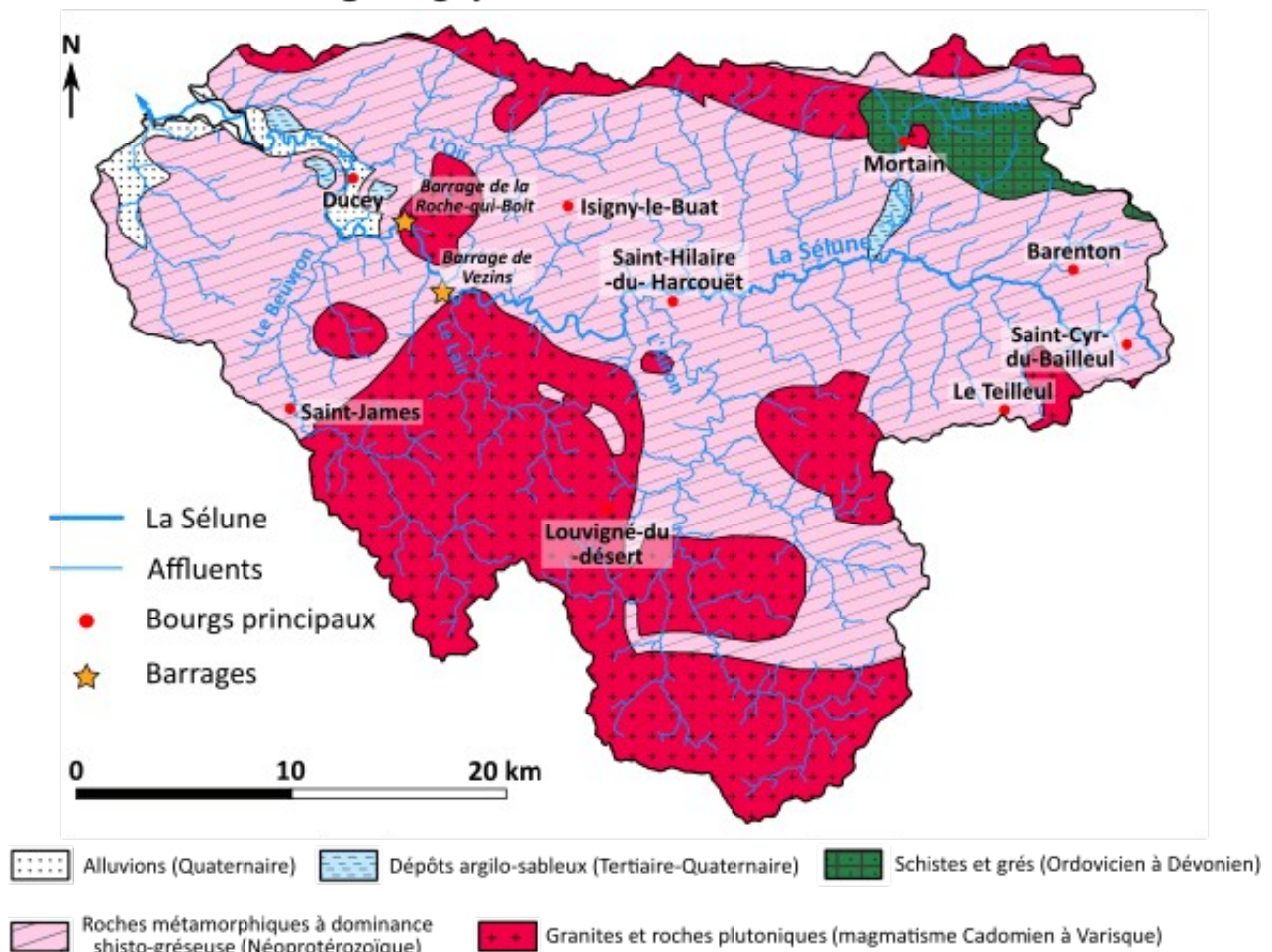


Figure 2.3 : Carte géologique du bassin versant de la Sélune (d'après la carte géologique du BRGM, R. Létondot, 2019)

Le bassin versant de la Sélune est majoritairement constitué de **roches granitiques et schisteuses typiques du Massif Armoricain** (Figure 2.3), un massif montagneux ancien du Paléozoïque érodé au fil du temps. **L'imperméabilité de ces roches** et l'absence de la capacité de stockage hydrique souterrain, hormis dans certaines failles, explique donc la **forte densité du réseau hydrographique** et le **nombre important d'affluents** (SAGE Sélune, 2001) (Figure 2.2 et 2.3) qui convergent vers la Sélune. De même, la nature de ce substratum, cumulée aux précipitations, aura **une influence sur le régime des cours d'eau** comme nous le verrons en étudiant notamment la quantité et la saisonnalité des précipitations drainées par ce bassin versant.

Climatologie :

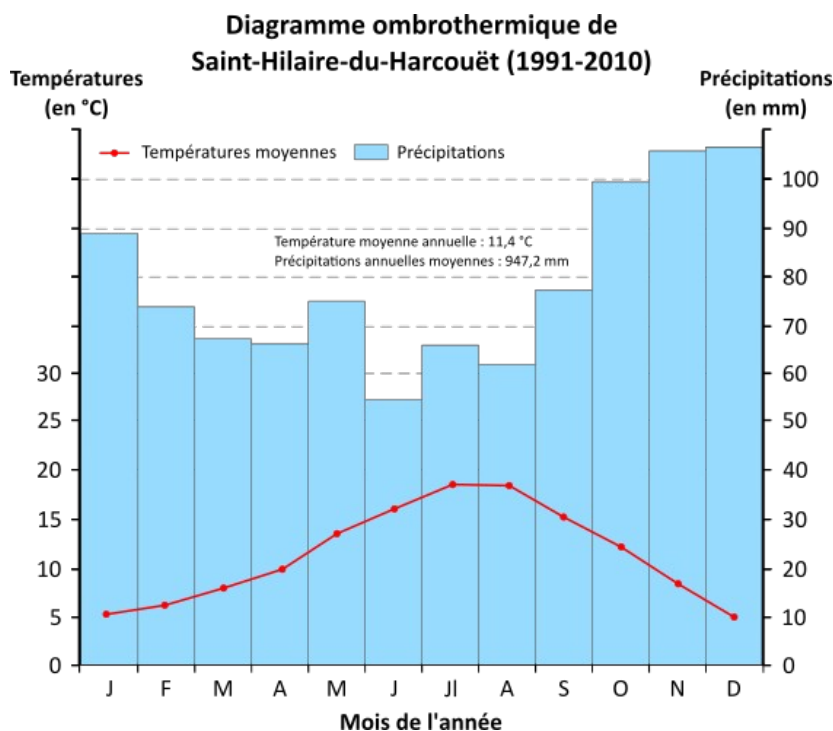


Figure 2.4 : Diagramme ombrothermique à Saint-Hilaire-du-Harcouët (d'après les données de Météo-France, R. Létondot, 2019)

Dans cette zone proche de la mer le climat peut être qualifié de « **tempéré océanique** » (Laslier, 2018). L'influence du littoral va en effet adoucir les températures tant en hiver qu'en été et on remarque qu'à Saint-Hilaire-du-Harcouët, la **température moyenne annuelle est de 11,4 °C**, la plus basse température moyenne mensuelle étant de 5,1 °C en janvier et la plus haute de 18,1°C en juillet (Figure 2.4).

Les précipitations, dont la valeur moyenne pour une année est de **947,2 mm** (Figure 2.4), seront également impactées par l'humidité apportée par la mer. Toutefois, la raison de leur quantité, plutôt élevée, pour la région réside dans **la configuration du relief** qui entraînera la chute des pluies lorsque les masses d'air rentreront en contact avec des espaces élevés comme le synclinal de Mortain (Figure 2.2). Les variations de ces précipitations auront donc une **influence prépondérante dans la saisonnalité des débits** de la Sélune et, en raison du substratum, dans la réactivité hydrologique des cours d'eau. En effet, du fait de **l'imperméabilité des roches**, l'eau ne pourra pas s'infiltrer mais ruissellera sur les versants et rejoindra directement le chenal. Le contexte physique du bassin versant de la Sélune va donc conditionner le régime hydrologique du fleuve.

2.1.3. ...expliquant le régime hydrologique typique du fleuve

De par ses caractéristiques géologiques et climatiques le bassin versant de la Sélune connaît une **forte densité de drainage**. En effet, avec au total 1163 km de linéaire de cours d'eau, dont les deux tiers en rive gauche de la Sélune, cette densité atteint 1,15 km/km². Le fleuve principal est donc alimenté par une **vingtaine d'affluents principaux** d'une longueur variant de 2 à 41 kilomètres (SAGE Sélune, 2001). **Sa pente, d'environ 0,2 %** en moyenne, est particulièrement forte en tête de bassin versant puis s'atténue progressivement jusqu'en dans la Baie du Mont-Saint-Michel (Figure 2.5). On voit également très bien sur ce profil en long du fond de la Sélune **les ruptures de pente engendrée par les deux barrages** (Figure 2.5). Leurs retenues forment en effet un replat, notamment au niveau de celle

de Veziens, suivi d'un décrochement quasiment vertical qui matérialise l'endroit où a été construit l'ouvrage. La pente reprend ensuite une tendance plus « naturelle » en aval de la Roche-qui-boit (Figure 2.5). Ces barrages vont ainsi **permettre un certain contrôle des débits du cours d'eau** qui possède ici une saisonnalité bien marquée.

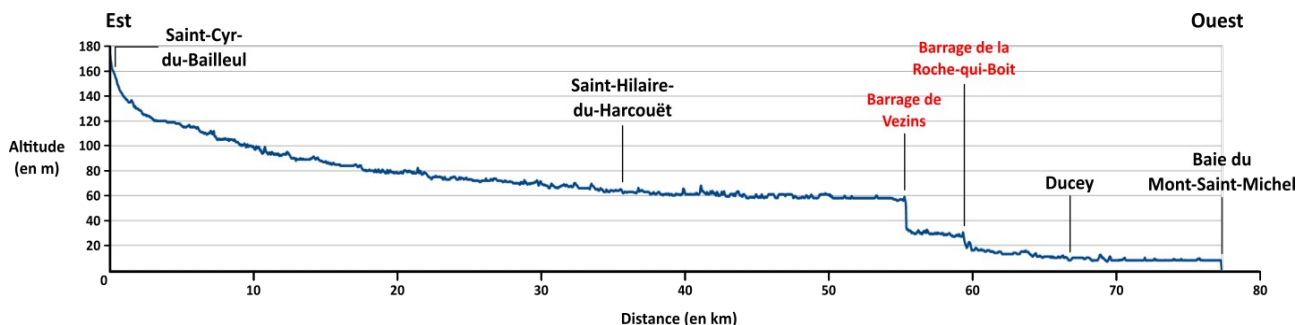


Figure 2.5 : Profil en long du fond de vallée de la Sélune (d'après le MNT 25m, R. Létondot, 2019)

La Sélune possède **un module avoisinant les 10m³/s** en aval des barrages sur la station la plus proche de la confluence à Ducey (Banque Hydro, 2019). Les débits y sont supérieurs à cette moyenne **de novembre à avril**, une période qui marque la **saison des hautes eaux** durant laquelle les précipitations sont plus abondantes (Figure 2.6). La **saison des basses eaux s'étend elle de mai à octobre**, encore une fois en raison des variations des précipitations, avec des débits inférieurs à 5m³/s de juillet à septembre (Figure 2.6). Le régime hydrologique de la Sélune est donc **simple et peut être qualifié de pluvio-océanique**.

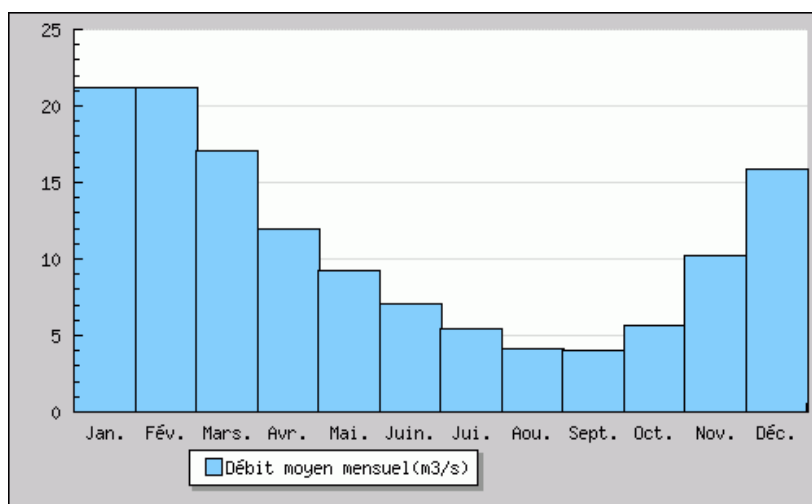


Figure 2.6 : Débits moyen mensuels de la Sélune (Ducey) de 1994 à 2019 (Banque hydro, 2019)

Position par rapport aux barrages	Amont	Aval
Station	Sélune Notre-Dame-du-Touchet	Sélune Ducey
Période	1991 - 2019	1994 - 2019
Module annuel (m ³ /s)	2,690	11,00
Débit spécifique (l/s/km ²)	13,3	12,3
Étiage (VCN10) (m ³ /s)	0,280	2,40
Crues (QJ biennal) (m ³ /s)	18,00	58,00

Figure 2.7 : Synthèse des données hydrologiques de la Sélune (Laslier, 2018 ; Banque hydro, 2019)

On remarque en comparant les données de deux stations différentes sur la Sélune, qu'en amont, ce fleuve ne possède qu'un faible débit qui s'explique par la faible superficie du bassin versant en amont (203 km²) et le nombre ainsi que la taille des affluents encore limité (Figure 2.7). Les crues peuvent être importantes tant en amont qu'en aval avec un débit biennal de 18 m³/s soit plus de 6 fois le module à Notre-Dame-du-Touchet et de 58 m³/s à Ducey soit 5 fois plus que le module (Banque Hydro) (Figure 2.7). De même les étiages peuvent être marqués sur ce fleuve un **débit moyen minimal annuel sur 10 jours consécutifs** de 0,280 m³/s à Notre-Dame-du-Touchet et de 2,40 m³/s à Ducey (Figure 2.7). Toutefois, la présence des barrages de Vezins et de la Roche-qui-Boit vont venir influencer la variabilité et les temporalités de ces débits notamment entre le début de la retenue et l'aval du second ouvrage. Ces impacts sur les flux hydrologiques, qui seront détaillés par la suite, vont permettre d'expliquer l'efficacité des barrages en termes d'écrêttements des crues et de soutien des périodes d'étiages prononcés (Ndom *et al.*, 2019).

Transition :

La Sélune est donc **un fleuve du Sud-Manche incisé dans un massif ancien** composé de roches dures et imperméables dans un milieu relativement humide, notamment en hiver. Son embouchure, située dans une des plus belles mais également une des plus fragiles baies du monde, est une des raisons pour lesquelles ce cours d'eau doit faire l'objet d'un suivi scientifique précis. Ses **débits peuvent connaître des variations importantes** mais restent globalement typiques des cours d'eau de faible énergie de plaines et de plateaux en basse altitude. Ses débits sont également influencés par la **présence des barrages de Vezins et de la Roche-qui-boit** qui modifient la dynamique fluviale de tout ce système, tant en amont qu'en aval. Il convient donc de les présenter en allant chercher **leurs origines et leurs caractéristiques** ainsi qu'en montrant de quelle manière ils ont impacté, pendant plus de 90 ans, **l'équilibre hydromorphologique de la Sélune**.

2.2. Les barrages de Vezins et de la Roche-qui-boit : une dynamique fluviale bouleversée

2.2.1. Présentation et histoire des barrages

Les deux barrages hydroélectriques de la Sélune, ont été construits entre le village de Saint-Hilaire-du-Harcouët et de Ducey à environ 10 km, à vol d'oiseau, de l'embouchure pour celui de la Roche-qui-Boit et 15 km pour celui de Vezins (Figure 2.8).



Figure 2.8 : Les barrages de Vezins et de la Roche-qui-Boit sur la Sélune (R. Létondot, 2019, d'après Germaine, 2013 et Vincent M, 2016)

CARACTERISTIQUES		VEZINS	ROCHE QUI BOIT
DATE DE CREATION		1929-1932	1915-1919
Bassin capté		720 km ²	730 km ²
Retenue			
Cote de la retenue normale		60,56 NGF	28,40 NGF
Cote maximum		60,56 NGF	29,02 NGF
Surface de la retenue		151 ha	30 ha
Longueur du remous		/	4 km
Volume total		19 000 000 m ³	1 500 000 m ³
Capacité utile		39%	43%
Barrage			
Type		Courbe, voûtes multiples à contreforts (40 voûtes)	Rectiligne, voûtes multiples à contreforts (17 voûtes)
Hauteur sur fondation		36 m	15,40 m
Longueur en crête		278 m	125 m
chute			
Hauteur de la chute		30 m	12,76 m
Puissance maximale installée		13 500 KVA	2 180 KVA
Productibilité moyenne estimée		20 391 MWh	6 500 MWh
Equipements de l'usine		3 groupes	2 groupes
Capacité totale d'évacuation		475 m ³ /s	475 m ³ /s
Débit réservé		non concerné	2 m ³ /s

Figure 2.9 : Caractéristiques des barrages de Vezins et de la Roche-qui-Boit (DDTM 50, 2011)

Le premier barrage à être érigé par la Société des forces motrices de la Sélune fut celui de la **Roche-qui-boit** dont les travaux ont duré quatre ans, de 1915 à 1919 (SAGE Sélune, 2001). De type rectiligne à voûtes multiples à contreforts (DDTM 50, 2011) il se situe entre les communes de Ducey et de Saint-Laurent-de-Terregatte (Figure 2.8). Ses **16m de hauteur, 125m de long et les 1,5 millions de m³ d'eau qu'il retient dans sa retenue longue de 4 km** (Laslier, 2018 ; SAGE Sélune, 2001) le place tout juste au-dessus du seuil des 15m définissant, selon la Commission Internationale des Grands Barrages (CIGB), un grand barrage (Figure 2.9). Il entraîne une turbine hydroélectrique d'une puissance de 2180 kW et produit, en moyenne, 7 millions de kilowattheures par an qui ont longtemps servi de compensation au barrage de Vezins plus en amont (SAGE Sélune, 2001 ; DDTM 50, 2011) (Figure 2.9).

Il fut décidé que ce second barrage, mesurant **36m de haut et 278m de long**, plus du double de celui de la Roche-qui-Boit, soit construit dans le but d'augmenter la production hydroélectrique jugée à l'époque trop insuffisante (SAGE Sélune, 2001 ; DDTM 50, 2011) (Figure 2.9). Le **barrage de Vezins**, également de type voûtes à multiple contreforts mais courbé, se trouve à la limite des communes de Vezins et de Saint-Laurent-de-Terregatte (DDTM 50, 2011) (Figure 2.8 et 2.9). Le chantier de cet ouvrage, qui servira durant la Seconde Guerre mondiale à **l'alimentation de l' Arsenal de Cherbourg et du mur de l'Atlantique**, débutera en 1929 pour se terminer en 1932 (DDTM 50, 2013). La puissance de sa centrale, estimée au maximum à 13 500 kW, dépasse largement celle de son prédécesseur et permet de fournir jusqu'à **20 millions de kWh par an** (Figure 2.9). Sa **retenue s'étale sur 19 km** en amont du barrage et retient plus de 19 000 000 m³ d'eau (SAGE Sélune, 2001 ; DDTM 50, 2011). En raison de sa position en amont de la Roche-qui-boit, le barrage Vezins n'est pas concerné par l'obligation d'un **débit réservé qui s'élève à 2m³/s, soit 1/5 du module**, pour ce dernier (DDTM 50, 2011) (Figure 2.9). Toutefois, ces deux ouvrages sont bien soumis à la réglementation concernant leur **vidange décennale** (DDTM 50, 2011).

De par **leur hauteur et la taille de leur retenue** ces barrages font de la Sélune **un cours d'eau remarquable** au sens géographique du terme. En effet, entravé depuis plus de 90 ans ce fleuve a connu lors de la construction de ces ouvrages un **véritable bouleversement dans sa dynamique fluviale et son équilibre hydromorphologique**. Ils ont également été porteur d'un **développement économique de la vallée** notamment avec l'installation d'une base de loisir, celle de la Mazure, sur le lac de Vezins. De même, de nombreux pêcheurs d'espèces lenticules y ont trouvé un lieu où pratiquer leur activité plusieurs cabanons se sont construits tout au long de la retenue. Il est également possible d'évoquer **la production hydroélectrique** qui, bien que modérée, représentent tout de même une source d'énergie renouvelable qui, dans le contexte actuel n'est pas négligeable.

Ainsi, il apparaît nécessaire de présenter de **quelles manières ces ouvrages impactent la Sélune** et notamment en ce qui concerne ses **principaux paramètres hydro-sédimentaires** qui vont avoir une incidence sur la géométrie du fleuve. Ces variables seront d'ailleurs, en raison du système de processus-réponse expliqué précédemment, à **l'origine de la dégradation de l'état écologique du cours d'eau**, principale motivation de l'arasement de ces deux barrages.

2.2.2. Impacts des barrages sur les flux liquides et solides de la Sélune

La Sélune est, à l'origine, un cours d'eau du Sud-Manche dont le régime hydrologique est **rythmé par la saisonnalité des précipitations** de cette région et les quelques réserves d'eau souterraines présentes dans les fissures du Massif Armoricaïn (SAGE Sélune, 2001). La **construction des barrages** a par conséquent, complètement **bouleversé ces conditions « naturelles »** de contrôle des débits. Le régime du fleuve s'est ainsi trouvé modifié, d'une part par la **création de retenues** de 151 ha (Vezins) et de 30 ha (La Roche-qui-boit), mais également par **la régulation anthropique des débits** entre l'amont et l'aval de ces ouvrages.

Il est donc intéressant de montrer dans quelles mesures les barrages **influencent les débits dit « naturels »** et notamment des les débits de crues ou d'étiages. Dans cette objectif, plusieurs travaux ont été menés grâce à des **comparaisons amont/aval** de ces flux liquides pour mettre en évidence le rôle des barrages en général mais également en période d'extrême hydrologique.

Ainsi, une **première étude mise en place par le bureau d'étude Egis eau en 2012** pour démontrer, grâce à la reconstitution des débits entrant et sortant du barrage de Vezins (dont les valeurs ont notamment été fournis par EDF), **l'influence du barrage de Vezins sur les flux hydriques en aval** des deux barrages (DDTM 50, 2012). Cette expertise permet, grâce à la synthèse d'une autre étude hydrologique menée par EDF en 2004, de montrer que les **débits estimés entrant dans la retenue de Vezins sont globalement bien restitués en aval** du barrage de la Roche-qui-boit à Saint-Aubin-de-Terregatte, là ou se situe la station hydrologique du Pont de Signy installée en 1990 (DDTM 50, 2012) (Figure 2.10). Toutefois, lorsque ces débits tendent à **dépasser les 50m³/s à Vezins**, la retenue de ce second barrage aurait pour effet **d'accroître les débits à la station de Signy** comme le montre la plus grande dispersion des points sur le graphe de comparaison (DDTM 50, 2012) (Figure 2.10).

Graphe de comparaison entre les ANR journaliers à Vezins et les débits de St-Aubin (1990-2001).

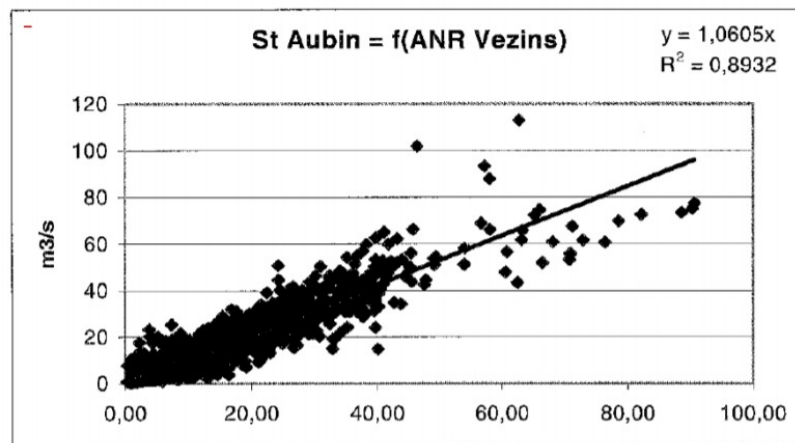


Figure 2.10 : Comparaison entre les débits entrant à Vezins et en aval de la Roche-qui-Boit (DDTM 50, 2012)

Une analyse plus fine à ensuite été réalisée sur **le rôle des barrages lors des extrêmes hydrologiques** et notamment des **crues dont le débit dépassait les 50 m³/s**. Celle-ci a révélé que les barrages pouvaient impacter **leur temporalité mais également leur intensité** (sur les 8 crues ayant eu lieu entre 1974 et 2000 et dont les données sont disponibles) (DDTM 50, 2012). Ainsi, il a été mis en évidence que dans **50 % des cas**, le pic de crue avait **2 à 6 heures de retard à Saint-Aubin-de-Terregatte** et qu'il aurait donc pu se produire plus tôt sans les barrages (DDTM 50, 2012). De même, sa durée à été **supérieure de 2 à 4 heures dans 25 % des cas** en aval mais l'effet à été nul ou négligeable dans les 25 % des cas restant (DDTM 50, 2012). En ce qui concerne **l'écrêtement**, celui-ci n'a été que de **5 à 10 % dans 40 % des cas et nul ou négligeable dans 60 % des cas** (DDTM 50, 2012). Les barrages de Vezins et de la Roche-qui-boit impactent donc les débits liquides mais n'aurait qu'un **rôle mineur sur l'écrêtement des crues**.

Au début des travaux ayant pour objectif la suppression des barrages, en 2015, **une station hydrologique fut donc installée au Pont de Virey**, en amont de la retenue du barrage de Vezins, afin de compléter les connaissances quant aux effets des barrages sur les débits. Malgré le manque de données sur un temps suffisamment long pour en tirer de réelles conclusions, les débits horaires enregistrés entre janvier 2015 et mai 2019 permettent d'étudier **le rôle des barrages en période de crue mais également d'étiage** (Ndom *et al.*, 2019). Ces données nous permettent tout de même de

réaliser une comparaison entre le nombre d'heure durant lesquelles le débit enregistré est supérieur au débit biennal de crue sur cette période entre l'amont et l'aval des barrages et entre le nombre d'heure durant lesquelles le débit enregistré est inférieur au débit moyen minimal annuel sur 3 jours consécutifs (VCN3) (Figure 2.11).

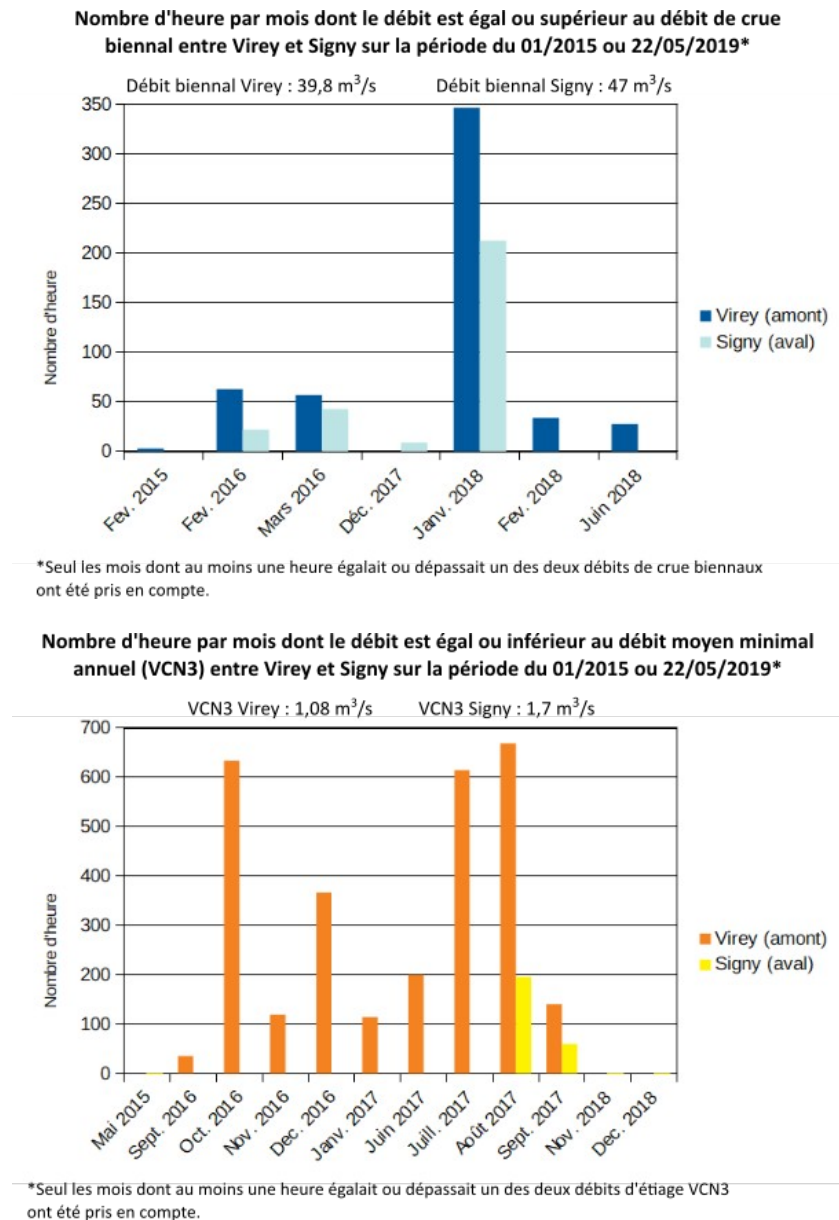


Figure 2.11 : Etude comparative des débits lors des périodes de crue ou d'étiage entre l'amont et l'aval des barrages (D'après les données de l'INRA, R. Létondot, 2019)

La représentation graphique de ces données nous renseigne sur **les deux effets principaux des barrages** sur les flux hydriques. En période de crue, les barrages ont tendance à **écrêter plus ou moins fortement les débits**. On retrouve en effet une différence du nombre d'heure dépassant le débit biennal de crue variant de 3 à 134 heures entre l'amont des barrages et l'aval (Figure 2.11). Le débit devant, selon la logique, est toujours supérieur en aval du cours d'eau, cela montre **l'effet retenue des barrages qui stockent une partie des flux venant de l'amont**. Pour exemple, en janvier 2018 le débit biennal de crue a été atteint 347 heures à Virey pour seulement 213 à Signy (Figure 2.11). De même, il semblerait que les retenues des barrages **permettent un soutien des étiages en aval** lors de la saison des basses eaux. Alors qu'à Virey le VCN3 est atteint de 36 à 669 heures pour les mois concernés il n'est quasiment jamais atteint sur ces mêmes périodes à Signy (Figure 2.11). Il est également possible de

noter que depuis la première vidange ayant eu lieu durant l'été 2018, **les différences de débit semblent moins marquées**. Toutefois, des données complémentaires seraient nécessaire pour vérifier cette hypothèse du rôle que joueraient les barrages **durant les périodes de crues et d'étiage**.

Cette **perturbation dans les flux liquides de la Sélune se répercutent également sur les autres échanges** qui s'opèrent entre l'amont et l'aval du bassin versant. C'est notamment le cas **des flux solides**. En effet, à l'approche de l'ouvrage « *l'élargissement de la section et la diminution de la pente d'eau induit une perte rapide d'énergie qui se traduit par une sédimentation massive* » (DDTM 50, 2011). Le volume de ces sédiments a d'ailleurs été estimé, en 2004, à **1,4 millions de m³ dans la retenue de Veziens** et est majoritairement constitué de limons et de sable (DDTM 50, 2011). La **concentration des matières en suspension (MES)** est alors bien plus importante dans la retenue du barrage qu'en aval notamment lors des pics de crue (Ndom *et al.*, 2019) (Figure 2.12). Les particules fines migrant vers l'aval ont tout de même eu tendance à **augmenter suite à l'ouverture du barrage de Veziens** lors de l'année 2017-2018 (Figure 2.12).

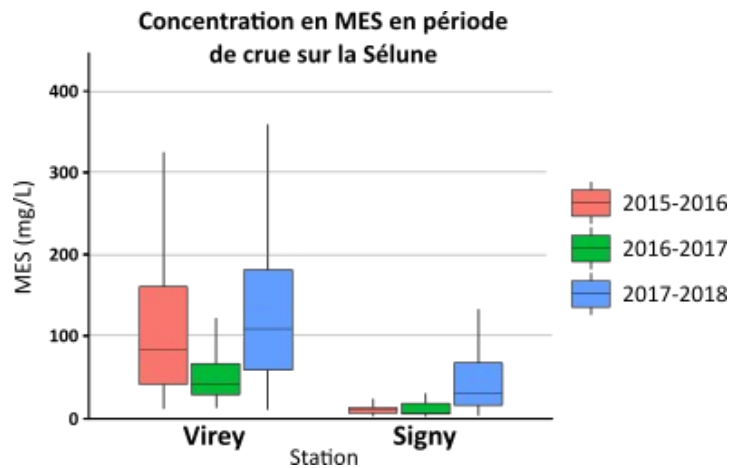


Figure 2.12 : Concentration en MES entre l'amont et l'aval des barrages sur la période 2016-2018 (D'après Ndom *et al.*, 2019)

Concernant **la charge grossière**, l'analyse de la granulométrie médiane des têtes et milieux de radiers en aval de la Roche-qui-boit démontre **l'absence d'une réelle perturbation provoquée par les barrages**. En effet, la grande variabilité de la taille des particules de ces radiers signifie que, *a priori*, les barrages n'engendreraient pas, ou dans une moindre mesure, les processus habituellement observé en aval des retenues (ajustement lié au déficit sédimentaire, diminution de la taille des particules...) (Figure 2.13) (Rollet, 2019).

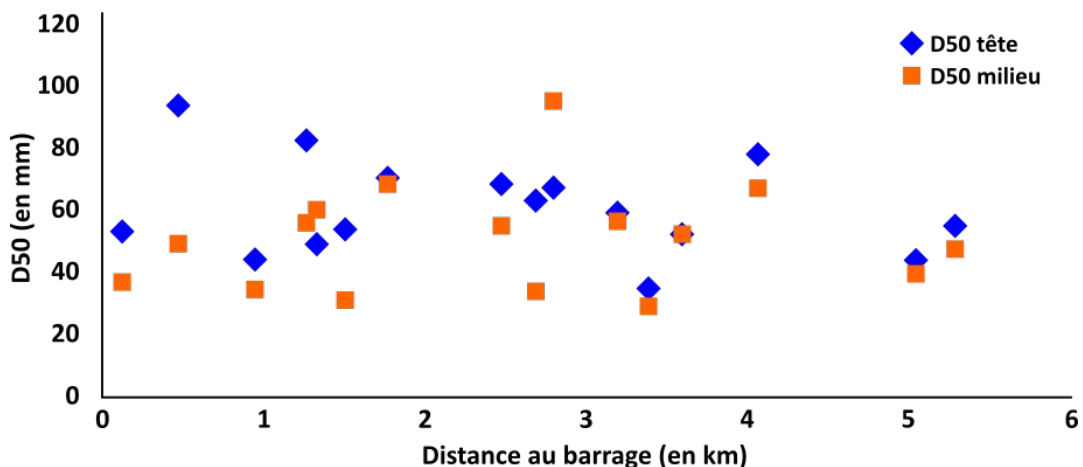


Figure 2.13 : Variation de la granulométrie des radiers (tête et milieux) en aval de la Roche-qui-Boit (Rollet, 2019)

Les barrages de la Sélune, et particulièrement celui de Vezins, ont donc **une influence parfois marquée sur les différents flux du fleuve**. Cela engendre **une forte modification de la dynamique fluviale**, notamment en amont des ouvrages, qui se traduit par **une altération de l'hydromorphologie** dans l'ancienne zone de retenue qui n'est pas sans conséquence sur **l'état écologique du fleuve**.

2.2.3. Répercussions des modifications hydromorphologiques sur l'état écologique du fleuve

Avec le **nouvel équilibre dynamique** qui s'est mis en place en amont du barrage de Vezins depuis sa construction, **l'état écologique de la Sélune a évolué et s'est progressivement dégradé**. En effet, la création d'un lac de retenue engendre, comme nous l'avons précédemment expliqué, une **détérioration de la qualité de l'eau et des habitats aquatiques sur la rivière et la Sélune ne déroge pas à la règle** (Souchon et Nicolas, 2011, DDTM 50, 2011). Une attention particulière sera portée ici à l'espace correspondant à **la retenue du barrage de Vezins** de par le choix du lieu d'étude.

Les barrage de Vezins et de la Roche-qui-Boit impactent les flux liquides et modifient et solide au sein des anciennes zones de retenues. Toutefois, cette sédimentation et cette turbidité **aggravent le phénomène de colmatage du substrat** et donc des zones potentielles de frayères des poissons migrateurs (Cholley *et al.*, 2015). De plus, ces sédiments n'étant pas remobilisés par le cours d'eau **des éléments nocifs à la vie viennent s'y stocker**. Malgré que ce phénomène soit relativement peu observé sur la Sélune (DDTM 50, 2011) on note tout de même que certaines **concentrations en métaux lourds** (cadmium, cuivre, zinc...) dépassent ponctuellement les seuils de bonne qualité des eaux, notamment au niveau de la confluence de l'Yvrande (DDTM 50, 2011 ; Cholley *et al.* 2015). Des constats similaires ont également été faits sur **les taux des composés azotés** proches du seuil critique de 50 mg/l ou **la concentration en oxygène** qui peut parfois descendre un peu trop (Cholley et al. 2015 ; DDTM 50, 2011).

Hormis la qualité physico-chimique de l'eau et des sédiments de la retenue qui, sur la Sélune, sont en partie la cause de **la dégradation de l'équilibre biotique**, l'implantation du barrage de Vezins à également engendré **l'homogénéisation des faciès d'écoulement** qui reflète la diversité des habitats piscicoles (DDTM 50, 2011 ; Cholley *et al.* 2015). En effet, la typologie le montre bien, **le linéaire du cours d'eau en amont de l'ouvrage a été complètement homogénéisé** : réduction de la pente et de la vitesse d'écoulement, ennoisement du fond de vallée, perte de sinuosité... (Figure 2.14).



Figure 2.14 : La Sélune en 2006 au niveau du lac Vezins
(Daniel Denis, www.survoldefrance.fr)

Le sous-système en amont du barrage a donc peu à peu été **colonisé par des espèces lenticques** (carpes, gardons, perches, brochets...) **en dépit des espèces typiques de ce fleuve salmonicole** (truites, saumons...) (Cholley et al., 2015). Une étude d'Aquascop, un bureau d'étude de recherche environnementale, a d'ailleurs révélé que **la part des faciès lenticques s'élevait à 75 % dans la retenue** (DDTM 50, 2011). Ce changement d'écosystème n'est pas négatif en soi mais **le problème de la qualité de l'eau** ne permet pas non plus à ces espèces de se développer convenablement notamment en raison du **risque d'eutrophisation** (DDTM 50, 2011). Pourtant, la Sélune possède **un important potentiel d'accueil des espèces amphihalines** (truites, saumons, anguilles, aloses...) qui dépasse même celui de sa voisine la Sée (DDTM 50). Malgré cela, seul **un tiers du cours d'eau leur est accessible** en raison des barrages et entraîne le déclassement de la Sélune en tant que meilleure rivière à Saumon de la région (DDTM 50, 2001). La population piscicole n'est également pas la seule à être impactée par le barrage et **les plantes, les macro-invertébrés ou encore d'autres espèces aquatiques telles que les écrevisses subissent les conséquences de l'ennuiement de leur habitat** (DDTM 50, 2013). Toutefois, ce travail de recherche portant plutôt sur la potentielle recolonisation piscicole de la Sélune nous ne détaillerons pas ces aspects ici. Ces espèces serviront tout de même dans **l'évaluation des indices de la qualité biologique du milieu** dont nous allons faire une synthèse.

Il existe en effet **plusieurs indices normalisés permettant d'évaluer la qualité biologique d'un cours d'eau** et qui prennent en compte différents paramètres sur les populations végétales et animales de celui-ci. On trouve **l'Indice Biologique Diatomée (IBD)** établi dans le but d'apprécier la qualité de l'eau grâce à la présence d'algues microscopiques contenues dans l'eau. Celui-ci reste relativement bon sur la Sélune sauf depuis 2006 notamment en amont du barrage (classe de qualité « moyenne » à Saint-Aubin-de-Terregatte (DDTM 50, 2011).

Toujours en ce qui concerne les végétaux, qui sont **le reflet de la qualité d'un cours d'eau, l'Indice Biologique Macrophytes en Rivière (IBMR)** qui concerne cette fois les végétaux aquatiques visibles à l'œil nu dépasse également des seuils critiques sur la Sélune avec des niveaux de trophies moyens à élevés avec une importante variabilité spatiale entre l'amont et l'aval des barrages ainsi qu'en fonction des années étudiées (DDTM 50, 2011).

Au niveau faunistique **l'Indice Biologique Global Normalisé (IBGN)** est lui très utilisé et permet d'appréhender véritablement la qualité de l'état écologique. Effectivement, celui-ci **s'intéresse aux macro-invertébrés** qui sont « *considérés comme de très bons indicateurs biologiques* » (DDTM 50, 2011) car étant sédentaires ils subiront forcément les perturbations hydromorphologiques (DDTM 50, 2011). Après un suivi depuis 2000, il apparaît que les populations de macro-invertébrés restent de **bonne qualité avec une légère dégradation depuis 2006** (DDTM 50, 2011). Une comparaison de cet indice sur 4 ans entre l'amont et l'aval des barrages a également permis de mettre en évidence **l'incidence des barrages et des retenues sur la qualité biologique du cours d'eau**. Ainsi, alors que cet indice est très bon hors de la zone d'influence des barrages, sa note globale baisse rapidement au niveau de la zone de retenue (DDTM 50, 2011).

Le dernier indice dont il sera question et qui nous intéresse le plus dans le cadre de cette étude de la résilience de la Sélune, est **l'Indice Poisson Rivière**. En effet celui-ci « *consiste globalement à comparer le peuplement de poissons en place (échantillonnage généralement effectué par pêche électrique) au peuplement attendu en situation de référence (dans des conditions pas ou peu altérées par l'action humaine)* » (DDTM 50, 2011). Cet indice permet donc de rendre compte de **l'influence des barrages sur la population piscicole de la Sélune**. Son évolution depuis 1995 (Figure 2.15) montre une forte variabilité qui s'explique par **la présence des espèces cyprinicoles dans la retenue** du barrage. De plus sa valeur est parfois critique comme en 1996 et en 2007 (DDTM 50, 2011). Même si cet indice

illustre une relative bonne qualité du paramètre piscicole le Plan Départemental pour la Protection des milieux aquatiques et la Gestion des ressources piscicoles (PDPG) de la Manche classe tout de même **la Sélune comme fleuve salmonicole dégradé** (DDTM 50, 2011).

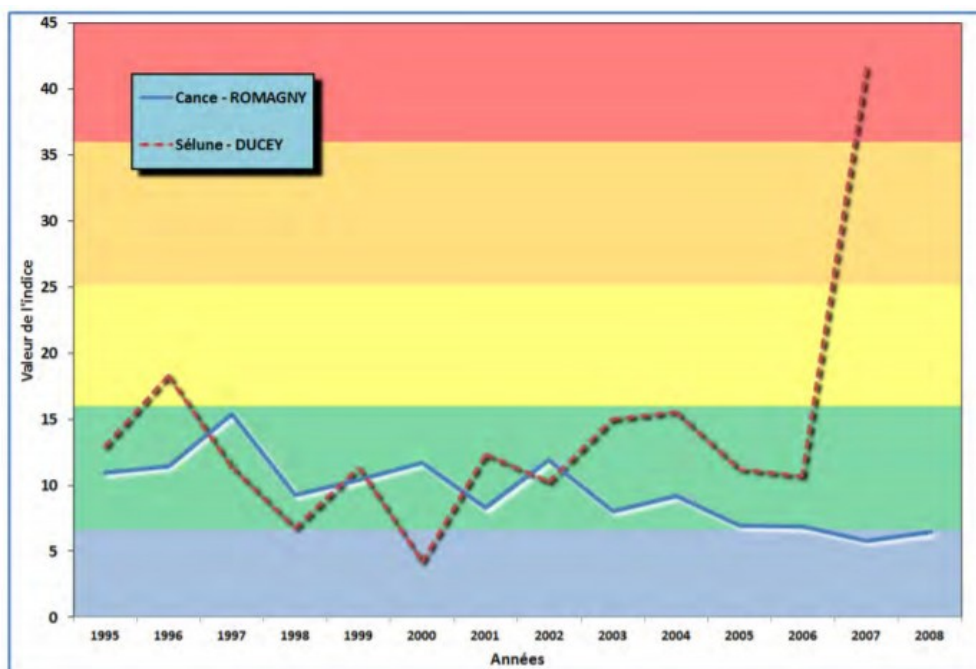


Figure 2.15 : Evolution de l'IPR de 1995 à 2008 sur la Sélune (DDTM 50, 2011)

La perturbation matérialisée par le barrage de Vezins a donc entraîné une **modification de l'hydromorphologie** du fleuve **compromettant son état écologique** dans son ensemble et notamment au niveau de la population piscicole et de ses habitats par l'homogénéisation des conditions d'écoulements et les processus de sédimentation en amont de l'ouvrage.

Transition :

La Sélune est un fleuve qui possède la particularité d'être **entravé par deux grands barrages**, Vezins et la Roche-qui-boit, depuis près de 90 ans. Construits dans le but de développer la vallée et de produire une énergie renouvelable ils sont devenus, progressivement, partie intégrante du paysage. Toutefois, lorsque les études sur les effets des barrages ont commencé à se multiplier, **leurs impacts sur la dynamique fluviale du fleuve et son hydromorphologie** ont soulevé beaucoup de questions quant à **leur incidence sur l'état écologique du milieu**. Après que les études prescrites par la DCE soit effectuées sur le cours d'eau, la dégradation de ce dernier en raison de la présence des barrages était évidente. Les principales conséquences de la mise en place de ces infrastructures étant **la modification des flux liquides et solides, l'entrave à la continuité écologique et l'homogénéisation des habitats aquatiques**. La question de leur dérasement n'est donc pas si récente et la Sélune à longterm fait l'objet **d'études d'impact quant au rapport coûts-bénéfices** que pourrait causer ce type d'opération (DDTM, 2011 ; Cholley *et al.* 2015, Agence Eau Seine-Normandie, 2016). Il s'agira donc maintenant de voir de **quelle manière cette décision a été prise** et quels ont été **les travaux effectués sur la Sélune dans l'optique du dérasement initié en 2017**.

2.3. Historique de la décision de dérasement et suivi scientifique de l'opération

2.3.1. L'effacement des barrages : l'histoire d'une décision qui ne fait pas consensus

La décision d'effacement des barrages de Vezins et de la Roche-qui-Boit s'inscrit directement dans les objectifs de rétablissement du bon état écologique des cours d'eau fixés par la **DCE en 2000** et par la **LEMA en 2006**. Toutefois, le projet de démantèlement des barrages est envisagé depuis plus longtemps encore.

En effet, le signe annonciateur de la décision finale date de **1924** quand un décret de classement des cours d'eau normands **oblige la mise en place de passes à poissons** pour garantir la circulation des espèces migratrices (Figure 2.16) (Germaine, 2014?). Malgré cela la concession des barrages est tout de même renouvelée et **la construction du barrage s'achève en 1932** avec tout de même la mise en place de mesures compensatoires telles que l'apport annuel d'alevins par le concessionnaire (Germaine, 2014?). S'ensuit alors une période durant laquelle les barrages sont **considérés comme de réels progrès techniques profitables** à l'économie et à l'activité touristique locale : « *L'électrification de nos riches campagnes normandes est à l'ordre du jour, et il est loin le temps où certains vieux paysans, braconniers de l'Avranchin, voulaient faire sauter le barrage de retenue des eaux, sous le fallacieux prétexte qu'elles étaient moins poissonneuses* » (in Germaine and Lespez 2014, Ouest-Eclair, 26/07/1932).

Les événements s'accroissent à partir de 1991 (Figure 2.16) quand, en raison du non respect de l'arrêté du 2 janvier 1986 portant sur le classement de la Sélune comme indiqué dans le décret de 1924, **les barrages deviennent illégaux** (Germaine, 2014?). En effet, aucun aménagement n'a été effectué à cette date pour garantir la libre circulation des poissons sur la Sélune. Deux ans plus tard, en **1993, une vidange « catastrophe »** provoque une certaine prise de conscience des élus et motive la **création du Schéma d'Aménagement et de Gestion des eaux (SAGE)** de la Sélune en 1997 qui se trouve être un des premiers en France (Germaine, 2014?). Cet outil de gestion à l'échelle du bassin versant est **lié à la Commission Locale de l'Eau (CLE)** qui penche, après un vote en 2004/2005, sur le démantèlement rapide des barrages ou du moins des mesures visant à améliorer la qualité du milieu (Laslier, 2018). Sont représentés dans cette commission les différents acteurs de l'eau tels que les pêcheurs, les agriculteurs, les associations de défense de l'environnement et l'état. EDF ne fait plus partie de cette commission depuis 2004 en raison de son changement de statut (Germaine, 2014?).

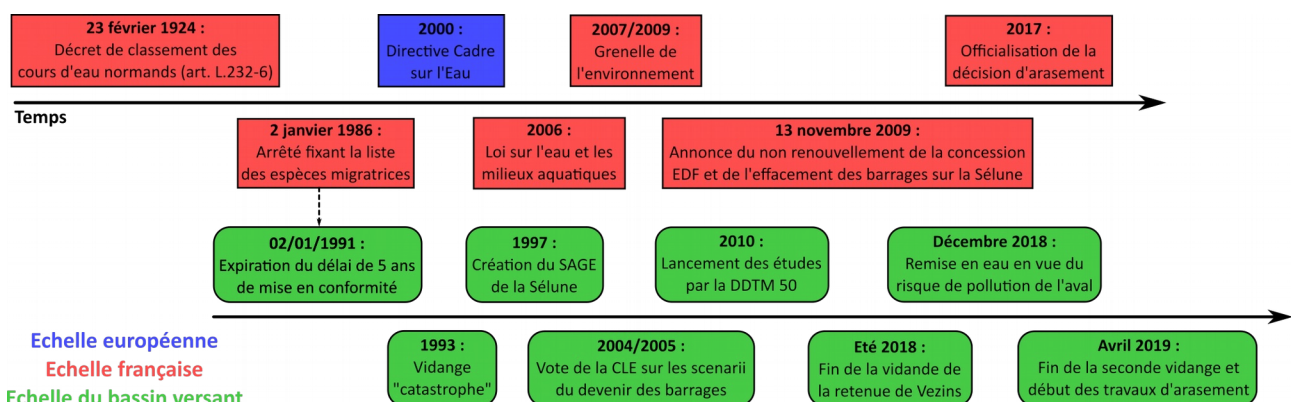


Figure 2.16 : Chronologie de la décision d'arasement des barrages (R. Létondot, 2018, d'après Germaine, 2014?)

C'est **2009**, à « l'issue du **Grenelle de l'environnement** et à l'occasion du **lancement du Plan national d'actions pour la restauration de la continuité écologique des cours d'eau (PARCE)**, que l'État fait part de la décision d'arasement des barrages de la Sélune » (Barraud et Germaine, 2011). En effet, depuis 2005 plusieurs études d'impacts sont mise en place et différents scénarii ont été étudié

(Germaine, 2014?). Cependant, aucun élu local n'a été prévenu et cette décision n'est pas officialisée en raison de l'estimation **du coût jugé trop important** par l'ancienne ministre de l'environnement Ségolène Royal (Barraud et Germaine, 2011). En 2014 celle-ci déclare : *"Il faut que le rapport qualité-prix soit raisonnable. On ne met pas 53 millions d'euros pour faire passer les poissons"* (Ségolène Royal, 2014). Cependant, malgré une **forte contestation locale** l'enquête publique de cette même année tend **en faveur du dérasement des ouvrages** qui sont synonyme, pour le personnes extérieures à la région, de **contrainte à l'écoulement et d'entrave à la continuité écologique** (Germaine, 2014?).

Ce n'est toutefois qu'à la **fin de l'année 2017** (Figure 2.16), après plusieurs études de faisabilité, que Nicolas Hulot, ancien ministre de la transition écologique et solidaire officialise le projet de démantèlement avec une **échéance à 2019 pour le barrage de Vezins et à 2021 pour celui de la Roche-qui-boit**. Cette **décision est largement contestée** en raison des impacts économiques négatifs de l'arasement des barrages et de la modification des paysages engendrés. Plusieurs **manifestations** sont alors mises en place avec notamment l'affichage de banderoles communiquant des messages anti-suppression des ouvrages. Des **recours en justice** sont mêmes initiés par l'association des Amis du barrage mais ces derniers n'ont **jamais aboutis** et une **première vidange des lacs est effectuée durant l'été 2018**. Les travaux en vu du dérasement ont tout même commencé et après une **remise en eau temporaire à partir de décembre 2018**, la vidange finale est terminée en avril 2019. Il paraît important de présenter **la nature de ces travaux qui rentreront en compte dans le potentiel de réajustement de la Sélune**, notamment en amont du barrages de Vezins où certains sites on connus des remaniements parfois important.

2.3.2. L'opération d'effacement du barrage et les travaux connexes

Après avoir présenté les barrages, leurs effets sur le fleuve et l'historique de la décision d'arasement, il est nécessaire **d'étudier les différentes opérations liées à l'ouverture du barrage** de Vezins (Figure 2.17) pour déterminer comment elles pourraient potentiellement **modifier la dynamique fluviale de la Sélune**. En effet, le fleuve connaissait, depuis environ 90 ans, un état plus ou moins stable induit par la présence du barrage (débits liés à la production hydroélectrique, transfert sédimentaire bloqué, phases de vidanges régulières...). Son dérasement va **engendré des bouleversements importants dans les flux et les différents échanges latéraux de l'hydrosystème** qui ne seront pas sans conséquences sur le milieu. Une description des travaux de remaniements du chenal en amont de l'ouvrage est donc essentielle pour déterminer leur influence sur les réajustements futurs du fleuve.



Figure 2.17 : La retenue du barrage de Vezins avant/après la vidange d'avril 2019
(R. Létondot, 2019 ; Syndicat mixte du bassin versant de la Sélune, 2014)

Les principales modifications dans la dynamique fluviale de la Sélune concernent **les variables de contrôles** (débit liquide et solide) qui vont être **fortement impactées par l'ouverture du barrage**. Le lac de retenue, d'une faible vitesse d'écoulement, va laisser place à un cours d'eau d'une **largeur et d'une profondeur considérablement réduite** (Figure 2.17) mais d'une **vitesse augmentée**. Les débits en seront donc modifiés et par effet de causalité, **la capacité de transport du cours d'eau** également. Effectivement, les **sédiments ne se déposeront plus au pied du barrage mais seront à nouveau mobilisés** ce qui aura des conséquences en terme d'érosion des berges du chenal. C'est principalement pour cette raison qu'il a été décidé **d'échelonner la phase de vidange des lacs sur deux, voire trois ans** (DDTM 50, 2018), la vidange de 1993 ayant été catastrophique à ce niveau là.

La **préparation du terrain pour les travaux commence déjà en 2015** lorsque la retenue n'est pas remontée à sa cote estivale en mars de cette année (DDTM 50, 2018). C'est en queue de retenue que le **curage et le dragage des sédiments** débutent en juillet 2017 alors que le plan d'eau est à la cote 54m NGF (Figure 2.18). Ces sédiments commencent alors à être **stockés sur le lit majeur de la Sélune ou un lit moyen est modelé** pour permettre l'expansion des crues durant l'hiver (DDTM 50, 2018). Il faut attendre le **14 mai 2018**, avec l'arrêt définitif des turbines, pour que **la première phase de vidange**, à la cote 42m NGF soit entamée (Figure 2.18). Le lac restera alors autour de ce niveau pendant trois mois jusqu'au **20 août pour que la vidange totale** soit effectuée (DDTM 50, 2018). Durant ce temps, le **remaniement des berges de la Sélune** progresse et les pelleteuses et dragueuses remodèle le lit de la Sélune. L'objectif étant de rétablir un tracé proche de celui ante-barrage (DDTM 50, 2018). Il est à noter que des **interventions d'un pêcheur professionnel** ont permis, pendant les travaux, de sauver une partie de la population piscicole de la retenue (Figure 2.18)

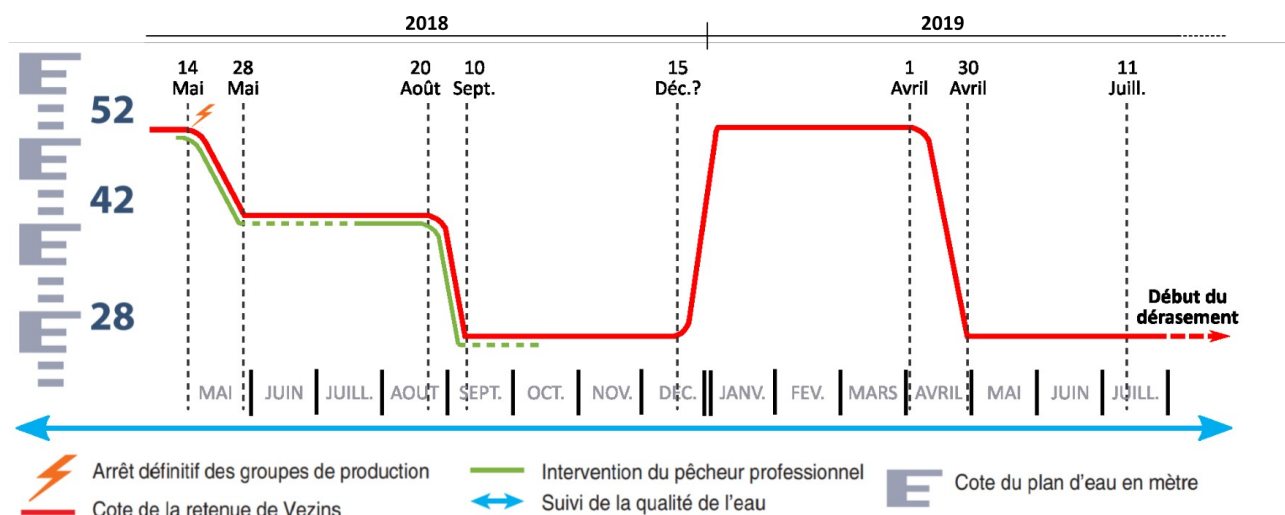


Figure 2.18 : Chronologie des étapes des vidanges du barrage de Vézins (Mai 2018 à Juill. 2019)
(d'après DDTM 50, 2018, R.Létondot, 2019)

La vidange devait **être achevée en septembre 2018** mais en raison des risques liés à des possibles crues hivernales, il a été décidé de **remettre partiellement en eau la retenue à partir de novembre et ce jusqu'en avril 2019**. Au 30 avril 2019 les lacs avaient bel et bien disparu pour laisser place à ce qui sera, à *priori*, **le nouveau tracé du fleuve**. Le barrage de Vézins en tant qu'ouvrage hydroélectrique à lui était déclassé en juin 2019 suite au percement de 3 brèche dans sa base (Gilles Berrée, 2019) (Figure 2.18). On remarque que depuis le début de l'opération, et encore aujourd'hui, **un suivi de la qualité de l'eau** est réalisé en aval de la Roche-qui-boit pour contrôler les conséquences de l'opération de vidange (DDTM 50, 2018) (Figure 2.18). Il s'agit donc de vérifier, ou non, si **ces travaux et le mode de gestion de ce dérasement d'ouvrage sont efficaces en terme de résilience du système** avec une surveillance régulière des ajustements post-travaux. Les résultats permettront ainsi de déterminer **la reproductibilité de cette méthode**.

Conclusion partielle/transition :

La Sélune possède un bassin versant aux caractéristiques physiques (topographie, géologie, climat...) **typique des cours d'eau du Sud-Manche incisés dans le Massif Armoricaïn**. Son relief, vallonné, cache un empilement de roches granitiques et schisteuses dures et imperméables qui provoquent le ruissellement des précipitations, relativement importante dans ce milieu notamment en hiver. En réponse à ces paramètres, **les débits de la Sélune connaîtront une saisonnalité marquée** entre la période des basses eaux en été et celles des hautes eaux en hiver. **Les crues** y seront régulièrement importante malgré **la présence de deux barrages hydroélectriques sur son cours**. Les ouvrages de Vezins et de la Roche-qui-boit, considérés aujourd'hui comme des « grands barrages », ont longtemps **entravé ce fleuve et on complètement modifié sa géodynamique** (variables de contrôles, morphologie...) depuis plus de 90 ans. C'est pourquoi, lorsque les études ont démontré **les impacts négatifs de ces infrastructures sur l'équilibre biotique des cours d'eau** la question de **leur dérasement** prend de plus en plus d'importance. Officialisée en 2017 cette décision **marque l'histoire de la tendance au rétablissement de la continuité écologique** des cours d'eau de par son ampleur encore jamais observée en Europe. Les début des premiers travaux, en 2015, confirment **l'importance d'un suivi scientifique** à plusieurs échelles et dans différents domaines.

Celui-ci, coordonné par l'Institut National de la Recherche Agronomique, à débuté en 2012 et **s'intensifie depuis la première vidange des lacs** durant l'été 2018. Son objectif est « *d'analyser les mécanismes de restauration écologique du fleuve* » et « *de faire de ce site pilote une référence scientifique* » (INRA, 2014). Le travail de recherche dont il est question ici **s'inscrit dans cette étude** et notamment dans les projets concernant le « *rééquilibrage des processus physiques, des formes du lit et du substrat du cours d'eau* » et sur « *l'évolution des communautés piscicoles du milieu aquatique* » (Appel à projet de recherche restauration Sélune, 2018). Il se concentrera principalement sur **les potentiels réajustements morphologiques et leur conséquences en terme d'habitat aquatiques en amont du barrage de Vezins**, normalement supprimé d'ici la fin de l'année 2019. C'est pour ces raisons ce que ce travail de recherche n'aura pas ici vocation à donner des résultats définitifs mais bien à initier un suivi qui **sera effectué sur un plus long terme**. Afin de le mener à bien, **une méthodologie couplant mesures de terrain et imagerie** sera employée à partir de la fin de la seconde vidange en avril 2019 dont les résultats permettront de mieux comprendre **la réaction des cours d'eau semblable à la Sélune face au désaménagement et d'appréhender de façon moins hypothétique les futures dérasements d'ouvrage** de cette envergure. Il s'agira donc maintenant de **présenter la manière dont cette méthodologie sera mise en place** et quel sera **l'intérêt des différents traitements** qui seront réalisés.

III. Méthodologie de la recherche

3.1. Échelles de travail et choix des sites pour l'étude hydromorphologique

3.1.1. Emboîtement des échelles de travail sur la Sélune

Cette étude des **capacités de résilience de la Sélune** suite à l'ouverture du barrage de Vezins se veut **multiscale** afin de permettre l'analyse des liens existants entre **tous les composants du système fluvial** et les **répercussions de la perturbation** engendrée sur chacun d'entre eux.

C'est pourquoi la première échelle de travail est celle du **bassin versant** (Figure 3.1). Les **caractéristiques physiques** (topographie, géologie, climatologie) et **l'occupation du sol** de ce dernier auront en effet un impact sur la **dynamique hydro-sédimentaire** de ce cours d'eau et doivent donc être pris comme des variables indépendantes ayant leur **rôle dans la réactivité du système** (Melun, 2012, Michler, 2018). De même, tout **le réseau des affluents** sera extrêmement important puisque ces derniers sont en connexion quasi-permanente avec le chenal principal (France Nature Environnement, 2010). Ils constituent notamment **la source principale d'apports solides** en sédiments qui fera l'objet d'une étude spécifique dans ce travail (Bravard et Petit, 1997 ; Malavoi et Bravard, 2010).

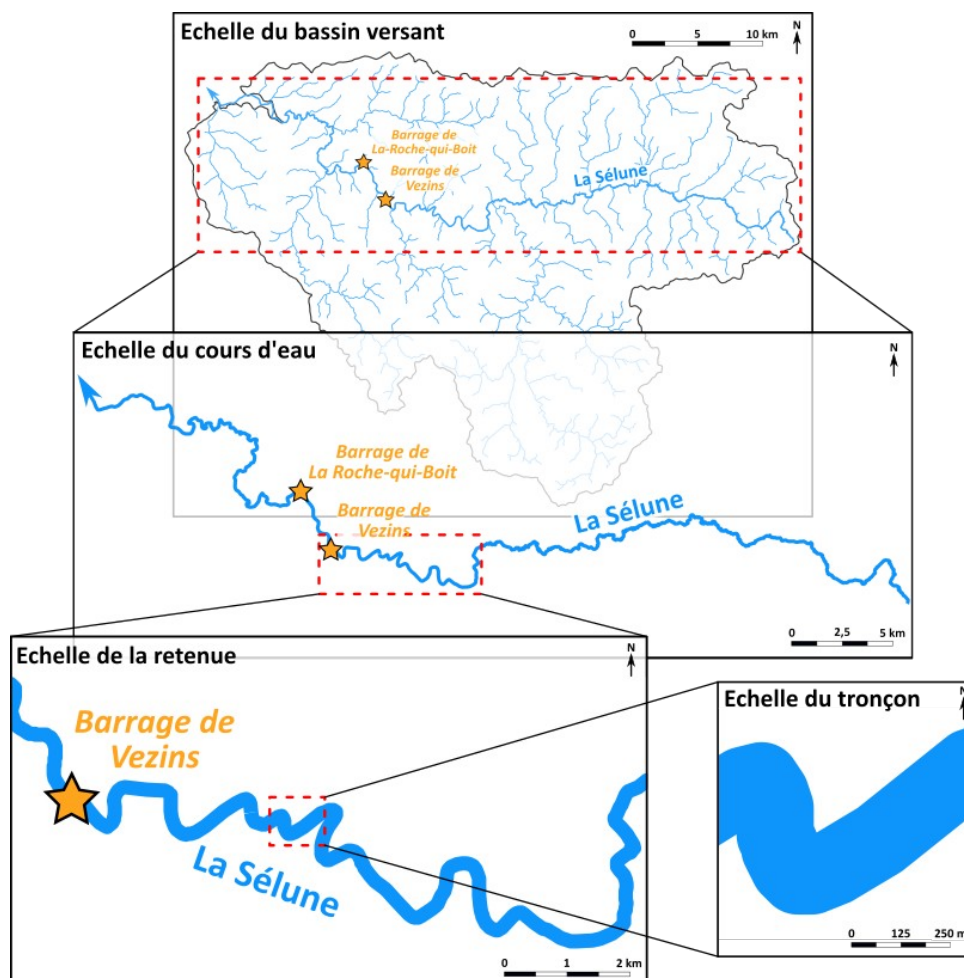


Figure 3.1 : Emboîtements des échelles de travail sur la Sélune (R.Létondot, 2019)

La seconde échelle d'analyse est celle **du cours d'eau de la Sélune** en lui-même, c'est à dire le chenal principal sur lequel on été construit les barrages de Vezins et de la Roche-qui-boit (Figure 3.1). C'est effectivement ce linéaire qui est le **premier concerné par l'effacement de ces ouvrages** qui

entraîneront, tant en amont qu'en aval, de **fortes modifications dans la dynamique fluviale** (Malavoi, 2007 ; Melun, 2012 ; Michler, 2018). Le **rétablissement des débits « naturels » et de la continuité écologique et sédimentaire** doit ainsi être appréhendé tout le long de ce fleuve et dans leur dimension **longitudinale mais également latérale et verticale**, notamment entre le cours d'eau et sa plaine alluviale ou sa nappe d'accompagnement (Bravard et Petit 1997 ; Malavoi, 2007 ; France Nature Environnement, 2010). L'étude de ce linéaire dans le cadre de cette étude peut ainsi fournir des informations sur **l'évolution potentielle de l'espace dennoyé en amont du barrage de Vezins**.

C'est d'ailleurs **ce secteur qui s'étend environ sur 20 km à l'amont du barrage** de Vezins qui constitue la troisième échelle d'étude de ce travail (Figure 3.1). En effet, il a été choisi de concentrer cette recherche sur **la zone d'influence amont de l'ouvrage principal** de la Sélune et ce pour plusieurs raisons. Premièrement, nous l'avons déjà évoqué, ces opérations de démantèlement sont encore **trop peu étudiées** dans les domaines de faible énergie. On remarque que, bien souvent, les différents suivis se concentrent surtout sur les impacts aval de ces opérations en omettant parfois un peu trop **les réajustements en amont** (Lespez et Germaine, 2012 ; Dam removal, 2019). Par ailleurs, hormis le fait qu'il est possible de trouver **un grand nombre de données** sur cette partie amont de la Sélune qui fait l'objet de plusieurs **suivis des domaines variés** (morphologie, écologie, physico-chimie...), celle-ci possède **un grand intérêt géographique**. La Sélune y est « immobilisée » depuis bientôt 90 ans et quand on connaît **le potentiel écologique des cours d'eau voisins** (Sée, Couesnon...), particulièrement en terme de **population salmonicole** (Forget *et al.*, 2014), il est alors pertinent de s'intéresser aux **capacités de réajustements hydromorphologiques de cette zone de retenue** afin d'évaluer **l'efficacité de l'opération de restauration**. Ces derniers seront, logiquement, plus marqués sur ce linéaire en raison du changement radical dans la dynamique fluviale et c'est pourquoi il constitue l'échelle de travail **la plus importante** dans notre travail de recherche.

La principale échelle d'analyse correspond à différents **secteurs de cette zone de retenue**, correspondant à des **tronçons d'environ 300 mètres de long** et qui n'ont pas tout subi le même degré de remaniement (Figure 3.1). Une analyse à ce niveau de détail permet de mettre en place plusieurs **relevés de terrains** précis pour **estimer les capacités de résilience du fleuve** à ces endroits et sa capacité à se réajuster en fonction de **la nature du site** (puissance du cours d'eau, nature des berges, géométrie du lit...) et du **degré d'intervention anthropique** suite à la vidange du lac de retenue (curage des sédiments, reprofilage des berges...). Un diagnostic morphologique y sera effectué afin de caractériser les formes fluviales en place. Cette échelle permettra d'effectuer une **généralisation à l'ensemble du linéaire amont au barrage** dont les caractéristiques morpho-sédimentaires sont assez homogènes. Le choix de ces sites se doit donc d'être pertinent afin d'obtenir une étude comprenant **une certaine diversité des situations** tout en étant **la plus représentative possible en terme de restauration hydromorphologique** de la Sélune.

Trois sites qui se situent tous dans l'ancienne zone de retenue du barrage de Vezins, soit en amont de l'ouvrage, ont donc été choisis selon des **critères variés** en rapport avec leurs **caractéristiques « physiques »** mais également selon d'autres éléments relevant de **leur intérêt en termes de restauration écologique** ou de leur **praticabilité**.

3.1.2. Critères de sélection et localisation des sites

Les trois sites sélectionnés dans le cadre de cette étude sont répartis sur l'ensemble de la zone de l'ancienne retenue du barrage de Vezins. Il s'agit, de l'aval vers l'amont, des secteurs du **Pont de la République**, du **Pont des Biards** et de la **base de loisirs de la Mazure** (Figure 3.2).

Ces sites répondent à **certains critères permettant d'estimer les capacités de résilience de la Sélune** d'une part à échelle fine mais également à l'échelle de la zone de retenue dans son ensemble voire du cours d'eau tout entier. Ainsi, en dehors du fait que chacune de ces zones est **assez accessibles pour y acheminer le matériel de mesure**, elles permettent de **comparer les réajustements en fonction de l'importance variable du stock de sédiment décroissant d'amont en aval**, de par leur éloignement par rapport au barrage (Figure 3.2). Il est donc probable que ces derniers diffèrent d'un secteur à l'autre, le **rééquilibrage du cours d'eau étant, logiquement, proportionnellement inverse** à l'influence qu'avait la zone de retenue sur celui-ci (Melun, 2012)



Figure 3.2 : Localisation des sites d'études au sein de la zone de retenue du barrage (R.Létondot, 2019)

Toujours dans l'objectif d'une **comparaison inter-sites**, les différences dans **l'intensité des travaux de remaniement des sédiments et de reprofilage des berges** entre ces derniers sont également rentrées en compte dans leur sélection. En effet, comme nous le montrerons par la suite dans la description des sites, certains ont subi de **lourdes interventions anthropiques** (recalibrage, dragage des sédiments...) suite à l'ouverture du barrage Vezins (Pont de la République, Pont des Biards) alors que le secteur vers le secteur de la Mazure le cours d'eau tend à **se réajuster sans contrainte de ce type** (DDTM 50, 2018). De plus, deux des sites (Le Pont de la République, Le Pont des Biards) possèdent un certain **patrimoine symbolique** avec la présence de la structure des anciens ponts datant d'avant l'enneigement du fond de vallée qui sont encore visibles aujourd'hui ou la présence d'anciennes pêcheries. De même, la Mazure étant une base de loisirs proposant des activités nautiques variées le site présente un **intérêt socio-géographique non négligeable**.

Avant d'entreprendre toute mesure de terrain ou autre traitements informatiques **une description de ces trois sites s'impose** donc afin de préciser leurs caractéristiques et **leurs spécificités en termes de restauration hydromorphologique**. Cela permettra de mettre en évidence, grâce à des illustrations photographiques, le **changement radical dans le paysage suite à l'abaissement du niveau d'eau**, et par extension, dans **les faciès d'écoulement** au sein de la retenue.

3.1.2. Description des sites et comparaison avant/après ouverture du barrage

Le Pont de la République :

En partant de l'amont, le premier site correspond au **Pont de la République** qui est situé environ 10 km du barrage de Vezins (3.2). De ce fait, ce dernier influence moins la Sélune dans ce secteur que les deux autres sites. Depuis 2014, dernière année durant laquelle le niveau d'eau était à la cote 59,50 m NGF au niveau du barrage, **le tracé du cours d'eau a bien changé** (Figure 3.3). La cote

hivernale (58 m) à été gardée jusqu'en juin 2017 pour permettre un bon réessuyage des sédiments (DDTM 50). Les travaux de **dragage des sédiments** stockés par le fleuve à cet endroit et de **reprofilage du lit** grâce à ces sédiments ont ensuite commencé le mois suivant.



Figure 3.3 : Le site du Pont de la République avant/après l'ouverture du barrage de Vezins (D'après l'Observatoire photographique de la Sélune, R.Létondot, 2019)

Une « **banquette** » de 5 m de haut a ainsi été créée pour permettre l'expansion des crues de la Sélune sur ce qu'il serait possible de qualifier de lit moyen (DDTM 50). Ce fut par exemple le cas pendant l'hiver 2017/2018 durant lequel des débits importants ont entraîné un arrêt temporaire des travaux. Après la **première vidange achevée en août 2018**, la végétation a commencé à recoloniser les berges et l'ancien pont est de nouveau bien visible (Figure 3.3). Toutefois, la **remise en eau partielle du barrage** a entraîné une légère remontée du niveau d'eau à cet endroit ce qui a, durant environ quatre mois, réennoyé le site. On note également le **style très rectiligne et le recalibrage** du cours d'eau qui pourrait entraîner un **possible reméandrage au sein des alluvions avec l'émergence de faciès d'écoulement** bien plus variés qu'avant l'ouverture des barrages (Figure 3.3).

Le Pont des Biards :

L'évolution de la Sélune au niveau du **Pont des Biards**, situé à environ 6 km en amont du barrage (Figure 3.2), est similaire à celle du Pont de la République. En effet, l'objectif était également de **remodeler les berges** pour essayer de retrouver le **tracé « originel » du lit mineur**. Les sédiments ont donc été extraits et stockés sur les berges (DDTM 50) (Figure 3.4). La particularité de ce site réside dans la **confluence de l'Yvrande** légèrement en aval. Il a été ainsi démontré que les dépôts de cet affluent connaissent une forte concentration de métaux lourds potentiellement polluants. Autrement, les **travaux de restauration morphologique** sur le cours principal de la Sélune ont été **semblables au**

site précédent avec la remobilisation des sédiments, la création d'un lit moyen (DDTM 50) et une rechenalisation assez linéaire (Figure 3.4).

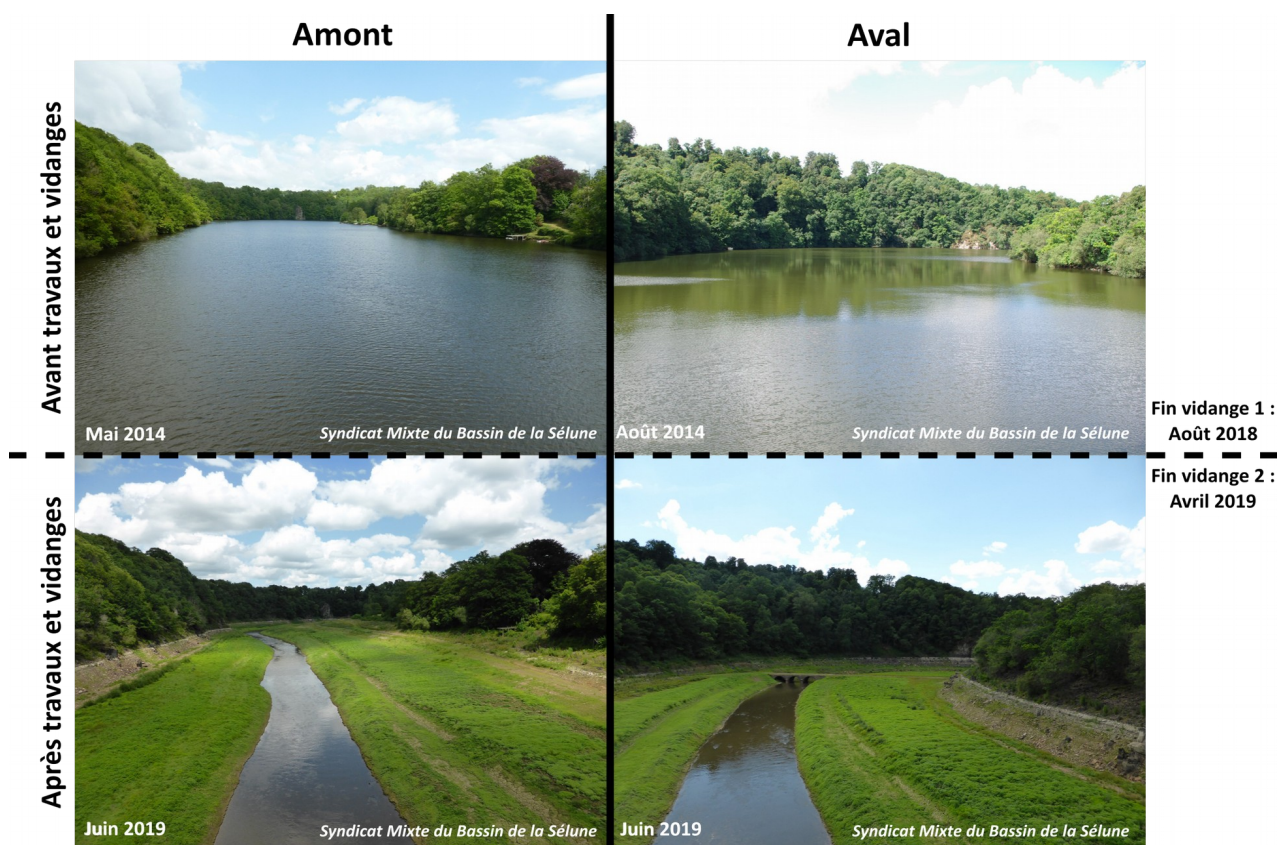


Figure 3.4 : Le site du Pont des Biards avant/après l'ouverture du barrage de Vezins (D'après l'Observatoire photographique de la Sélune, R.Létondot, 2019)

La **gestion des sédiments** remis en mouvement par l'ouverture du barrage de Vezins est, pour ces raisons, à cet endroit, **très sensible**. La remise en eau partielle de décembre 2018 a entraîné le **réennoisement de ce secteur** et, bien qu'aucune évolution significative des formes ne semble avoir eu lieu, il est **difficile d'estimer l'impact de ce « retour en arrière »** sur les conditions hydromorphologiques de la Sélune au niveau de la retenue. Le **suivi photographique** réalisé par le syndicat mixte du bassin de la Sélune permet donc encore une fois de montrer la recolonisation de la végétation rivulaire et l'évolution du cours d'eau suite aux **phases d'exondement/ennoisement** de l'ancien pont qui se trouvait depuis 1931 sous plusieurs mètres d'eau (Figure 3.4).

Le **Pont de la République** et le **Pont des Biards** sont deux sites qui ont connu de **fortes interventions anthropiques** pendant et après l'ouverture du barrage, le volume total des sédiments extrait du lit et stocké dans des casiers le long de la retenue s'élevant à **250 000 m³ pour ces deux secteurs** (DDTM 50).

La base de loisir de la Mazure :

Au niveau de la **base de loisirs de la Mazure**, située à seulement 3,5 km du barrage (Figure 3.2), le remaniement des sédiments a été moins important mais le **changement dans le paysage** y est particulièrement impressionnant (Figure 3.5). En 2018, après la vidange, le lac a ainsi complètement disparu pour laisser place à **un cours d'eau étroit et beaucoup moins profond**. Certains travaux de gestion des sédiments ont également été entrepris pour stabiliser les berges (DDTM 50). Une ripisylve basse a ensuite recouvert les berges exondées et le ponton de la base de loisir ne repose désormais

plus sur l'eau (Figure 3.5). La remise en eau à **particulièrement influencé cette zone proche du barrage** et le tracé, cette fois non contraint anthropiquement, du cours d'eau pourrait potentiellement connaître des réajustements importants notamment en raison de la large plaine alluviale présente en rive droite et l'absence de protection des berges.

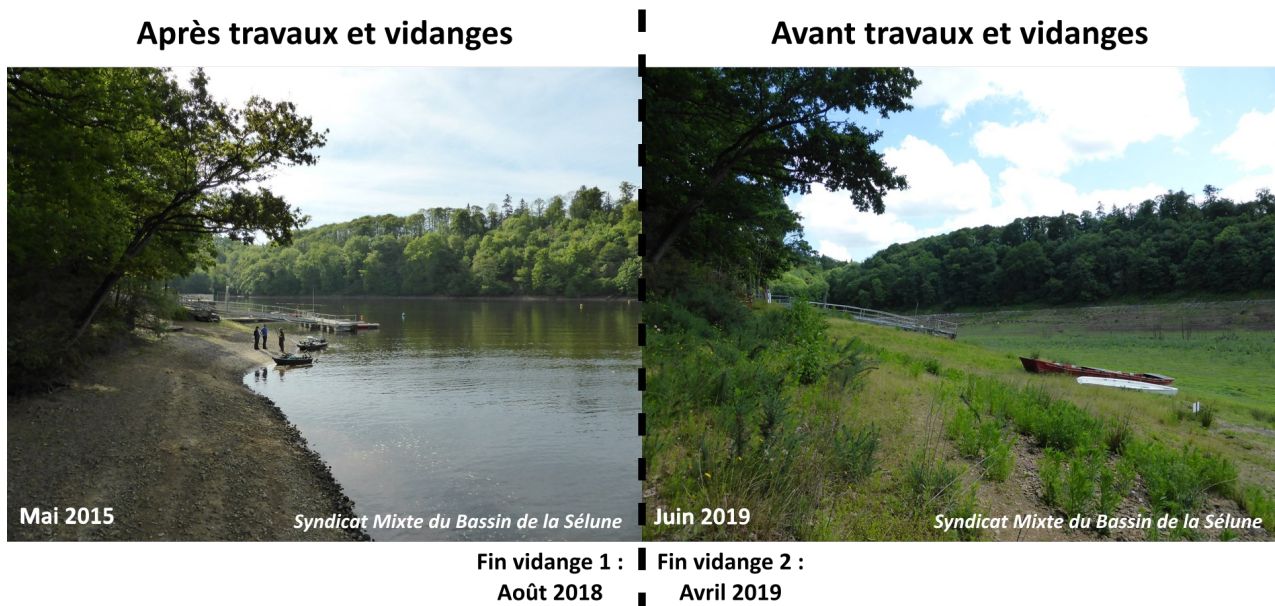


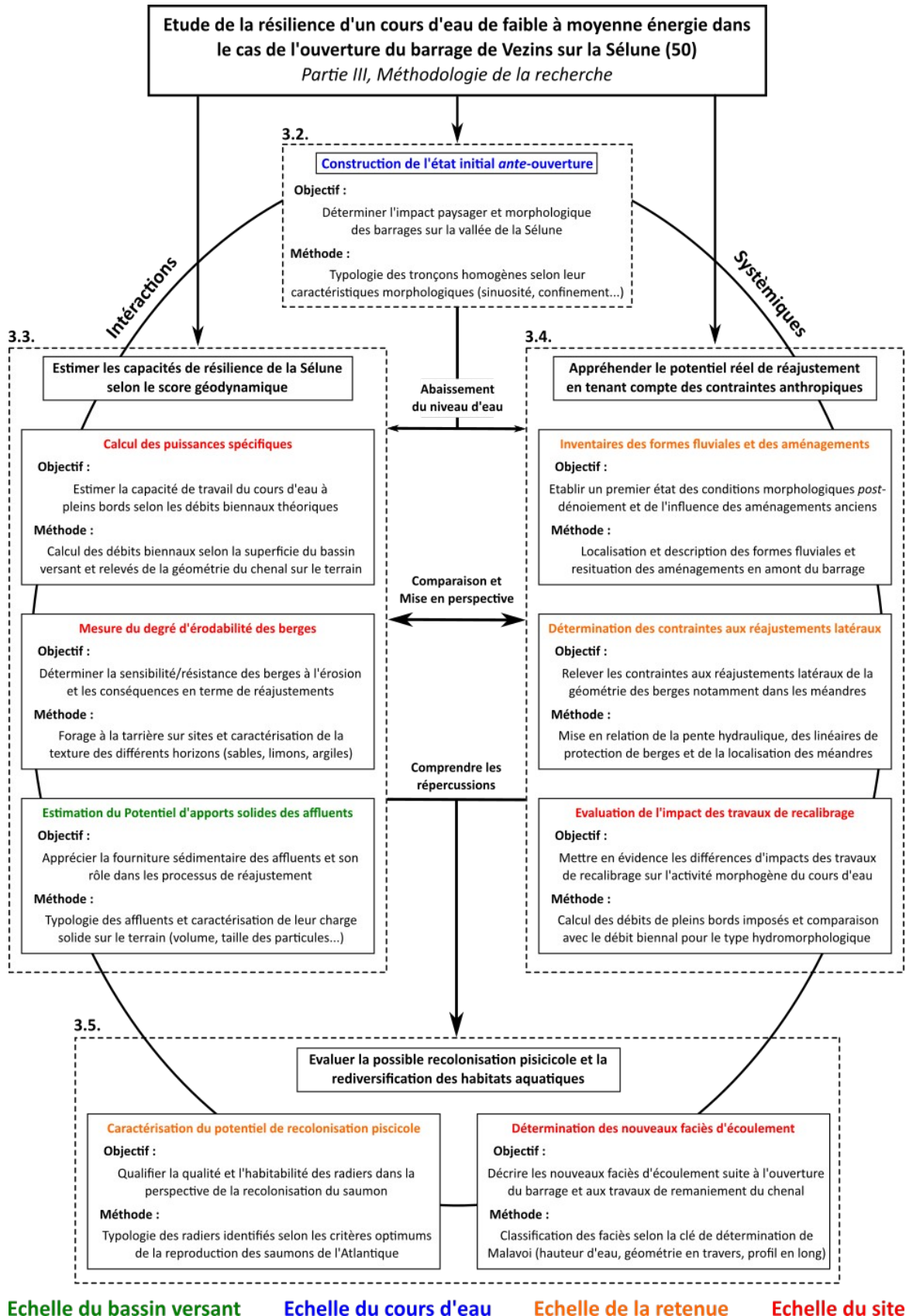
Figure 3.5 : Le site de la Mazure avant/après l'ouverture du barrage de Veziins
(D'après l'Observatoire photographique de la Sélune, R.Létondot, 2019)

Le site de la Mazure est **très emblématique** dans ce projet de dérasement du barrage de Veziins puisque que la disparition des lacs engendre également celle de plusieurs activités nautiques proposées par ce centre d'accueil. Cet aspect a contribué à renforcer **le conflit autour de l'opération**, un véritable suivi tant sur le plan hydromorphologique que sociologique doit y être mis en place (DDTM 50).

Transition :

Ces trois sites seront donc analysés dans ce mémoire, chacun d'entre eux ayant des caractéristiques différentes (distance au barrage, méandrage, travaux de remaniement...). Les réajustements potentiels à ces endroits seront évalués afin de **déterminer l'évolution globale du système fluvial**. Ces sites pourraient ainsi être apparentés à des hydrosystèmes dont il s'agira de **définir la résilience en insistant sur la géomorphologie et son impact sur les habitats aquatiques**. Après les avoir replacés dans leur contexte *ante*-ouverture du barrage, divers traitements basés sur des levés de terrains et d'analyse d'imagerie haute résolution seront effectués. La délimitation des terrains d'études réels seront alors réalisés grâce à la largeur des cours d'eau sur les différents sites qui permettra de déterminer leurs longueurs (AFB, 2017).

Avant de passer à l'explication de la méthodologie de terrain et de traitement des données qui est à l'origine des résultats de ce mémoire, le schéma suivant permet de synthétiser les objectifs de cette dernière et les méthodes employées aux différentes échelles précédemment citées. Son objectif est ici de permettre la compréhension de l'agencement du travail qui suit.



3.2. Définition de l'état initial ante-ouverture du barrage

Avant toutes mesures sur le terrain, la définition d'un **état initial ante-ouverture du barrage** de Veziens entre Saint-Hilaire-du-Harcouët et Ducey est nécessaire. En effet, celui-ci va permettre d'établir une comparaison diachronique entre la géomorphologie du cours d'eau lorsque les retenues existaient encore et l'état décloisonné de ce dernier. Après avoir constitué **la base de travail**, plusieurs **métriques brutes** (pente, largeur du cours d'eau, largeur de la bande active et largeur du fond de vallée) et **synthétiques** (indice de sinuosité, indice de confinement, densité de prairies/parcelles agricoles, de bois et de bâti) concernant la morphologie fluviale seront extraites. Cela permettra de se rendre compte de **l'ampleur des changements géomorphologiques** engendrés par la vidange des lacs en réalisant une **typologie des différents sous-tronçons de la Sélune** entre Saint-Hilaire-du-Harcouët et Ducey grâce à la méthode de la **Classification par Ascendance Hiérarchique**.

3.2.1. Constitution de la base de travail

La **création du Modèle Numérique de Terrain (MNT)** du bassin versant de la Sélune fut la première étape de ce travail (Figure 3.6). Celui-ci représente les **altitudes d'une zone géographique** et permet de renseigner sur sa topographie (UVED, Glossaire des SIG, 2013). Pour créer ce MNT, la direction des écoulements de surface, les zones de cuvettes et d'accumulation ainsi que l'exutoire du cours d'eau sont utilisés grâce au logiciel de **Systèmes d'Information Géographique (SIG) Arcgis** à l'aide des outils proposés dans la boîte à outil « Analyse spatiale ».

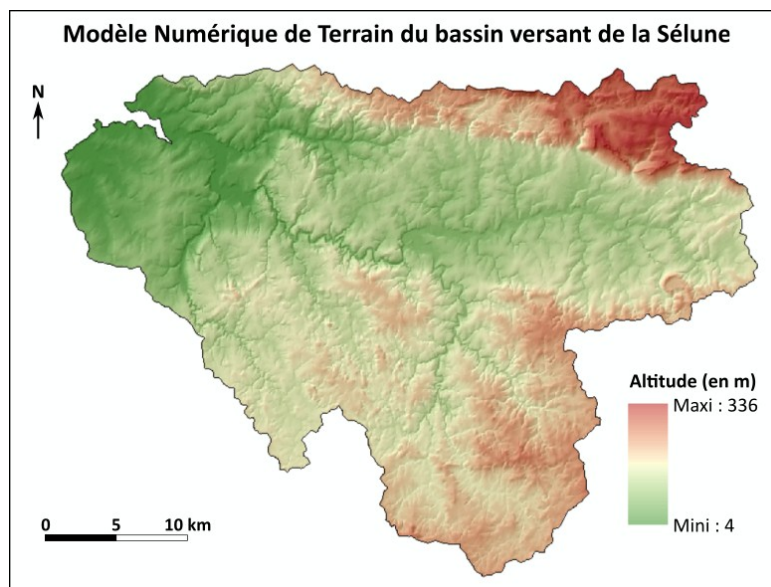


Figure 3.6 : Extraction du bassin versant de la Sélune
(D'après la BD alti de l'IGN, R. Létondot, 2018)

La typologie concernant uniquement le cours d'eau de la Sélune il faut, après avoir délimité son bassin versant, **extraire son fond de vallée**. Pour cela, la méthode s'inscrit dans le cadre du **Système Relationnel d'Audit de l'Hydromorphologie des Cours d'Eau (SYRAH-CE)** qui sert à « *identifier les pressions hydrogéomorphologiques* » (Cairault, 2013). Celle-ci permet, après avoir défini la pente maximale entre les différentes cellules du raster du MNT extrait précédemment, de **définir une distance du réseau hydrographique pondérée par la pente** (Lissak, 2018) et donc de mettre en évidence le fond de vallée de la Sélune. Le réseau hydrographique pris en compte ne concerne ici que le cours d'eau principal de la Sélune. Pour l'obtenir, on utilise **la banque de données topographiques de la Manche**. Après avoir **seuillé le MNT** au format raster selon la distance du fond de vallée par

rapport au cours d'eau grâce à l'outil **coût-distance**, le fond de vallée de la Sélune de sa source à son embouchure est ainsi mis en évidence (Figure 3.7). La valeur du seuil est fixée à 1000 afin d'obtenir un fond de vallée représentatif par rapport au cours d'eau, plus cette valeur étant élevée plus le fond de vallée étant large (Lissak, 2018).

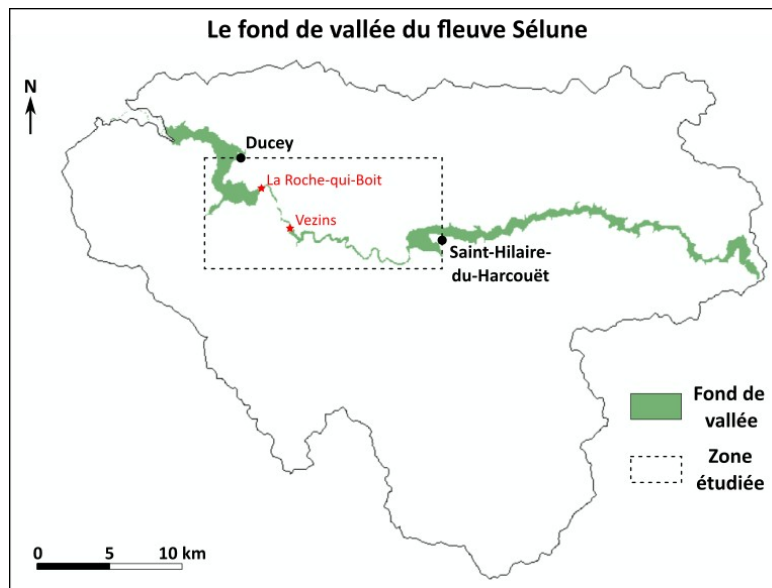


Figure 3.7 : Extraction du fond de vallée de la Sélune (D'après le MNT du bassin versant, R. Létondot, 2019)

C'est le polygone du fond de vallée ainsi découpé qui servira de base à la **segmentation** pour la typologie finale. Pour cela l'outil **Fluvial Corridor** a été téléchargé afin de pouvoir se servir des outils d'agrégation qu'il propose. Tout d'abord, il est nécessaire de créer la **ligne centrale du polygone** qui permet la **construction des polygones de référence** également appelés **polygone de Thiessen**. Ce sont « des objets géographiques désagrégés (DGO) qui sont utilisés comme des unités spatiales standardisées. Ils ne correspondent pas exactement à une réalité géomorphologique mais constituent des unités intermédiaires de traitement » (in Wiederkehr, 2013, Wiederkehr et al., 2010c). La figure 3.8 illustre le passage entre la ligne centrale et la segmentation du fond de vallée dont la valeur de distance a été fixée à **200 m**. Cela laissant assez de longueur par tronçons pour en ressortir des **caractéristiques géomorphologiques significatives**.

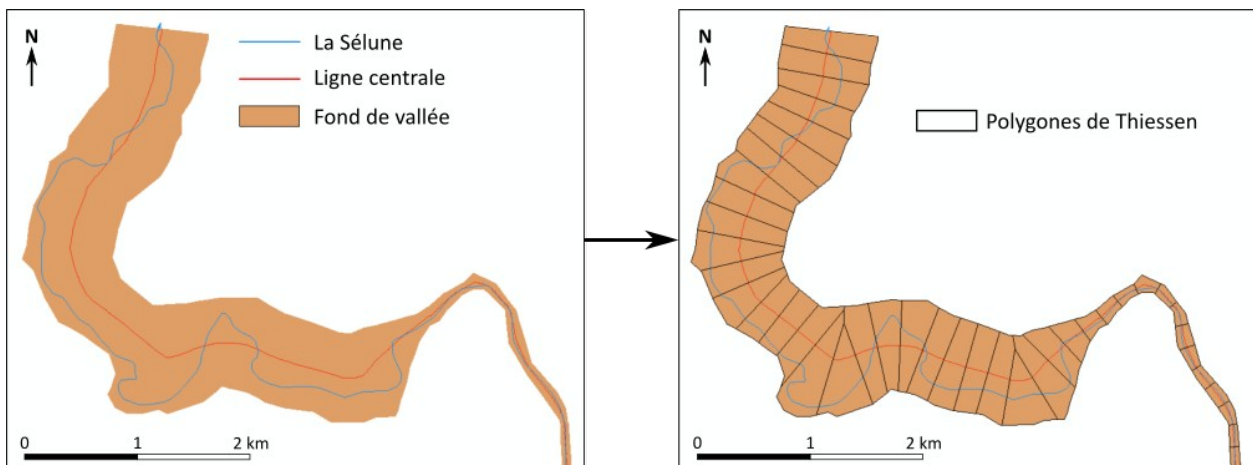


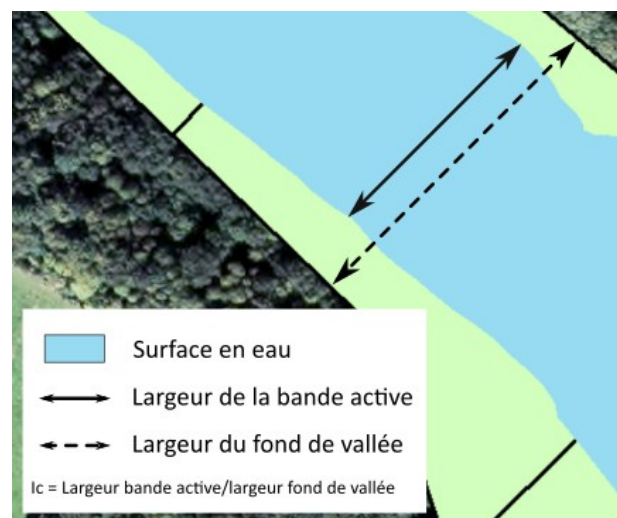
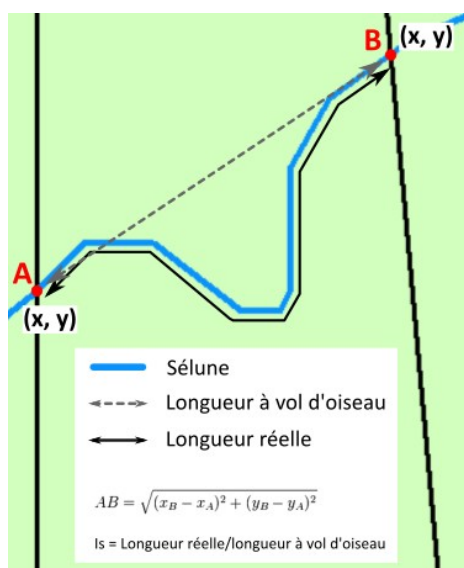
Figure 3.8 : Création des polygones de Thiessen (D'après le MNT du bassin versant, R. Létondot, 2019)

3.2.2. Extraction des métriques géomorphologiques

Les différents paramètres permettant de déterminer **la géométrie du chenal du cours d'eau ainsi que ceux influençant les dynamiques géomorphologiques** peuvent être calculés grâce aux outils que propose le logiciel Arcgis.

La **pente moyenne du fond de vallée** de la Sélune fut la première métrique à être mesurée. Celle-ci est calculée en pourcentage et estimée grâce à l'outil « Ajouter des informations spatiales » par le croisement entre les tronçons du cours d'eau et le MNT de la BD altitude au 25 au format raster extrait au début.

L'**indice de sinuosité** est également essentiel car il permet d'évaluer **le méandrage du cours d'eau**. Pour le calculer, deux métriques brutes sont nécessaires : la **longueur réelle du cours d'eau** et la **longueur à vol d'oiseau** entre le point de départ et d'arrivée. La première étant calculée grâce à la fonction « Calcul de la géométrie » et la seconde grâce aux coordonnées géographiques des points (Figure 3.9). L'indice de sinuosité correspond donc au rapport entre ces deux valeurs.



L'**indice de confinement** quant à lui se calcule par le **rapport entre la largeur de la bande active du cours d'eau (le ou les chenaux) et la largeur du fond de vallée**. Ces deux paramètres sont donc sous-entendus dans cette variable et servent ainsi également à la caractérisation du style fluvial de chaque tronçon. Il est possible de calculer ces deux largeurs grâce à la division de l'aire du polygone (ici surface en eau ou fond de vallée découpé pour chaque DGO) par sa longueur (Figure 3.10).

Ainsi, ces métriques concernant **la géométrie du cours d'eau** permettront de déterminer le style fluvial des 145 tronçons de cours d'eau entre Saint-Hilaire-du-Harcouët et Ducey. Un lien possible en fonction de la distance aux barrages pourra donc probablement être mis en évidence.

Des métriques concernant l'occupation des berges doivent également être mesurées afin d'obtenir des informations sur **la nature du fond de vallée et sa potentielle influence sur les dynamiques du cours d'eau**. Différentes densités ont donc été calculées : la densité de végétation arborée, la densité de prairie ou du parcellaire agricole et la densité du bâti. Une **densité étant ici le pourcentage qu'occupe une surface par rapport à la surface totale** en question. La végétation ayant un

rôle dans la stabilité des berges et dans le ruissellement, tout comme le bâti, il paraît important d'estimer leur densité pour chaque polygone. Ces données sont ainsi récupérées grâce à la **banque de données topographique de la Manche** (IGN) puis découpées pour chacun des polygones de Thiessen (Figure 3.11). Leur taux d'occupation du sol est alors déterminé dans le logiciel de SIG. Notons que la présence **d'ouvrage en travers** a également été mise en évidence pour ces sous-trançons grâce au Référentiel des Obstacles à l'écoulement (ROE) dont seules les structures barrant au moins partiellement le lit du cours d'eau ont été extraites (Figure 3.11) .

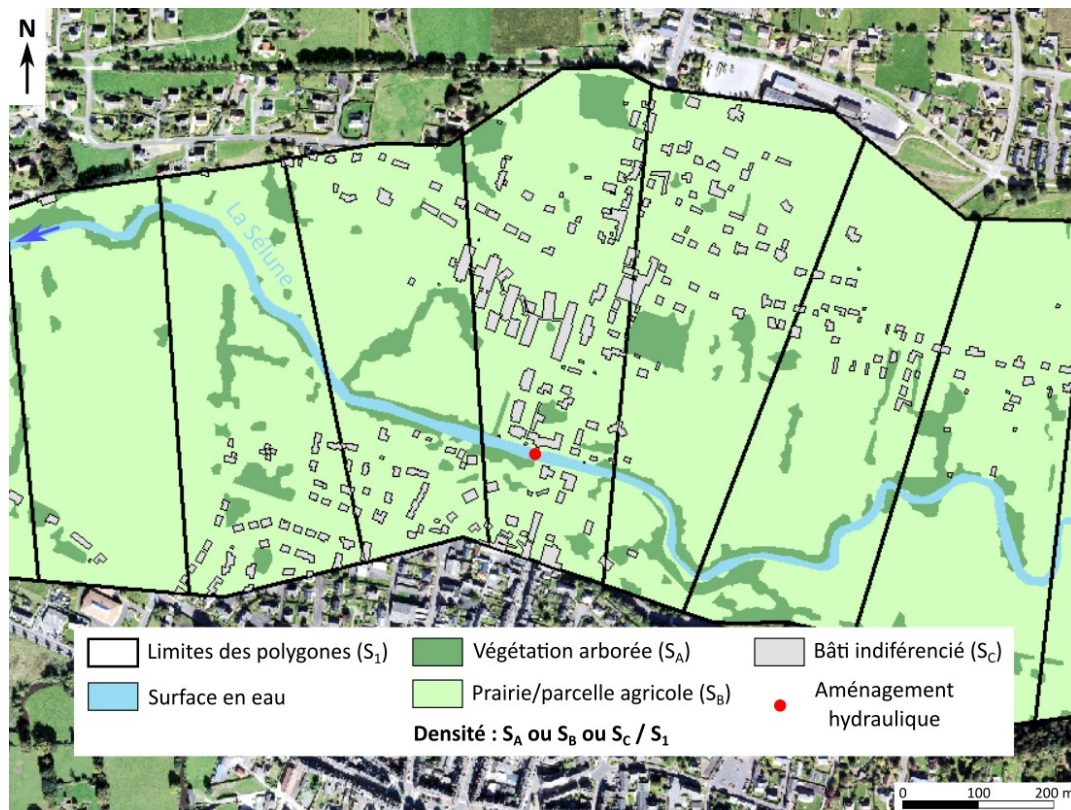


Figure 3.11 : Surface en eau, de végétation arborée et de prairie/parcelle agricole au sein des polygones (BD Topo IGN, R. Létondot, 2019)

Par conséquent, ce sont toutes ces **métriques qui constitueront les variables dans la typologie des 145 entités** (polygones de Thiessen) correspondant aux sous-trançons de la Sélune. Celle-ci, réalisée grâce à la méthode de la **Classification par Ascendance Hiérarchique**, va permettre l'analyse détaillée de chacun de ses secteurs en les rangeant dans des classes regroupant les individus les plus proches possible en termes de conditions morphologiques.

3.2.3. Réalisation de la Classification par Ascendance Hiérarchique des tronçons homogènes

Dans l'objectif de réaliser la typologie des 145 tronçons du cours d'eau, la **Classification par Ascendance Hiérarchique** est pertinente. Cette méthode de classification itérative, c'est à dire qui se répète plusieurs fois, permet de **ranger le nombre n d'individus dans un nombre nb de classes** largement inférieur au nombre n (XLSTAT). On utilise pour cela le logiciel XLSTAT depuis excel qui effectue automatiquement la classification avec des paramètres préalablement enregistrés. La CAH consiste à **comparer les individus deux par deux selon un certain degré de dissimilarité afin de les agréger en fonction de cette même dissimilarité**. Le résultat obtenu est un **arbre binaire**, également appelé dendrogramme qui peut être découpé en fonction du nombre de classes souhaitées (XLSTAT).

Pour effectuer cette CAH il faut tout d'abord **exporter les données de la table attributive des entités**, les polygones de Thiessen, afin d'obtenir un fichier excel dans lequel toutes les métriques sont rassemblées pour chaque identifiant de polygone. Durant cette étape une attention particulière doit être portée à l'ordre des valeurs qui doit être strictement le même que dans la table originale d'Arcgis. **Les moyennes de chacune des métriques sont ensuite calculées** sous excel en bas du tableau afin d'avoir une référence « moyenne » après avoir créé les classes (Figure 3.12).

Métrique	Indice de sinuosité	Indice de confinement	Obstacles à l'écoulement	Densité bois/haies (%)	Densité prairies/ parcelles agricoles (%)	Densité bâti (%)	Pente (%)
Moyenne	1,075	0,428		26,1	33,1	0,5	1,24
Écart-type	0,153	0,349		18,8	34,0	1,6	1,42

Figure 3.12 : Tableau des moyennes et écarts-types des métriques sur le tronçon étudié (R. Létondot, 2019)

Les métriques **largeur de la bande active et du fond de vallée ont également été supprimées**. L'indice de confinement étant le rapport entre ces deux valeurs il n'a pas semblé nécessaire que ces dernières soient finalement représentées deux fois. L'indice permettra donc **d'estimer implicitement la largeur de la bande active au sein du fond de vallée**.

La CAH à ensuite été utilisée grâce à la fonction « Analyse de données » de XLSTAT. L'ensemble des variables choisies sont sélectionnées et les libellés (identifiants numériques) des polygones sont ajoutés. La proximité est de type dissimilarités selon la **distance Euclidienne** et la **méthode d'agrégation de Ward** afin de maximiser la variance interclasse et minimiser celle intraclasse. Il ne faut également pas oublier de « **Centrer** » et de « **Réduire** » les données afin de minimiser l'effet de taille entre les valeurs. Le nombre de classes est ici établi entre 5 et 10 pour déterminer quel sera le plus pertinent en terme d'homogénéité intra-classe mais d'hétérogénéité inter-classe. L'étape finale est donc le **choix du nombre de classes approprié** selon cette variance et **l'analyse des caractéristiques** de chacune d'entre elles en essayant de déterminer les corrélations existantes entre la distance au barrage et la morphologie fluviale. **Une cartographie de cette typologie** sera donc réalisée pour localiser géographiquement les sous-tronçons appartenant à la même classe afin de mieux comprendre leur répartition spatiale.

Transition :

La réalisation de cette typologie des sous-tronçons de la Sélune permet ainsi de définir **un état dit initial** avant l'ouverture du barrage de Vezins. Essentiel pour comprendre **la résilience du cours d'eau** et l'importance des **changements dans sa dynamique fluviale** après son décloisonnement, la description de cet état constitue une **première étape « théorique »** dans l'étude des réajustements hydromorphologiques faisant suite à la perturbation. Cet état initial étant établi, il est alors nécessaire d'expliquer **le protocole des différentes mesures sur le terrain** qui vont permettre de rendre compte de **l'ampleur des modifications hydromorphologiques post-opération** et **des capacités de résilience** de la Sélune face au désaménagement, notamment sur les trois sites d'étude.

3.3. Estimer les capacités de résilience du fleuve Sélune

L'objectif de cette partie est d'estimer **les capacités de résilience théoriques de la Sélune** après l'ouverture du barrage de Vezins. Cela permettra de déterminer dans quelles mesures ce fleuve pourra se réajuster vers **un nouvel équilibre dynamique**, et quelle pourrait être l'ampleur de ces réajustements. Pour cela, **la puissance spécifique** du cours d'eau, **le degré d'érodabilité de ses berges** ainsi que **le potentiel d'apport solide en sédiments** seront évalués grâce à différentes mesures de terrain que nous allons ici expliciter. Ces éléments font ainsi référence à **la typologie géodynamique fonctionnelle** de Malavoi qui permet **d'évaluer le potentiel de réajustement des cours d'eau** suite à des travaux de restauration (Malavoi, 2007).

3.3.1. Calcul de la puissance spécifique

Objectif de la mesure :

La notion de **puissance spécifique**, introduite en 1977 par Bagnold, permet d'appréhender la **capacité de travail** d'un cours d'eau (Bravard et Petit, 1997) et ses « **possibilités de réaction et d'adaptation en réponse à des travaux d'aménagement** » (in Petit et al., 2000, Brookes 1988). Exprimée en watts/m^2 , le calcul de cette puissance est donc important dans l'étude **des capacités de résilience de la Sélune**. De même, elle permet comme nous l'avons vu, de **classer les cours d'eau selon leur énergie**. Les seuils de 25 et de 35 w/m^2 ont ainsi été défini par Brookes et représentent les valeurs en dessous desquelles les réajustements morphologiques sont quasiment inexistant suite à une perturbation (Malavoi, 2007) (Figure 3.13).

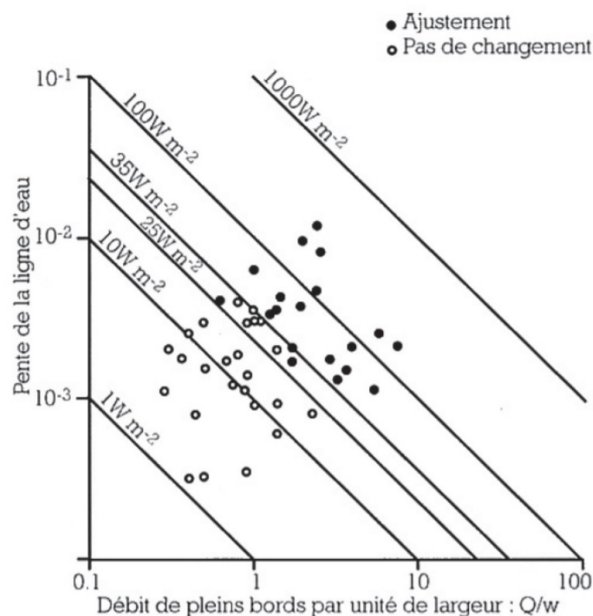


Figure 3.13 : Rappel des capacités de réajustements selon la puissance spécifique (in Malavoi et Bravard, 2010 d'après Brookes, 1987)

L'estimation de cette puissance spécifique au niveau des trois sites d'études constitue donc une première étape dans la caractérisation **des capacités de réajustements de la Sélune** dans ces secteurs et donc, en fonction de sa valeur, son potentiel en terme de **modifications géométriques de son lit** et **d'adaptation hydromorphologique** (Melun, 2012). La première et principale question étant de savoir si la Sélune possède **assez de puissance pour se réajuster** suite au dérasement du barrage de Vezins.

Le calcul de cette puissance (ω , en W/m²) s'exprime par l'équation suivante (Fagot, 2012 ; Petit *et al.*, 2000) :

$$\omega = (\rho * g * Q * S) / w$$

où ρ représente la masse volumique de l'eau (997 kg/m³), g l'accélération de la pesanteur (environ 9,8 m/s²), Q le débit en m³/s, S la pente d'énergie (m/m) et w la largeur du chenal à plein bord (m). Alors que ρ et g sont fixes, le débit Q correspond au débit de plein-bord dont la valeur se rapproche du débit biennal humide qui sera estimé ici pour chacun des sites, la pente S fait référence à la pente d'énergie du cours d'eau soit la pente de la ligne d'eau et non celle du fond du chenal et w doit donc être mesurée sur les berges au niveau du point de débordement du cours d'eau (Petit *et al.*, 2000).

Protocole d'acquisition et de traitement de la donnée :

Afin d'estimer la **puissance spécifique de la Sélune** il est donc nécessaire d'obtenir plusieurs informations quant à la géométrie du cours d'eau. En effet, alors que la masse volumique de l'eau ne change pas tout comme l'accélération de la pesanteur, le **débit, la pente d'énergie** ainsi que la **largeur à pleins bords** du cours d'eau doivent être appréciés pour chaque sites.

En ce qui concerne le **débit Q**, aucune station de mesure n'étant présente à proximité immédiate des trois sites d'étude il a été décidé de l'estimer selon **une méthode utilisée par la Direction Régionale de l'Environnement, de l'Aménagement et du Logement (DREAL)** et fiable pour les bassins versant dont la surface est **inférieure à 2000 km²** (Bravard et Petit, 1997). Celui de la Sélune faisant environ 1000 km² cette méthode qui permet d'**estimer un débit en un point du cours d'eau en fonction de la surface amont du bassin versant**, peut s'appliquer ici et s'exprime par l'équation :

$$q = Q * (a/A)^{0,8}$$

où q est le débit recherché, Q le débit connu à la station de mesure hydrologique, a la superficie du bassin versant en amont du point pour lequel on cherche le débit et A la superficie du bassin versant en amont de la station hydrologique.

La première station en aval des sites étant celles du **Pont de Signy**, c'est son débit de crue biennal (47 m³/s selon la banque hydro) qui a été choisi ici, la surface du bassin versant amont y étant de 770 km². Les **superficies du bassin versant en amont de chacun des trois sites** ont été déterminée, grâce à l'outil « Watershed » d'Arcgis. La présence des barrages n'est pas ici prise en compte et cette méthode permet d'apprécier le volume du flux liquide de la Sélune dans **des contions qui ne seraient pas perturbées par l'homme**.

La **pente d'énergie S** correspond à la **pente de la ligne d'eau** et permet ici d'estimer la **puissance de l'écoulement** (AFB, 2017). Son calcul sur chaque site est effectué sur toute la longueur du tronçon, préalablement déterminée grâce **aux indications du protocole de Caractérisation Hydromorphologique des Cours d'Eau (CarHyCE)**. Celui-ci préconise de multiplier la largeur à plein-bord moyenne par 14 afin d'obtenir **une station correspondant à deux séquences de radier/mouilles** et donc un tronçon représentatifs en terme de morphologie (AFB, 2017). **Le profil en long de la ligne d'eau a** donc été mesurée sur une distance correspondant à 14 fois la largeur à plein bord de chaque site (entre 150 et 250 m) au moyen d'une **lunette topographique** et d'une **mire graduée** (précision centimétrique) (Figure 3.14). Devant normalement être estimée **pour un débit de plein bord**, la pente d'énergie n'a put ici n'être obtenue que pendant **une période d'étiage** en raison de l'enneigement des sites durant la saison des hautes eaux hivernales.

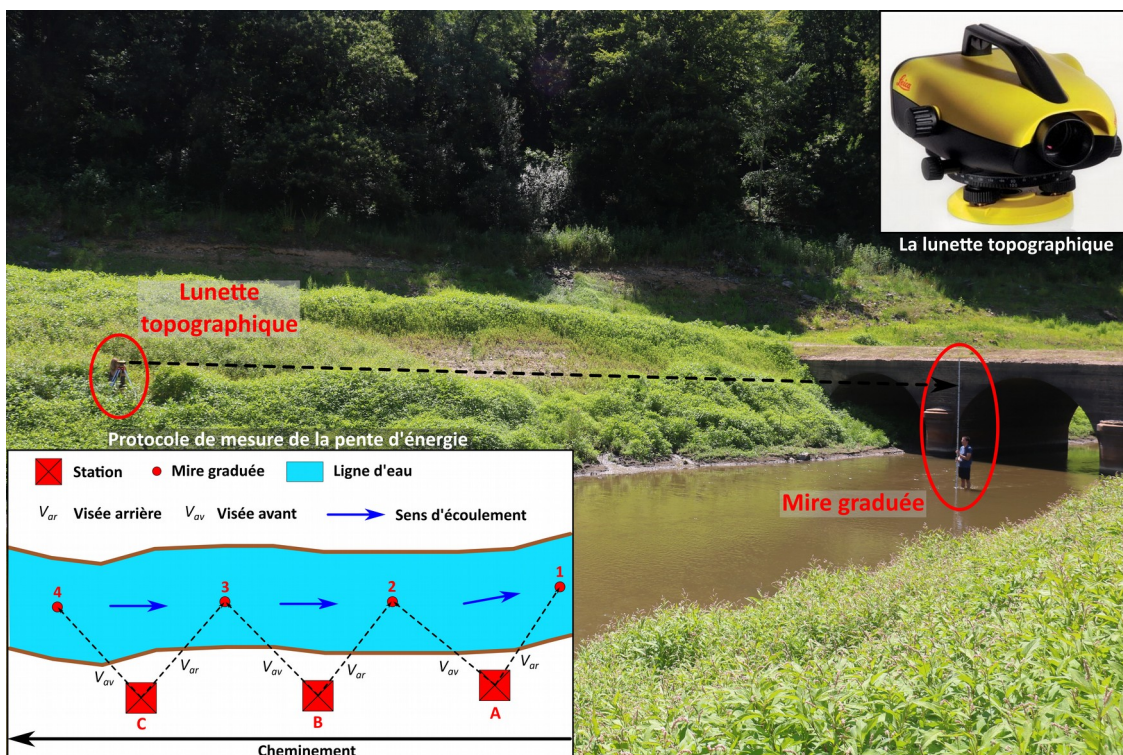


Figure 3.14 : Mesure de la pente de la ligne d'eau et du fond sur le terrain à la lunette topographique (R. Létondot, 2019)

Après traitement des données, la pente en m/m peut être calculée grâce au rapport entre la somme des dénivelés entre les points ($\Sigma\Delta h$) et à la distance du cheminement (D). La distance réelle entre les mesure à été corrigée grâce à la mesure de l'angle du niveau de chantier entre deux visées avant et arrière (Figure 3.14). On utilise pour cela le théorème d'Al Kashi selon lequel (Figure 3.15) :

Dans un triangle ABC dont on connaît l'angle \hat{A} (en degrés) et les longueurs b et c (en m) :

$$a^2 = b^2 + c^2 - 2 \times b \times c \times \cos(\hat{A})$$

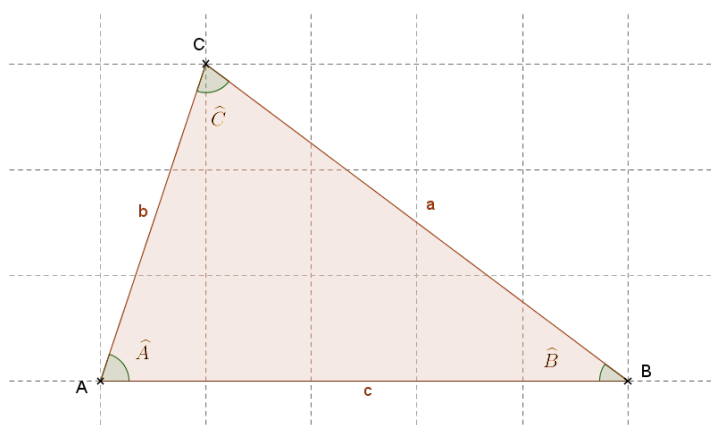


Figure 3.15 : Correction de la distance entre deux points par le théorème d'Al Kashi (le memento, 2019)

Enfin, la largeur pleins bords w est quant à elle mesurée pour chaque site en suivant également les indications du protocole CarHyCE. Celle-ci correspond à la limite de berges « au delà de laquelle l'eau se répand dans la plaine d'inondation » (Eau France, 2019) et donc au débit de pleins bords (Figure 3.16). L'objectif est de déterminer une largeur à pleins bords moyenne sur tout le tronçon étudié. Pour cela, une première largeur sera mesurée au décamètre (précision entre 5 et 10

cm) au droit du point de départ du tronçon étudié que nous appellerons ici station. La valeur de cette dernière sera ensuite multipliée par deux pour donner les distances auxquelles deux autres largeurs à pleins bords seront mesurées afin d'obtenir une **moyenne représentative de cette station** (AFB, 2017). Notons que la largeur devra être prise **au niveau de la berge la plus basse**, le cours d'eau pouvant débordant plus vite sur sa rive la moins haute (Figure 3.16).

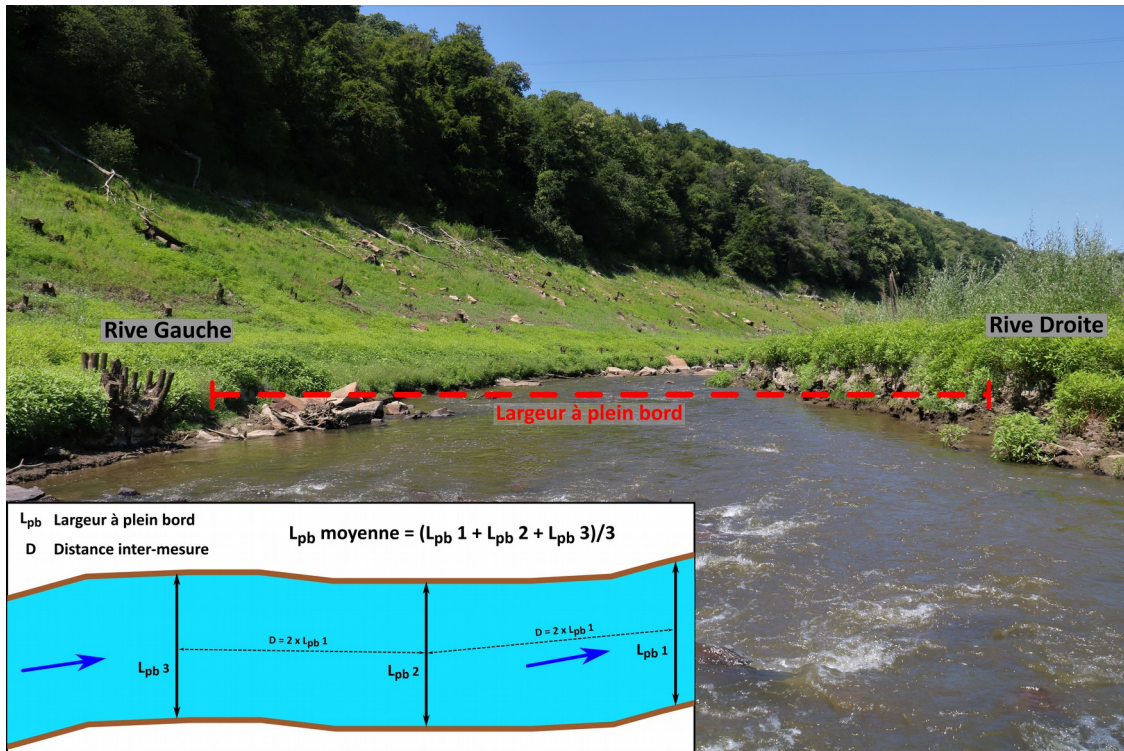


Figure 3.16 : Mesure de la largeur à plein bord moyenne sur le tronçon étudié (R. Létondot, 2019)

Le chenal ayant subi **de nombreuses modifications**, notamment sur les sites du Pont de la République et des Biards, les valeurs de puissance spécifique obtenues ne resteront qu'en partie **théoriques**. Le débit réel pourrait ainsi être différents et un second calcul de ce dernier grâce aux relevés de la géométrie en travers du cours d'eau permettra de réestimer cette puissance spécifique en fonction du recalibrage du chenal. De plus, les réajustements du cours d'eau dépendront également de **l'érodabilité des berges (conditionnée par les matériaux et la végétation)** sur chaque site ainsi que **des apports solides** des affluents (Malavoi, 2007).

3.2.2. Mesure de l'érodabilité des berges

Objectif de la mesure :

Le **degré d'érodabilité des berges** est un paramètre important rentrant en compte dans **les capacités de résilience des cours d'eau** (Malavoi, 2007). L'érosion des berges est à comprendre ici comme le « *phénomène régressif d'ablation de matériaux, dû à l'action d'un écoulement d'eau turbulent (fluvial ou marin)* » (Géorisques, 2019). En effet, **la cohésion et la granulométrie** de ces dernières aura des conséquences en terme **d'érosion latérale du chenal**. Ce degré d'érodabilité est alors déterminé en fonction de **la nature des sédiments** constituant les berges et de **leur organisation stratigraphique** (Malavoi et Bravard, 2010) (Figure 3.17). La couche inférieure jouera un rôle important dans l'estimation de ce degrés d'érodabilité puisque son érosion peut entraîner **l'effondrement ou le glissement des couches supérieures** (Malavoi et Bravard, 2010).

Nature des berges	Degré d'érodabilité
Rocheuses	Nul
Argileuses, argilo-limoneuses	Faible
Limono-sableuses, sablo-limoneuses	Moyen
Sableuses à caillouteuses	Fort

Figure 3.17 : Degrés d'érodabilité des berges selon leur constitution sédimentologique (d'après Malavoi et Bravard, 2010)

Un cours d'eau possédant une faible puissance spécifique peut ainsi tout de même connaître une « **activité géodynamique** » (Malavoi, 2007) importante si ses berges sont constituées de **matériaux très peu cohésifs** comme du sable. De même, l'inverse est également envisageable et une **forte puissance spécifique ne signifie pas forcément une grande dynamique d'érosion latérale** si le degré d'érodabilité des berges est nul ou faible (Malavoi, 2007). Notons également que **la présence d'une ripisylve et d'un chevelu racinaire** au sein de ces berges peut jouer un rôle dans leur cohésion et donc **ralentir les processus d'érosion** notamment au niveau des rives concaves d'un méandre (Bravard et Petit, 1997) comme nous le verrons par la suite.



Figure 3.18 : Ligne de bloc en pied de berge sur la Sélune (R. Létondot, 2019)

Cette subtilité ne pose pas de problème sur la Sélune étant donné **la récente remise en eau** ayant stoppé tout développement végétal jusqu'à aujourd'hui. Toutefois, les sédiments constituant ses berges ayant été parfois **fortement remaniés**, particulièrement sur certains de nos sites d'études, la question de **leur érosion et de leur remobilisation** par le cours d'eau se pose donc. Plusieurs **lignes de blocs**, dont la présence remonte à l'ancien aménagement du fleuve, sont visibles et représentent donc **un risque pour l'équilibre global des berges et de la plaine alluviale** (Bravard et Petit, 1997) (Figure 3.18). Ce sujet sera d'ailleurs abordé par la suite dans la partie sur les contraintes des réajustements (cf. 3.4.2).

Il s'agira donc **d'estimer les facteurs susceptibles d'accentuer ou d'atténuer** l'expression de la puissance spécifique précédemment définie **au droit des sites d'étude** afin de comprendre si son chenal pourra connaître, à plus ou moins long terme, des **réajustements géométriques dus à une érosion latérale**. Pour cela, diverses méthodes de **caractérisation granulométrique des sédiments**, dont la précision varie selon l'objectif de la mesure, peuvent être employées. De plus, **le rapport largeur/profondeur** du cours d'eau nous renseignera également sur la cohésion de ces berges (AFB, 2017).

Protocole d'acquisition et de traitement de la donnée :

L'évaluation du **degré d'érodabilité des berges** peut être réalisée grâce à différentes méthodes en fonction de la précision recherchée. Les sédiments des berges dans la zone dennoyée de la Sélune paraissant **très homogènes** tant entre les sites qu'au niveau de la stratigraphie des couches, seuls **deux sondages, à la tarière à main**, un en rive droite et un en rive gauche, ont été effectués sur chacun des sites au plus près du chenal (Figure 3.19). Le choix du lieu exact du sondage dépend de **l'état de la berge** (végétation, protection...). En raison de **l'importance de la nature de la couche inférieure** dans les processus d'érosion, il est essentiel que ces carottages **atteignent le pied de berge** (Malavoi, 2007).



Figure 3.19 : Sondage à la tarière à main sur les berges de la Sélune (R. Létondot, 2019)

Les **différentes strates** observées lors de ces sondages sont alors **disposées dans leur ordre de succession à côté d'une règle graduée au centimètre** afin d'estimer **leur épaisseur totale** au sein de la berge. Une photographie de la carotte sera alors prise pour pouvoir comparer les différents sondages (Figure 3.20) (cf. annexe 2).



Figure 3.20 : Exemple de carottage suite au sondage à la tarière (R. Létondot, 2019)

La granulométrie de chaque horizon ainsi déterminée sera alors caractérisée grâce **au test du boudin** et à **la clé de détermination de la texture des sols** (Wallonie Environnement SPW, 2019) (Figure

3.21). Cette clé permet de classer les sondages effectués selon le **pourcentage de sable, de limon et d'argile** dans ces horizons. La présence de **cailloux** sera également notée si le cas se présente. Moins précise qu'une analyse en laboratoire, cette méthode est tout de même utile pour **qualifier le degré d'érodabilité des berges** en fonction de leur composition.

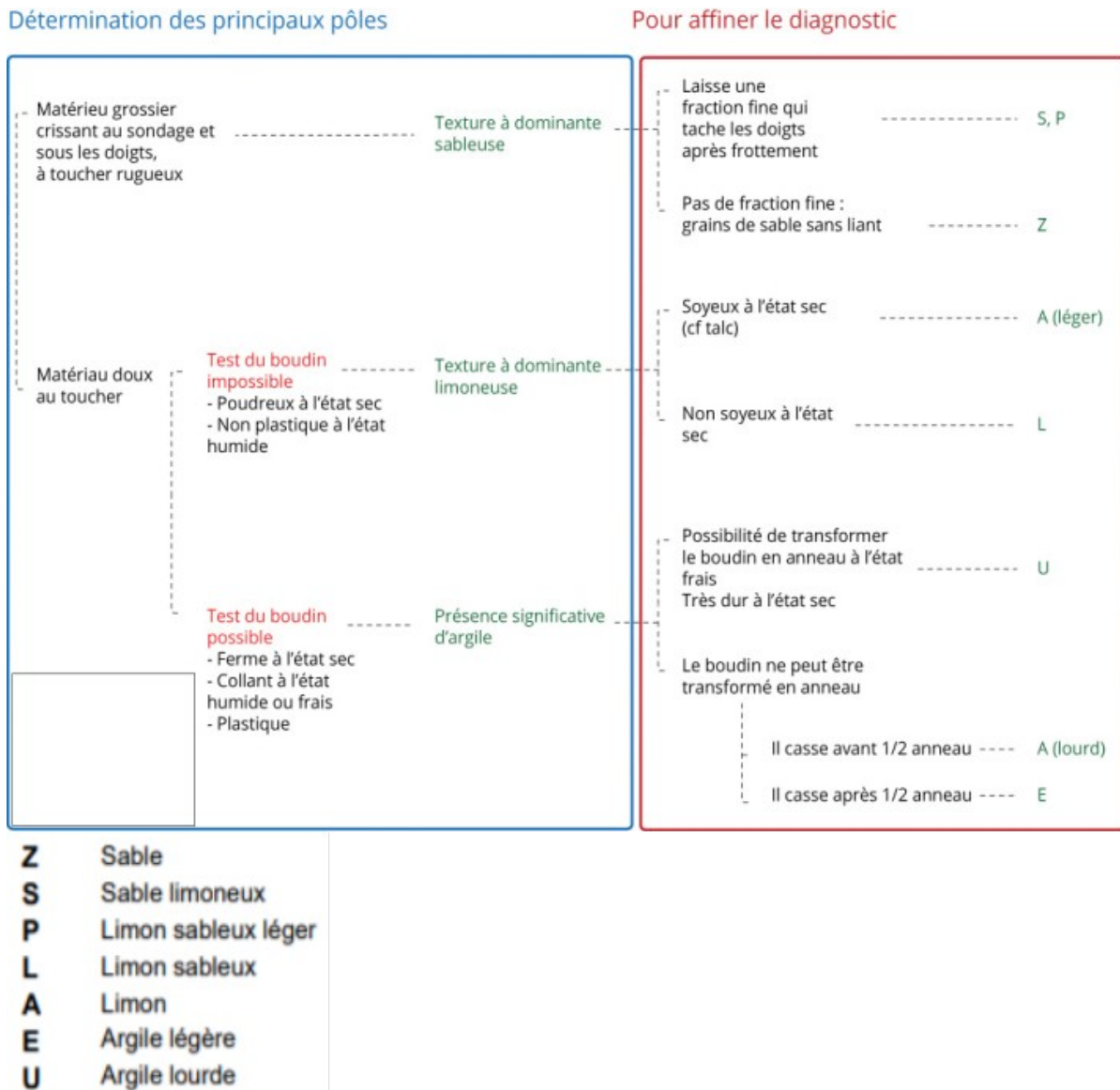


Figure 3.21 : Clé de détermination de la texture d'un sol selon le test du boudin (Wallonie Environnement SPW, 2019)

En complément de cette caractérisation *in situ*, **l'état des berges** au droit des trois sites d'étude a également été relevé. Ainsi, la **présence de protection ou au contraire d'une érosion marquée** nous permettra d'affiner notre estimation de leur degré d'érodabilité.

Second paramètre dans la **détermination des capacités de résilience** théoriques d'un cours d'eau, l'estimation du degré d'érodabilité des berges, couplé la puissance spécifique ainsi qu'aux apports solides, nous permettra de mieux comprendre **les réajustements possibles de la Sélune** suite à l'effacement du barrage de Vezins et notamment en ce qui concerne **la géométrie du chenal**.

3.3.3. Potentiel d'apports solides du bassin versant

Objectif de la mesure :

Toujours dans le but d'évaluer **les capacités de résilience** de la Sélune le **potentiel d'apport solide en sédiments** doit être évalué. Celui-ci correspond à la **charge solide du fleuve** qui peut être transportée de trois manières différentes : la solution, la suspension et le charriage (Figure 3.22). On ne s'intéresse ici qu'aux **sédiments les plus grossiers** qui sont transportés par le cours d'eau lors de l'augmentation des débits et de période de crues et qui se déposent dans le fond du lit durant les basses eaux. En effet, ce sont surtout ces matériaux, d'une taille pouvant être comprise entre 2 mm (sable) et 1024 mm (rochers) (Classification de Wentworth simplifiée, AFB, 2017), qui vont être **responsables de l'activité morphologique du cours d'eau** et de la **diversité de ses faciès d'écoulement** (Malavoi et Bravard, 2010).

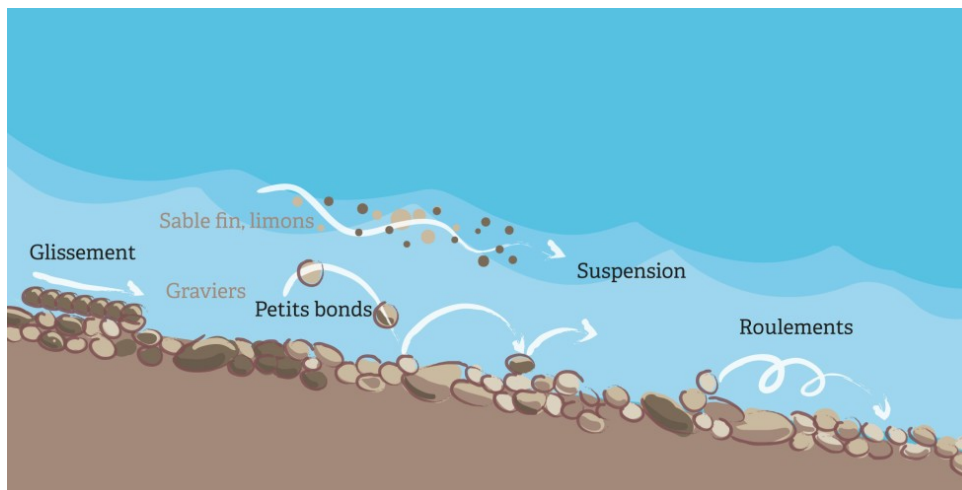


Figure 3.22 : Le charriage des sédiments dans le cours d'eau
(Les sentiers de l'eau, date?)

L'étude des apports solides potentiels s'est concentrée sur **le rôle des affluents en tant que fournisseurs de la majeure partie de la charge solide** présente dans la Sélune. De sa source au barrage de Vezins, **45 affluents** se jettent dans ce fleuve. D'une longueur allant de 271 mètres à 32 kilomètres, et d'une surface de bassin versant variant entre 0,5 et 273 km² ils représentent **les principaux cours d'eau**, permanents ou intermittents, rejoignant la Sélune avant le barrage.

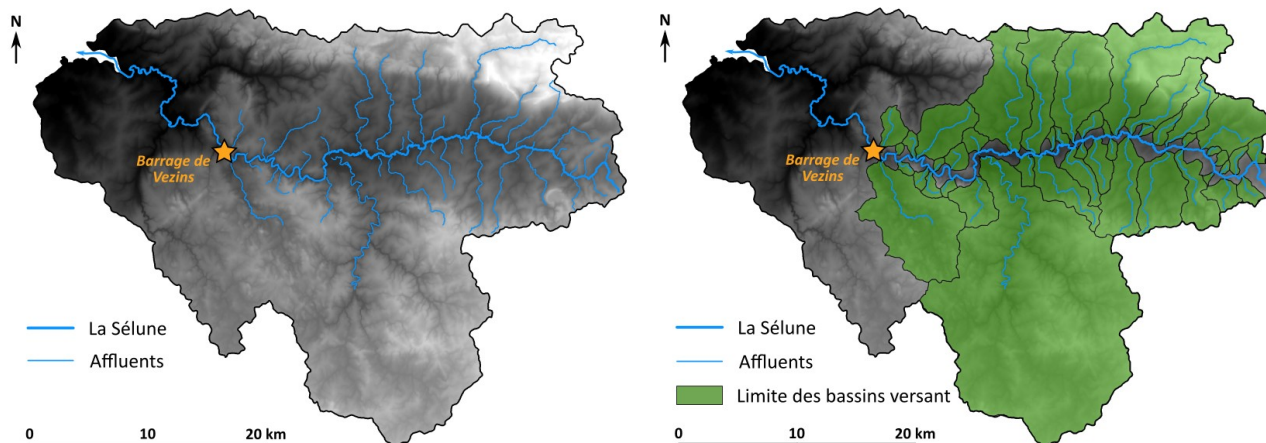
L'objectif est de déterminer le potentiel de **fourniture sédimentaire en particules grossières** (> 2mm) de ces sous-bassins ainsi que de **caractériser la granulométrie moyenne** de ces sédiments. Cela permettra d'estimer **le rôle des affluents dans les réajustements potentiels** de la Sélune. L'importance de cette fourniture sédimentaire étant utile dans la mise en place **des processus d'érosion et d'aggradation** favorisant la **diversité des formes fluviales** (Malavoi et Bravard, 2010). De même, la taille de ces alluvions pourra nous renseigner sur leur possible utilité **en terme d'habitat et notamment de ré-émergence de zone de frayère** propice aux espèces salmonicoles. En effet, les zones de frai de ces dernières doivent être constituées de **sédiments compris au moins entre 16 et 60 mm** dans les cours d'eau les plus importants (*in* David Le Brech, 2009, Bardonnnet et Baglinière, 2000).

Protocole d'acquisition et de traitement de la donnée :

Dans l'objectif de l'estimation de apports solides potentiels d'un cours d'eau **plusieurs approches méthodologiques sont possibles**. Il a ici été décidé de développer une démarche basée sur

la caractérisation *in situ* des affluents de la Sélune en terme **d'apports sédimentaires grossiers** potentiels en fonction des **caractéristiques de leur bassin versant** respectifs.

Les affluents principaux de la Sélune en **amont du barrage de Vezins** ont donc été déterminés. Ces derniers sont extraits à partir du MNT au 25m selon la méthode de l'algorithme D8 qui modélise le linéaire hydrographique selon la direction et l'accumulation des écoulements (Figure 3.23). Les **bassins versants** de ces 45 cours d'eau ont ensuite été définis encore une fois grâce à la direction et à l'accumulation des écoulements et l'exécutoire de chacun des affluents (Figure 3.23).



Malgré une précision discutable induite par la résolution du MNT (25 m), ce premier traitement permet d'obtenir **les limites de chaque bassin versant dont seul le chenal se jetant dans la Sélune** nous intéresse pour cette étude.

Plusieurs paramètres seront ensuite définis afin de caractériser ces affluents et leur bassin versant. Il s'agit donc de déterminer, grâce à l'outil SIG : **la pente** du cours d'eau (en %), **la présence d'obstacle à l'écoulement** sur les affluents grâce au Référentiel des Obstacles à l'Écoulement (ROE), **la surface du bassin versant** (en km²), **l'indice de compacité** (Périmètre du bassin versant/son aire) qui permet d'estimer **la réactivité hydrologique du cours d'eau**, ainsi que **l'occupation des sols** de ces derniers qui peut être obtenue grâce à la **CORINE Land Cover** présentant l'occupation des terres à l'échelle nationale. Ce sont tous ces paramètres qui vont servir à **la réalisation d'une Classification par Ascendance Hiérarchique (CAH)** (Cf. 3.1) qui permettra de ranger ces 45 affluents dans 4 classes servant de **première approche théorique d'évaluation des apports solides potentiels**. En effet, on estime que plus la pente est forte, le bassin versant grand, l'indice de compacité faible et les sols artificialisés, plus les apports en sédiments pourront être importants en raison d'un ruissellement accru (Bravard et Petit, 1997).

Une fois cette typologie des bassins versants effectuée, il sera alors possible de **caractériser les différentes classes** grâce à l'étude **sur le terrain** de quelque individus dans chacune d'entre elles en effectuant ensuite **une généralisation** basée sur les résultats obtenus. Sur les **quatre classes** déterminées, de 1 à 3 affluents (en fonction du nombre d'individus par classe) ont donc fait l'objet de **mesures in situ**. L'objectif étant de caractériser **la zone de confluence et la présence d'une forme d'accumulation** et d'estimer **le dynamisme hydro-sédimentaire** de l'affluent. La granulométrie de la charge solide du cours d'eau étant déterminée à chaque fois (médiane et dernier décile).

Une **grille d'analyse** a donc été mise en place afin d'appliquer le même protocole sur les 8 affluents choisis pour leur représentativité au sein de leur classe (cf. Annexe 3). Il s'agissait dans un premier temps, de **mesurer la forme d'accumulation à la confluence** pour estimer sa **surface** ainsi que son **volume** (largeur x longueur x épaisseur) (Figure 3.24). Un décimètre ainsi qu'une perche graduée furent donc nécessaires pour la réalisation de ces mesures.

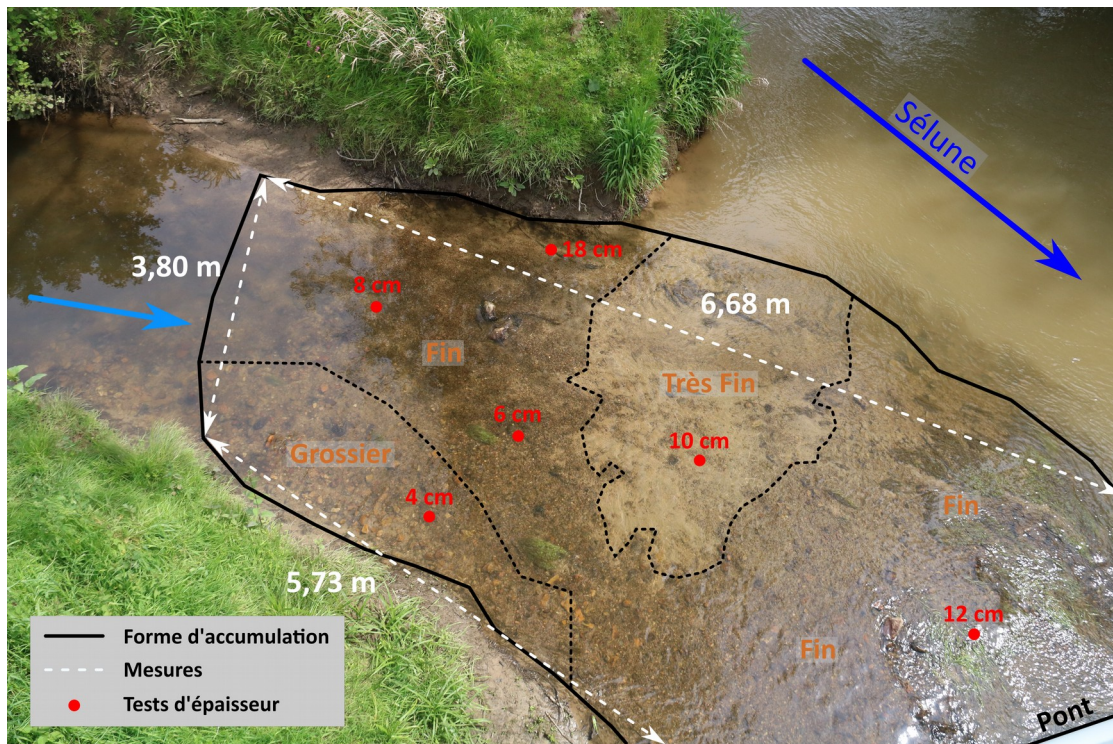


Figure 3.24 : Exemple de caractérisation d'une forme d'accumulation à la confluence d'un affluent (R. Létondot, 2019)

La zone d'accumulation à la confluence ne reflétant pas l'ensemble de la charge de fond transporté par l'affluent, il a été décidé de **remonter en amont** sur une distance représentant théoriquement **2 successions de radiers/mouilles** (AFB, 2017) **pour compléter cette analyse**. C'est sur cette distance qu'au moins deux voire trois radiers ou plats courants ont été identifiés. En effet, ce sont dans ces zones d'accélération de l'écoulement et de baisse de la hauteur d'eau que **la charge solide la plus grossière a tendance à se déposer** (Malavoi et Bravard, 2010). La **largeur à plein bord**, au niveau de la berge la plus basse, ainsi que les **hauteurs de berges** y ont été relevées avec un décimètre (5-10 cm de précision) ainsi qu'une mire graduée (5 cm de précision) pour pouvoir, grâce au rapport entre les deux, **estimer la géodynamique du cours d'eau** (Malavoi et Bravard, 2010) (Figure 3.25).

Tout comme sur la forme d'accumulation, **un échantillonnage granulométrique des particules**, basé sur le protocole **Wolman**, y a été effectué (AFB, 2017). Celui-ci consiste à mesurer **100 éléments prélevés à distance égale le long d'un ou plusieurs transects** (Figure 3.25) établis en tête ainsi qu'en milieu de radiers, là où les particules les plus importantes se déposent en basses eaux et sont remobilisées en période de crues (Malavoi et Bravard, 2010).

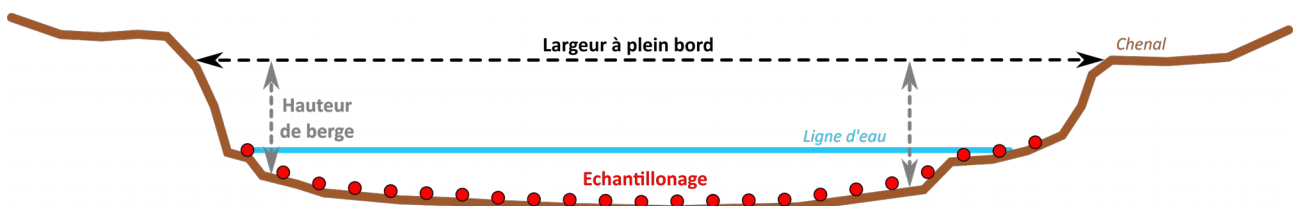


Figure 3.25 : Mesure de la géométrie du chenal et échantillonnage granulométrique des radiers (R. Létondot, 2019)

Ces 100 éléments, dont l'axe B (la plus grande largeur) a été mesuré au pied à coulisse (Figure 3.26), ont ensuite été répertoriés dans les **classes granulométriques simplifiées de Wentworth** afin de montrer les **intervalles de tailles dominants au sein du radier** (Figure 3.26).



Figure 3.26 : Mise en place des mesures granulométriques basées sur le protocole Wolman sur les radiers identifiés (R. Létondot, 2019)

Cette méthode permet de **comparer la granulométrie des différents affluents** et leur **potentiel en terme d'apport solide** vers la Sélune. La mise en relation de ces résultats avec **les caractéristiques de leurs bassins versants** respectifs constitue la dernière étape de cette méthode pour pouvoir, grâce à une **généralisation typologique**, estimer si la Sélune reçoit assez de charge solide pour pouvoir **se réajuster** et si celle-ci pourrait favoriser **la ré-émergence des zones d'habitat piscicole** (saumon, truite...) au sein de l'ancienne retenue.

Transition :

Indissociables dans l'étude des réponses hydromorphologiques d'un cours d'eau, **la puissance spécifique, le degrés d'érodabilité des berges** ainsi que **les apports solides** en sédiments sont essentiels pour comprendre **les capacités de résilience théoriques** du fleuve après perturbation, matérialisée ici par l'ouverture du barrage de Vezins. Réunis ils permettront de déterminer **le score géodynamique** de la Sélune et **l'efficience des travaux de restauration** (Malavoi, 2007). Dans le cas de la Sélune, **les interventions anthropiques sur la morphologie du chenal** ne sont pas négligeables et il convient de montrer comment ces dernières pourront **influencer le potentiel de réajustement réel de ce fleuve**. L'objectif est donc, grâce à la réalisation de plusieurs relevés sur le terrain, de comprendre quelle est **l'ampleur de ces travaux et des aménagements anciens** sur tout le linéaire de l'ancienne retenue et en particulier sur les 3 sites et quels peuvent être **leurs effets sur la mise en place du nouvel équilibre** modélisé précédemment par la balance de Lane (cf. 1.1.2).

3.4. Déterminer le potentiel réel de réajustement face aux contraintes anthropiques

Après avoir étudié les **capacités de résilience théoriques** de la Sélune suite à l'ouverture du barrage de Veziens, il est pertinent de s'intéresser à la **forte anthropisation**, tant ancienne que récente, du cours d'eau en amont de l'ouvrage. Cette anthropisation peut contraindre les processus de résilience théorique du fleuve. L'objectif est donc de pouvoir **comparer la théorie à la réalité** en déterminant comment les interventions anthropiques ont pu **modifier la dynamique « naturelle » du cours d'eau** et quel est **l'impact morphologique de l'abaissement du niveau d'eau**. Pour cela, un **inventaire et une cartographie des formes fluviales** dans le nouveau chenal à été effectué. De plus, **une étude comparative entre la pente du cours d'eau et les zones d'érosion/protection de berges** servira pour l'évaluation des contraintes imposées dans le potentiel de réajustement de la Sélune. Enfin, la **ré-estimation des débits de pleins bords** selon la nouvelle géométrie, plus ou moins façonnée anthropiquement, permettra de mettre en évidence **l'impact des travaux de remaniement** sur le potentiel de réajustement de la Sélune.

3.4.1. Inventaire et cartographie des formes fluviales *post*-ouverture du barrage

Objectif de la mesure :

L'**abaissement définitif du niveau d'eau** sur la Sélune et la **disparition des lacs** au profit d'un fleuve beaucoup **moins large** mais dont la **vitesse d'écoulement est bien supérieure**, est la **première conséquence hydromorphologique de l'ouverture du barrage** de Veziens. Ce phénomène est d'ailleurs encore bien visible sur le terrain grâce à la **trace laissée par le plan d'eau sur la roche** (Figure 3.27). Ce changement dans la dynamique fluviale n'est alors pas sans conséquences sur les différentes **formes fluviales** qui vont émerger dans le **nouveau chenal**. Le fleuve va retrouver un tracé relativement « naturel » et normalement proche du tracé originel ce qui implique d'une part **l'apparition, ou plutôt la réapparition, de formes jusqu'à alors envoyées** dans la retenue.

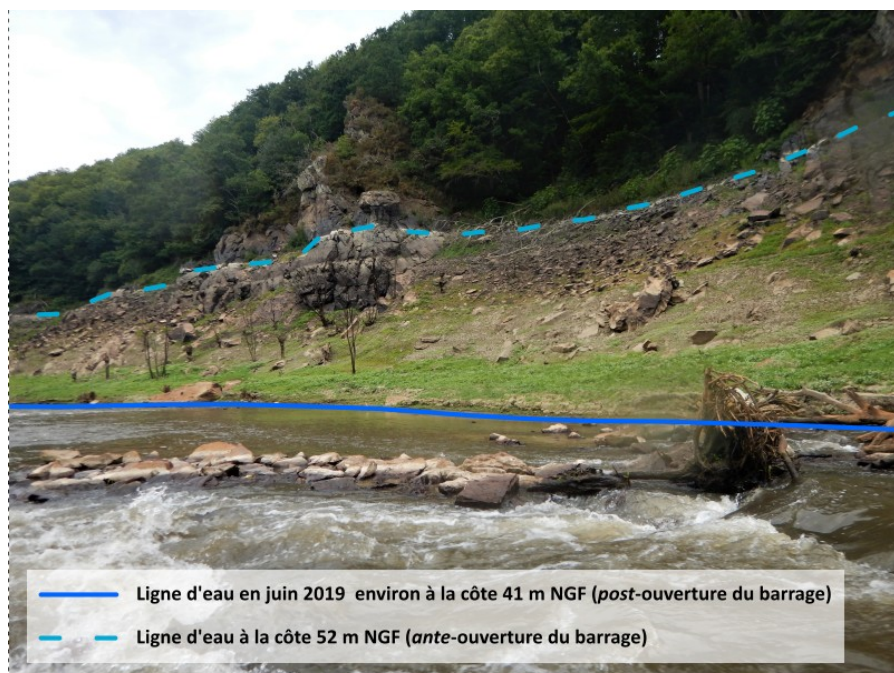


Figure 3.27 : Différence du niveau d'eau avant/après ouverture du barrage dans l'ancienne retenue (R. Létondot, 2019)

Les **formes fluviales** d'un cours d'eau illustrent sa **géodynamique** et sont bien souvent **révélatrices de son état écologique** (FNE, 2010). Ces formes, qui regroupent notamment **les radiers, les mouilles, les plats courants, les bancs et zones d'accumulation** mais aussi des éléments plus marginaux comme **les îlots** ou **les blocs exhumés** sont le gage d'un **bon fonctionnement hydromorphologique** et d'une importante **diversité des faciès d'écoulement** (FNE, 2010 ; Malavoi et Bravard, 2010). Elles révèlent également le dynamisme du fleuve avant la construction des barrages. Pouvant être d'origines variées, elles permettent de **caractériser la dynamique du cours d'eau** et de comprendre **son potentiel de réajustement**. Effectivement, en fonction des formes en place immédiatement après la vidange des lacs et la réalisation des travaux connexes, **une tendance évolutive** de la Sélune vers **son nouvel équilibre dynamique** peut être mise en évidence (Figure 3.28).



Figure 3.28 : Exemples des formes fluviales relevées sur la Sélune (R. Létondot, 2019)

L'objectif est donc de **répertorier et de caractériser ces formes** dans la zone de l'ancienne retenue et au sein du nouveau chenal. Cet inventaire permettra aussi de déterminer **les conditions morphologiques de la Sélune**, sur tout le tronçon qui était influencé par le barrage de Vezins, juste après l'ouverture de celui-ci. Il s'agit de construire **un état dit T₀** qui servira dans ce travail de recherche à évaluer l'état hydromorphologique du cours d'eau en termes **de diversité et de fréquence des formes**. Par ailleurs, avec la vidange des lacs, plusieurs **pêcheries, anciens moulins et passages à gué** ont été dénoyés. Ces aménagements contraignent aujourd'hui les réajustements du fleuve et, la Sélune étant un cours d'eau anciennement fortement anthropisé, il est donc important de les répertorier. La question de leur devenir dans **la restauration complète de la continuité écologique** et dans **le rétablissement de la dynamique fluviale** « naturelle » du fleuve se pose donc aujourd'hui (Gilles Berrée, juillet 2019).

Protocole d'acquisition et de traitement de la donnée :

La première étape dans la caractérisation des nouvelles formes fluviales de la Sélune en amont du barrage de Vezins consiste à **modéliser le nouveau tracé du cours d'eau**. Celui-ci a été déterminé grâce au cumul de la position des points GPS relevés, dont le protocole sera explicité, et au relevé aérien de **Light Detection and Ranging (LIDAR)** effectué sur la Sélune en octobre 2018 alors que la vidange des lacs n'était pas totalement achevée. Cette technique de télédétection laser consiste en **l'émission d'un signal laser** qui, lorsqu'il rencontre un objet (sol, végétaux, cailloux...) va émettre **un signal d'écho** concernant ses coordonnées x, y et z grâce à la position GPS du LIDAR et au temps mis par le signal pour revenir (Plateforme LIDAR Nantes-Rennes). Le résultat est **un nuage de points à très haute densité** représentant la topographie (avec la végétation) de l'espace survolé (Figure 3.29).

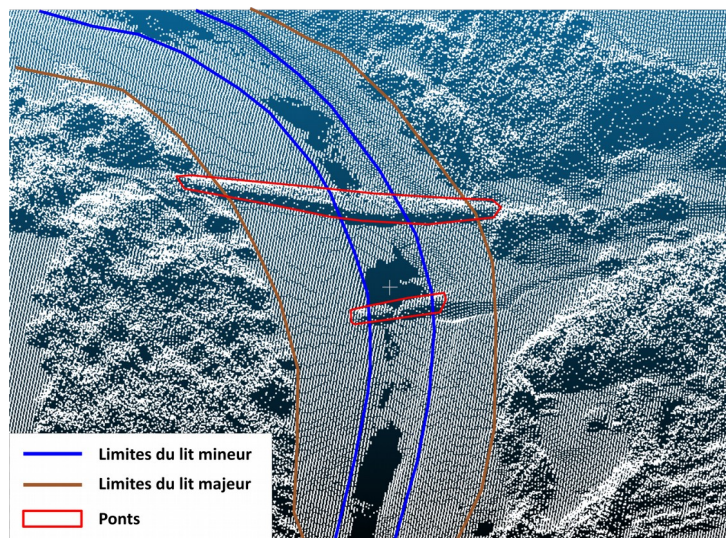


Figure 3.29 : Résultat du levé LIDAR au Pont de la République (2018)

Le fond de vallée (cours d'eau + plaine alluviale) de la Sélune a ainsi été extrait de ce nuage de point afin de réaliser **un Modèle Numérique de Surface**, nettoyé des éléments pouvant générer des erreurs (ponts), permettant de retrouver le tracé du nouveau chenal et ainsi de le digitaliser sous Arcgis (Figure 3.30). Ce MNT ne se suffisant pas à lui-même en raison de sa date de réalisation et de son étendue, **les points GPS relevés** ont permis d'ajuster le tracé final. La date du levé LIDAR ne permettant pas de retrouver les limites du nouveau chenal, il n'a pas été possible d'estimer la largeur du cours d'eau. De plus, compte tenu de la végétation les altitudes ne sont pas ici respectées sur les berges.

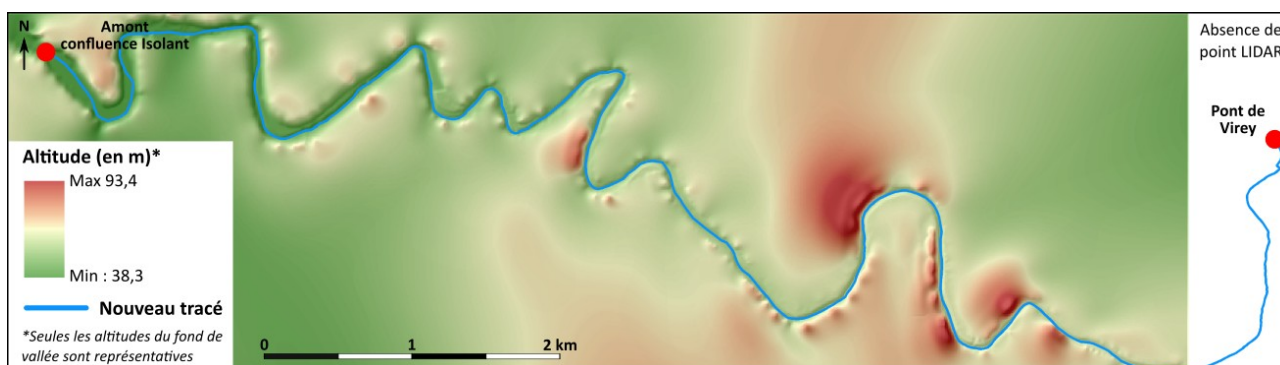


Figure 3.30 : MNT du fond de vallée de la Sélune et nouveau tracé du chenal (LIDAR, 2018, R.Létondot, 2019)

Les formes fluviales et les aménagements seront donc répertoriées au sein de ce nouveau linéaire de la Sélune. Le levé LIDAR ne permettant pas d'extraire ce qui relève ici de la micro-forme en raison de l'absorption du signal par l'eau, **une campagne de terrain** fut nécessaire.

Ainsi, il a été décidé **de descendre en canoë-kayak** tout le cours d'eau entre le Pont de Virey et la confluence de L'Isolant (environ 15 km) qui se trouve quelques centaines de mètres en amont du barrage de Vezins, celui étant en travaux lors des sorties. Grâce à **l'utilisation d'un GPS JUNO 5B** (précisions 2-4 m) les différentes formes fluviales qui nous intéressaient ici ont pu **être localisées** (Figure 3.31). Le **Global Positionning System** (GPS) fonctionne sur la base d'un échange de signal entre le récepteur et les satellites orbitant à 20 000 km de la terre qui émettent sur deux fréquences, L1 (1575,42 MHz) destinée au grand public et L2 (1227,60 MHz) pour les organismes non civils. Des stations au sol permettent de corriger les potentielles erreurs et **de calculer la position longitudinale, latitudinale et altitudinale (x, y et z) du point** avec une précision centimétrique.



Figure 3.31 : Descente en kayak de la Sélune muni d'un GPS JUNO (R.Létondot, 2019)

Le courant de la Sélune n'ayant pas permis un arrêt pour chaque forme, la précision de leur localisation est donc discutable mais permet, après reprise des données et nettoyage des irrégularités, d'aboutir à **une cartographie des formes fluviales**. **L'état des berges** (érosion, ligne de blocs, empierrement) et la présence de **glissements, les radiers** (début, fin et granulométrie dominante), **les bancs d'accumulation** (granulométrie dominante), **les blocs exhumés** (point dur) ainsi que **les îlots végétalisés** ont donc été géolocalisés grâce à une grille d'analyse pré-construite (cf. annexe 4)

Les divers aménagements (moulins, pêcheries, gués, ponts), dont les traces sont visibles suite au denoïement et **qui influencent la morphologie du fleuve** ont également été répertoriés et replacés sur la carte finale grâce à **la cartographie réalisée par l'Université de Paris Nanterre**. L'objectif est de montrer que la dynamique fluviale de la Sélune est encore fortement contrainte, et que plusieurs **formes sont héritées** de ces anciens éléments bâtis.

Des analyses en termes **de fréquence et de diversité des formes** pourront alors être effectuées afin de montrer **le potentiel hydromorphologique de ce secteur** et vers quoi celui-ci pourrait être amené à évoluer, notamment en ce qui concerne ses berges. Les radiers feront eux l'objet d'**une analyse plus détaillée dans la partie relative aux habitats piscicoles**.

3.4.2. Détermination des contraintes aux réajustements latéraux sur la Sélune

Objectif de la mesure :

Dans le même temps que la réalisation de l'inventaire des formes fluviales sur la Sélune a également été effectuée **une caractérisation de l'état des berges** actuelles. Celles-ci sont **les premières à subir les réajustements du fleuve** suite au démantèlement d'un ouvrage comme celui de Veziins. L'ajustement des berges déstabilisées fait ainsi parti du stade IV dans **les processus de réajustement** des cours d'eau défini par Doyle *et al.* en 2003 (Cf. 1.3.2). En effet, **leur érosion aura un rôle important dans le dynamisme du cours d'eau** et la mise en place du nouvel équilibre dynamique. L'érosion de berges est définie comme un « *phénomène naturel, généralement provoqué par le courant, participant au transport de la charge solide et à la recharge sédimentaire du cours d'eau. Les érosion de berges sont à l'origine des migrations de méandres et garantissent le fonctionnement dynamique du cours d'eau* » (Glossaire eau et milieux aquatiques) (Figure 3.32). On comprend donc que ces processus détermineront **l'ampleur des réajustements hydromorphologiques** et sont intimement liés à **la puissance spécifique du fleuve** ainsi qu'à **ses apports solides** si ces derniers sont conséquents.

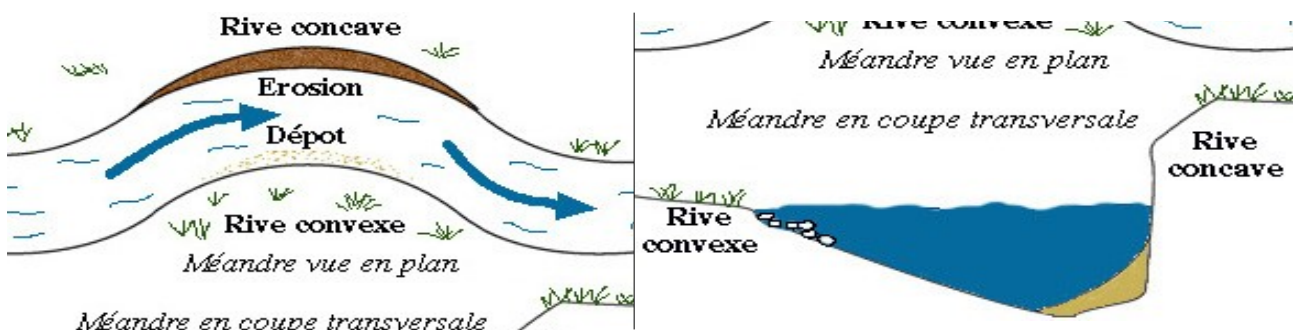


Figure 3.32 : Processus d'érosion/aggradation des berges et dans un méandre (BEIERE, date?)

En situation dite « naturelle », l'énergie du cours d'eau **s'accroît en rive concave** ce qui provoque **une érosion de la berge** qui permet un apport en sédiments et s'amenuise **en rive convexe** sur laquelle les sédiments venant de l'amont se déposent pour former un banc d'accumulation (Glossaire eau et milieux aquatiques) (Figure 3.32).



Figure 3.33 : Exemple d'érosion et d'empierrement des berges sur la Sélune (R.Létodot, 2019)

Le relevé de l'état des berges (Figure 3.33) permet donc d'obtenir **un bon indicateur du potentiel réel de réajustement latéral** de la Sélune dans l'ancienne zone de retenue. **Couplé à la pente de la ligne d'eau**, il sera alors possible de déterminer **les secteurs les plus sensibles** à ce type de

processus. Il ne s'agit pas de ré-estimer le degré d'érodabilité des berges selon leur composition sédimentologique, travail déjà effectué précédemment, mais bien de mettre en évidence **les linéaires ayant fait l'objet, récemment ou non, de protection** (enrochement, empierrement) et ceux **subissant une érosion marquée** (glissement de berge, sapement...) afin d'apprécier le potentiel exprimé en terme d'ajustements latéraux. Il convient de préciser qu'aucune crue de grande ampleur ne s'est encore produite depuis l'ouverture du barrage, limitant l'évolution des berges.

Grâce à **l'estimation de la nouvelle pente de la ligne d'énergie** du cours d'eau, cette approche permettra de déterminer **le potentiel réel de réajustement du système** en fonction des aménagements anthropiques mis en place sur la Sélune. Par ailleurs, si le fleuve est trop contrainte latéralement cela pourrait provoquer des processus d'incision du lit important (*in Melun, 2012, Doyle et al. 2003*).

Protocole d'acquisition de la donnée :

Pour déterminer quelles étaient **les contraintes**, notamment anthropiques (murets, lignes de blocs...), **aux ajustements latéraux** en amont du barrage, plusieurs étapes mettant en relation **les relevés GPS** de l'état des berges avec les données de pente extraite du **levé LIDAR** réalisé en octobre 2019 (cf. 3.4.1) ont été nécessaires. Notons qu'en raison de la date de ce levé, les **valeurs de pente** de la ligne d'eau ne représentent pas la pente actuelle mais elles permettent tout de même de fournir **un ordre d'idée sur la variabilité spatiale de l'énergie** du cours d'eau.

Dans un premier temps, **une zone dite « tampon »** a été matérialisée autour du nouveau tracé de la Sélune sous SIG afin de pouvoir découper le linéaire étudié en différents **sous-tronçon de 20 m**, cette distance permettant une analyse à échelle suffisamment fine compte tenu de la longueur des protections relevées. **Une valeur de pente de la ligne d'eau** (en %), extrapolée depuis les altitudes du levé LIDAR ainsi qu'une valeur de longueur de linéaire (en m) de **berges protégées par des lignes de blocs, des murets, ou érodées** (somme de la rive gauche et de la rive droite) qui ont été répertoriées leur seront attribuées. Cette zone tampon de 50 m, choisie ici pour s'assurer de rassembler tous les éléments géolocalisés, sera donc **découpée par sa ligne centrale** selon la méthode des polygones de Thiessen précédemment expliquée (cf. 3.2) (Figure 3.34). Les traitements s'effectuent de nouveau avec **l'outil Fluvial Corridor** qui a ici été ajouté dans le logiciel Arcgis.

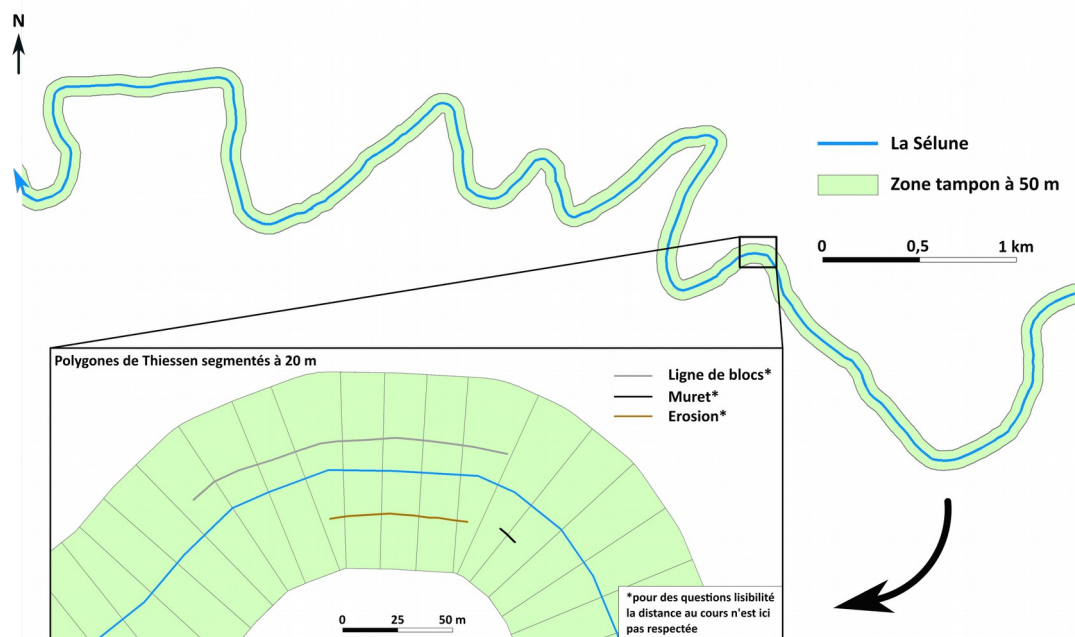


Figure 3.34 : Segmentation de la zone tampon en sous-tronçon de 20 m (R.Létondot, 2019)

Le levé LIDAR ne couvrant pas toute la zone d'étude, les polygones pour lesquels aucune valeur de pente ne pourra être trouvée ont ensuite été supprimés (environ 1,8 de km de linéaire à partir du Pont de Virey). Ainsi, grâce à l'outil d'intersection d'Arcgis et à différentes jointures attributaires, chacun des 674 polygones créés va posséder une valeur de pente ainsi que une ou plusieurs valeurs correspondant à l'état des berges. La pente de la ligne d'eau étant déterminée grâce au MNT résultant du levé LIDAR (cf. 3.4.1) et les linéaires de berges calculés grâce à la fonction « Calcul de la géométrie » d'Arcgis. Chaque nature de berges est différenciée et il sera alors possible d'identifier les secteurs caractérisés par de longues lignes de blocs, ou d'érosion.

Une mise en perspective avec les valeurs de pente, même si ces dernières restent très peu précises, va alors permettre de mettre en évidence les berges qui pourraient être soumises à des processus « naturels » d'érosion ou de dépôts mais qui, en raison de la présence de protection, ne peuvent pas se réajuster géométriquement. C'est donc dans ces zones que des travaux de restauration pourraient être profitables à la reprise d'une dynamique fluviale moins contrainte. De même, il est également possible que dans certains secteurs ayant fait l'objet de retalutage des berges (Pont des Biards, Pont de la République par exemple), possèdent au final une pente hydraulique faible et donc qu'un remaniement aussi important n'aurait pas obligatoirement été nécessaire. A l'inverse, d'autres endroit (comme la Mazure) n'ont pas été retouchés et il serait intéressant de savoir si ils auraient du, cette fois, faire l'objet d'une gestion plus approfondie.

Les résultats obtenus seront présentés sous la forme de graphiques à double entrée avec les valeurs de pente des sous-tronçons comme donnée fixe et les valeurs correspondants à l'état des berges (murets, ligne de blocs ou érosion) en seconde entrée. Les méandres et principaux aménagements seront également localisés sur ces graphiques.

3.4.3. Estimer l'impact des travaux de restauration sur les débits de pleins bords

Objectif de la mesure :

Comme cela à déjà été évoqué, l'hydrologie d'un cours d'eau possède des liens très important avec son fonctionnement morpho-sédimentaire et la qualité ainsi que la diversité de la vie aquatique qui en résulte. En ce sens, elle constitue un des compartiments de l'hydromorphologie et impactera donc la continuité écologique et les conditions morphologiques du fleuve (Figure 3.35) (FNE, 2010).

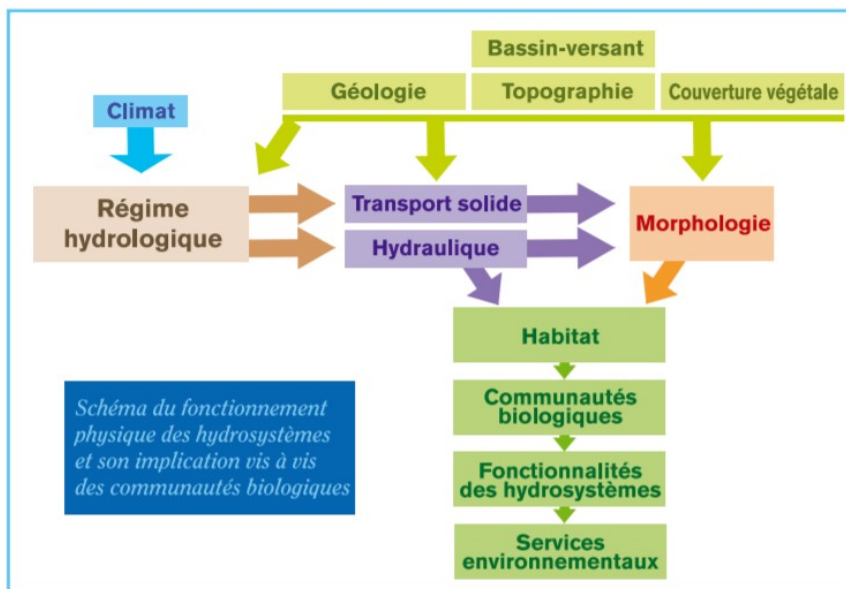


Figure 3.35. : Rôle du débit dans l'ensemble du système fluvial (ONEMA, 2007)

Le débit à partir duquel le cours d'eau débordera sur son lit majeur jouera donc un rôle primordial dans le modelage des formes des différents lits (mineur et majeur) ainsi que des berges (FNE, 2010 ; Malavoi, 2007). De ce fait, il est essentiel que ce débit de pleins bords soit ni trop faible ni trop fort afin d'assurer l'équilibre global du cours d'eau et « il convient donc de ne jamais considérer la morphologie sans la mettre en perspective avec les débits et leurs variations » (FNE, 2010).

Les travaux de restauration ayant été important sur plusieurs secteurs, une étude concernant la nouvelle débitance de la Sélune est nécessaire. Le linéaire anciennement ennoyé à parfois fait l'objet d'un recalibrage dont une des conséquences serait notamment l'altération du débit biennal de crue (d'une fréquence de retour de un à deux ans) « naturel » du fleuve. Étudiés et mesurés afin de répondre à certains objectifs (restreindre ou augmenter la dynamique érosive...), ces travaux de remaniement des sédiments et du façonnement anthropique des limites des différents lits du cours d'eau (mineur, moyen et majeur) peuvent limiter la réémergence des habitats et entraîner une homogénéisation du linéaire concerné (Malavoi, 2007, FNE, 2010). Le conditionnement du débit peut donc être un frein non négligeable aux différents réajustements du cours d'eau. Notons que comme précisé dans leur présentation (cf. 3.1.2), tous les sites n'ont pas fait l'objet d'un recalibrage du lit mais celui-ci a pu, dans certains cas et dans le but de recréer le régime hydrologique théorique de la Sélune, entraîner la création d'un chenal à l'aspect particulièrement anthropique. Cela s'observe au niveau du Pont des Biards qui présente des limites bien marquées entre le lit mineur, le lit moyen façonné par les pelleteuses et le lit majeur composé des sédiments de l'ancienne retenue (Figure 3.36).



Figure 3.36 : Recalibrage du lit de la Sélune au niveau du Pont des Biards (R. Létondot, 2019)

Notre objectif est donc de déterminer de quelle manière ces travaux modifient les débits de pleins bords du fleuve sur les trois sites d'étude, si cela est le cas, pour montrer comment la modification de la géométrie en travers pourra influencer le dynamisme morphologique des différents sites.. Il s'agira donc de recalculer les débits à pleins bords (débit de crue biennaux) et de les comparer avec les valeurs naturelles pour le type hydromorphologique obtenues précédemment grâce à la surface amont du bassin versant. Cela nous permettra de rectifier les premières conclusions sur les capacités de résilience de la Sélune (Malavoi et Bravard, 2010). La mise en perspective de ces données avec la diversité des formes fluviales et les contraintes aux réajustements complétera l'analyse de l'impact des interventions anthropiques sur le potentiel de réajustement, à long terme, de la Sélune.

Protocole d'acquisition et de traitement de la donnée :

Il existe différente façon **d'estimer le débit d'un cours d'eau à surface libre** en fonction des données possédées. Dans notre cas, il a été choisi d'utiliser la **formule dite de Manning-Strickler** qui permet de calculer le **débit d'une section en travers** en fonction de **la rugosité du lit et des berges** ainsi que de **la géométrie** (Degoutte, 2012). Cette méthode s'exprime par la formule suivante :

$$Q = K \times S \times R^{2/3} \times i^{1/2}$$

où **Q** représente le débit recherché, **K** le coefficient de rugosité (Strickler), **S** la surface de section mouillée (en m²), **R** le rayon hydraulique (rapport entre la surface de la section mouillée et son périmètre) (en m) et **i** la pente de la ligne d'eau (en m/m).

Le coefficient de rugosité K à ici été déterminé grâce à une table des ordres de grandeurs du coefficient de Strickler (Figure 3.37). Celui-ci dépend de **la forme du lit** ainsi que de **la nature du fond et de la végétation des berges**.

Nature des parois	Valeur de K en m ^{1/3} / s
Béton lisse	75-90
Canal en terre, non enherbé	60
Canal en terre, enherbé	50
Rivière de plaine, sans végétation arbustive	35-40
Rivière de plaine, large, végétation peu dense	30
Rivière à berges étroites très végétalisées	10-15
Lit majeur en prairie	20-30
Lit majeur en vigne ou taillis	10-15
Lit majeur urbanisé	10-15
Lit majeur en forêt	<10

Figure 3.37 : Table des ordres de grandeur du coefficient de Strickler (Degoutte, 2012)

Très subjectif, ce coefficient est difficile à estimer précisément notamment dans le cas de **l'amont du barrage de Vezins sur la Sélune récemment dénoyé**. Toutefois, en raison de la certaine **homogénéité entre le fond du lit et la ripisylve entre les trois sites d'étude**, il a été décidé que les débits seraient calculé pour deux coefficients : **15 et 25** (moyenne entre le lit majeur en prairie et la rivière de plaine large dans le tableau). Cela permet d'obtenir **une gamme de valeur** en fonction de l'état des berges sur ces secteurs. Une **vérification de cette rugosité** par l'estimation des débits lors des mesures sur le terrain avec ces coefficients à également était effectuée. Cela a permis d'**affiner le choix de la valeur de ce coefficient** grâce à la mesure de la surface et du périmètre mouillé avec le niveau d'eau du jour du relevé. Une **distinction entre les sites** est donc possible en raison de la rugosité des lits qui peut différer et le coefficient 15 pourra alors être plus adapté à un site et le 25 à un autre.

Afin de mesurer **la surface de la section mouillé du chenal S** et son **périmètre P** une campagne de terrain de **réalisation de profils en travers** basé sur le **protocole de Caractérisation Hydromorphologique des Cours d'eau (CarHyCE)** à été mise en place. Plus approfondi que dans le cadre de notre étude, ce protocole nous permet tout de même ici de **renforcer la précision et la représentativité des mesures** de la géométrie en long et en travers des sites. Il préconise en effet de

réaliser 15 profils en travers espacés chacun d'une longueur à pleins bords (cf. 3.1.1) et dont le premier sera placé sur un radier pour obtenir une succession théorique de deux radiers/mouille (AFB, 2017). Dans notre cas, seul **7 profils, espacés de deux largeurs à pleins bords**, ont été relevés par site en raison de l'homogénéité des berges. Le premier (la station) étant placé sur un radier quand cela été possible.

Ces **7 profils en travers** ont été réalisés à l'aide d'un **D-GPS Trimble** (précision à 2 cm) dont la différence avec l'utilisation d'un GPS scientifique classique (cf. 3.4.1) vient de la présence d'une **base fixe**. La position de cette base est calculée durant tout le temps du relevé et permettra de **corriger les erreurs** (décalage de l'horloge, perturbations de la troposphère...) sur tous les points avec le **récepteur mobile** et donc d'augmenter leur précision (Figure 3.38). La communication entre la base et le récepteur mobile se faisant par le biais d'une **radio**.

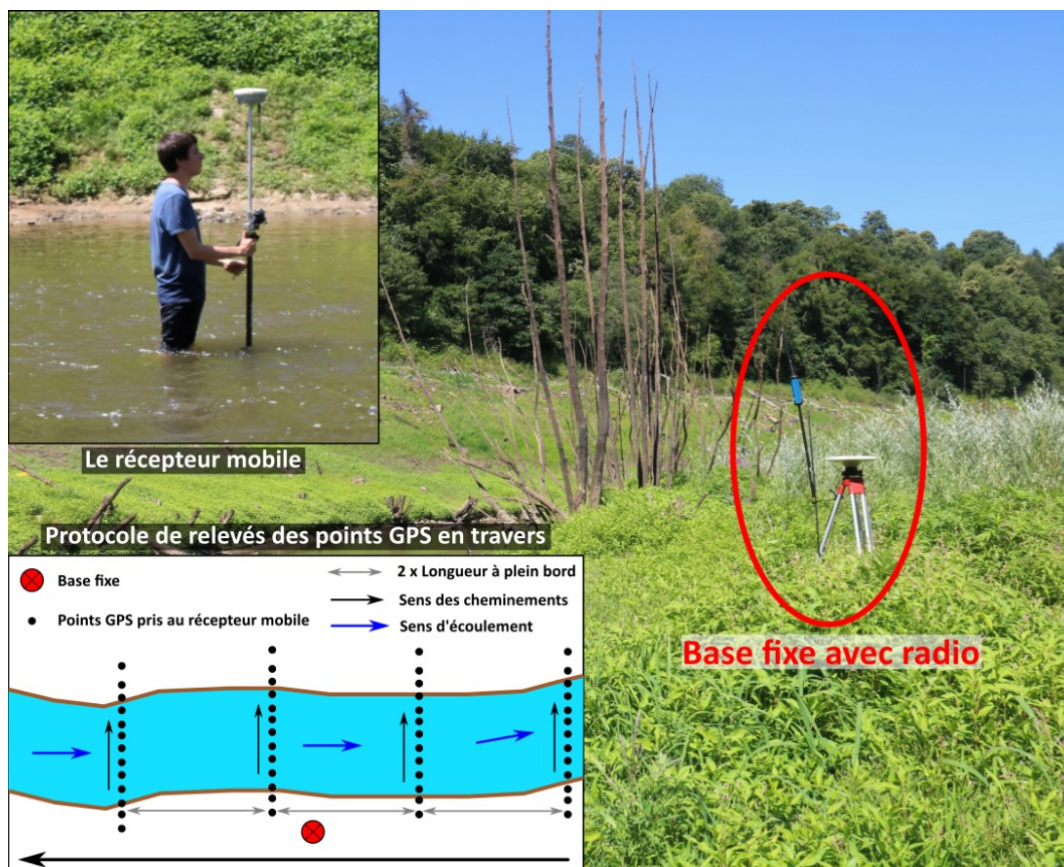


Figure 3.38 : Protocole de la réalisation des profils en travers au D-GPS (R. Létondot, 2019)

Plusieurs points GPS du **fond du cours d'eau** ont ainsi été pris à **chaque rupture de pente** en se déplaçant le plus **perpendiculairement possible au cours d'eau** d'une rive à une autre (Figure 3.38). La mesure des points (x, y et z) est enregistrée dans un **carnet de terrain** et les données font ensuite l'objet d'un **post-traitement** grâce à la position des satellites. Notons que lorsque le nombre de points ne suffisait pas à modéliser les différents lits du cours d'eau, d'autres ont été **rajoutés par le biais du levé LIDAR** (cf. 3.4.1) qui permet **de leur attribuer une altitude sous Arcgis** grâce à l'outil « Ajouter des informations de surface ».

S'ensuit alors la **construction des profils sous le logiciel Arcgis** en ajoutant les distance entre les points ainsi que les altitudes correspondantes dans une table attributive indépendante. Les données sont ensuite **modélisées sous forme de polygones** grâce à la fonction « Afficher des coordonnées XY » de ce même logiciel. Les coordonnées en X correspondant ici à la distance et celles en Y à l'altitude

(Figure 3.39). Cela permet de déterminer **la surface ainsi que le périmètre mouillé à plein-bord de la section** en travers (Figure 3.39) grâce à la fonction « Calcul de la géométrie » d'Arcgis. La surface correspond à **l'aire entre les deux courbes délimitant les lits** et le périmètre à **la longueur des bords** de cette dernière sans prendre en compte la largeur mouillée (Degoutte, 2012). Toutefois, les profils présentés ont ici été réalisés sous un tableur afin de mieux faire figurer les échelles de distance et d'altitude (Figure 3.39). Ces graphiques seront toujours représentés de la rive gauche vers la rive droite. Précisons par ailleurs que lorsque que le lit à fait lorsqu'un lit moyen à été construit entre le lit mineur et majeur (Pont des Biards notamment), **deux surfaces et périmètres** seront calculés afin de montrer à partir de quel débit ce lit moyen est rempli (Figure 3.39).

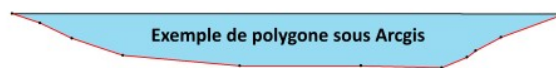
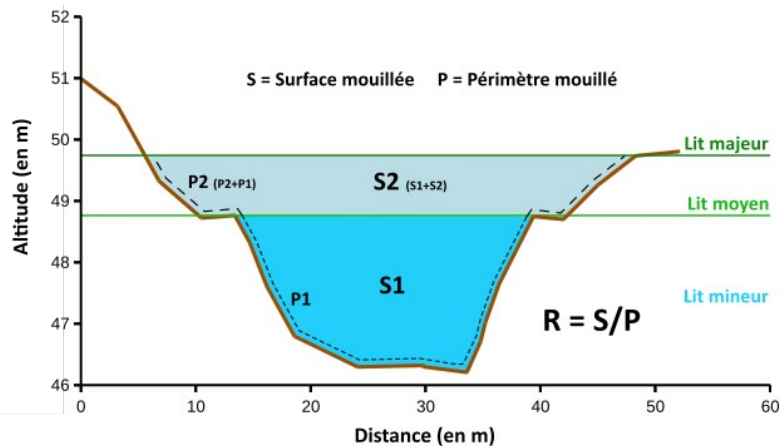


Figure 3.39 : Mesures des surfaces et périmètres mouillés des profils en travers (R. Létondot, 2019)

Ces deux mesures permettent de calculer le **rayon hydraulique R** en divisant l'aire obtenue par la longueur du périmètre. Tous les paramètres permettant d'estimer le débit pour une section en travers sont alors réunis. En effet, **la pente de la ligne d'eau i** à déjà été mesurée précédemment pour l'estimation des puissances spécifiques (cf. 3.3.1). Une **comparaison des débits** ainsi calculés avec les **débits biennaux** interpolés selon la superficie du bassin versant est alors possible. Cela permet d'effectuer une analyse de **l'impact de ces travaux sur les différentes fréquences de crues** et le potentiel de réajustement de la Sélune, si impacts il y a.

Transition :

Ainsi, grâce à **l'inventaire des formes fluviales et des aménagements anthropiques**, à **la comparaison de l'état des berges avec la pente du cours d'eau** sur toute l'ancienne retenue et **la ré-estimation des nouveaux débits de pleins bords**, il sera possible de déterminer l'efficacité de cette opération de restauration. En effet, nous montrerons que malgré ses capacités de résilience déterminées précédemment, **la dynamique du fleuve est encore contrainte** par de nombreux aménagements anciens et continue de l'être en raison des **nouveaux travaux de rechenalisation**. En lien avec cette analyse de capacités de résilience, nous allons maintenant aborder le sujet **des habitats aquatiques** et notamment piscicoles. Traitant de **l'hydromorphologie** de la Sélune, ce travail ne saurait faire abstraction de cette dimension qui constitue une des **motivations principales au dérèglement** du barrage de Vezins. Bien sur, cela ne sera ici qu'une **première approche** pour montrer les impacts de cette opération sur le potentiel de recolonisation des **espèces lotiques telles que le saumon**.

3.5. Évaluer la possible recolonisation piscicole liée aux nouveaux faciès d'écoulement

En complément de l'estimation des capacités de résilience de la Sélune en amont du barrage de Vezins et du potentiel de réajustement morphologique dans l'ancienne zone de retenue, ce mémoire s'intéresse également à la **possible recolonisation piscicole** de ce tronçon inaccessible aux poissons migrateurs depuis la construction des barrages. Une des principales motivations de l'arasement de ces ouvrages étant le **rétablissement de la continuité écologique** notamment afin de favoriser le **retour du saumon en amont des barrages**. La Sélune, se jetant dans la baie du Mont-Saint-Michel, possède en effet le potentiel d'être **une des meilleures rivières salmonicole de Normandie**. La Sée et le Couesnon, fleuves voisins, sont d'ailleurs très renommés en ce qui concerne la montaison de cette espèce aujourd'hui menacée (SAGE Sélune, 2011). Il est donc intéressant d'effectuer **une première analyse de la réémergence des zones de radiers** constituant les habitats de ces espèces amphihalines et des **nouveaux faciès d'écoulement** aujourd'hui observables sur les secteurs étudiés.

3.5.1. Estimation du futur potentiel frayères en amont du barrage de Vezins

Objectif de la mesure :

Les radiers sont le **lieu d'habitat et de reproduction des poissons** et notamment des saumons qui représentent une problématique importante du dérasement du barrage de Vezins. Cette espèce amphihaline pourra bientôt **remonter dans la zone en amont des barrages** et il convient donc d'étudier le **potentiel frayères** de ce secteur suite à l'abaissement du niveau d'eau. Le frai consistant en la **reproduction des salmonidés** à la fin de l'automne. Les femelles **creusent alors un nid avec leur queue** dans lequel elles pondront leurs œufs avant de les recouvrir après la fécondation par le mâle (ENSEEIH, 2019) (Figure 3.40).



Figure 3.40 : Photographie d'une frayère (AAPPMA de la Nive, 2012)

Espèce	Vitesse d'écoulement	Hauteur d'eau	Granulométrie
Saumon de l'Atlantique	50 cm/s en moyenne	20 à 50 cm	Cailloux fins à cailloux grossiers (20-60 mm)

Figure 3.41 : Caractéristiques optimales des zones de frayères pour le saumon (ENSEEIH, 2019)

Les zones de frai de l'espèce qui nous intéresse ici, le **saumon**, doivent ainsi répondre à **certains critères** de **vitesse d'écoulement**, de **hauteurs et d'eau** et de **granulométrie** (in ENSEEIH, 2019,

Baglinière, 1991). Ces conditions sont répertoriées dans le tableaux ci-dessus (Figure 3.41).

L'objectif est d'effectuer **une analyse des radiers** inventoriés précédemment sur le linéaire de l'ancienne retenue selon ces différentes caractéristiques. Alors que les barrages **empêchent encore toute remontée** des salmonidés ils avaient également **ennoyé toutes ces zones de reproduction** potentielle. **Une typologie des radiers récemment découverts** permettra alors d'estimer si l'amont du barrage sera propice, à plus ou moins long terme, à **la reproduction de ces poissons**. Cette approche reste assez sommaire mais elle servira de première étude **du nouveau potentiel frayère** de la Sélune. L'idée n'étant pas de donner d'indications en terme de recolonisation piscicole réelle mais bien d'estimer **si ces espèces pourront trouver refuge** après la restauration complète de la continuité écologique.

Protocole d'acquisition et de traitement de la donnée :

Afin de réaliser **une première approche en terme de potentiel frayères** en amont du barrage **une typologie des radiers** qui ont été inventoriés et cartographiés (cf. 3.4.1 et 4.3.1) peut être effectuée. En effet, durant la descente en kayak ces derniers ont fait l'objet d'une caractérisation plus précise notamment en ce qui concerne **leur granulométrie dominante** et **la hauteur d'eau** dans ces secteurs peu profonds. En estimant que la vitesse d'écoulement, qui n'a pas pu être mesurée ici, gravite toujours autour de 50 cm/s, il est alors possible de déterminer **les secteurs qui seraient déjà, ou dans le futur, propice à la reproduction des saumons** selon les deux critères restants :

- **la granulométrie** : Une ou plusieurs classes granulométriques dominantes ont ici été attribuées à chaque radier en fonction de la taille des matériaux visibles. La méthode étant visuelle il est possible que le diamètre de ces derniers ait été légèrement surestimé.

- **la hauteur d'eau** : A chaque fois que cela était possible une hauteur d'eau a été mesurée en début de radier à l'aide d'un bâton en fer gradué tous les 5 cm. En cas d'absence de cette donnée, ce qui concerne environ 30 % des radiers seul **le critère granulométrique** sera pris en compte pour la classification. De même, cette hauteur d'eau ayant été prise en conditions de basses eaux (juin 2019) sa valeur permet surtout de préciser le niveau de développement des radiers observés.

Il a donc été décidé de classer les radiers **dans 3 classes différentes** qui ont été définies selon les critères requis pour la reproduction du saumon (Figure 3.41) dont les caractéristiques sont présentés dans le tableau ci-dessous (Figure 3.42) :

Classe	Granulométrie	Hauteur d'eau
Classe 1 (radiers potentiellement favorables au frai, granulométrie et hauteur d'eau rentrant dans les critères d'habitat)	Granulométrie dominante comprise entre les graviers grossiers et cailloux grossiers	Comprise entre 20 et 60 cm
Classe 2 (granulométrie favorable mais hauteur d'eau trop importante ou absence de données)	Granulométrie dominante comprise entre les graviers grossiers et cailloux grossiers	Supérieure à 60 cm ou absence de données
Classe 3 (non favorable au frai, granulométrie trop grossière)	Granulométrie dominante supérieure ou égale à pierres fines	Ne rentre pas en compte

Figure 3.42 : Classes des radiers concernant leur potentiel frayères (R. Létondot, 2019)

La cartographie de cette typologie permettra de mettre en évidence **la spatialisation de ces radiers** en fonction de leur caractéristiques et donc les zones qui auront **le potentiel de devenir des secteurs à frayères importants**. Les radiers de chaque classe feront ensuite l'objet de **mesure de longueur**, grâce à la position GPS estimée de leur fin (cf. 4.3.1), dans le but de quantifier **la proportion de linéaire** de chaque classe par rapport au linéaire étudié. De plus, bien qu'aucune distinction ne soit faite entre les radiers anthropiques et naturels pour cette fois-ci, **les anciens aménagements** dont la hauteur ou la configuration pourraient **empêcher la remontée des saumons** plus en amont seront également mentionnés. Des espaces favorables au frai pourraient effectivement encore être inatteignables par les salmonidés malgré le dérasement des barrages. **Des travaux complémentaires** pourraient alors être nécessaires pour rétablir complètement la continuité écologique du cours d'eau et permettre **la réémergence de radiers rassemblant des conditions optimales d'habitat**.

Cette classification est alors à compléter à une échelle d'analyse plus fines avec la détermination des **nouveaux faciès d'écoulement**. Cela permettra de montrer quelles pourraient être les futurs secteurs à forte habitabilités piscicoles et aquatiques.

3.5.2. Détermination des nouveaux faciès d'écoulement sur la Sélune

Objectif de la mesure :

L'hydromorphologie d'un cours d'eau se définit en partie par **la diversité et la succession de ses différents faciès d'écoulement**. Ils sont « *le reflet à long terme des contraintes exercées par la géologie, la morphologie terrestre, la couverture végétale et le climat* » (in Malavoi et Souchon, 2002, Beschta et Platts, 1986). Ils représentent des **macro-descripteurs des habitats aquatiques** et permettent d'évaluer **la qualité** de ces derniers pour différentes espèces notamment de poissons (Malavoi et Souchon 2002). Une multitude de faciès d'écoulement peuvent être observés sur les rivières et sont de **bons indicateurs des potentiels dysfonctionnements hydromorphologiques** (AFB, 2017). Sur la Sélune, les barrages ont provoqué **la totale homogénéisation de ces faciès** et la vidange des lacs a permis un début de réémergence d'une plus grande variété de ces derniers.

Afin de les identifier **une clé de détermination des principaux faciès d'écoulement** a été mise en place par Jean-René Malavoi et Yves Souchon en 2002. Les premiers critères de définition sont **la hauteur d'eau** et **la vitesse d'écoulement** qui doivent être mesurés, ou estimés, en période d'étiage. On distingue donc dans un premier temps **les faciès profonds** tels que les mouilles ou les fosses et **les faciès peu profonds** dans lesquels on retrouve les radiers ou les plats courants. La vitesse d'écoulement permet alors d'affiner ce premier niveau de détail en différenciant **les faciès lenticques** (faible vitesse) **des faciès lotiques** (vitesses plus élevée) (Malavoi et Souchon, 2002) (Figure 3.40).

Le second niveau de classification est effectué grâce à **la forme que prennent les profils en travers** d'un tronçon du cours d'eau. Selon leur géométrie (asymétrique ou symétrique) les faciès pourront être détaillés en fonction de **la présence de fosses ou de surlargeurs** (Figure 3.40). **Le profil en long et la pente de la ligne d'eau** viennent compléter cette typologie. Ils permettent de préciser l'importance de la mouille ou de différencier les radiers des rapides dans les système dynamiques (Figure 3.) (Malavoi et Souchon, 2002).

Enfin, **la granulométrie du fond du chenal** pourra être rajoutée dans la détermination des faciès d'écoulement. Elle apporte « *une information importante tant pour les aspects morphodynamiques (rugosité du lit, transport solide) que biologiques (notion d'habitat, de refuge et d'abri hydraulique)* » (Malavoi et Souchon, 2002). Dans notre cas, la caractérisation du fond du chenal permettra notamment **d'estimer l'épaisseur de la couche de sédiment fin**, résultant de la vidange des lacs, encore présente au dessus du substrat plus grossier du cours d'eau.

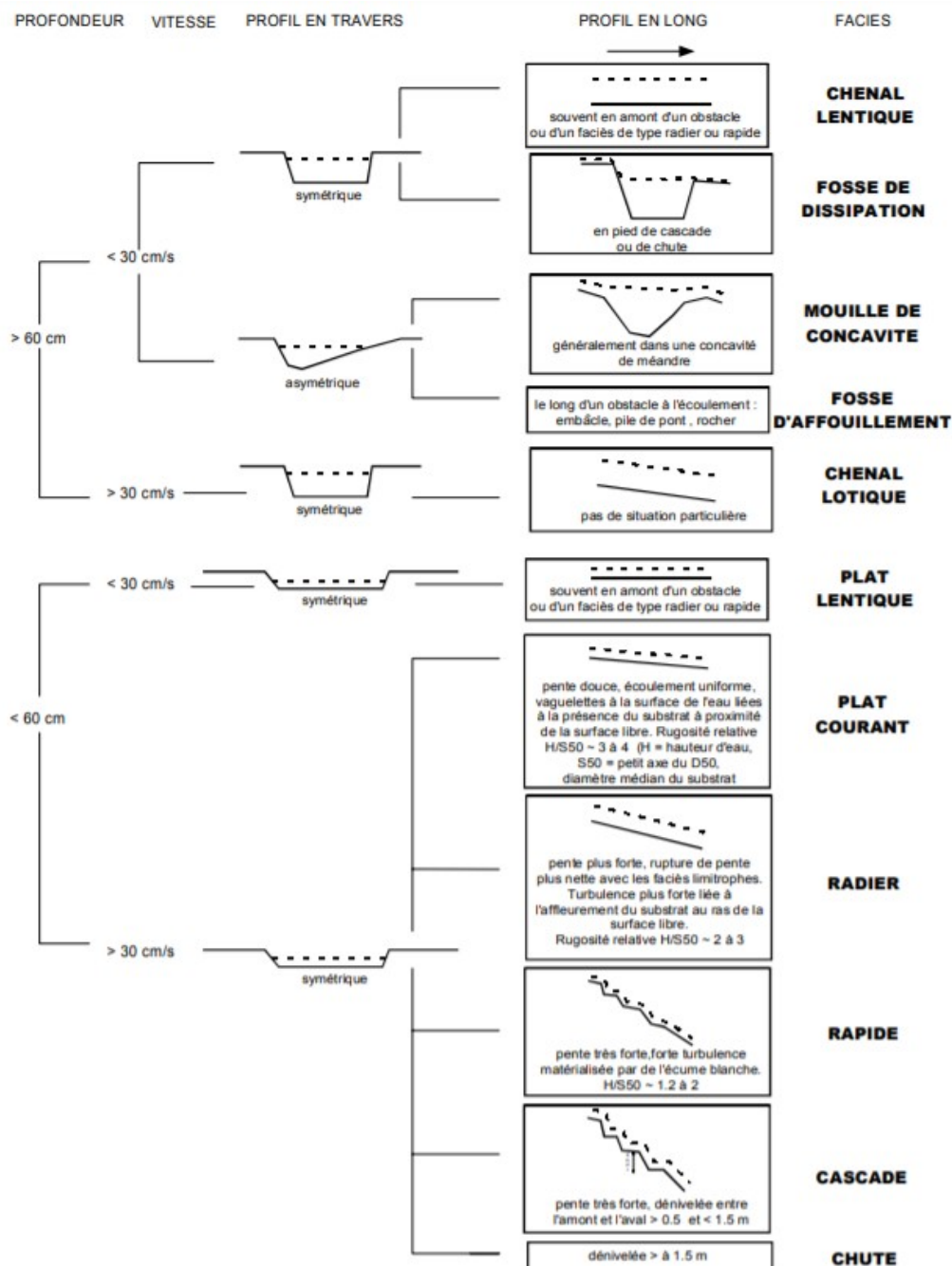


Figure 3.43 : Clé de détermination des principaux faciès d'écoulement des cours d'eau (Malavoi et Souchon, 2002)

L'objectif de cette partie est d'identifier **les nouveaux faciès d'écoulement** qui tendent à émerger suite à l'abaissement définitif de la ligne d'eau en amont du barrage de Vezins. En effet, seul le faciès « Chenal lentique » (Figure 3.43) était observable tout le long des 22 km de retenue jusqu'à aujourd'hui. Il s'agira ici de mettre en évidence **la rediversification de ces faciès** seulement sur les **trois sites étudiés** afin de montrer quel serait **le potentiel de la Sélune en terme d'amélioration de la qualité des habitats** et donc de la biodiversité en général.

Les différents faciès rencontrés seront donc classés selon la clé de détermination ci-dessus afin de montrer d'une part **dans quelle grande catégorie se trouvent actuellement les trois tronçons** en question et quelles sont, au sein de ces tronçons, **les spécificités** qui pourraient amener à penser que la Sélune se réajuste petit à petit au sein de sa plaine alluviale.

Protocole d'acquisition et de traitement de la donnée :

La détermination des **faciès d'écoulement** se fait grâce à différents **relevés sur le terrain** qu'il convient de réaliser plutôt en **période de basses eaux** afin que les différentes formes (radiers, mouilles) soit bien distincts (Malavoi et Souchon, 2002). C'est pour ces raisons que la campagne de terrain concernant ce sujet s'étalant sur 3 jours à été mise en place durant le mois de juillet 2019.

Le premier critère discriminant dans la détermination des faciès d'écoulement étant **la hauteur d'eau** celle-ci à pu être mesurée à l'aide des **hauteurs lues sur la mire graduée** grâce au niveau de chantier lors de la réalisation du **profil en long des tronçons** (cf. 3.3.1). En effet, en plus de **la pente de la ligne d'eau**, **la pente du fond** du lit mineur à également été mesurée ce qui permet, par une soustraction, de savoir quelle était **la hauteur d'eau moyenne au niveau du point mesuré** (précisions centimétrique) (Figure 3.44).

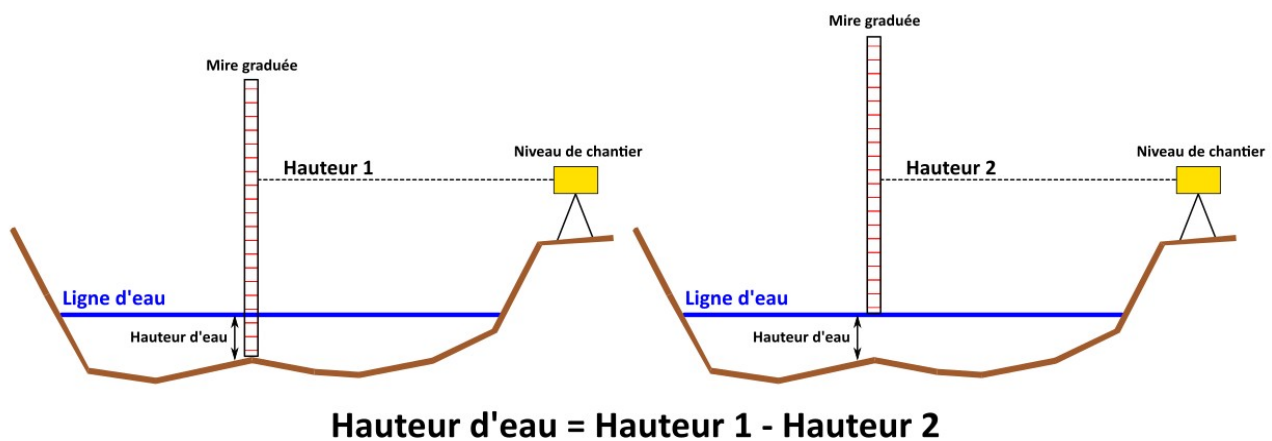


Figure 3.44 : Mesure de la hauteur d'eau pour chaque section en travers à l'aide du niveau de chantier (R. Létondot, 2019)

Ces mesures serviront également à la **réalisation de ce profil en long** entre les 7 profils (fond et ligne d'eau) qui constitue le 4ème critère de détermination des faciès (cf. 3.3.1). **La vitesse** n'ayant pas pu être relevée faute de moyens et de temps, les faciès d'écoulement de chaque section seront **ajustés selon les observations de terrain**. La **géométrie de ces sections**, représentant le troisième critère, est elle appréhendée grâce aux profils en travers réalisés précédemment (cf.3.4.3 et 4.3.3).

Pour compléter cette analyse, **la granulométrie dominante** sera également qualifiée selon les classes simplifiées de Wentworth (cf. 3.3.3). En effet, cette dernière aura un rôle important dans la **qualité et la diversité des habitats** représentés ici par les faciès d'écoulement (Malavoi et Souchon, 2002). Les sites étudiés étant anciennement ennoyés dans la zone de retenue du barrage de Vezins, comblée par un important volume de sédiments fins, il est donc pertinent de s'intéresser à la **constitution du fond de chenal** qui fournit des informations sur **le morphodynamisme et l'état hydromorphologique du cours d'eau** suite à l'ouverture du barrage. Pour cela, **le substrat** sous chaque point de mesure sera déterminé visuellement et à l'aide d'une perche graduée pour mesurer **l'épaisseur de la couche de sédiments fins** si cela était nécessaire (Figure 3.45).

Point de la section	P1	P2	P3	P4	P5	P6	P7	P8	Moyenne
Substrat (+épaisseur)									

Figure 3.45 : Tableau d'analyse du substrat du fond du chenal pour chaque section en travers (R. Létondot, 2019)

Tous ces paramètres rentreront en compte dans **la détermination finale d'un faciès d'écoulement pour chaque profil relevé**, soit 7 par sites. Bien que cette première approche ne suffit pas pour effectuer une analyse quantitative détaillée, cela permettra d'apprécier **le début de réémergence des nouveaux faciès d'écoulement** en amont du barrage de Vezins. Encore une fois, une **comparaison inter-sites** mettra en évidence les différents **impacts des travaux de restauration** sur cet aspect de l'hydromorphologie de la Sélune. L'objectif étant ici de savoir si ce fleuve aurait **la possibilité de voir réapparaître des secteurs favorables à la recolonisation des espèces lotiques** telles que le saumon dont les **critères d'habitat et de reproduction sont assez spécifiques**.

Conclusion partielle/transition :

C'est donc l'**ensemble de cette méthodologie**, appliquée sur **trois sites** n'ayant pas subi le même degré de restauration ou à **plus large échelle**, qui va permettre de **répondre aux problématiques** de ce mémoire. Celles-ci concernent, rappelons le, **les capacités de résiliences théoriques** de la Sélune, son **potentiel de réajustement** selon les contraintes qui lui sont imposées et les **impacts en terme de possible recolonisation piscicole**, un des enjeux majeurs de cette opération. Dans un premier temps l'élaboration d'un **état initial de la Sélune** avant la première ouverture du barrage de Vezins est une étape nécessaire afin de comprendre le changement et la **perturbation hydromorphologique** que représente ce dérasement d'ouvrage. Par la suite, **l'évaluation du score géodynamique** de la Sélune par le calcul des puissances spécifiques au droit des sites d'études, l'estimation du degré d'érodabilité des berges et la caractérisation des apports sédimentaires des affluents en amont du barrage renseignera sur **les capacités de résilience dites théoriques de la Sélune**. L'objectif étant de savoir si ce **système fluvial de faible à moyenne énergie** posséderait des caractéristiques favorisant son **rééquilibrage post-perturbation** ou non. Ces capacités de résilience seront complétées et rectifiées par **l'étude des contraintes aux réajustements**, tant anciennes que récentes, sur ce fleuve. **L'impact morphologique et morphogène** de l'opération de restauration, dans son état actuel, pourra ainsi être mis en évidence afin de mettre l'accent sur ses potentielles limites. Enfin, l'analyse de **la possible recolonisation piscicole**, et notamment salmonicole, de ce secteur permettra la mise en perspective de ces différentes parties sur **la nouvelle géodynamique** de la Sélune. La réalisation de tout ces traitements aura donc nécessité la **mobilisation d'outils de mesure variés** et la mise en pratique de **diverses compétences** liées aux **analyses statistiques et géographiques**.

Il est maintenant temps de développer **les résultats** qui ont découlé de la mise en place de cette méthodologie. Fruits d'un **quinzaine de jours sur le terrain** et d'encore plus de temps de *post-traitement* et présenté sous forme de **divers documents** (cartes, graphiques, tableaux...) commentés, ces données permettent de **qualifier les capacités de résilience de la Sélune suite à l'ouverture du barrage de Vezins**. La **nouvelle dynamique fluviale**, très différente de celle pendant l'enneigement de la vallée, sera ainsi présentée tout comme **la forte anthropisation du système** qui contraint fortement les réajustements hydromorphologiques et le temps de réponse du cours d'eau. Une brève approche du **potentiel de recolonisation des saumons**, espèce symbolique dans cette région, permettra d'apprécier **les premières conséquences de cette opération en terme d'habitats aquatiques**, sujet primordial dans l'application de la **Directive Cadre sur l'Eau** de 2000.

IV. Résultats et analyses

4.1. Un cours d'eau influencé par les barrages pendant 90 ans

Cette première partie a pour but de montrer de **quelle manière** les ouvrages hydroélectriques de Vezins et de la Roche-qui-boit ont influencé, pendant plus de 90 ans, **les paysages et la dynamique du fleuve Sélune**. Cela permettra de mettre en évidence **le changement induit par leur effacement**. Une attention particulière sera notamment portée à la zone en amont du barrage de Vezins.

4.1.1. Résultats de la typologie morphologique des tronçons homogènes (CAH)

La CAH des 145 sous-tronçons de la Sélune entre Saint-Hilaire-du-Harcouët et Ducey selon les critères définis précédemment (indice de sinuosité, indice de confinement, occupation du sol et pente) a donc été réalisée pour un nombre de classes variant entre 5 et 10. **Le tableau de variance intra-classe** (au sein d'une même classe) et **inter-classes** (entre les classes) nous montre que **le nombre de 9 classes** est approprié pour cette étude. La **dissimilarité entre les classes étant importante** alors que les individus au sein d'une même classe sont relativement proches les uns des autres (Figure 4.1).

	Absolu	Pourcentage
Intra-classe	213,084	14,00%
Inter-classes	1308,792	86,00%
Totale	1521,877	100,00%

Figure 4.1 : Tableau des variances intra et inter classes pour 9 classes (R. Létondot, 2019)

On obtient alors **un dendrogramme** se terminant par **neufs branches** et illustrant la proximité entre les différentes classes selon les variables prises en compte (Figure 4.2). C'est cet arbre binaire qui permettra notamment de **définir les caractéristiques principales des classes**, en fonction des paramètres qui justifient leur répartition dans telle ou telle classe et d'ajuster leur couleur dans la représentation graphique.

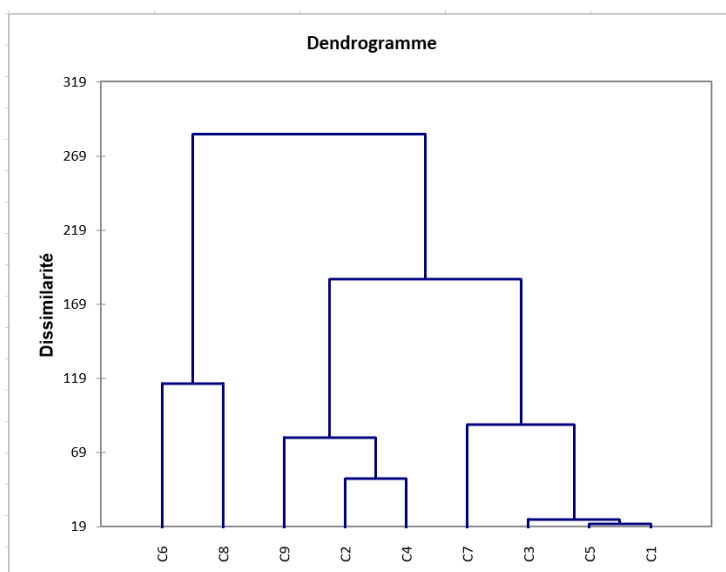


Figure 4.2 : Dendrogramme de la CAH au nombre de 9 classes (R. Létondot, 2019)

Le **tableau des barycentres** de ces 9 classes contenant de 1 à 64 individus est ensuite analysé (Figure 4.3). Ces barycentres, qui sont les valeurs correspondant aux valeurs moyennes de la classe pour chaque variable permettent de comprendre **comment les classes ont été déterminées par la CAH**. Ainsi, en comparant deux à deux chaque entité, et en répétant cette opération jusqu'à que chaque polygone soit comparé avec tous les autres, ces derniers se retrouvent rangés **avec ceux qui leur ressemblent le plus** en termes de sinuosité, de confinement, de présence d'ouvrages en travers, de densité de bois, de prairie, de bâti ou de pente. Chaque classe possédera **une ou plusieurs particularités qui la distinguera des autres**.

Classe	Indice de Sinuosité	Indice de confinement	Ouvrages en travers	Densité bois	Densité Prairie	Densité Bâti	Pente
1	1,055	0,055	0,000	16,144	78,173	0,708	1,200
2	1,004	0,031	1,000	9,250	76,696	11,160	0,828
3	1,049	0,022	0,000	10,279	83,745	4,477	0,864
4	1,089	0,271	1,000	18,110	56,141	1,195	2,031
5	1,075	0,033	0,000	46,503	49,580	0,185	0,477
6	1,017	0,370	0,000	59,896	11,273	0,016	2,089
7	1,544	0,054	0,000	17,414	73,081	0,608	0,876
8	1,030	0,766	0,000	19,413	6,593	0,101	0,880
9	1,012	0,724	1,000	4,465	25,373	0,017	14,287
Moyenne	1,075	0,428	0,041	26,094	33,053	0,546	1,240

Figure 4.3 : Tableau des barycentres des 9 classes selon leur caractéristiques
(R. Létondot, 2019)

La **représentation cartographique** des classes de chaque polygone est donc ensuite nécessaire afin de comprendre comment **leur localisation** au sein du tronçon étudié peut justifier ces caractéristiques.

4.1.2. Cartographie finale de la typologie : l'état initial de la Sélune

Grâce à la cartographie des classes de chaque polygone on remarque, que pour une échelle assez large, le linéaire du cours d'eau étudié semble pouvoir être séparé en **trois grandes parties ayant des attributs relativement similaires** en termes de géométrie du lit et d'occupation du fond de vallée (Figure 4.4).

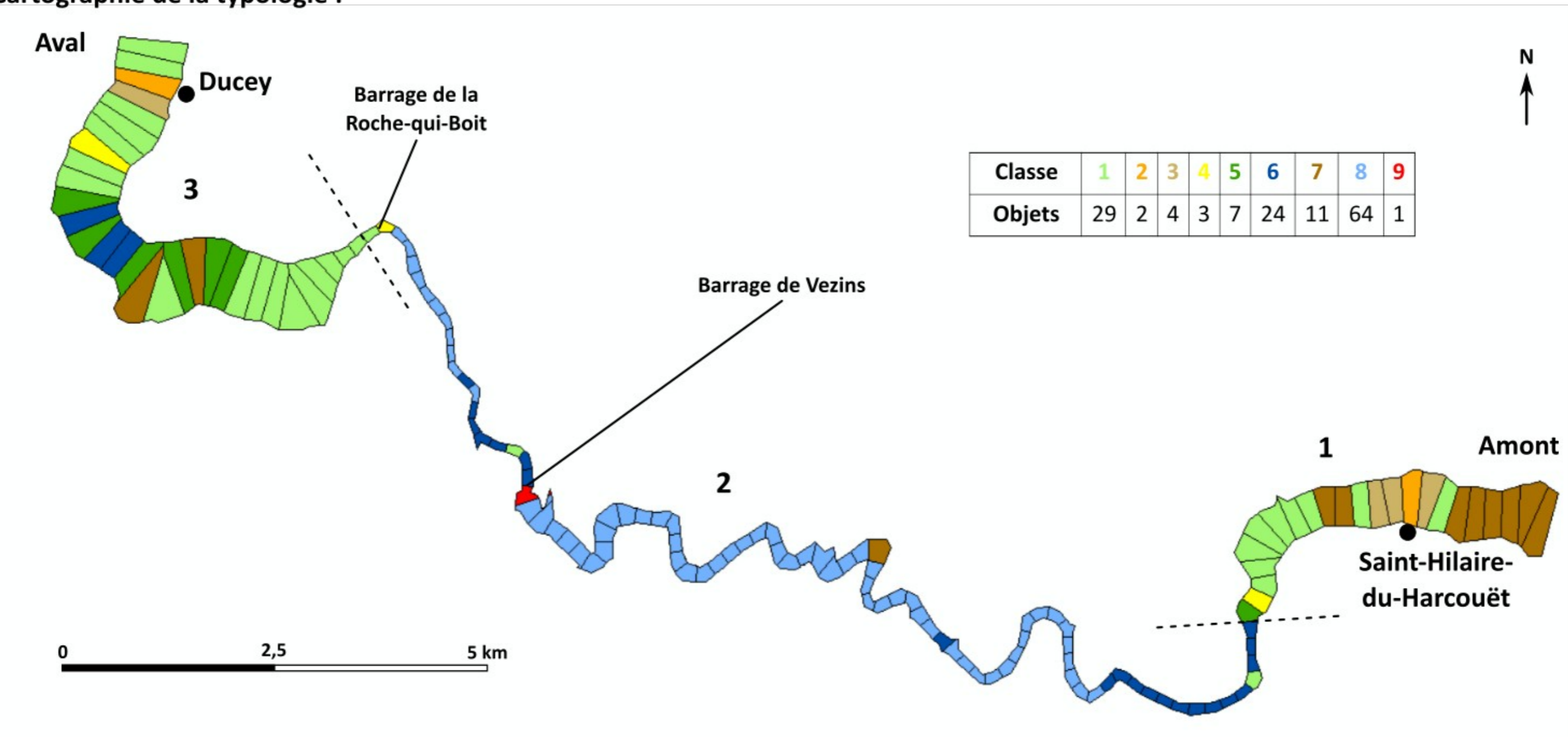
La **première partie** commencerait à Saint-Hilaire-du-Harcouët pour finir juste après le premier grand méandre (Figure 4.4) et concernerait surtout les classes 1, 3 et 7 . Le **fond de vallée y est large** alors que le **cours d'eau est plus étroit et sinueux**, les berges y sont majoritairement occupées par des **prairies/parcelles agricoles** ainsi que du bâti **au niveau du village principal**. Certains polygones ont la particularité d'avoir un **aménagement hydraulique**.

La **seconde partie** prend en compte toute la longueur des classes 6, 8 et **jusqu'au barrage de la Roche-qui-Boit** (Figure 4.4). Elle s'étend sur **toute la longueur des retenues** et légèrement plus en amont. La présence de la classe 9 au sein de cette partie constitue un élément atypique important puisqu'elle correspond au **barrage de Vezins**, principal obstacle aux flux liquide et solide. Cela entraîne l'apparition de **gorges** aux versants parfois abrupts sur lesquels **seule une végétation arborée peut se développer**.

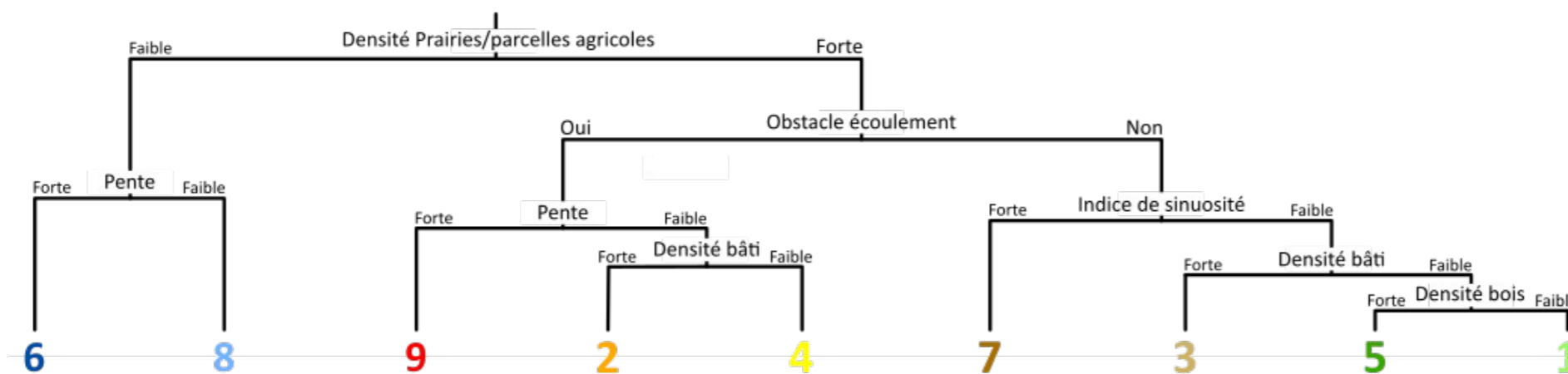
La **troisième et dernière partie** commencerait donc **après le barrage de la Roche-qui-Boit pour se terminer à Ducey** (Figure 4.4). Ses caractéristiques sont relativement **similaires à celles de la première partie** mais dans un sens inverse (forte densité de prairie puis village). Le **cours d'eau y est moins sinueux** malgré un large fond de vallée et on retrouve la classe 5 représentant **le bois d'Ardennes**, un patrimoine naturel important de la zone.

Typologie géomorphologique des tronçons de la Sélune entre Saint-Hilaire-du-Harcouët et Ducey

Cartographie de la typologie :



Classes et attributs principaux correspondants :



Précisions méthodologiques

Cette typologie résulte des métriques brutes et synthétiques calculées et mesurées pour chaque polygone sous SIG. Les données ont ensuite fait l'objet d'une Classification par Ascendance Hiérarchique (CAH) et de traitements statistiques tels que leur centrage ainsi que leur réduction.

Concernant le dendrogramme, les termes "fort" et "faible" sont relatifs et déterminés par rapport aux autres classes. Seuls les attributs distinguant les classes les unes des autres sont ici mentionnés. Pour plus de précision se référer aux graphiques en annexes ainsi qu'au texte d'analyse.

Source : R. Létondot, M1 GAED, P. Environnement, UFR SEGGAT, Département Géographie, 2019

Figure 4.4 : Cartographie du résultat de la CAH des sous-tronçons en 9 classes (R. Létondot, 2019)

Le terrain d'étude se situant en amont du barrage de Vezins nous détaillerons ici plus particulièrement la **seconde partie** qui correspond à la zone de retenue et notamment **des sous-tronçons faisant partie de la classe 8** (Figure 4.4). Les données des autres classes se trouvant en annexe 1.

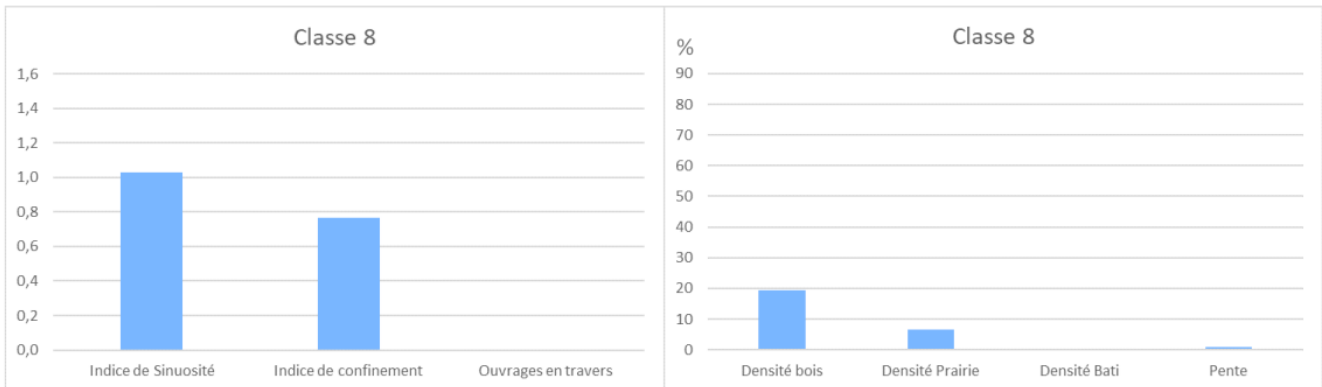


Figure 4.5 : Graphique des valeurs des métriques de la classe 8 (R. Létondot, 2019)

Ainsi, la classe 8 est principalement marquée par une **faible densité de prairie** et une **pente en dessous de la moyenne**. On note également **l'indice de confinement le plus élevé** entre toutes les classes (0,766) et une **densité de bois plutôt forte** (Figure 4.5). Correspondant aux zones des anciennes retenues ces caractéristiques sont typiques d'un cours d'eau entravé par un barrage.

Analyses et discussions des résultats :

La réalisation de cet état initial nous montre que **l'amont et l'aval des barrages** ne semble être que ponctuellement perturbée par certains aménagements de taille modeste (moulins, seuils). Toutefois, la partie centrale de cette typologie représente la zone sur laquelle **les barrages possèdent la plus grande influence** (classe 8 notamment). En effet, dans ce secteur **l'enneigement quasiment total du fond de vallée** explique la **formation de gorges** du cours d'eau et l'impossibilité d'un développement étendu de toute forme de végétation hormis **quelques bois sur les berges**. La pente étant considérablement **réduite par l'obstacle qui ralentit fortement la dynamique fluviale**. Le barrage de Vezins a donc modifié, depuis sa construction et jusqu'à sa vidange finale, **l'ensemble de la géométrie et de l'hydromorphologie dans le sous-système amont**. En connaissant le lien entre ces éléments du système et les autres, notamment la vie aquatique, il apparaît que **la retenue du barrage de Vezins est la cause de la dégradation de l'état hydromorphologique de la Sélune** notamment en amont direct de l'ouvrage.

Transition :

L'état initial nous montre que la Sélune pourrait, sans l'influence des barrages, être **un fleuve typique du Massif Armoricain** aux caractéristiques géomorphologiques proches d'autres cours d'eau voisins tels que la Sée ou le Couesnon. L'ouverture puis le dérasement du barrage de Vezins constitue donc **une première étape** qui permettra à ce système de retrouver **une dynamique fluviale plus « naturelle »**. Toutefois, un nouvel équilibre ne pourra être atteint que si la Sélune possède, suite à cette perturbation, **la capacité de se réajuster**. Il est donc maintenant nécessaire de montrer **les capacités de résilience de ce fleuve**. Si celui-ci possède **un potentiel de résilience suffisant**, la comparaison de cet état initial avec le nouvel état géomorphologique qui se mettra en place au fur et à mesure des années sera **un travail pertinent à réaliser**.

4.2. Les capacités de résilience théoriques de la Sélune

4.2.1. Des puissances spécifiques contrastées suite à l'ouverture du barrage

L'ensemble des paramètres servant à l'estimation théorique des puissances spécifiques de chaque site a été répertorié dans des **tableaux synthétiques** afin de pouvoir ensuite effectuer une **comparaison inter-sites** des valeurs obtenues.

- Sur le site du Pont de la République :


Nom du site	Pont de la République	
Station de référence	Pont de Signy (Q=47 m ³ /s, A = 770km ²)	
Superficie amont du bassin versant	643 km ²	
Débit biennal	40,7 m ³ /s	
Pente	0,00203 m/m	
Largeur à plein bord	20 m	
Puissance spécifique	40,35 W/m²	

Figure 4.6 : Estimation théorique de la puissance spécifique au Pont de la République (R. Létondot, 2019)

La puissance spécifique au niveau du **Pont de la République** (Figure 4.6) a été déterminée au **mois de juillet 2019** sur un **tronçon d'environ 215 mètres de long**. Avec une superficie amont de bassin versant s'élevant à **643 km²** en moyenne, le débit biennal de crue a été estimé à **40,7 m³/s** (Figure 4.6). Les relevés sur le terrain ont également permis d'obtenir la pente moyenne du tronçon d'une valeur de **0,00203 m/m**. La largeur à pleins bords atteint elle une moyenne de **20 m** (Figure 4.7). Toutefois, la relative complexité de la configuration des berges sur ce site a pu entraîner sa sous-estimation. Sa puissance spécifique est donc, avec **40,35 w/m²**, la plus élevée des trois sites.

- Sur le site du Pont des Biards :

Nom du site	Pont des Biards	
Station de référence	Pont de Signy (Q=47 m ³ /s, A = 770km ²)	
Superficie amont du bassin versant	654 km ²	
Débit biennal	41,27 m ³ /s	
Pente	0,00102 m/m	
Largeur à plein bord	23 m	
Puissance spécifique	17,88 W/m²	

Figure 4.7 : Estimation théorique de la puissance spécifique au Pont des Biards (R. Létondot, 2019)

Les mesures de terrain sur le **Pont des Biards** ont été entreprises durant la même période que le site précédent sur un **tronçon d'environ 250 mètres de long**. Logiquement, la superficie amont du bassin versant est légèrement supérieure tout comme le débit biennal estimé à **41,3 m³/s** (Figure 4.7).

Alors que la largeur à pleins bords moyenne s'élève à **23 m** en raison d'un élargissement du lit sur ce site, **la pente elle est considérablement réduite** (0,000102 m/m) (Figure 4.7). La puissance spécifique au droit de ce site ne dépasse pas donc même pas 20 w/m² avec **une valeur de 17,88 w/m²**.

- Sur le site de la base de loisir de la Mazure :


Nom du site	La Mazure	
Station de référence	Pont de Signy (Q=47 m ³ /s, A = 770km ²)	
Superficie amont du bassin versant	675 km ²	
Débit biennal	42,31 m ³ /s	
Pente	0,00116 m/m	
Largeur à plein bord	13 m	
Puissance spécifique	35,98 W/m²	

Figure 4.8 : Estimation théorique de la puissance spécifique à la Mazure (R. Létondot, 2019)

Les mesures au niveau de **la base de loisir de la Mazure** ont été réalisées le lendemain de celles du Pont des Biards. Elles révèlent, encore une fois sans surprise, un débit biennal encore supérieur avec une valeur atteignant les **42,31 m³/s** (Figure 4.8). La pente de la ligne d'eau est elle légèrement supérieure au site précédent et s'élève ici à **0,000116 m/m** sur les 150 mètres étudiés (Figure 4.8). C'est surtout la largeur de ce tronçon, qui ne mesure que **13 m** en moyenne qui marque une grande différence avec les deux premiers secteurs qui ont été retalutés. La puissance spécifique de la Mazure dépasse donc de peu le seuil des 35 w/m² avec **35,98 w/m²**.

Analyses et discussions des résultats :

Site	Pont de la République	Pont des Biards	La Mazure
Puissance spécifique	40,35	17,88	35,98

Figure 4.9 : Synthèse des calculs des puissances spécifiques sur la Sélune (R. Létondot, 2019)

Ainsi, avec **une puissance spécifique de 40,35 w/m²** le site du **Pont de la République** se place au dessus du seuil de 35 w/m² défini par Brookes (Figure 4.9). On peut donc s'attendre, théoriquement et sans prendre en compte les travaux de restauration, à de **potentiels réajustements** sur ce tronçon. Les faciès présents sur ce site illustrent d'ailleurs ce dynamisme assez marqué. Au **Pont des Biards**, la valeur de la puissance spécifique reste très faible avec seulement **17,88 w/m²**. En l'état, quasiment **aucun réajustement n'est donc pour le moment théoriquement envisageable**. Cependant, cette puissance n'est pas valable pour une pente de plein-bord qui pourrait évacuer **les sédiments** qui s'accumulent dans ce secteur en raison de la faible pente et donner au cours d'eau **un regain d'énergie**. La puissance spécifique du site de **la Mazure** à elle été évaluée à **35,98 w/m²**. Ne dépassant que très légèrement le seuil des 35 w/m², il sera tout de même probablement **possible d'observer certains réajustements morphologiques** sur ce site, d'autant plus **qu'aucun travaux n'y ont encore été effectués**.

Les calculs des puissances spécifiques pour les trois sites permettent de montrer que celles-ci **sont contrastées** en fonction de la distance au barrage. Plusieurs facteurs peuvent expliquer ces différences comme le **recalibrage du chenal** mais aussi la **précision des mesures**. De plus, ces géométries **se réajusteront très certainement à plus long terme**. Elles révèlent tout de même que la Sélune se trouve bien **dans un contexte de faible à moyenne énergie** et que son potentiel de réajustement n'est pas nul. Toutefois, d'autres critères rentrent en compte dans les **capacités de résilience** d'un cours d'eau. De plus, les débits utilisés sont ici statistiques et il conviendra des les **comparer aux nouvelles estimations de débits de pleins bords** qui ont été effectuées pour mettre en évidence l'impact des travaux de restauration sur la dynamique fluviale de la Sélune.

Il est également possible de montrer que les résultats de ces puissances, notamment pour le Pont de la République et celui des Biards, sont **liés aux travaux de remaniements** mis en place sur ces sites. Toutefois, les valeurs de débits biennaux étant ici calculées selon la dynamique non perturbée du cours d'eau, on estime ici **une puissance spécifique théorique** du fleuve.

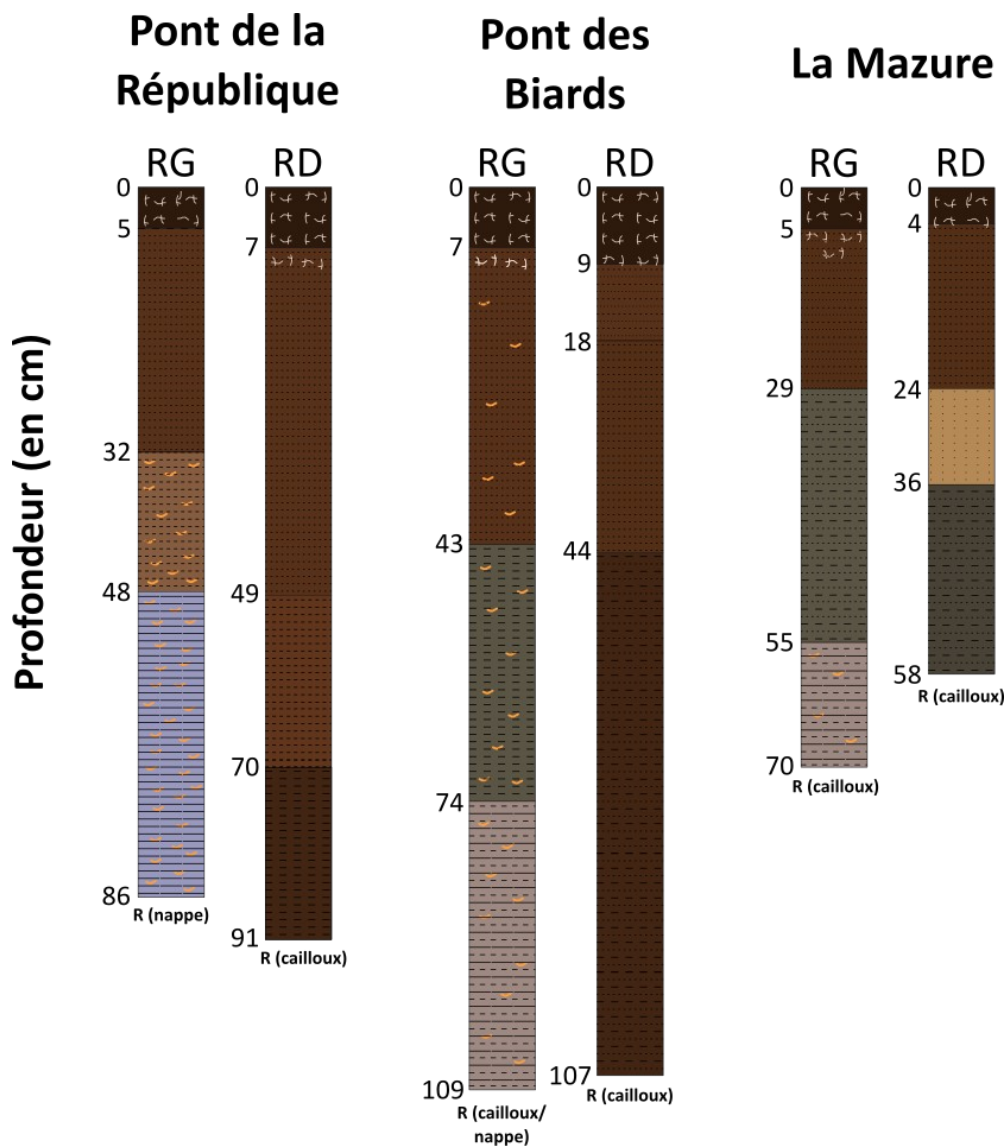
4.2.2. Des berges au degré d'érodabilité relativement faible

La mesure du **degré d'érodabilité des berges** réalisée sur le terrain vont permettre de compléter la première analyse des capacités de résilience de la Sélune estimées selon les puissances spécifiques des sites. Les **carottages** sont présentés et caractérisés afin de construire **des profils pédologiques de la composition sédimentologique** des berges (Figure 4.10).

Au niveau du **Pont de la République**, nous remarquons que les berges sont relativement **homogènes** (Figure 4.10). En effet, quatre horizons suivant une logique similaire peuvent être différenciés sur les deux berges. Les forages mesurant entre 86 et 91 cm de profondeur. Après la fine couche d'humus, le sol devient **de plus en plus limoneux**, voire même **légèrement argileux** pour le dernier horizon de la rive gauche (Figure 4.10). Il est à noter que le refus de cette rive est **une nappe d'eau** en rive gauche, dont les traces d'oxydation et la couleur bleutée du dernier horizon illustrent la présence, et de la **roche/cailloux** en ce qui concerne la rive droite, la tarrière n'ayant pas réussi à s'enfoncer plus profondément.

Les berges du site du **Pont des Biards** sont elles caractérisées par **une homogénéité tant verticale qu'horizontale encore plus importante** (Figure 4.10). Effectivement, la rive gauche présente une stratigraphie composée à très grande majorité de **limons léger en surface et de limons lourds argileux** en profondeur sur seulement quatre horizons pour un sondage de 109 cm. Les horizons de la rive droite sont encore plus semblables entre eux avec **un empilement de limons légers et de limons moyennement lourds** jusqu'au refus à 107 cm de fond (Figure 4.10). Ce refus étant lié à la présence de cailloux et de la nappe dont la présence est encore une fois illustrée par des **traces d'oxydation** sur quasiment toute la profondeur du forage en rive gauche. Les profondeurs de ces forages s'expliquent par la hauteur des berges ici plus importante que sur les deux autres sites.

Les carottages réalisés sur le site **de la Mazure** révèlent quelques particularités, notamment sur les **profondeurs moins élevées** (70 et 58 cm) mais restent dans cette tendance de **grande homogénéité dans la composition sédimentologique des berges** (Figure 4.10). Ainsi, la rive gauche connaît **une succession d'horizons limoneux** avec quelques nuances dans le pourcentage de ce dernier et un pied de berge légèrement oxydé. Nous trouvons un **schéma similaire en rive droite** à ceci près qu'**un horizon sableux** fait son apparition entre 24 et 36 cm (Figure 4.10). Le refus est ici marqué par la présence de la roche, notamment en rive gauche qui longe le versant.



Couleur : Teinte de l'échantillon lors du prélèvement

Texture de l'échantillon :



Figure 4.10 : Profils pédologiques des carottages réalisés sur les berges des trois sites d'étude (R. Létondot, 2019)

Analyses et discussions des résultats :

Les berges au niveau du **Pont de la République** sont donc **assez cohésives** avec un degré d'érodabilité **moyen à faible** notamment en pied de berge (Figure 4.11). Toutefois, comme cela peut se voir sur le terrain, ces dernières sont tout de même sujettes à **des glissements et sapements** qui témoignent ici de **leur instabilité** (érosion, affaissement lié à leur teneur en eau...). La puissance spécifique étant plus élevée pour ce site il paraît logique que les réajustements latéraux y soient plus marqués. Le tronçon étudié au droit du **Pont des Biards** possèdent également **un degré d'érodabilité des berges assez faible** qui de plus était fortement remaniées ce qui explique **l'absence de toute trace**

d'érosion. Il est donc probable que le cours d'eau ne possède pas ici la capacité **d'ajuster sa géométrie** tant en rive droite qu'en rive gauche (Figure 4.11). Enfin, en raison de la nature des limons sur le site de la Mazure, il est possible que cela soit dans ce secteur que **le degré d'érodabilité des berges soit**, relativement aux autres sites, **le plus élevé.** L'absence de travaux et les **nombreuses marques d'érosions et de glissements** en berge illustrant cette affirmation (Figure 4.11).



Figure 4.11 : Photographie des berges sur les trois sites d'étude de la Sélune (R. Létondot, 2019)

Les sédiments des berges de la Sélune connaissent donc **peu de variabilité verticale** et leur nature ainsi que leur organisation reste **très homogène sur tous les sites étudiés.** De plus, c'est également **entre ces sites que la composition des berges est très similaire.** En effet, on remarque que partout ces dernières sont désormais constituées **des matériaux à dominante limoneuse** qui se trouvaient jusqu'à alors **dans la retenue du barrage de Vezins.** Plutôt **cohésif et difficilement érodable,** il est possible de se demander quelle sera **l'évolution de la géométrie de ces berges** notamment avec les interventions anthropiques et les anciennes protections encore en place. **Les rapports largeur/profondeur (l/p)** confirment d'ailleurs, pour le moment, la cohésion des berges (Figure 4.12)

En vue des résultats concernant ce paramètre de l'érodabilité des berges, **les réajustements latéraux du fleuve** paraissent donc **difficiles à se mettre en place,** tout du moins sur un moyen terme. Il est en effet possible que **l'énergie, tout de même non négligeable du cours d'eau,** soit suffisante pour lui permettre de s'ajuster aux nouvelles conditions hydromorphologiques mais **sur un temps plus long.** Toutefois, nous pouvons nous demander si ce paramètre aurait pu être différent **sans les travaux de remaniement** effectués sur certains sites. La Sélune **façonnera donc son lit avec cette contrainte** et **la végétation** viendra bientôt recoloniser les berges et en modifiera encore le potentiel d'érosion. **Les apports solides** sont également l'un des facteurs qui pourra **influencer ces réajustements** et il est donc maintenant important d'étudier le potentiel de la Sélune de ce point de vue.

4.2.3. Un potentiel d'apport solide typique des milieux de faible énergie

Les **apports solides potentiels** sont le dernier paramètre nous permettant d'estimer le score géodynamique de la Sélune. Les résultats obtenus seront présentés en deux temps : une première partie qui montrera **le résultat de la CAH** et les caractéristiques de chaque classe, et une seconde dans laquelle **les apports solides de chaque affluent** étudiés seront présentés et mis en perspectives avec les caractéristiques des bassins versants.

La Classification par Ascendance hiérarchique a ainsi permis de trier les 45 affluents du fleuve (de sa source au barrage) **en 4 classes.** Ce nombre ayant été choisi pour la dissimilarité acceptable entre les classes (19,53 % de variabilité intra-classe et 80,47 inter-classe). **La cartographie des classes** de chaque bassin versant permet alors de se rendre compte de **la répartition spatiale** de ces dernières (Figure 4.13). **Le dendrogramme** est ici utile pour comprendre quels sont **les caractéristiques principales** ayant entraîné cette classification, **le nombre d'individus par classe** (Figure 4.13).

Typologie des affluents et de leurs bassins versant en amont du barrage de Vezins selon leurs caractéristiques physiques

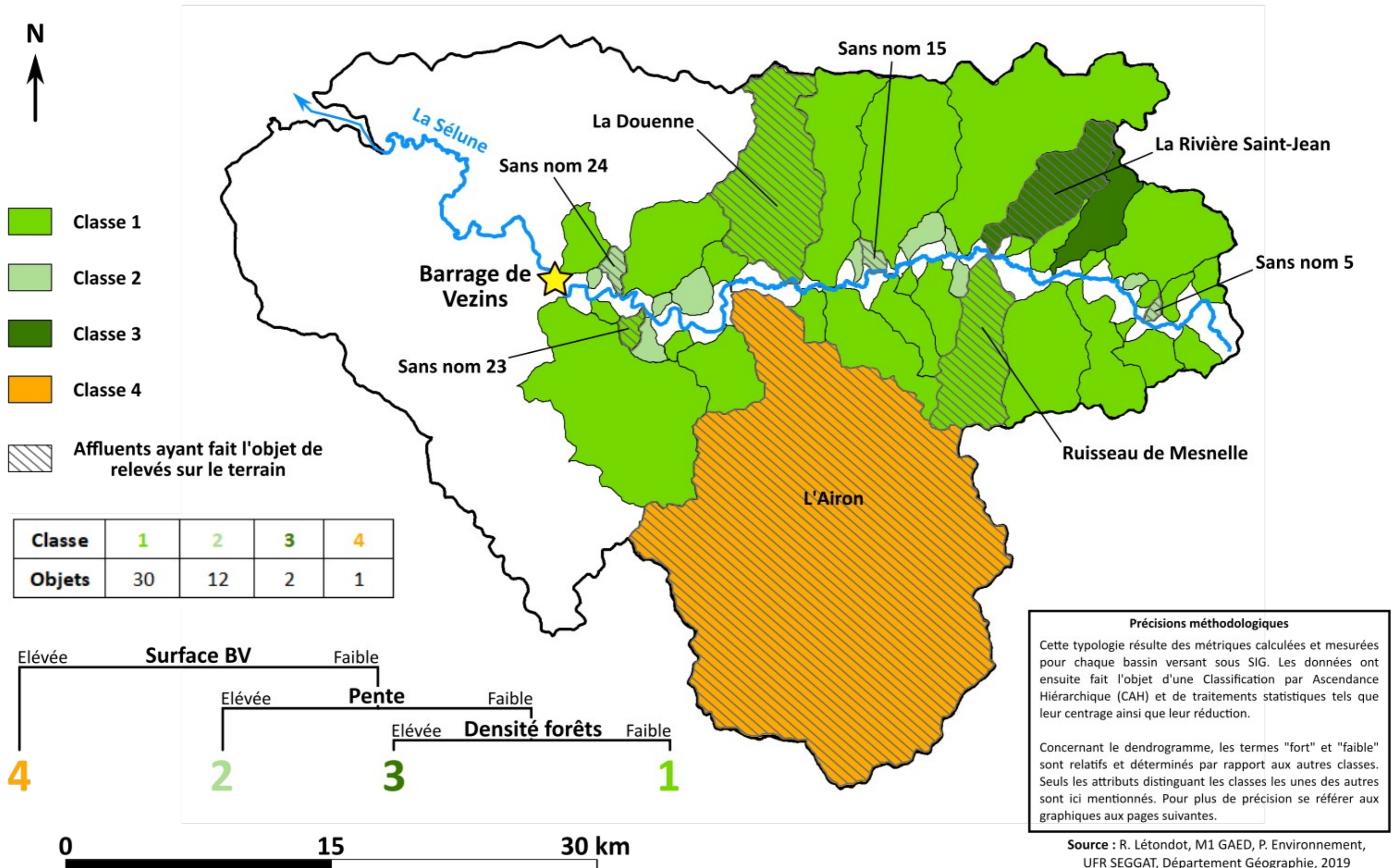


Figure 4.13 : Cartographie de la typologie des affluents en amont du barrage de Vezins (R. Létondot, 2019)

Les 45 affluents paraissent ici **relativement bien répartis** tout le long du cours d'eau principal avec un taux de confluence moyen de **0,8 affluent au km** sur les 57 km de linéaire. En effet, hormis les classes 3 et 4 qui ne possèdent que 2 et 1 affluents, les bassins versants faisant partie des classes 1 et 2 s'observent **tant en amont qu'en aval de la zone d'étude** (Figure 4.13). C'est pour ces raisons que **les 8 affluents ayant fait l'objet de relevés sur le terrain** ont été choisis sur tout ce linéaire. Concernant leurs caractéristiques, ces derniers sont illustrés par **les graphiques des barycentres de chaque classe** (Figure 4.14 et 4.15). Ne représentant pas suffisamment la variabilité intra-classe, la généralisation finale devra être nuancée selon les différences entre les affluents d'une même classe.

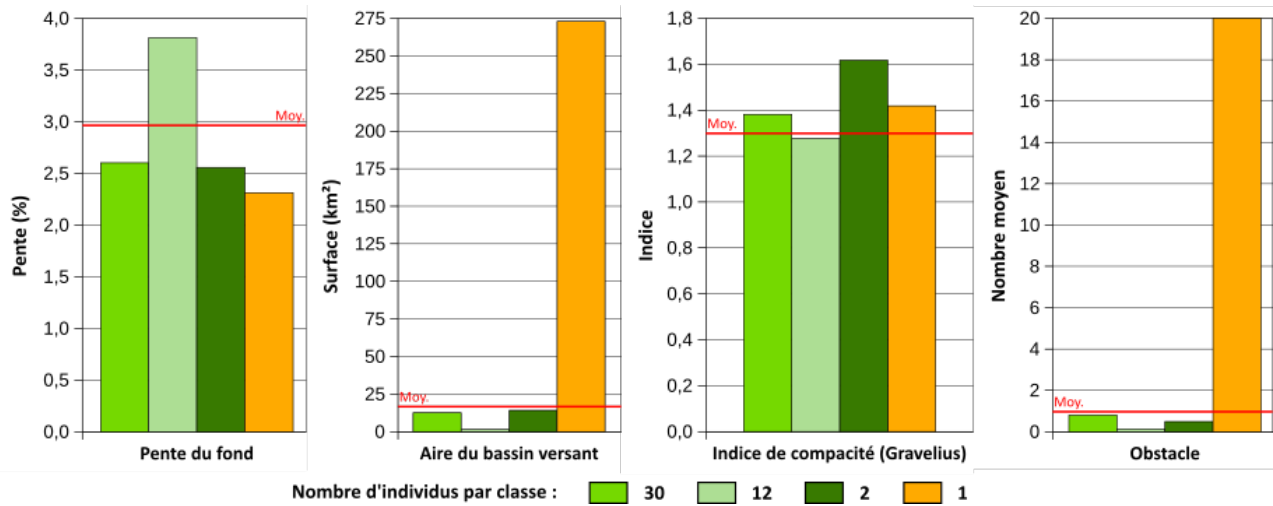


Figure 4.14 : Caractéristiques "physiques" des affluents par classe (R. Létondot, 2019)

Grâce à ces graphiques on remarque que **les valeurs de pente sont assez homogènes** entre les classes **excepté pour la classe 2** pour laquelle le barycentre est de 3,8 % (Figure 4.14); ces affluents étant de petits cours d'eau incisés dans le relief abrupt des rives de la Sélune dans ces secteurs. Les superficies des bassins versants montrent que ces derniers sont **globalement de même taille** sauf celui de l'Airon, seul affluent de la classe 4, qui dépasse les 270 km² (Figure 4.14). **La très faible variabilité de l'indice de compacité** démontre quant à elle que ce critère ne devrait pas trop influencer les différences de potentiel d'apports solides entre les affluents (Figure 4.14). Enfin, **le nombre d'obstacles à l'écoulement** sera utile pour justifier le fait que certains affluents d'une même classe peuvent ne pas produire autant de sédiments que les autres en raison de **ces aménagements pouvant les retenir** plus en amont comme sur l'Airon (Figure 4.14).

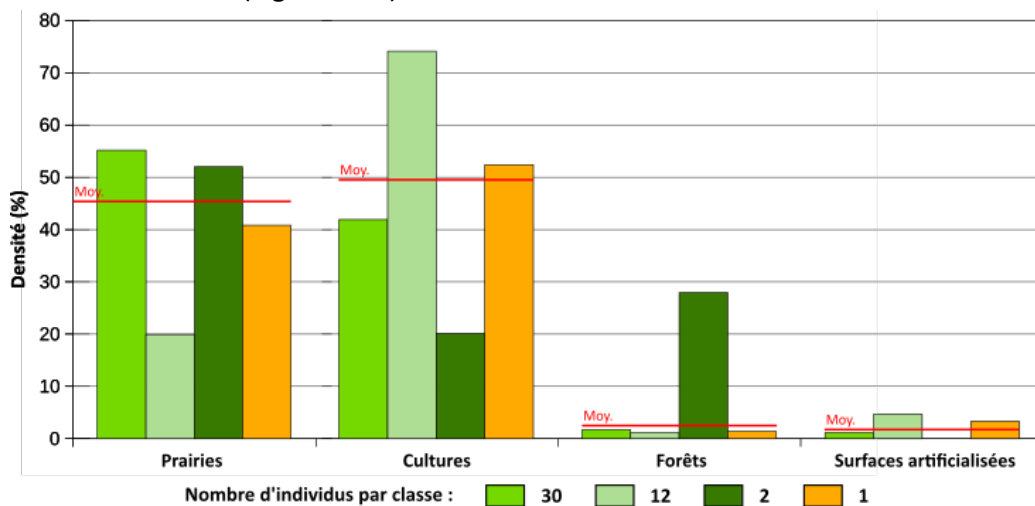


Figure 4.15 : Densité des occupations du sol par classe (R. Létondot, 2019)

Concernant **l'occupation du sol** sur chaque bassin versant, celle-ci a été récupérée grâce à la

banque de données nationales Corinne Land Cover. En général, elle reflète bien **la dominance des paysages ruraux et agricoles** pour l'ensemble des bassins versants (Figure 4.15). On remarque que lorsque **la densité de prairies est faible, celle de culture est plus élevée** et inversement. C'est notamment le cas des classes 2 et 3 (Figure 4.15). La **densité de forêts est elle très marquée pour la classe 3** dont les bassins versants se trouvent à proximité de la forêt de Mortain. Comme on pouvait s'y attendre, **les surfaces artificialisées (bâti, route...) occupent peu de place** au sein des bassins versant de cette région (Figure 4.15).

L'étude de **8 affluents** sur le terrain à alors été entreprise afin d'obtenir suffisamment de données statistiques afin d'effectuer par la suite une généralisation par classe. L'identifiant sans nom x à été attribué aux affluents ne possédant pas de nom. Les caractéristiques de **chacun de ces cours d'eau** étant répertoriées dans le tableau ci-dessous (Figure 4.16) :

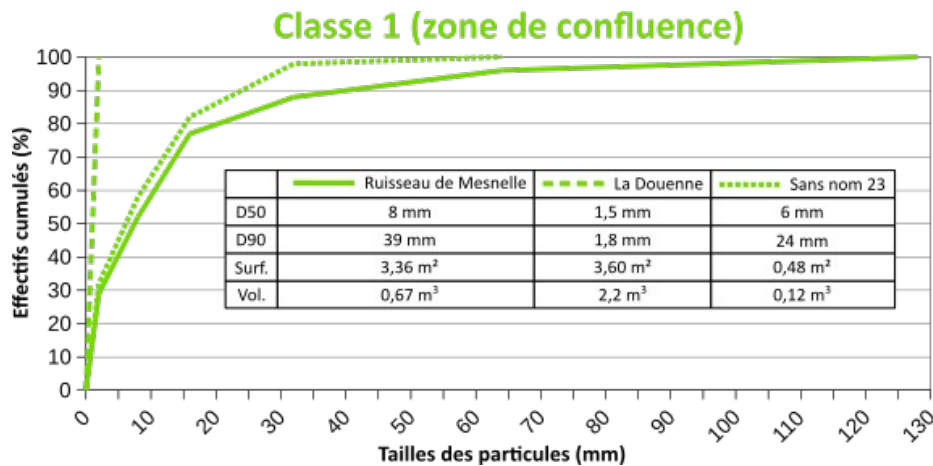
Affluent	Classe	Pente (%)	Aire BV (km ²)	Indice de compacité	Nombre d'obstacle	Densité prairies	Densité culture	Densité forêts	Densité surf. artif.
Ruisseau de Mesnelle	1	2,5	21,6	1,4	1	51,2	46,4	1,3	1,1
La Douenne	1	1,8	39,9	1,5	7	54,5	40,9	2,7	1,9
Sans nom 23	1	4,9	1,7	1,3	0	76,8	22,9	0	0,04
Sans nom 5	2	3,3	0,6	1,3	0	23,5	76,5	0	0
Sans nom 15	2	2,3	1,4	1,6	0	57,2	15,6	27,1	0
Sans nom 24	2	3,0	1,8	1,3	0	0	96,7	1,9	0
La rivière Saint-Jean	3	2,1	17,9	1,6	1	57,2	15,6	27,2	0
L'Airon	4	2,3	273,1	1,42	20	40,8	52,4	1,4	3,3
Écart au barycentre	Très fort (-)		Fort (-)		Proche		Fort (+)		Très fort (+)

Figure 4.16 : Caractéristiques et écarts aux barycentres des affluents étudiés (R. Létondot, 2019)

Ces affluents on ainsi été choisis de façon à obtenir **une situation moyenne** pour chaque classe tout en relevant **certaines spécificités** observables à l'intérieur de celles-ci. **La classe 1** représente la classe dite « **moyenne** » de cette typologie. Les affluents choisis sont donc assez proches de la moyenne des barycentres (Figure 4.14 et 4.15). **La classe 2** est elle caractérisée par **des cours d'eau aux petits bassins versants** et à **la pente** plus élevée que la moyenne. Les trois affluents étudiés ont donc pour vocation de relever ces spécificités (Figure 4.16). **La classe 3** est elle très proche de la 1 à ceci près que **la densité de forêts y est très importante**. Ne contenant que 2 individus un affluent à donc été étudié pour cette classe (Figure 4.16). Enfin, **la classe 4** ne comporte qu'un seul affluent très atypique : l'Airon. L'analyse de ce cours d'eau au **très grand bassin versant** est pertinente car il pourrait à lui seul fournir beaucoup de charge solide (Figure 4.16). Tous ces paramètres seront donc mis en relation avec **l'importance de la charge de fond de chaque affluent étudié ainsi que sa granulométrie** afin de réaliser **une généralisation à l'ensemble de la classe**. Le potentiel d'apport solide sera alors déterminé pour chacune d'entre elles.

Les formes d'accumulation ainsi que plusieurs radiers, quand cela était possible, ont été analysés en termes **de dynamisme morphogène et de granulométrie** sur chacun de ces affluents. **Une synthèse** de chaque classe a donc été réalisée.

- Classe 1 :



	Ruisseau de Mesnelle			La Douenne			Sans nom 23		
	D50	D90	l/p	D50	D90	l/p	D50	D90	l/p
Radier 1	22 mm	56 mm	2,7	1,8 mm	7,1 mm	2,5	11 mm	40,5 mm	1,3
Radier 2	25mm	59 mm	2,6	3,8 mm	11,9 mm	2,9	8 mm	32 mm	1,2
Radier 3	26 mm	60 mm	2,7						

Figure 4.17 : Résultats des mesures terrains pour les affluents de la classe 1 (R. Létondot, 2019)

Les trois affluents étudiés pour la classe 1 illustrent une certaine diversité dans les apports solides de cette dernière. **Le ruisseau de Mesnelle** possède un certain potentiel avec une forme d'accumulation d'une surface de 3,36 m² et d'un volume de 0,67 m³ et d'une granulométrie comprise entre les graviers grossiers et les cailloux grossiers (Figure 4.17). Les radiers situés plus en amont confirment ce dynamisme avec un D50 (médiane) d'une valeur de 22 à 26 mm et un D90 de 56 à 60 mm. Les rapports l/p révélant au dynamisme morphogène relativement moyen (Figure 4.17 et 4.18).

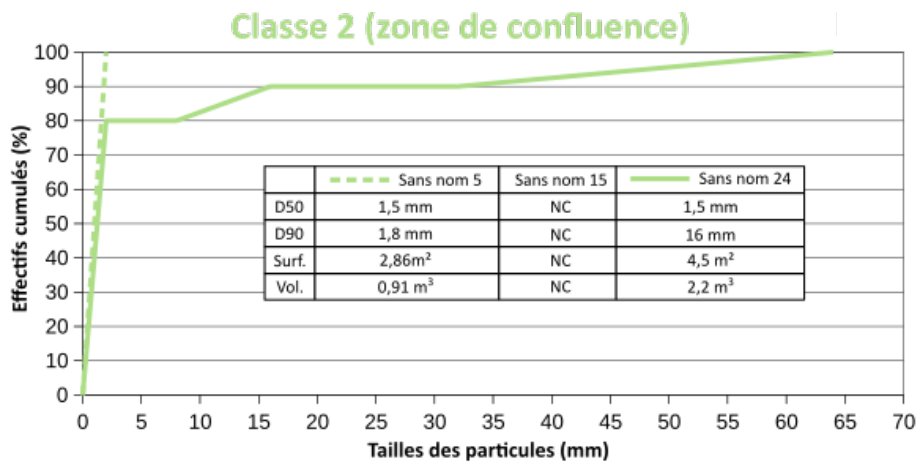


Figure 4.18 : Photographie des affluents de la classe 1 (R. Létondot, 2019)

L'affluent **Sans nom 23** possède un **potentiel similaire** bien que légèrement inférieur. La forme d'accumulation à la confluence étant moins marquée et de granulométrie moins grossière. Toutefois,

les D90 des radiers montrent tout de même la présence de cailloux grossiers. Les faibles rapports l/p s'expliquent eux par la localisation du cours d'eau dans l'ancienne retenue et **sa forte incision** au sein des sédiments avec **une pente s'élevant à 4,9 %** (Figure 4.16, 4.17 et 4.18). **La Douenne** est elle un cas particulier dans cette classe. En effet, les D90 de sa zone de confluence mais également de ses radiers **ne dépassent jamais les 12 mm** et les D50 démontrent l'omniprésence des sables qui constitue toute la forme d'accumulation. Ces caractéristiques sont probablement liées à **la présence de 7 obstacles à l'écoulement** sur cet affluent ce qui viendrait bloquer la charge grossière encore plus en amont (Figure 4.16 et 4.17).

- Classe 2 :



	Sans nom 5			Sans nom 15			Sans nom 24		
	D50	D90	l/p	D50	D90	l/p	D50	D90	l/p
Radier 1	3 mm	10 mm	2,09	1,5 mm	1,5 mm	1,7	7 mm	29 mm	1,1
Radier 2	4 mm	14 mm	1,18	1,8 mm	1,8 mm	2,2	2 mm	22 mm	0,7
Radier 3	2 mm	14 mm	2,2						

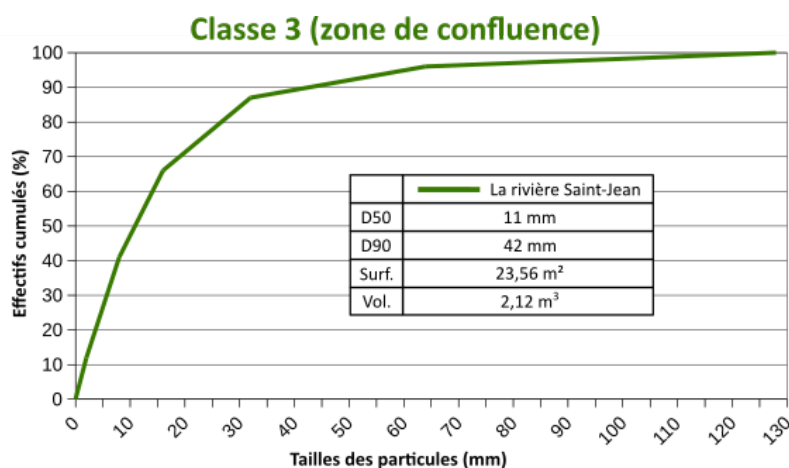
Figure 4.19 : Résultats des mesures terrains pour les affluents de la classe 2 (R. Létondot, 2019)

La classe 2 correspond aux affluents **les plus petits** de la typologie. On constate des apports solides très faibles et **une dominance du transport de particules comprises entre 0 et 5 mm** (sables et graviers fins). On retrouve quelque cailloux fins dans l'affluent **Sans nom 5** avec des D90 des radiers en amont s'élevant autour de 14 mm mais ses rapports l/p et la composition de sa forme d'accumulation de 2,86 m² démontrent **le faible dynamisme de ce cours d'eau** au bassin versant de seulement 0,6 km² (Figure 4.16, 4.19 et 4.20). Le **Sans nom 15** relevant plus **du fossé** que du cours d'eau, celui-ci ne produit que des sédiments très fins et ne possède **pas de forme d'accumulation à sa confluence** (Figure 4.19). Les sédiments n'y sont d'ailleurs pas plus grossiers en amont et l'apport de cet affluent en charge grossière est donc nul (Figure 4.19). Étant donné **sa faible pente ainsi que la taille de son bassin versant** cela n'est pas étonnant. Le dernier affluent de cette classe, le **Sans nom 24**, possède quant à lui un **potentiel d'apports solides grossiers légèrement plus important**. En effet, avec une forme d'accumulation d'un volume de 2,2 m³ à la confluence celui-ci fournit à la Sélune quelques particules grossières telles que **des graviers grossiers ou cailloux fins** que l'on retrouve notamment sur certains radiers plus en amont (D90 à 22 et 29 mm). Ce dynamisme étant lié, comme l'illustrent ses faibles rapport l/p à **son incision dans les sédiments** à proximité du barrage (Figure 4.19 et 4.20).



Figure 4.20 : Photographie des affluents de la classe 2 (R. Létondot, 2019)

- Classe 3 :



La rivière Saint-Jean			
	D50	D90	l/p
Radier 1	13 mm	39 mm	3,2
Radier 2	16 mm	53 mm	4,6
Radier 3	24 mm	62 mm	4,6

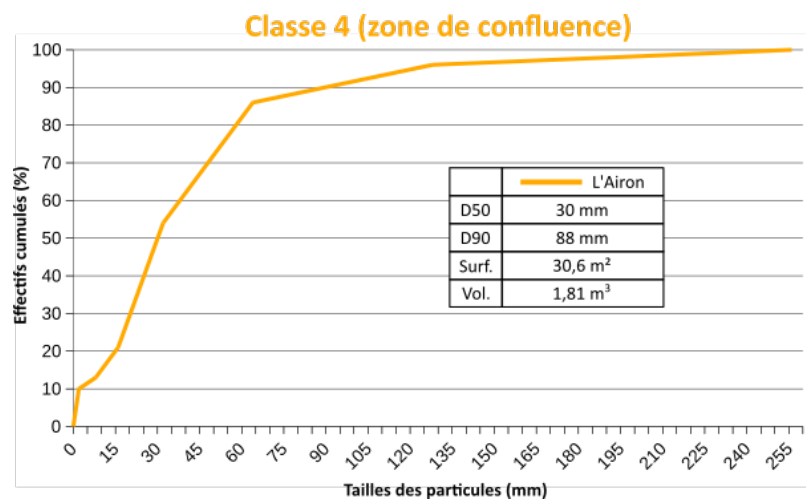
Figure 4.21 : Résultats des mesures terrains pour l'affluent de la classe 3 (R. Létondot, 2019)

La classe 3 ne contenant que deux affluents, un seul d'entre eux a fait l'objet de mesures sur le terrain. **La rivière Saint-Jean** est un cours d'eau moyen dont les caractéristiques sont très proches de la classe 1 hormis la densité de forêt. On remarque que cela n'a pas l'air de jouer énormément sur sa charge solide. On y observe **une forme d'accumulation à la confluence conséquente** notamment en terme de surface et composée de matériaux plutôt grossiers (graviers grossiers à cailloux grossiers) avec un D50 à 11 mm et un D90 à 42 mm (Figure 4.21). Un constat similaire est fait sur les radiers situés plus en amont dont **la granulométrie médiane avoisine les 20 mm** avec un dernier décile qui lui gravite autour de **50 mm**. Les rapports l/p viennent confirmer ce dynamisme hydro-sédimentaire cette fois plus marqué de cet affluent (Figure 4.21 et 4.22).



Figure 4.22 : Photographie de l'affluent de la classe 3 (R. Létondot, 2019)

- Classe 4



	L'Airon		
	D50	D90	l/p
Radier 1	20 mm	60 mm	10,7
Radier 2	26 mm	96 mm	4,5
Radier 3			

Figure 4.23 : Résultats des mesures terrains pour l'affluent de la classe 4 (R. Létondot, 2019)

En analysant les résultats granulométriques obtenus sur **l'Airon** on comprend rapidement pourquoi celui ci constitue **la classe 4** à lui tout seul. En effet, avec une forme d'accumulation à la confluence de 30,06 m² pour 1,81 m³ et **un D50 à 30 mm ainsi qu'un D90 à 88 mm**, cet affluent possède **la charge la plus grossière de tous** (Figure 4.24). Les deux radiers qui ont pu être traités reflètent également **cette importance de la charge solide** avec une taille des particules médianes autour **de 23 mm et des D90 à 60 et 96 mm** (Figure 4.19). Les rapports l/p ne sont cependant pas ici très représentatifs en raison de la localisation des radiers (élargissement brutal et aménagement anthropique).



Figure 4.24 : Photographie de l'affluent de la classe 4
(R. Létondot, 2019)

Analyses et discussions des résultats :

Les **30 affluents** de la **classe 1** possèdent donc un **potentiel d'apport solide non négligeable** notamment en particules comprises entre les graviers fins et les cailloux grossiers. Toutefois, la variabilité observée sur les trois affluents indique que les cours d'eau de cette classe ne sont **pas forcément tous des producteurs de sédiments grossiers** et que la pente, la surface du bassin versant et le nombre d'obstacles, influencent beaucoup leur dynamisme morpho-sédimentaire. Les **12 affluents** de la **classe 2** sont eux caractérisés par un **faible, voire très faible, potentiel d'apports solides**. Selon les résultats des mesures sur le terrain, ils ne fourniraient que **de la matière très fine** à la Sélune et n'auraient alors que peu d'influence sur les futurs réajustements. Cela s'explique d'une part par **les faibles tailles des bassins versants** concernés mais aussi possiblement par les **fortes densités de surface en cultures** qui fournissent, par ruissellement, une quantité importante de particules fines aux cours d'eau. La **pente** plus élevée que la moyenne de ces affluents, leur permet tout de même de charrier **quelques matériaux plus grossiers**, sûrement remobilisés lors des crues. La **classe 3** paraît elle posséder un **potentiel d'apports solides** équivalent à la classe 1. Toutefois, les valeurs des tailles des particules légèrement supérieures peuvent laisser penser que ces deux affluents constituent **des producteurs importants de la charge solide** qui se retrouve ensuite dans la Sélune. Cependant, il est difficile d'estimer si c'est réellement l'occupation du sol qui en est à l'origine ou le simple choix des affluents effectué au début. Enfin, la raison principale qui explique les résultats de la **classe 4** est la **taille de l'affluent et de son bassin versant** qui s'étend sur 273 km² (Figure 4.16). De plus, la **présence de 20 obstacles** à l'écoulement conduit probablement à une sous-estimation de ce dynamisme sédimentaire.

Cette typologie à ainsi permis de mettre en évidence **les différents potentiels d'apports solides des affluents** la Sélune en amont du barrage de Vezins. Les **classes 1 et 3** représentent des **sources de sédiments moyennes**, avec notamment la fourniture de particules comprises entre les graviers fins et les cailloux grossiers. La pente faible à moyenne et l'occupation de sols correspondant majoritairement à des prairies et cultures justifiant ces résultats. La **classe 2** quant à elle **ne joue quasiment aucun rôle dans les apports solides** de la Sélune puisqu'elle n'est constituée que de petits affluents dont la charge sédimentaire ne dépasse que très marginalement les graviers grossiers. La **classe 4** représente elle un **affluent au fort potentiel d'apport en charge grossière** malgré le fait qu'une seule rivière la compose.

La Sélune reçoit donc des apports sédimentaires typiques des milieux de faible à moyenne énergie avec **une prédominance de matériaux fins** voir très fins liés aux caractéristiques physiques des bassins versants et des sols. Toutefois, le nombre d'affluent produisant tout de même une charge

grossière pourrait permettre, sur un temps plus ou moins long, **la réactivation des processus morphologiques** (érosion, dépôt) dans la zone de l'ancienne retenue et sur les trois sites étudiés. La taille de ces sédiments étant de surcroît, **favorables à la reproduction des salmonidés** dans les zones de frai.

Reste alors la question de **la remobilisation de cette charge par la Sélune**. En effet, bien que ces affluents possèdent un certain potentiel d'apport solide, il faudra que le fleuve soit en mesure de les transporter une fois dans son chenal afin de **rétablir l'équilibre** sur tout son linéaire. On note qu'entre la plupart de ces affluents et le barrage de Vezins, **deux ouvrages en travers** pourraient **ralentir ce transport de la charge de fond**. L'étude du remplissage de ces-derniers pourrait donc venir compléter cette hypothèse. **Le dynamisme morpho-sédimentaire** ne pourra, dans tous les cas, être moins élevé que la situation *ante*-ouverture du barrage lorsque la retenue empêcher tous transport et transfert de sédiments grossiers.

Transition :

Les capacités de résilience théoriques de la Sélune sont donc définies par ces trois critères (puissance spécifique, degré d'érodabilité des berges et apports solides) qui définissent son score géodynamique. Ainsi, on constate que, fidèle à **son contexte physique** (topographie, géologie, climat...), ce fleuve est caractérisé par **une énergie moyenne** qui induit une possibilité de réajustement du système fluvial mais **sur un temps relativement long**. De plus, **l'inégalité de ce score géodynamique** entre les sites étudiés montre que ces réajustements ne suivront pas partout la même évolution. Le site le plus amont, le Pont de la République semble propice à **la rediversification des faciès d'écoulement** alors que le tronçon passant sous le Pont des Biards y paraît peu enclin. La Mazure présente la particularité de pouvoir se réajuster au sein d'une large plaine alluviale en rive droite malgré la contrainte du versant en rive gauche. **L'atteinte du nouvel équilibre dynamique** est donc potentiellement envisageable sur ce linéaire correspondant à l'ancienne retenue, mais il est difficile d'**estimer les durées** sur lesquelles s'étendront **les temps de réaction et de relaxation** de ce cours d'eau qui dépendront notamment de son hydrologie dans les années à venir.

Dans cette optique, **les travaux de restauration** sur ce tronçon auront **un rôle très important** dans **la réadaptation du système**. Ayant comme objectif de redonner à la Sélune sa dynamique « naturelle » et « originelle », **ils impactent forcément son potentiel de réajustement** et pourraient être à l'origine d'un **ralentissement ou d'une aggravation des processus hydromorphologiques** du fleuve. Avec l'abaissement du niveau d'eau, **de nouvelles formes fluviales vont émerger** et il s'agira donc de comprendre comment leur construction/évolution pourrait **être contrainte par des aménagements anthropiques hérités** ou par **les interventions plus récentes** liées au dérasement du barrage.

4.3. Un cours d'eau anthropisé : les contraintes aux réajustements

4.3.1. La morphologie de la Sélune *post-ouverture* : entre aménagements anciens et nouvelles formes fluviales

Les **conséquences de l'abaissement du niveau d'eau sur la morphologie de la Sélune** au sein de l'ancienne zone de retenue ont été immédiates. Les quelques **250 points GPS relevés** (Figure 4.25) plus les **linéaires de caractérisation des berges** vont alors permettre de caractériser le secteur étudié en montrant comment les **nombreux aménagements historiques** présents sur le fleuve peuvent influencer sur ces formes.

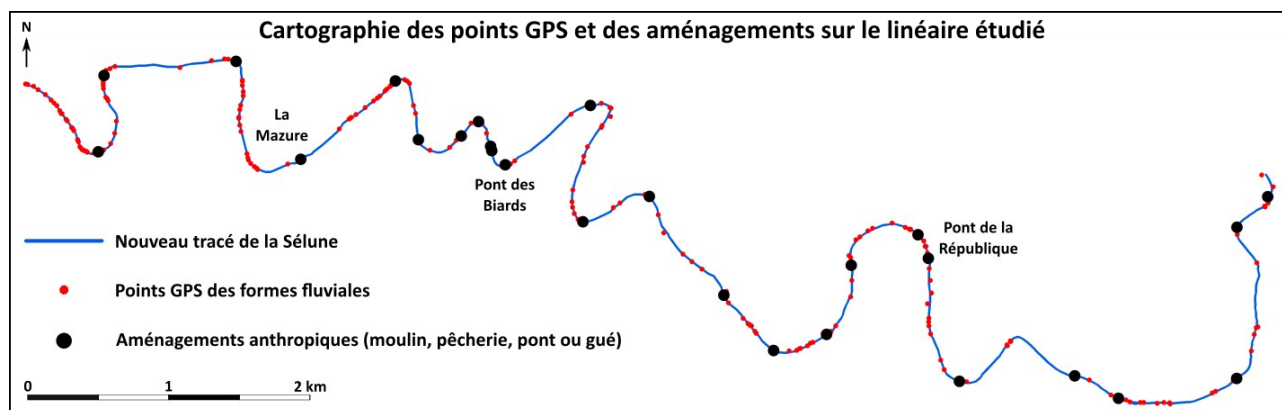
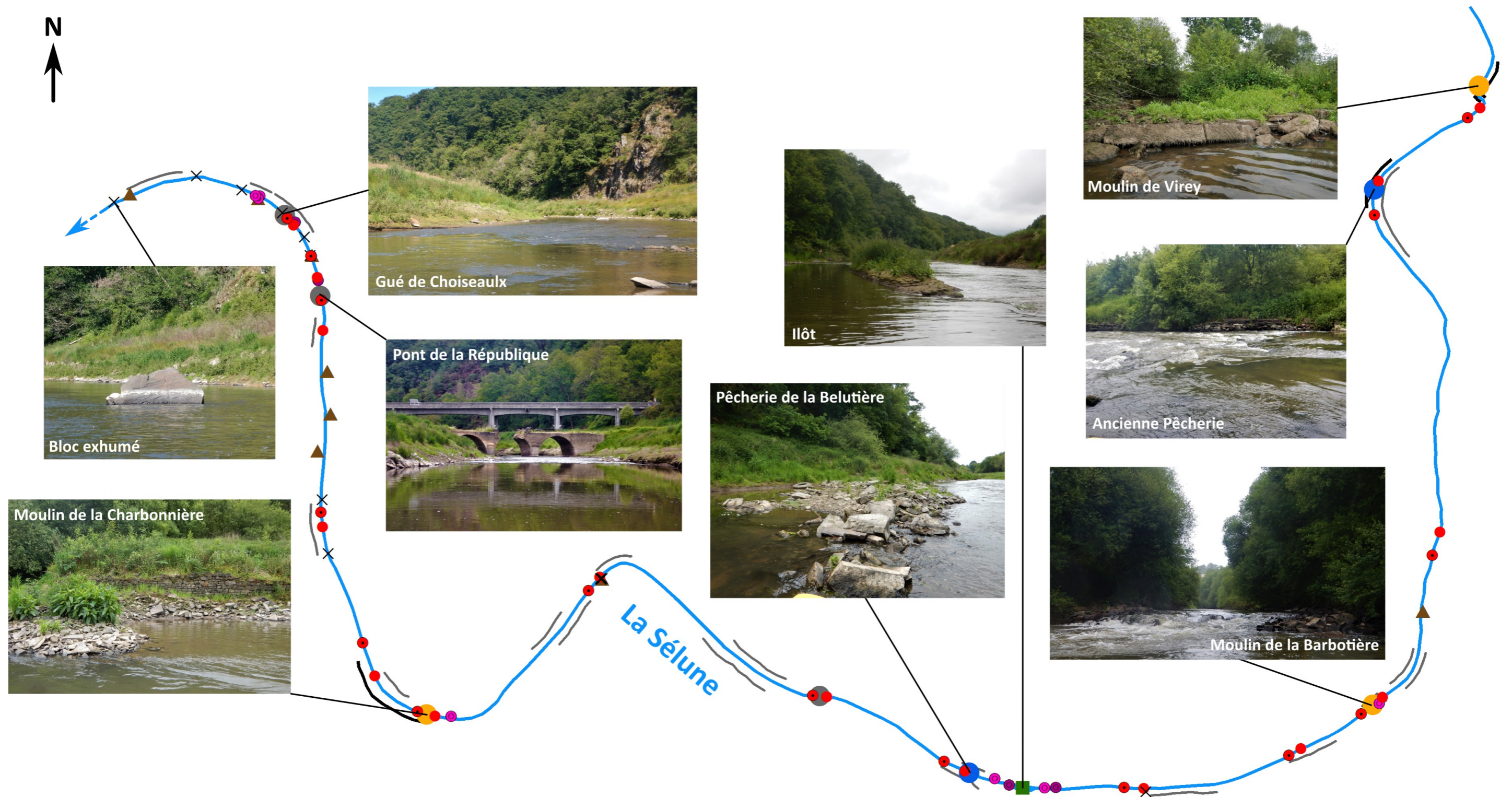


Figure 4.25 : Localisation des points GPS résultant de la campagne de terrain (R. Létondot, 2019)

Cette carte montre que **la densité des points varie tout au long du linéaire** étudié. Un premier secteur en amont du Pont de la République semble présente **une densité de formes** plus faible avec environ 8 formes (radiers, blocs, bancs d'accumulation, glissement de berge, îlot) au kilomètre. Cette densité **augmente de plus en plus vers l'aval** avec une densité de 10 formes au km pour les 5 kilomètres suivant et de 14 pour les 5 derniers (Figure 4.25). Nous remarquons également le **grand nombre d'aménagements** (moulins, pêcheuries, ponts et gués confondus) sur tout le linéaire avec une densité de 1,7 aménagement au kilomètre. Il a donc été choisi de découper tout le tronçon étudié en **trois sous-tronçon de longueur identiques** de 5 km chacun afin d'effectuer une analyse comparative en fonction de la distance en amont du barrage.

La **cartographie de ces formes** permet alors de comprendre leur répartition spatiale et d'obtenir un aperçu des **conditions morphologiques dans la zone de l'ancienne retenue** suite à l'abaissement du niveau d'eau.

Cartographie des formes fluviales du secteur 1



Formes fluviales :

- ● Radiers (Début/Fin)
- Bancs d'accumulation (< sables à graviers)
- Bancs d'accumulation (cailloux à blocs)
- × Blocs exhumés (points durs)
- Îlots végétalisés

Caractérisation des berges* :

- Lignes de blocs
- Murets/empierrements
- ▲ Glissements

Aménagements anthropiques :

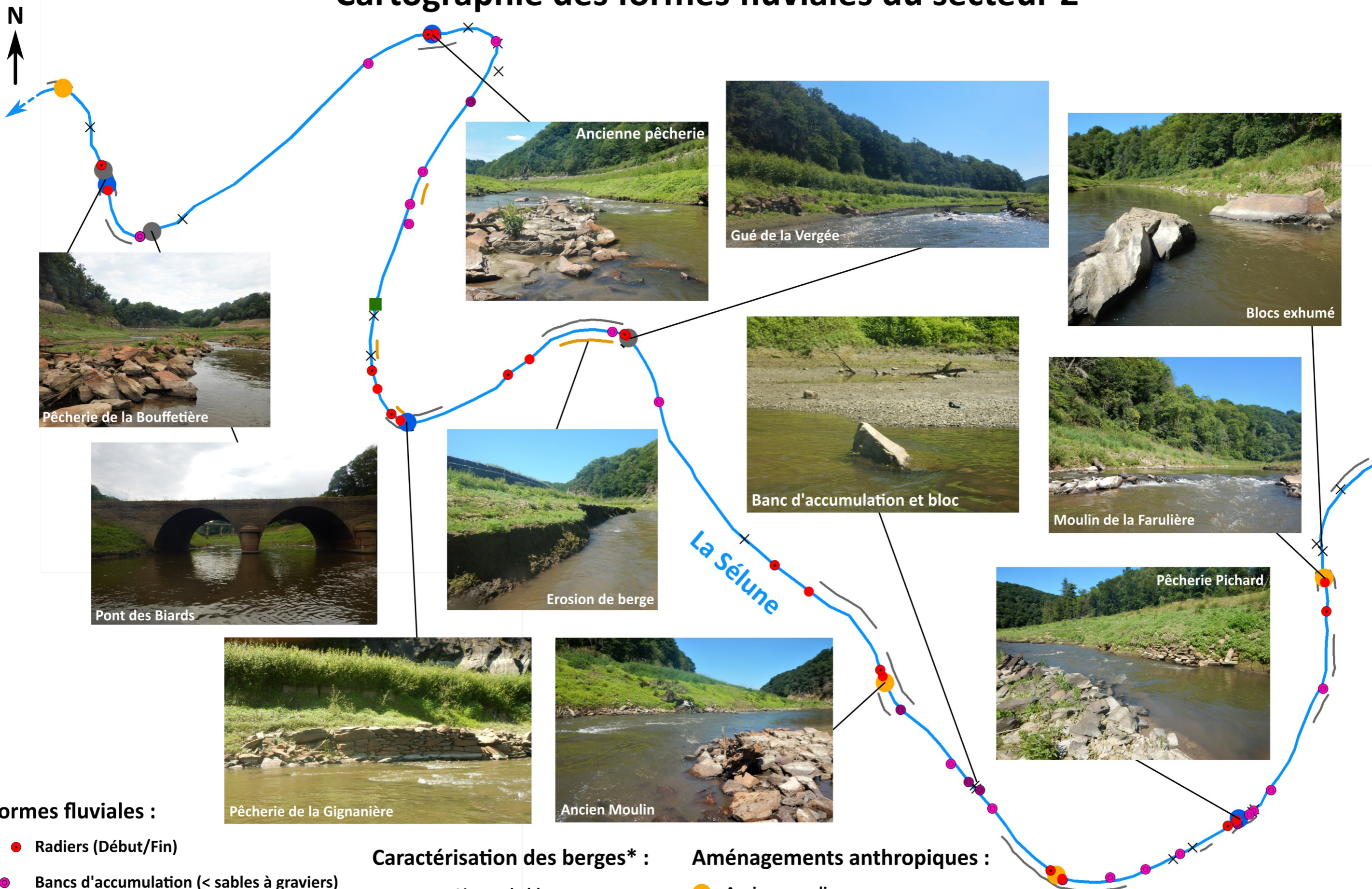
- Anciens moulins
- Traces de pêcheries
- Anciens gués ou ponts

*Le positionnement des berges ne représente ici pas la réalité de terrain (distance au cours d'eau) pour des questions de lisibilité

0 250 500 m

Figure 4.26 : Cartographie des formes fluviales et anciens aménagements du secteur 1 (R. Létondot, 2019)

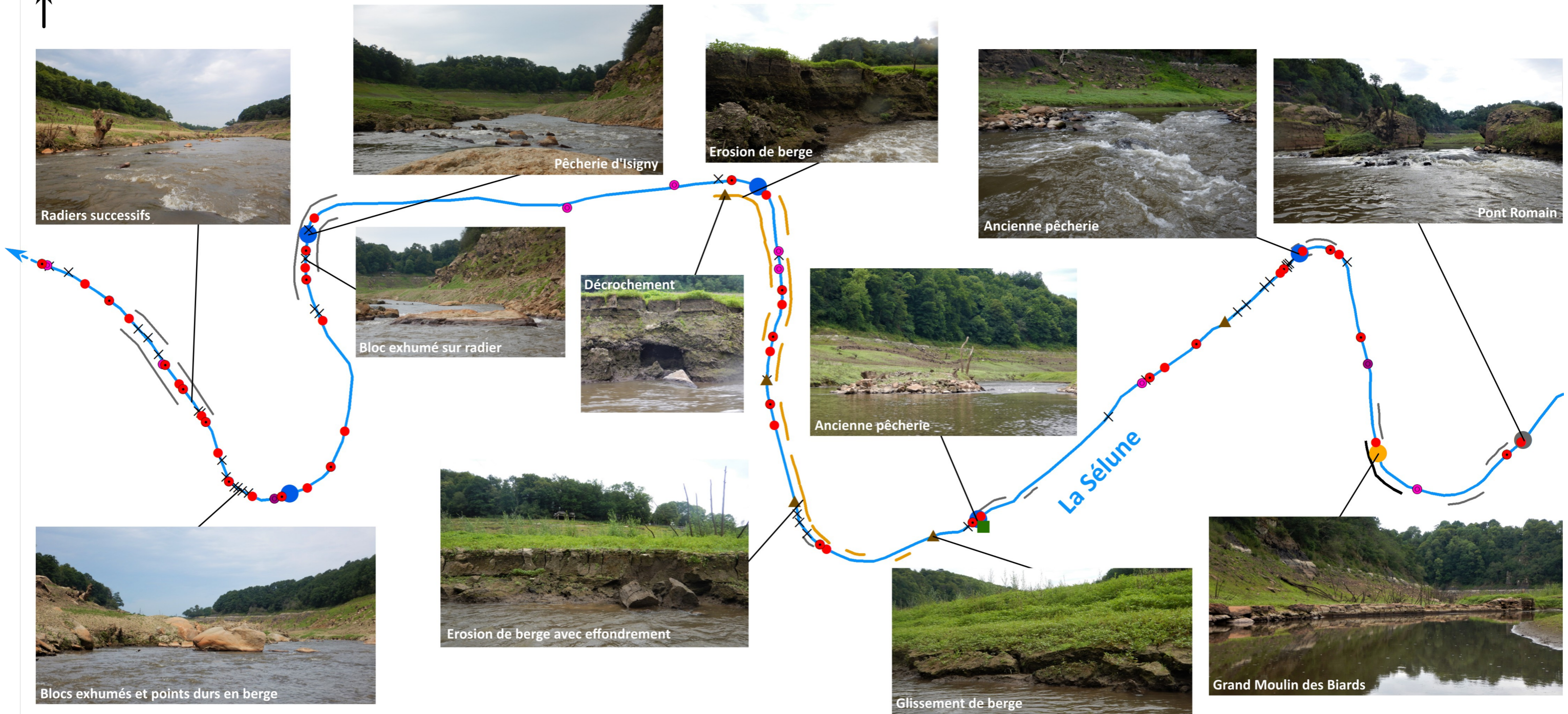
Cartographie des formes fluviales du secteur 2



*Le positionnement des berges ne représente ici pas la réalité de terrain (distance au cours d'eau) pour des questions de lisibilité

Figure 4.27 : Cartographie des formes fluviales et anciens aménagements du secteur 2 (R. Létondot, 2019)

Cartographie des formes fluviales du secteur 3



Formes fluviales :

- ● Radiers (Début/Fin)
- Bancs d'accumulation (< sables à graviers)
- Bancs d'accumulation (cailloux à blocs)
- × Blocs exhumés (points durs)
- Ilôts végétalisés

Caractérisation des berges* :

- Lignes de blocs
- Murets/empierrements
- Erosion/sapement
- ▲ Glissements

Aménagements anthropiques :

- Anciens moulins
- Traces de pêcheries
- Anciens gués ou ponts

*Le positionnement des berges ne représente ici pas la réalité de terrain (distance au cours d'eau) pour des questions de lisibilité

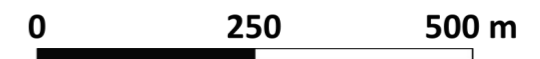


Figure 4.28 : Cartographie des formes fluviales et anciens aménagements du secteur 3 (R. Létondot, 2019)

Secteur	Densité de radiers au km	Densité de bancs au km	Densité de blocs au km	Nombre de glissements	Pourcentage de berges protégées	Pourcentage de berges érodées	Nombre d'aménagements
1	3	1,8	1,8	1,2	22	0	8
2	2,2	3,8	3,2	0	14,5	1,8	11
3	4,4	1,8	7,2	1	12,5	9	7

Figure 4.29 : Fréquences des formes sur les trois secteurs étudiés (R. Létondot, 2019)

Le secteur 1 débute au Pont de Virey pour se terminer environ 500 m en aval du Pont de la République (Figure 4.26). Il s'agit de la zone la plus en amont du barrage de Vezins qui a donc été la moins influencée par la retenue avant son ouverture. En effet, du Moulin de Virey jusqu'à celui de la Barbotière il semble que le cours d'eau n'est pas significativement changé de niveau depuis les travaux, la zone de remous touchant à sa fin. C'est d'ailleurs sur ce tronçon que la densité des formes fluviales est la plus basse, probablement en raison de la présence de ces anciens moulins. On découvre ensuite peu à peu le paysage dennoyé de la vallée (Figure 4.26). Avec un indice de sinuosité de 1,93 le nouveau tracé du fleuve qui suit ici la topographie peut être considéré comme à méandre (Malavoi et Bravard, 2010). Ces méandres étant provoqué par la géologie qui impose ici cette sinuosité.

Concernant les formes fluviales à proprement parler, on retrouve ici 15 radiers d'une longueur moyenne de 45 m (dont au moins 8 sont anthropiques) sur les 5 km du tronçon, c'est à dire environ 3 par km avec 1,6 radiers anthropique par km (Figure 4.26). Les bancs d'accumulation répertoriés sont eux principalement constitués de matériaux fins et se forment notamment en amont des obstacles à l'écoulement (ouvrage, bloc...) (Figure 4.26). Leur densité s'évalue à 1,8 bancs au km. Les points durs exhumés, parfois de taille importante, commencent également à être visibles en approchant du Pont de la République et leur densité s'élève également à 1,8 par km. (Figure 4.26 et 4.29).

La particularité de ce secteur réside dans les nombreuses protections de berge, et notamment des lignes de blocs ou empièvements, qui se retrouvent sur tout le linéaire et qui représente 22 % de la longueur des berges totales (rive droite et rive gauche) (Figure 4.26 et 4.29). Parfois imposante comme au niveau du Moulin de la Charbonnière, elles témoignent des aménagements anciens (pêcheries, moulins, gués et ponts) qui façonnent le paysage (Figure 4.26). On remarque d'ailleurs que des glissements de berge sont visibles, notamment sur le site du Pont de la République où aucune protection n'a été mise en place (Figure 4.26 et 4.29)

Le secteur 2 concerne les 5 km qui suivent jusqu'au Petit Moulin des Biards (Figure 4.27). On y remarque une plus grande densité des formes qui se trouvent exondées par l'abaissement du niveau d'eau. Le nouveau tracé du cours d'eau, s'écoule dans des gorges encore plus encaissées qu'auparavant avec un indice de sinuosité de 1,91 (cours d'eau à méandre), encore une fois induit par la configuration du relief qui contraint ici la mobilité du fleuve.

Avec cette fois 11 radiers (dont 7 anthropiques) d'une longueur moyenne de 40 m et d'une densité de 2,2 au km (Figure 4.27 et 4.29) nous remarquons que la majorité d'entre eux sont donc liés aux aménagements. On constate un nombre conséquent de bancs d'accumulation, encore une fois composés majoritairement de matériaux fins, qui résultent de la remobilisation des sédiments de l'ancienne retenue par le cours d'eau et dont la densité s'élève à 3,8 au km (Figure 4.29). Ce processus est ainsi très marqué entre les deux anciens moulins à la fin du premier méandre (Figure 4.27). Quelques blocs exhumés sont également visibles notamment en pied de berge (Figure 4.27). L'îlot aujourd'hui végétalisé d'une ancienne pêcherie représente un élément atypique (Figure 4.27). Par ailleurs, il est important de noter l'absence de formes sur un linéaire d'environ 500 m en amont du Pont des Biards (Figure 4.27), secteur où les travaux de remaniement ont été très importants.

Les berges sont encore caractérisées par la présence de **plusieurs lignes de blocs parfois longues de deux cent à trois cent mètres** et localisées en rive concave. De plus, des murets sont souvent présents en début de ligne comme à la pêcherie de la Gigannière (Figure 4.27). Ces protections représentent alors 14,5 % du linéaire de berge. C'est toutefois à proximité du Gué de la Vergée que **les premières traces d'érosion marquées** des berges sont visibles (Figure 4.27). Représentant 0,8 % du linéaire elles révèlent les premiers réajustements latéraux de la Sélune (Figure 4.27 et 4.29).

Le secteur 3 constitue la dernière partie du linéaire étudié et se termine à la confluence de l'Isolant un peu en amont du barrage. Le cours d'eau n'a **plus rien à voir avec les anciens lacs** et ses méandres viennent **longer les pieds de versant** en rive concave. Son **indice de sinuosité de 1,7** montre l'aspect légèrement **plus rectiligne de ce tronçon** bien qu'il soit toujours considéré comme à méandre et que son tracé soit imposé par la géologie et le relief (Figure 4.27).

Sa particularité réside dans **les 22 radiers** (dont au moins 7 sont anthropiques) qu'il a pu être possible d'identifier ce qui représente **environ 4,4 radiers au km** (Figure 4.28 et 4.29). Toutefois, leur **répartition est très variable** et alors que les premiers sont espacés mais peuvent atteindre 200 m de longueur dans certains cas, c'est sur le dernier kilomètre que **ces zones de faibles profondeurs se succèdent rapidement** avec une densité de 7 radiers rien que pour ce dernier kilomètre (Figure 4.28). On constate donc une **accélération assez brutale de l'écoulement** en amont du barrage. Quelques bancs d'accumulation, dont la densité est de 1,8 au km, nous rappellent que le transport solide est ici fortement constitué par les particules fines remobilisées par le fleuve et qui migrent vers l'aval (Figure 4.28 et 4.29). Plusieurs zones sont marquées par la présence **de nombreux blocs exhumés** provenant des versants, leur densité étant de 7,2 par km sur ce secteur. C'est notamment le cas de l'aval du second méandre ainsi que du dernier kilomètre (Figure 4.28 et 4.29).

En ce qui concerne les berges, **de nombreux linéaires d'érosion** ont pu être observés ainsi que plusieurs **glissements et décrochements**. L'amont du secteur est encore marqué par une forte protection des berges qui représente ici 12,5 des berges avec notamment **la présence du Grand Moulin des Biards** dont le seuil a été préservé (Figure 4.28). C'est environ le long du tronçon de direction Nord, qui correspond au site de **la Mazure**, que les berges subissent principalement ce processus (Figure 4.28). Le linéaire de berge érodées correspondant à **9 %** du linéaire totale sur ce secteur (Figure 4.29)

Analyses et discussions des résultats :

L'étude des formes fluviales sur ce linéaire met ainsi en évidence **la forte influence des anciens aménagements anthropiques**. Ces derniers sont notamment des moulins, des pêcheries et des gués ou des ponts. Ont dénombré ainsi **6 moulins sur la Sélune** entre le Pont de Virey et le barrage de Vezins (Olivier Thomas, 2016). Tous étaient alors **encore en activité à la fin du XX^{ème} siècle** avant la construction du barrage et servaient à **la minoterie le jour et à la pêche au saumon la nuit** (Olivier Thomas, 2016). Certaines de leurs fondations sont alors réapparues. **Les pêcheries**, plus nombreuses, se retrouvent également, comme sur beaucoup de cours d'eau de cette région tout au long de la rivière (Olivier Thomas, 2016). Un filet était tendu entre deux murets afin **de pêcher les saumons, truites et anguilles** qui remontaient le cours d'eau. Souvent soumise à l'impôt du seigneur durant le Moyen-Age, leur utilisation s'arrête durant la Révolution et seul **des traces des anciens empierrements sont aujourd'hui visibles** sur les berges (Olivier Thomas, 2016). Toutefois, elles ont **longtemps façonné les faciès du cours d'eau** et auront encore **un impact dans ses réajustements post-dérasement**. Elles démontrent également **le potentiel piscicole** de la Sélune sur laquelle même des anglais venaient pêcher (Olivier Thomas, 2016). **Les gués et les ponts** servaient quand à eux à traverser le fleuve à pied ou en charrette. Ils se situaient notamment au niveau des radiers (Olivier Thomas, 2016). **Certains sont encore en état aujourd'hui** et représentent **des lieux patrimoniaux symboliques**.

Ainsi, **le premier secteur** montre que la Sélune possède tout de même **un certain potentiel en terme de diversification morphologique** malgré un linéaire qui reste **très homogène** et des **formes héritées** de ces aménagements anciens qui contraignent aujourd'hui les réajustements du système. **Le second secteur** diffère lui légèrement du premier de par **une diversité des formes plus importante** malgré des **faciès qui restent très peu diversifiés et très anthropiques**. Des prémices de réajustements y sont visibles et montrent qu'avec une dynamique fluviale naturelle restaurée, la Sélune pourrait, petit à petit, à **façonner son lit de manière plus significative**. La présence des lignes de blocs pourra ainsi **limiter de potentiels processus d'érosions** et de dépôts comme nous le verrons par la suite. **Le dernier secteur** illustre que plus on se rapproche du barrage, plus **les effets de l'abaissement du niveau d'eau se font ressentir** et que le fleuve semble vouloir se réajuster malgré les contraintes induites par **cette omniprésence des aménagements anciens**. En effet, comme le montre le secteur à proximité de la Mazure qui n'a pas fait l'objet de protection, tant anciennement que récemment, **la Sélune posséderait la capacité de se réajuster latéralement**. Autrement, des **lignes de blocs** sont, comme pour les deux secteurs précédents, localisées **en rive concave des méandres** et sont liées à la présence des aménagements (pêcheries, moulins...).

Grâce à **cette cartographie** il est possible d'évaluer **la réaction morphologique de la Sélune** en amont du barrage. Il apparaît donc que le cours d'eau suit **les étapes logiques post-perturbation** et que sa morphologie tendrait à **se diversifier**. En effet, en comparaison avec l'état initial effectué (cf. 4.1), toute **la zone en amont du barrage ne présente plus du tout les mêmes caractéristiques** et la classe correspondant à la classe 8 de cet état initial n'aurait alors plus lieu d'exister. Toutefois, en raison du dynamisme du fleuve et des puissances spécifiques calculées précédemment (cf. 4.2.1), **les réajustements ne pourraient se produire que sur un temps long** et ne pas être de même nature sur tout le linéaire concerné. Certains secteurs ne présentent en effet aucune diversité de forme contrairement à d'autre où l'accélération de pente induit des **faciès plus variés**. De plus, les formes émergées restent tout de même **très homogènes** entre elles et **la dynamique fluviale** du cours d'eau est encore **contrainte par des aménagements anciens**. La question est de savoir si malgré ces contraintes, le cours d'eau possède la capacité de retrouver un bon équilibre dynamique. **L'importance relative des apports solides** que fournissent les affluents (cf. 4.2.3) et **le faible degré d'érodabilité des berges** (cf. 4.2.2), modélisé ici par un cours d'eau à méandre à l'indice de sinuosité d'environ 1,8, n'y serait **que peu favorable**. La fourniture sédimentaire de ces berges étant limités à des particules très fines. Cependant, malgré leur granulométrie qui reste grossière comme nous le verrons par la suite, **plusieurs radiers** semblent être en voie de développement grâce aux **apports solides des versants** en pente raide qui paraissent ici potentiellement importants (Figure 4.30).



Figure 4.30 : Exemple des versants rocheux sur la Sélune (R. Létondot, 2019)

L'émergence de ces radiers pourraient donc, en fonction des réajustements, apporter la **diversification des faciès d'écoulement** nécessaire au rétablissement du bon état écologique de ce cours d'eau. Une partie d'entre eux est **héritée des anciens moulins et pêcheries** et la question du **rétablissement complet de la continuité écologique** par le traitement de ces aménagements se pose donc. Par conséquent, nous allons maintenant étudier plus en détail de quelle façon ces derniers, et les protections de berge qui en résultent, pourraient **influencer les réajustements latéraux du fleuve**.

4.3.2. Une activité morphogène contrainte par une anthropisation ancienne

Comme nous l'avons vu, la Sélune en amont du barrage de Vezins possède un indice de sinuosité la classant dans les **cours d'eau à méandres**. Bien que ces derniers soient ici **contraints par la géologie et le relief** en place (cf. 2.1), ils auront tout de même une grande importance dans les **réajustements du fleuve** de par leur influence sur **l'énergie du cours d'eau**. On dénombre alors 15 méandres principaux sur le linéaire étudié (Figure 4.31).

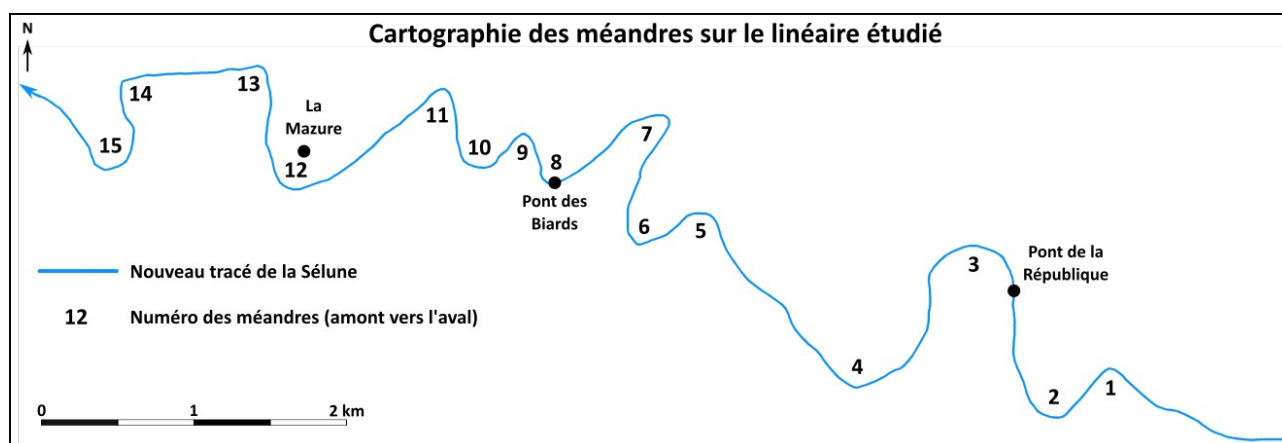


Figure 4.31 : Cartographie des méandres sur le linéaire étudié (R. Létondot, 2019)

Concernant la **répartition des protections de berges** telles que les **lignes de blocs** ou les **murets**, on remarque que ces dernières se situent au niveau des différents **aménagements anciens** précédemment répertoriés (Figure 4.32). Toutefois, et cela est intéressant dans le cadre de ce travail, la majorité de ces moulins et pêcheries notamment, ont été **construits au niveau des points d'inflexion des méandres** (Figure 4.32). En effet, que cela soit en amont comme sur les rives des méandres 2 (Moulin de la Charbonnière), 3 (Moulin de la Farulière), 4 (Ancien moulin), du méandre 6 (Pêcherie de la Giganière) ou plus en aval en bordure des méandres 10 (Grand Moulin des Biards) et 14 (Pêcherie d'Isigny), les lignes de blocs et parfois les murets constituent **une grande partie des berges concaves** (Figure 4.32). A cela s'ajoute que ces structures ont été **installées sur des radiers** qui correspondent à des **accélération de pente** comme on peut le voir en analysant les variations moyennes de celle-ci (Figure 4.32).

Bien que l'ouverture du barrage de Vezins soit récente et que ses processus soient encore peu visibles, les **linéaires d'érosion de berge** ont fait l'objet d'une étude similaire à celle des enrochements (Figure 4.33). On constate ainsi que les **premières traces d'érosions** se retrouvent notamment **en aval de certains aménagements** tels que la Pêcherie de la Giganière ou une Ancienne pêcherie légèrement en amont de la Mazure (Figure 4.33). La retenue n'étant que depuis peu vidangée, ces linéaires d'érosion sont encore peu visibles.

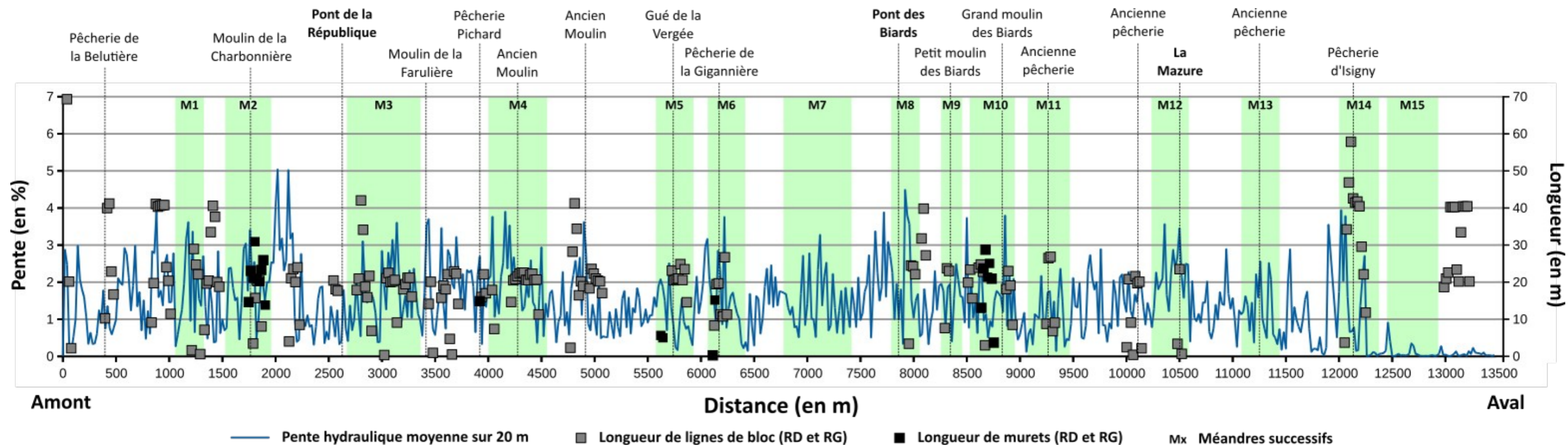


Figure 4.32 : Représentation graphique des linéaires de lignes de blocs et de murets en fonction de la pente dans la zone de l'ancienne retenue du barrage de Vezins (R. Létondot, 2019)

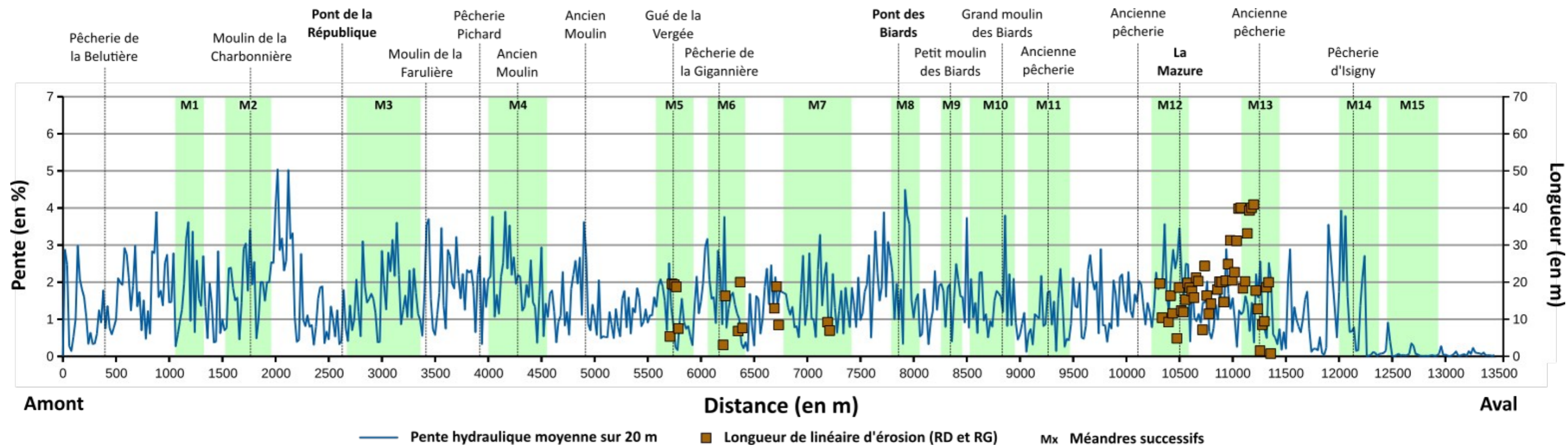


Figure 4.33 : Représentation graphique des linéaires d'érosion en fonction de la pente dans la zone de l'ancienne retenue du barrage de Vezins (R. Létondot, 2019)

Analyses et discussions des résultats :

La répartition des protections de berges montrent que **les réajustements latéraux** du cours d'eau sont **fortement contraints**. Bien sûr, ce phénomène n'est pas d'une ampleur égale sur tout le linéaire et certains points durs tels que le Moulin de la Charbonnière ou le Grand Moulin des Biards risquent d'entraîner, faute de pouvoir éroder ses berges, des **processus d'incision particulièrement marqués** du lit. Notons que **des secteurs à plus faible pente** tels qu'au Pont de la République au au Pont des Biards (mal représenté ici), les **berges sont retalutées** et malgré l'absence d'empierrements les réajustements géométriques du lit seront également **influencés par la morphologie imposée** (Figure 4.32). De plus, la faible pente sur le dernier kilomètre illustre ici les limites du levé LIDAR puisque aujourd'hui cette zone est dennoyée et connaît une augmentation de sa pente hydraulique (Figure 4.32). En ce qui concerne **les zones d'érosion** qui ne correspondent pas forcément à une pente plus forte une hypothèse peut être émise (Figure 4.33). Ainsi, en raison des **nombreux enrochements** (Figure 4.32) des berges, ou des travaux de remaniements réalisés, le fleuve **n'aurait la capacité de se réajuster que sur ces tronçons** et y éroderait donc son lit avec plus d'intensité. On peut alors se poser la question de savoir si, en l'absence des lignes de blocs ou murets liés aux aménagements ou sans les travaux plus récents, le cours d'eau connaîtrait **une augmentation de la longueur des linéaires d'érosion**. De même, un travail similaire pourrait être effectué sur le temps long pour mettre en évidence **l'évolution de l'ensemble de ces linéaires** de berges plusieurs années après l'effacement du barrage, les processus d'érosion dans ces systèmes de faible énergie **pouvant s'étaler sur le long terme**.

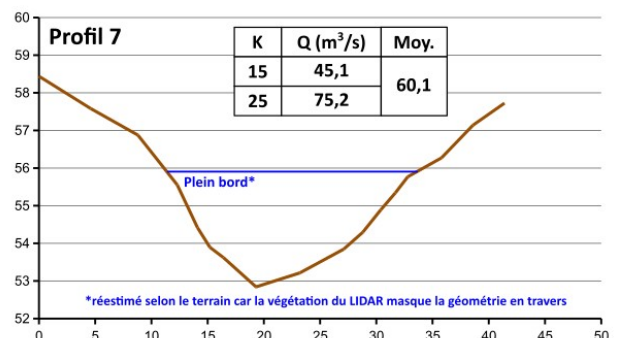
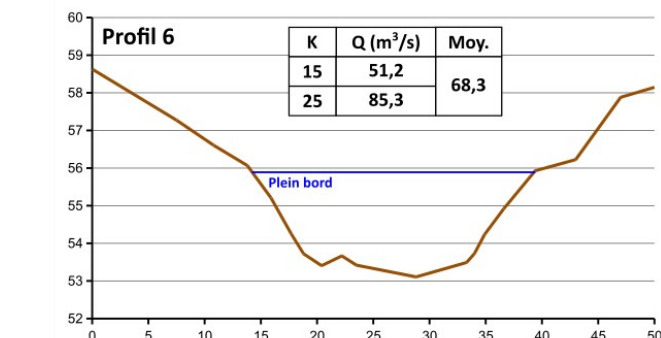
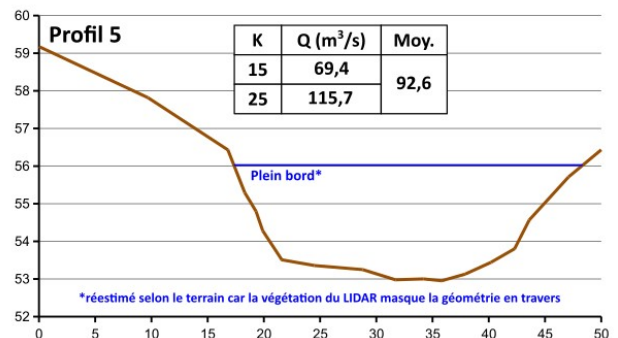
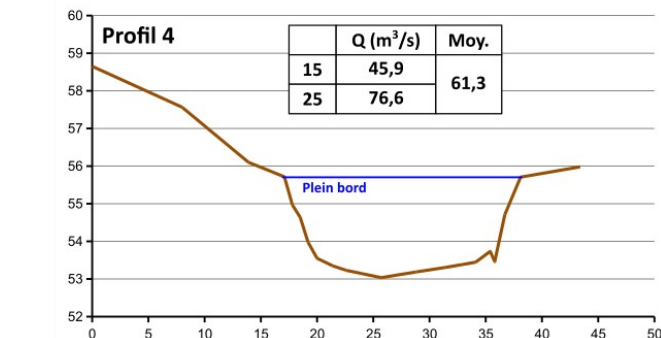
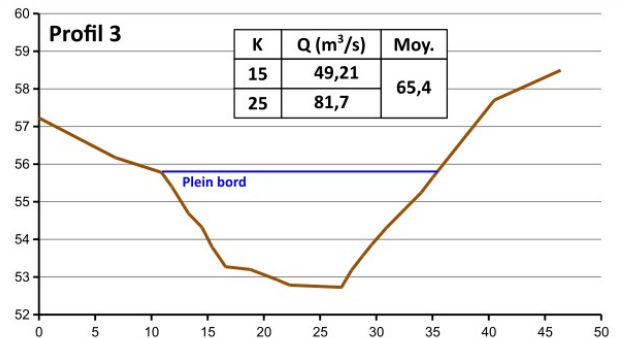
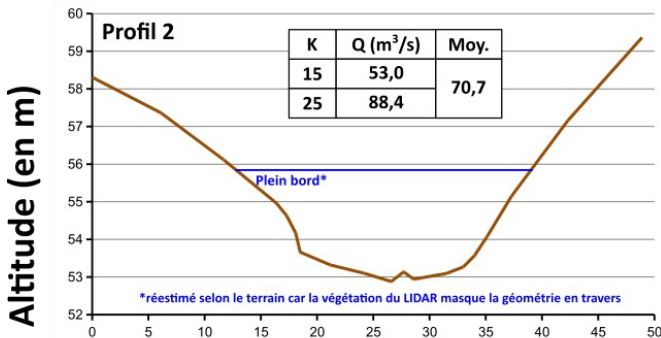
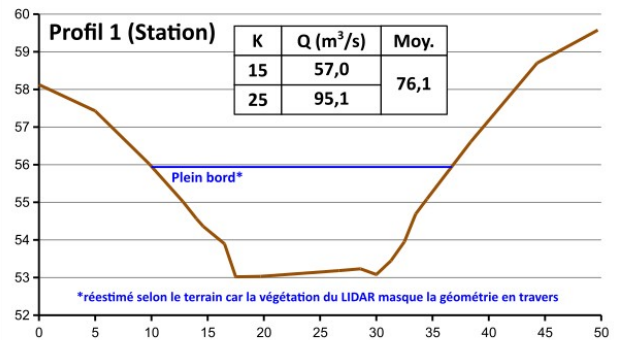
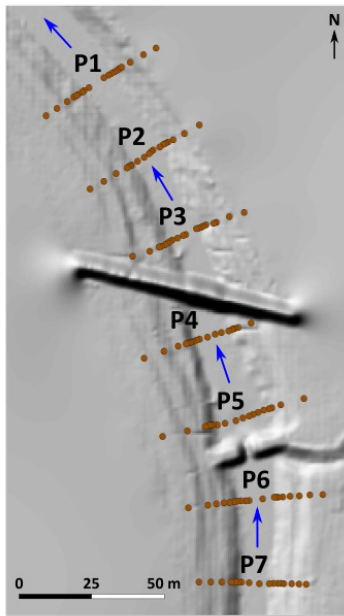
Ainsi, ces graphiques montrent que **l'équilibre dynamique de la Sélune vient tout juste d'être perturbé** et que son **réajustement sera fonction de divers éléments**. En effet, le fleuve possède des capacités de résilience, certes modestes, mais son **activité morphogène reste très contrainte** par son **anthropisation ancienne**. De ce fait, même si le degré d'érodabilité des berges est ici assez faible, le cours d'eau ne peut, pour le moment et dans beaucoup de secteurs, même **pas y entamer des processus d'érosion** notamment dans les méandres. Cela pose donc le problème de la **reprise d'une dynamique fluviale « naturelle »** et de la **rediversification des formes fluviales** au sein du chenal. De nouvelles interventions seront donc sûrement à envisager afin de **corriger ce problème** qui pourrait provoquer **l'incision du lit** induisant une augmentation de la pente et donc **un déséquilibre morphologique** qui se déplacerait de plus en plus en aval. Reste toutefois que si ces interventions ont lieu, **les apports solides devront être suffisants** pour réactiver les processus hydromorphologiques. Ces derniers étant, comme nous l'avons vu, relativement limités (cf 4.2.3). **L'anthropisation ancienne** de la Sélune impacte donc aujourd'hui le potentiel réel de réajustement du fleuve. De plus, durant cette opération, **le cours d'eau à de nouveau fait l'objet d'interventions** qui pourront également avoir une influence sur ses capacités de résiliences, une influence qu'il convient d'étudier.

4.3.3. Les travaux de restauration actuels : modifications du débit de pleins bords

Pour comprendre quels pourraient être les **impacts du recalibrage et du remaniement des berges** en amont du barrage de Vezins, **les débits à plein bord** sur les **7 profils de chaque sites** ont été recalculés. Cette partie a donc pour objectif de montrer d'une part comment ces travaux pourront **modifier** les débits morphogènes de pleins bords, et d'autre part **e potentiel de départ de chaque site** en ce qui concerne la morphologie fluviale. En effet, ces sites ne se ressemblent pas forcément et les capacités de réajustement peuvent, par conséquent, **différer sur tout le linéaire de l'ancienne retenue** en fonction de la distance au barrage et de leur niveau d'anthropisation récente.

Profils en travers au Pont de la République

Q estimé : 40,7 m³/s



Distance (en m)

Figure 4.34 : Localisation et formes des 7 profils en travers au Pont de la République (R. Létondot, 2019)

Au **Pont de la République**, nous remarquons ainsi que les débits, pour un coefficient de rugosité de 15, varient entre 45,1 et 69,4 m³/s et de 75,2 à 115,7 m³/s pour un coefficient de 25 (Figure 4.34 et 4.35). Sur ce site, le **coefficient 15 paraît plus approprié** en raison de la rugosité plus importante du lit et des berges (végétation sur les berges et constitution du fond du chenal). Dans cette fourchette basse les travaux effectués sur le chenal seraient tout de même à l'origine d'**une augmentation du débit de pleins bords de 5 à 30 m³/s** (12,6 m³/s en moyenne) par rapport au débit biennal de 40,7 m³/s estimé précédemment (Figure 4.34, cf. 4.3.1). Ces valeurs sont possiblement sous-estimées comme le montre les débits pour un coefficient de rugosité à 25 qui correspondraient à **une période de retour décennale** (Figure 4.34 et 4.35) dont le débit s'élève à environ 70 m³/s sur ce secteur. Le **débit de pleins bords** peut ainsi dépasser les 100 m³/s dans certaines sections pour un coefficient de rugosité de 25 (Figure 4.34).

K	Moyenne débits (m ³ /s)	Écart-type	Min	Max	Puissance spé. (w/m ²)	Rapport l/p moyen
15	52,9	7,7	45,1	69,4	52,5	13
25	88,3	12,9	75,2	115,7	87,6	

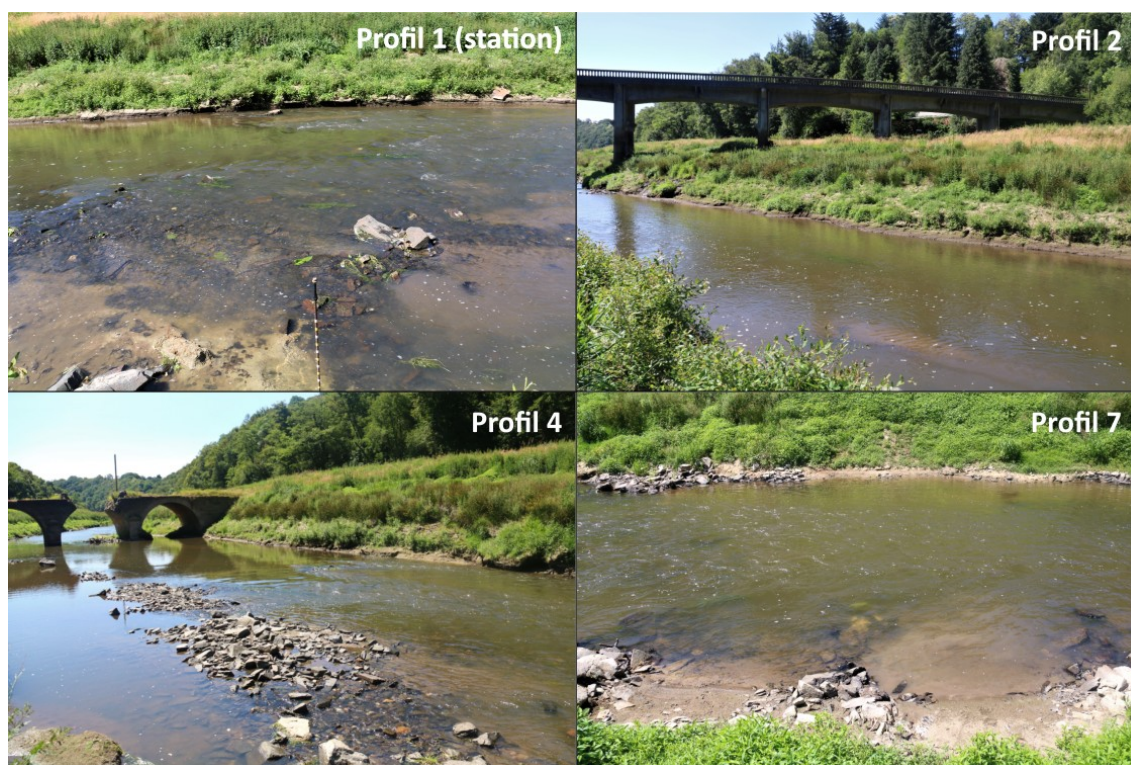
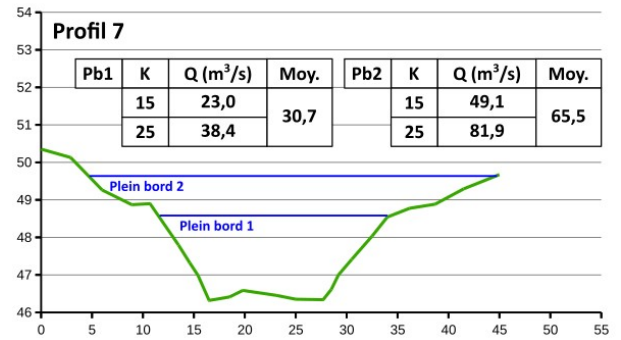
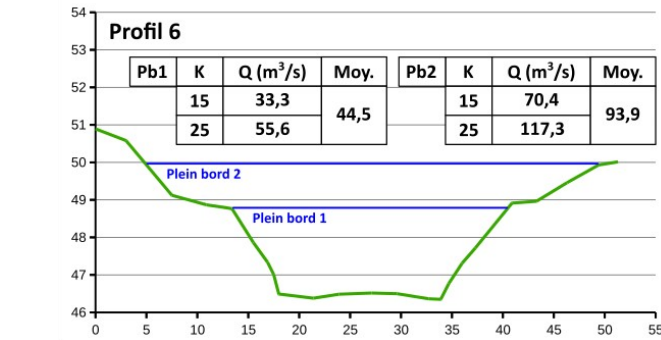
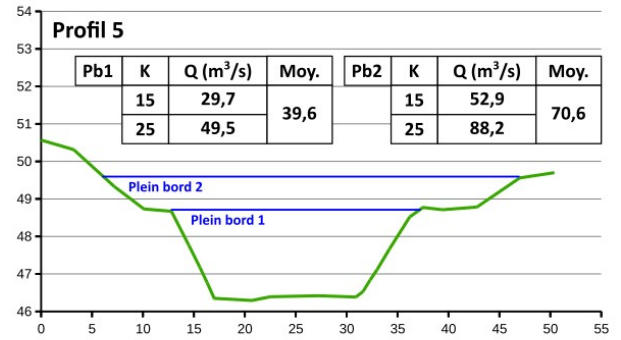
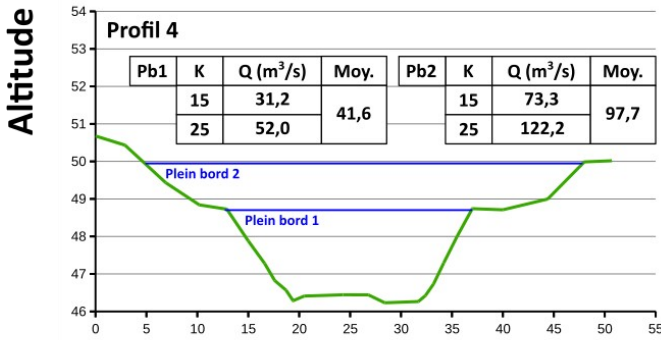
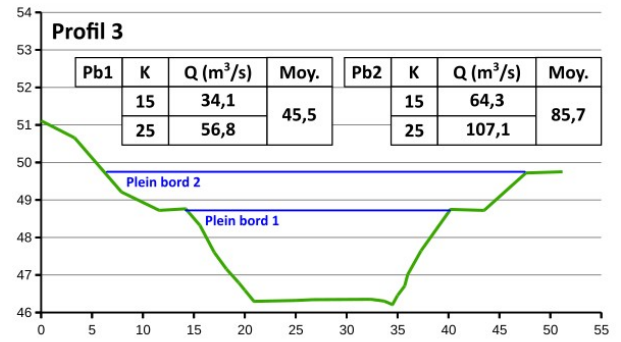
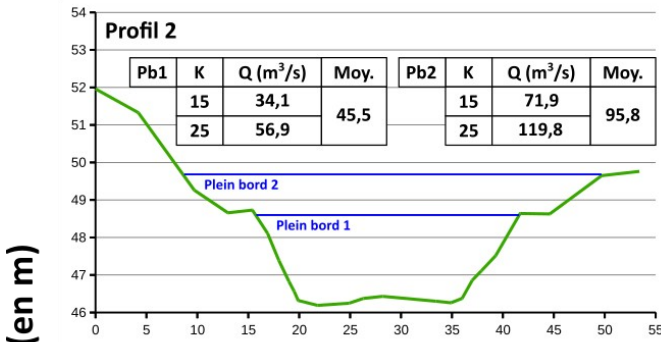
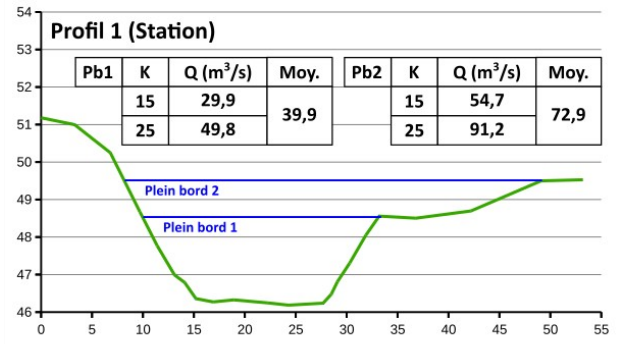
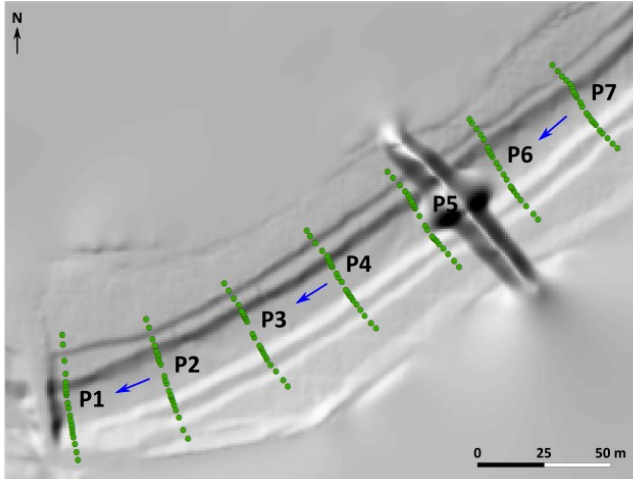


Figure 4.35 : Statistiques et illustrations des profils au Pont de la République (R. Létondot, 2019)

De plus nous constatons des **géométries relativement variées** sur les 7 profils en travers réalisés (début de fosse sur le profil 3, surlargeur sur le profil 5...) avec des écart-types plutôt élevés ce qui démontrent le **début de rediversification des formes et de réajustement des berges** de ce tronçon le plus en amont du barrage dont la puissance spécifique moyenne pourrait être ici réestimée à **52,5 w/m²** (Figure 4.34 et 4.35) avec un rapport **largeur profondeur moyen de 13** (Figure 4.35).

Profils en travers au Pont des Biards

Q estimé : 41,3 m³/s



Exagération : x3,8

Distance (en m)

Figure 4.36 : Localisation et formes des 7 profils en travers au Pont des Biards (R. Létondot, 2019)

Le site du **Pont des Biards** se distingue par la présence d'une **banquette formant un lit moyen** qui est bien visible sur les profils (Figure 4.36). Le tronçon étudié est ici beaucoup plus **rectiligne et homogène** en terme de géométrie et d'état des berges qui nous amène à penser que le **coefficient de rugosité serait plutôt égal à 25** pour le lit mineur (Plein Bord 1) mais inférieur pour le lit moyen (Plein Bord 2) (Figure 4.36 et 4.37). Selon ces critères, avec des débits de plein bord d'une moyenne de 51,3 m³/s, **supérieurs de 10 m³/s par rapport au débit biennal** qui est ici de **41,3 m³/s** (**Figure 4.36 et cf. 4.2.1**), le lit mineur a donc été plutôt bien recalibré même si le seuil des 50 m³/s est dépassé pour plusieurs sections (Figure 4.35). Les crues de fréquence de retour biennales pourraient donc **déborder sur cette banquette** d'environ 5 m de large (Figure 4.36). Toutefois, pour réellement atteindre le lit majeur les débits devront être compris entre, en moyenne, **70 et 95 m³/s** (Figure 4.36 et 4.37) ce qui correspond à la **fréquence de crue décennale**, voire vicennale, à cet endroit.

Pb	K	Moyenne débits (m ³ /s)	Écart-type	Min	Max	Puissance spé. (w/m ²)	Rapport l/p moyen
1	15	30,8	3,6	23,0	34,1	15,3	10
	25	51,3	6,0	38,4	56,9	25,5	
2	15	62,4	9,3	49,1	73,3	31,1	12
	25	103,9	15,4	81,9	122,2	51,8	

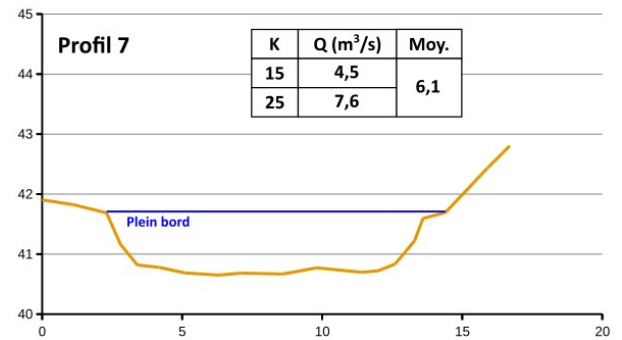
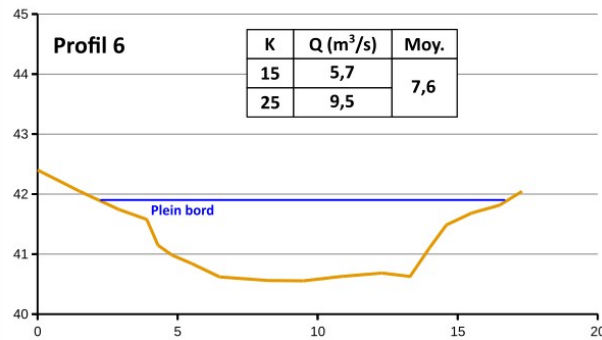
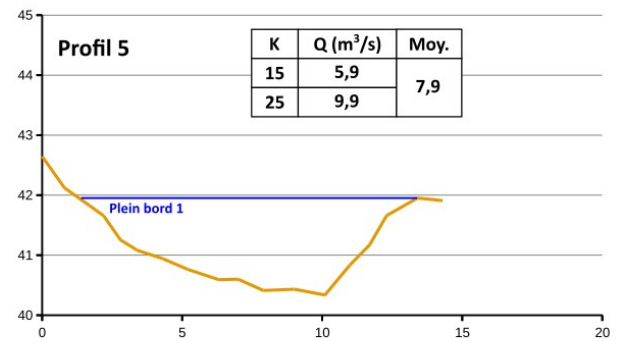
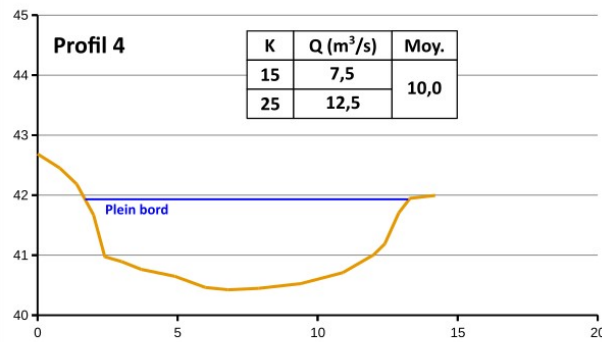
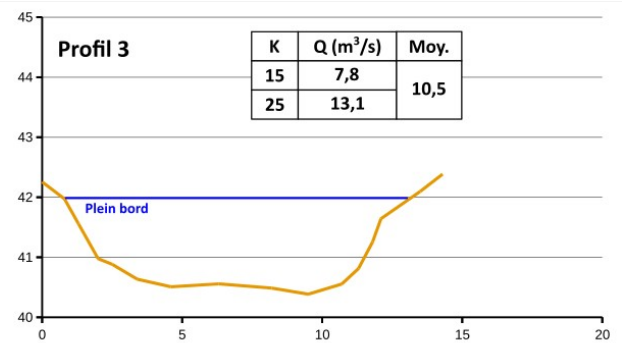
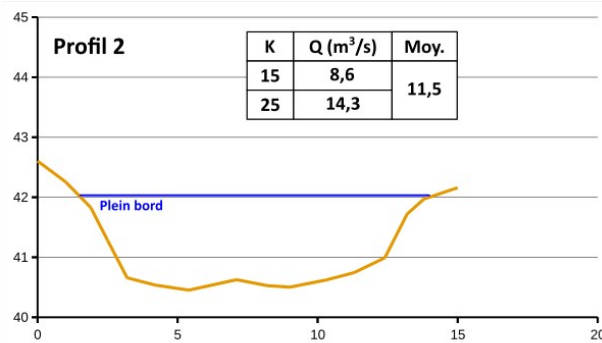
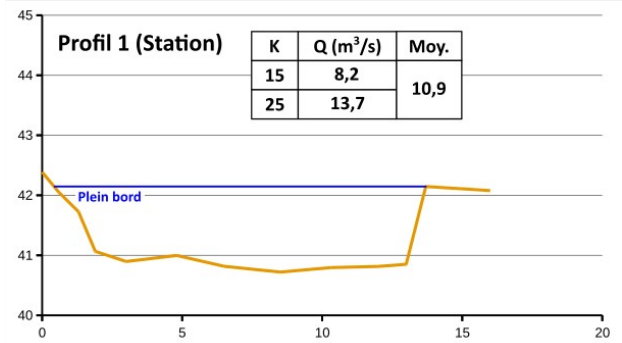
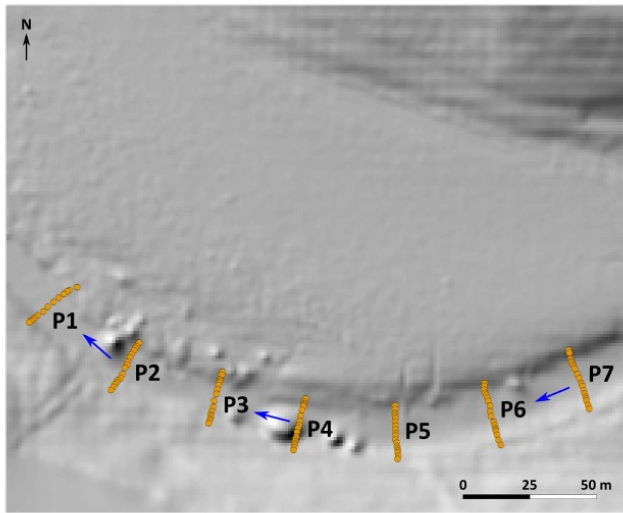


Figure 4.37 : Statistiques et illustrations des profils au Pont des Biards (R. Létondot, 2019)

Il est également possible de noter que les profils réalisés sont extrêmement similaires, comme le montre d'ailleurs les faibles écart-types de débits entre les sections, et les **berges sont très homogènes** (Figure 4.36 et 4.37). Du fait de ces débits plus importants, **les puissances spécifiques** à pleins bords à été réestimée entre 25 w/m² pour le lit mineur et 50 w/m² pour le lit moyen pour des rapports **largeur/profondeur compris entre 10 et 12**.

Profils en travers à La Mazure

Q estimé : 42,31 m³/s



Exagération : x2

Distance (en m)

Figure 4.38 : Localisation et formes des 7 profils en travers à la Mazure (R. Létondot, 2019)

La Mazure est le seul des trois sites qui n'a **pas encore fait l'objet de travaux de remaniement** ou d'un quelconque recalibrage du chenal. Par conséquent, le cours d'eau s'est ici retrouvé au sein d'un **thalweg peu large** et à la pente un peu plus importante qu'au Pont des Biards bien que cette dernière soit possiblement sous-estimée ici. On remarque que cette fois les débits réestimés selon le coefficient de rugosité, se trouvant pour ce site **entre 15 et 25**, ne sont plus supérieurs mais **très inférieurs au débit biennal « naturel »**. En effet, avec des débits de pleins bords compris entre 6,1 et 11,5 m³/s en moyenne pour les deux coefficients, **l'écart avec le débit biennal s'élève à plus de 30 m³/s** (Figure 4.38 et 4.39, cf. 4.2.1). Le minimum pour un coefficient de 15 étant 4,5 m³/s et le maximum pour un coefficient de 25 de seulement 14,3 m³/s.

K	Moyenne débits (m ³ /s)	Écart-type	Min	Max	Puissance spé. (w/m ²)	Rapport l/p moyen
15	6,9	1,3	4,5	8,6	6,0	11
25	11,5	2,3	7,6	14,3	10,0	

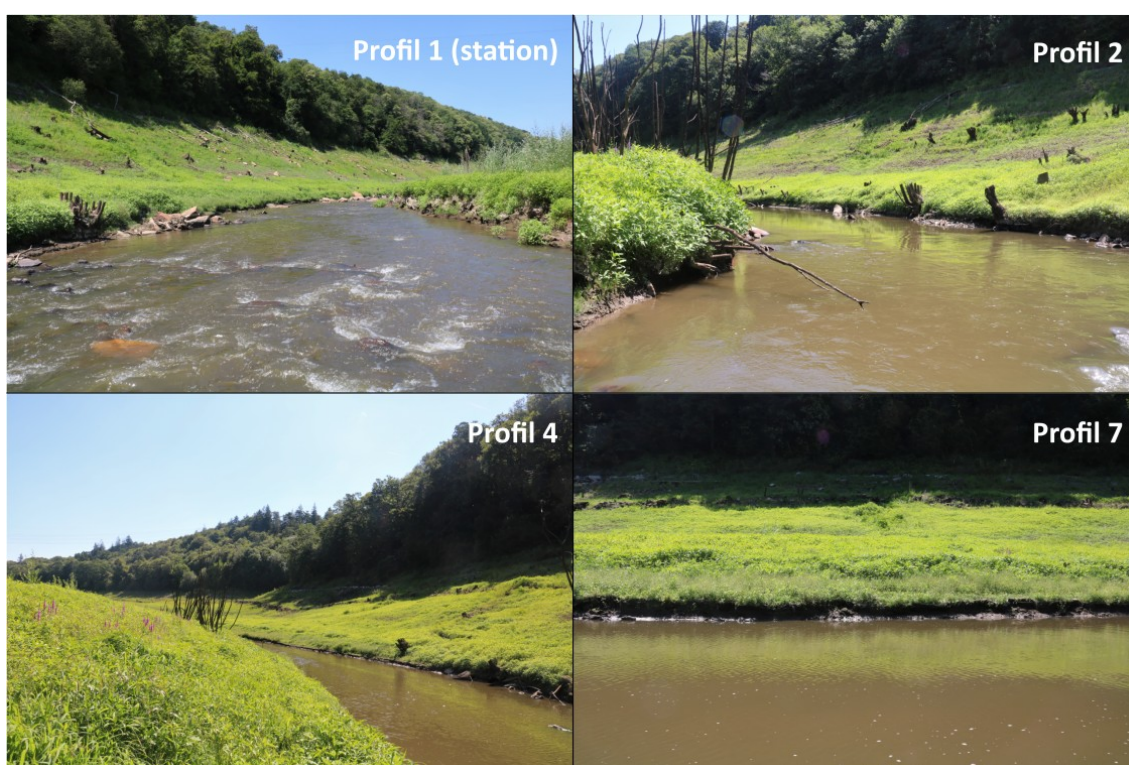


Figure 4.39 : Statistiques et illustrations des profils à la Mazure (R. Létondot, 2019)

Les **faibles écart-types** montrent ici encore une fois que malgré des géométries qui varient, notamment avec la présence de **fosses d'affouillement sur certaines sections**, les faciès restent assez peu diversifiés (Figure 4.39). Les **puissances spécifiques** sont elles considérablement réduites par rapport à la première valeur estimée de 35 w/m² (cf. 4.2.1) et n'atteignent que **8 w/m²** en moyenne (Figure 4.39) avec un rapport largeur/profondeur gravitant autour de **11**.

Analyses et discussions :

Les calculs des débits de pleins bords sur les 3 sites selon la nouvelle géométrie nous renseignent ainsi sur **le nouveau dynamisme de ces tronçons** et sur les impacts des différents recalibrages.

Au **Pont de la République**, Les travaux sur ce site paraissent être **globalement bien calibrés** pour une **rugosité assez importante** ce qui semble être le cas. Toutefois, nos calculs mettent également en évidence un possible sur-calibrage qui pourrait dans certains cas, provoquer une **trop forte concentration des débits** dans le chenal principal lors des crues dont le débordement serait retardé. La crue pour un débit biennal serait alors **moins morphogène** que les crues de fréquence moins importantes (décennale...) qui seraient à l'origine d'une **activité morphogène et de réajustements plus marqués** car elles n'auraient pas la possibilité de déborder sur le lit majeur et les écoulements s'en retrouveraient **intensifiés dans le chenal principal**. De plus, les berges étant encore peu végétalisées, cela pourrait intensifier ces processus malgré un rapport largeur/profondeur indiquant une **stabilité des berges importante**. Ces conclusions correspondant à un indice de rugosité estimé subjectivement et à une pente d'étiage elles restent toutefois discutables.

Au **Pont des Biards**, ce sur-calibrage est encore plus prononcé notamment en ce qui concerne la construction d'un lit moyen. Les écoulements y seront donc **contraints dans un chenal fortement anthropique** la plupart du temps ce qui pourra limiter les échanges entre le cours d'eau et sa plaine alluviale et **empêcher la mise en place des réajustements** post-perturbation dans le cas des crues biennales. En revanche, les crues décennales et vicennales seront auront elles **beaucoup plus d'influence sur le morpho-dynamisme** de ce secteur. Outre **le calibrage du chenal** qui peut être sujet à discussions notamment en ce qui concerne la création d'un lit intermédiaire, c'est surtout **l'aspect anthropique et l'absence totale de diversité dans la géométrie du lit** que l'on remarque sur ce site. De ce fait, malgré une puissance spécifique qui augmente légèrement par rapport à la théorie (25,5 w/m² pour le lit mineur) **le potentiel de réajustement reste très faible** de par cette **morphologie totalement imposée et linéaire** dont le rapport largeur/profondeur révèlent **la stabilité**. La pente étant de plus fortement réduite et la **présence d'un banc de sable**, dont le relief est visible sur les profils, sur tout le fond du chenal constitue le seul élément atypique sur ce tronçon.

Nous observons sur le site de **la Mazure**, avec des sections mouillées de plein bord très limitées, le phénomène inverse aux deux sites précédents. Le cours d'eau aura ainsi tendance à **déborder très rapidement sur son lit majeur**, s'étendant ici sur une **très grande surface en rive droite**. Les conséquences relèveraient alors d'une **augmentation de la fréquence des inondations** sur la plaine alluviale mais également **une évolution du lit très rapide en raison de l'écoulement amont** alors concentré dans un chenal très étroit et donc de la fréquence plus importante du débit de pleins bords. **Cette activité morphogène** est d'ailleurs **très marquée sur les berges dans ce secteur** comme nous l'avons montré précédemment malgré **les faibles puissances spécifiques réelles** (cf.4.3.2) et **le faible rapport largeur profondeur**. Contraint par le versant en rive gauche comme nous pouvons le voir sur les profils et ayant besoin d'une plus grande largeur ou profondeur pour pouvoir répondre aux écoulements amont, **le cours d'eau élargirait son lit là où il le peut** entraînant cette **dégradation des berges**. Ce site permet donc d'effectuer une **comparaison** avec des secteurs ayant **subi une intervention anthropique lourde** (Pont de la République, Pont des Biards) afin de chercher à savoir **quelle serait la meilleure modalité de gestion** dans le cas de ce dérasement.

L'analyse des **nouveaux débits de plein bord de la Sélune** sur les trois sites en amont du barrage permet de rendre compte **des impacts des travaux de restauration et de gestion sédimentaire**

sur l'**hydrologie** du fleuve. Les résultats prouvent qu'il est impossible de réaliser des interventions **sans aucune conséquence sur le milieu** que cela soit sur les débits ou la géométrie des lits. Le recalibrage du lit paraît donc être **relativement bien calculé** sur les secteurs du Pont de la République et du Pont des Biards malgré un **risque d'une concentration trop importante de l'écoulement** dans le chenal principal lors des crues les plus importantes, mais cette opération semble ne **pas avoir pris en compte les autres paramètres du cours d'eau** qui définissent son état hydromorphologique. Les **faciès sont ainsi quasiment totalement homogènes** et en raison d'un talutage très rectiligne, ces tronçons, notamment au Pont des Biards, ne présente pour le moment que **très peu de potentiel de réajustement**. Les puissances spécifiques modestes, le faible degré d'érodabilité des berges et les apports en charge grossière limités n'étant pas des facteurs pouvant compenser cette anthropisation. Au contraire, le site de la Mazure illustre le réajustement du cours d'eau en l'absence de travaux avec une activité morphogène plus marquée (pour le moment). . La question est donc de savoir quelle pourrait être **la meilleure modalité de gestion du lit de la Sélune** qui présente désormais la particularité de posséder une plaine alluviale au sein de gorges encaissées. En raison de **l'ampleur de ce dérasement** et de **la quantité de sédiments stockés en amont** du barrage, des interventions sont évidemment nécessaires mais elles devraient **laisser au cours d'eau une marge de manœuvre afin qu'il puisse exercer ses capacités de résilience**. Il est en effet préférable que le **potentiel de réajustement soit moins contraint** afin de limiter des processus pouvant venir dégrader la qualité hydromorphologique lors d'extrêmes hydrologiques notamment. Bien sûr, l'opération de restauration sur la Sélune n'est ici qu'à ses débuts et de possibles erreurs pourront être **rectifiées à l'avenir**, les travaux n'étant pas achevés.

Transition :

L'étude de **la morphologie fluviale de la Sélune** immédiatement après l'ouverture du barrage de Veziins révèle que ce cours d'eau est **très anthropisé** ce qui **impacte fortement son potentiel réel de réajustement** et **les échanges entre les différents compartiments de l'hydrosystème**. Les **formes fluviales** aujourd'hui visibles sont pour la plupart reliées à des **aménagements anciens qui contraignent l'activité morphogène** du fleuve mais révèlent une **rediversification des faciès** qui tend à se mettre en place. Toutefois, **la suppression des berges protégées** par des enrochements sera probablement nécessaire afin de redonner au cours d'eau **une dynamique la plus « naturelle » possible et limiter des processus post-perturbation** pouvant représenter un risque hydromorphologique (incision prononcée...). Un **retour vers l'état originel paraît en revanche difficile à atteindre** en raison de la présence des sédiments de l'ancienne retenue aujourd'hui accumulés sur les berges et des **travaux de recalibrage** mis en place sur certains site. **Les capacités de résilience**, même si ces dernières restent modestes comme vu précédemment (cf. 4.2), sont alors d'autant plus **limitées** et les **réajustements potentiels très contraints**. L'opération de restauration n'est donc pas, pour le moment, pleinement efficiente et doit encore **être approfondie dans l'objectif de devenir l'exemple international voulu**.

Afin de **compléter cette analyse hydromorphologique** il est également pertinent de s'intéresser aux **premières conséquences de ce dérasement sur les habitats aquatiques**. En effet, ces derniers permettront, à plus long terme, d'évaluer la réussite de cette opération et de savoir si **les attentes en terme de restauration de la continuité écologique sont respectées**. Il a donc été décidé de réaliser une première approche en terme **d'émergence des faciès d'écoulements** sur les sites et du **nouveau potentiel frayère** sur le l'ancien linéaire de la retenue. Après cela, une conclusion globale sur **les capacités de résilience hydromorphologique** de la Sélune pourra alors être émise.

4.4. Conséquences de l'opération en terme de recolonisation piscicole potentielle

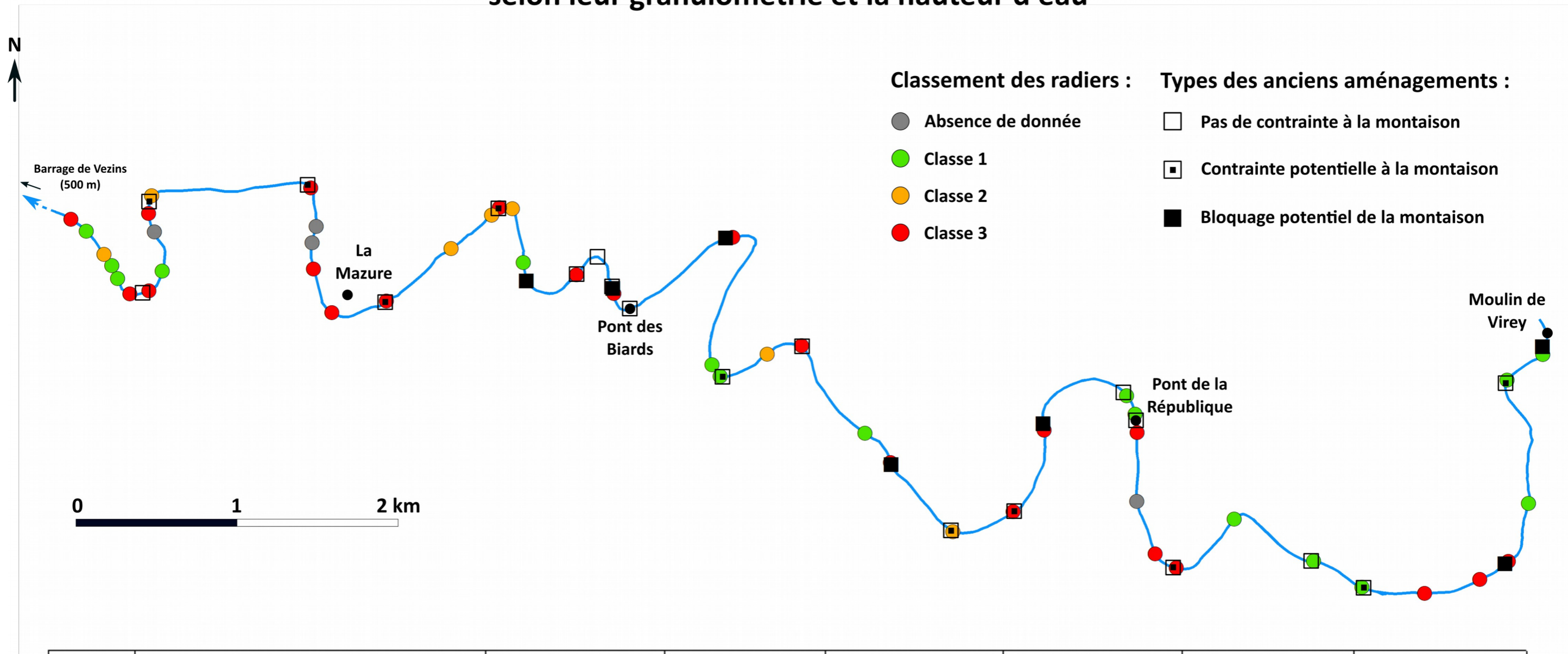
Dans cette **étude hydromorphologique**, il semble pertinent de s'intéresser **aux conséquences de l'ouverture du Vezins sur les habitats aquatiques**. En effet, ces derniers révèlent **l'état hydromorphologique du cours d'eau** et sont de bons indicateurs de la réussite ou non d'une opération de ce type. Nous nous intéresserons ici plus particulièrement à la **potentielle recolonisation piscicole**, et plus particulièrement celle du **saumon**, dans cet espace ennoyé depuis plus de 90 ans. Il n'est pas ici question d'apporter des conclusions définitives à la **réémergence d'habitats et de zones de reproduction** répondant aux **critères de cette espèce** mais bien de faire un **premier état des lieux** immédiatement après l'ouverture du barrage. Avec une remontée estimée à **1800 individus** après la restauration complète de la continuité écologique sur ce fleuve (Forget *et al.*, 2015), un **suivi sur le long terme dans ce domaine est essentiel**. C'est pourquoi une typologie des radiers précédemment répertoriés selon leurs caractéristiques morphologiques et sur le potentiel de recolonisation du saumon sera effectuée. Pour compléter cette analyse, **les premiers faciès d'écoulement** émergents seront également déterminés. Ils permettront d'avoir un **aperçu à une échelle plus fine**, celle des sites, **de la rediversification des habitats** après l'ouverture du barrage et les premiers travaux de restauration.

4.4.1. Première approche du nouveau potentiel frayère pour le saumon

Lors de **l'inventaire des formes fluviales** effectué durant la descente en kayak de l'ancienne zone de retenue en amont du barrage de Vezins, **45 radiers**, ou du moins secteurs peu profonds à la profondeur d'eau plus faible et à l'écoulement plus turbulent, ont été répertoriés (cf. 4.3.1). La description, bien que très subjective de **leur granulométrie et la mesure de la hauteur d'eau** à leur début permet alors de les classer, selon **leur qualité en terme d'habitat aquatique**, et notamment en ce qui concerne **les zones de frai du saumon**. Cette approche du **nouveau potentiel frayère** pour cette espèce va ainsi mettre en évidence les **secteurs plus ou moins favorables à sa recolonisation**. Bien évidemment, cette typologie est **amenée à évoluer dans les années à venir** selon les réajustements du fleuve et les différents travaux qui y seront encore effectués. Toutefois, il s'agit également d'évoquer les diverses actions qui devront être mises en place dans le but de **la restauration complète de la continuité écologique sur ce tronçon**.

La **cartographie de cette typologie des radiers** (Figure 4.40), montre que les trois classes définies auparavant (cf. 3.5.1) selon les critères de granulométrie et de hauteur d'eau correspondant aux conditions de vie et de reproduction du saumon se retrouvent sur tout le linéaire étudié. Toutefois, leur **répartition spatiale n'est pas égale** et il est possible de distinguer certains secteurs où chaque classe est plus représentée que dans d'autres. Le même constat peut être fait avec les **différents types d'aménagements**. Ces derniers ont ici été classés en trois types représentant, de par la hauteur de chute encore trop importante ou leur configuration au sein du lit mineur, leur **influence potentielle sur la montaison des saumons** durant leur période de reproduction. C'est ici surtout les aménagements qui pourraient **bloquer totalement la remontée** de ces poissons qui nous intéressent. En effet, ces derniers devront sûrement faire **l'objet d'une gestion appropriée**, sans quoi le dérasement du barrage de Vezins **ne pourra pas permettre de répondre aux objectifs attendus**.

Cartographie de la typologie des radiers en amont du barrage de Vezins selon leur granulométrie et la hauteur d'eau



Classe	Granulométrie	Hauteur d'eau	Nombre de radiers	Longueur moyenne	Longueur maximum	Longueur minimum	Longueur totale
1	Graviers grossiers à cailloux grossiers/pierres fines	20 à 60 cm	16	57 m	205 m	22 m	926 m
2	Graviers grossiers à cailloux grossiers/pierres fines	> 60 cm ou NC	7	60 m	218 m	10 m	481 m
3	Pierres fines à blocs	Non prise en compte	22	41 m	93 m	5 m	915 m

Figure 4.40 : Cartographie de la typologie des radiers (R. Létondot, 2019)

La première chose que l'on remarque grâce à cette typologie est que les radiers de la Sélune sont, en amont du barrage **surtout constitués de matériaux grossiers** (cailloux grossiers et pierres fines notamment), voir très grossiers (pierres grossières à blocs) (Figure 4.40). Ces derniers, présents dans la majorité des radiers, ne semblent pouvoir être déplacés que sur le long terme et de ce fait, **résultent probablement plus des anciens aménagements** que de la réelle capacité de transport du fleuve. Cela aura donc une influence non négligeable sur la nature des radiers identifiés.

La **classe 1** est caractérisée par des **radiers à la granulométrie favorable** à la construction des **zones de frayères** par le saumon et une **hauteur d'eau correspondant à leurs critères**. On retrouve notamment ce type de radier **en aval**, là où une accélération de pente entraîne une accélération de la vitesse d'écoulement et **en amont, sur un secteur moins influencé par le barrage** (Figure 4.40). Avec une **longueur totale d'environ 900 mètres**, ces radiers qui peuvent s'étendre parfois sur un linéaire important, 205 mètres pour le plus grand, représentent les **secteurs sur lesquels le saumon pourrait trouver une zone d'habitat** répondant à ses exigences en terme de dynamisme morphologique. Toutefois, excepté les deux grands barrages de Vezins et de la Roche-qui-boit, la plupart de ces radiers se trouvent **en amont d'obstacles à l'écoulement** pouvant **empêcher la remontée** de ces poissons migrateurs jusque dans ces zones. En ce sens, l'ancien Grand Moulin des Biards, illustre ce problème (Figure 4.41) et **l'accessibilité de 11 de ces 16 radiers est donc pour le moment limitée**.



Figure 4.41 : Chute d'eau au niveau de l'ancien Grand Moulin des Biards (R. Létondot, 2019)

A cette classe pourraient potentiellement également être rajoutés **les radiers de la classe 3** dont seule une **granulométrie favorable au frai du saumon** à pu être déterminée. Ces radiers se situent notamment au niveau des **anciens aménagements** et certains paramètres (hauteur d'eau, vitesse d'écoulement...) ne sont **pas encore optimum** pour la reproduction du saumon (Figure 4.40). Il est donc difficile de classer les 500 mètres de linéaire constitués par ces radiers.

La **dernière et troisième classe** correspond aux **radiers dont la granulométrie dominante est trop grossière** pour réellement proposer des habitats aquatiques de qualité à la biocénose d'un cours d'eau. Au nombre de 22 et répartis sur l'ensemble du linéaire pour une longueur totale avoisinant également les 900 m, ces secteurs sont pour la plupart **le résultat des anciens aménagements** qui sont venus **modifier leur configuration morpho-sédimentaire** (Figure 4.40). Ces radiers paraissent très anthropisés, voir parfois complètement anthropique la **dynamique fluviale y est donc perturbée** (Figure 4.42).



Figure 4.42 : Secteur à radier à la granulométrie très grossière (R. Létondot, 2019)

Analyses et discussions des résultats :

Ainsi, la **typologie des radiers** sur ce linéaire **confirme les premières conclusions quant aux capacités de résilience de la Sélune** et les **contraintes induites par sa forte anthropisation**. En effet, on constate que le **potentiel frayère est ici tout de même important** et reflète la qualité des habitats aquatiques passés sur ce fleuve. Toutefois, la forte anthropisation du cours d'eau et **les nombreux aménagements** que l'on retrouve régulièrement sont aujourd'hui des **freins à un réel retour vers une dynamique fluviale « naturelle »** et non perturbée. En dehors de la présence des barrages qui empêche encore toute montaison, le **potentiel de recolonisation piscicole est donc encore limité** avec 22 radiers sur 45 dont les conditions morphologiques sont défavorable à la reproduction du saumon. Cela montre que l'opération de restauration ne doit en effet **pas simplement se réduire à l'effacement des barrages** mais s'accompagner d'une gestion de l'ensemble du linéaire impacté. La forte et ancienne anthropisation du fleuve nécessite alors, une nouvelle fois, **l'intervention de l'homme pour rétablir l'équilibre du système**, sous réserve que ces interventions soit réalisées **en prenant en compte les caractéristiques physiques primaires du cours d'eau**. De plus, il reste encore la présence du **barrage de la Roche-qui-boit** qui constitue le second **obstacle infranchissable** sur ce fleuve et dont le dérasement est normalement prévu en 2021.

4.4.2. La lente émergence des nouveaux faciès d'écoulement encore amenés à évoluer

Comme nous l'avons vu, les **faciès d'écoulement sont le reflet de la diversité et de la qualité des habitats** au sein d'un cours d'eau. Il est donc nécessaire qu'ils soient **le plus variés possible** et ce sur toute la longueur de la rivière. Nous avons donc ici déterminé les principaux faciès présents sur les **trois sites d'étude** afin de montrer le **potentiel de la Sélune** dans ce domaine et comment **les travaux de restauration** ont pu les impacter. Les espèces salmonicoles telles que le saumon ayant besoin de faciès lotiques (radier, plat courant...) de **bonne qualité** (cf. 4.4.1), nous chercherons à savoir si ces derniers commencent déjà à réémerger par endroits et si non, **les causes de cette absence**.

NB : Pour des questions de visibilité et de différenciation des faciès les profils en longs ont été exagérés. Concernant la forme des profils en travers, se référer aux document de la partie 4.3.3.

- Sur le secteur du Pont de la République :

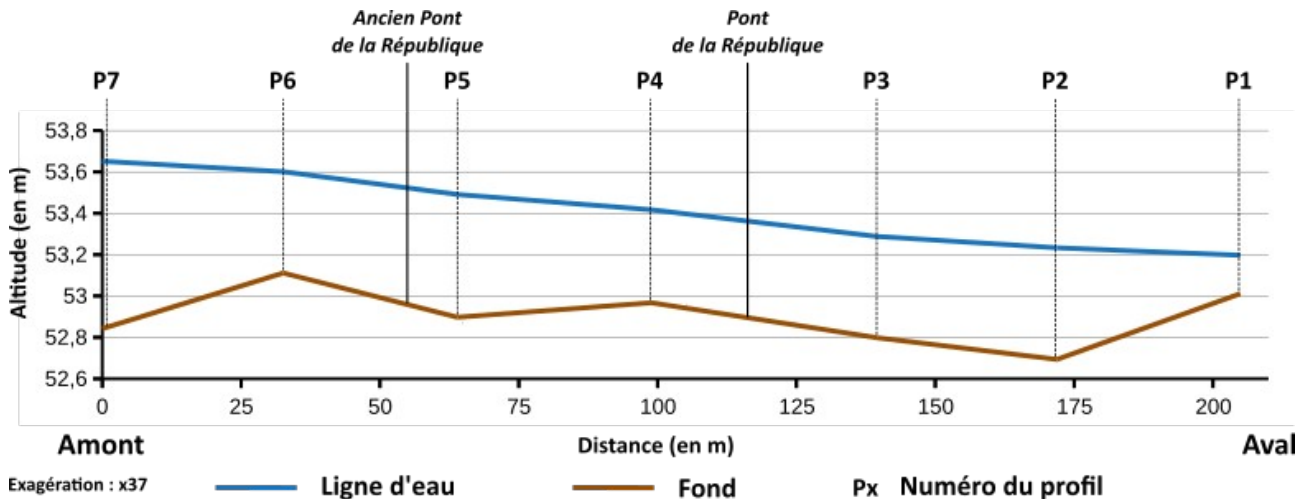


Figure 4.43 : Profil en long (fond et ligne d'eau) au Pont de la République (R. Létondot, 2019)

Profil	1	2	3	4
Hauteur d'eau (m)	0,19	0,53	0,48	0,55
Vitesse	Forte	Moyenne	Moyenne	Forte
Géométrie	Symétrique	Symétrique	Asymétrique	Symétrique
Granulométrie dominante	Cailloux grossiers	Sables (40 cm) et cailloux fins	Graviers fins et sables	Cailloux fins et cailloux grossiers
Faciès	Radier	Plat lentique	Fosse d'affouillement	Plat courant

Profil	5	6	7
Hauteur d'eau (m)	0,59	0,49	0,81
Vitesse	Faible	Moyenne	Forte
Géométrie	Asymétrique	Symétrique	Symétrique
Granulométrie dominante	Graviers grossiers et sables (20cm)	Cailloux grossiers et cailloux fins	Graviers grossiers et cailloux fins
Faciès	Fosse d'affouillement	Plat courant	Chenal lotique

Figure 4.44 : Classification des profils du Pont de la République par faciès (R. Létondot, 2019)

Le site du **Pont de la République** est caractérisé par un **fond irrégulier** et une ligne d'eau en **penne assez forte** (Figure 4.43). On constate plusieurs **ruptures de pentes** faisant varier la hauteur d'eau assez rapidement. Les ponts sont probablement ici la cause de ces replats et accélérations de pentes. Ce profil en long s'accompagne **d'une géométrie en travers variée** qui regroupent plusieurs **faciès d'écoulement de type lotiques** tels que le radier, le plat courant ou le chenal lotique ainsi que des secteurs plus lentiques avec la présence de fosse d'affouillement (Figure 4.44 et 4.45). Concernant la **granulométrie**, on remarque que mis à part quelques bancs de sables, celle-ci est assez hétérométrique et le fond du chenal est principalement constitué de particules comprises entre **les graviers fins et les pierres fines** (Figure 4.44).



Figure 4.45 : Exemple de faciès d'écoulement au Pont de la République (R. Létondot, 2019)

- Sur le secteur du Pont des Biards :

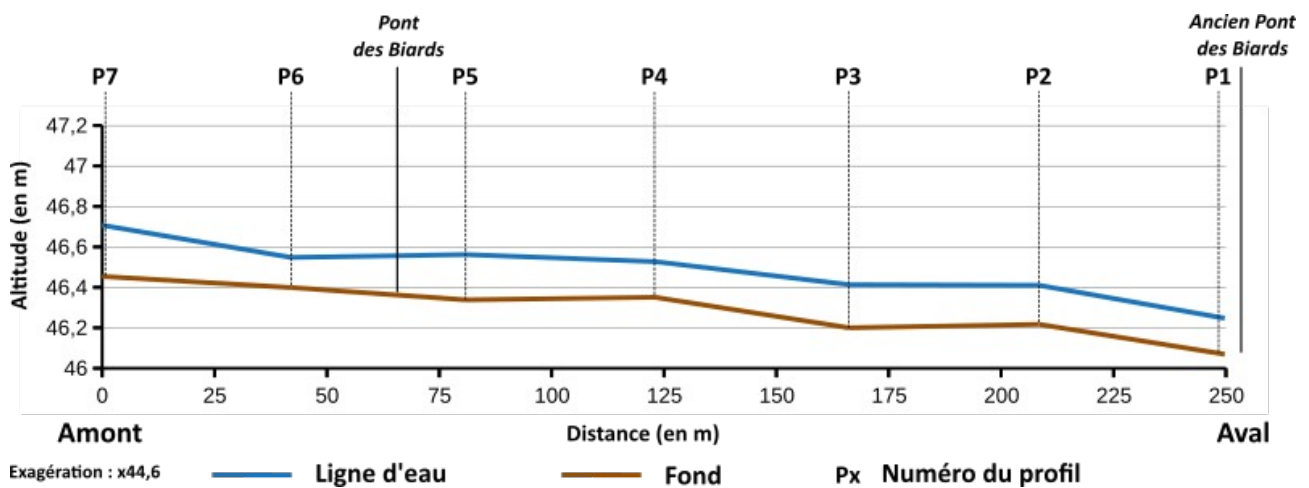


Figure 4.46 : Profil en long (fond et ligne d'eau) au Pont des Biards (R. Létondot, 2019)

Profil	1	2	3	4
Hauteur d'eau (m)	0,25	0,15	0,22	0,17
Vitesse	Faible	Faible	Faible	Faible
Géométrie	Symétrique	Symétrique	Symétrique	Symétrique
Granulométrie dominante	Sables et graviers fins (55 cm)	Sables et graviers fins (70 cm)	Sables et graviers fins (75 cm)	Sables et graviers fins (90 cm)
Faciès	Plat lentique	Plat lentique	Plat lentique	Plat lentique

Profil	5	6	7
Hauteur d'eau (m)	0,21	0,20	0,18
Vitesse	Faible	Faible	Faible
Géométrie	Symétrique	Symétrique	Symétrique
Granulométrie dominante	Sables et graviers fins (85 cm)	Sables et graviers fins (105 cm)	Sables et graviers fins (105 cm)
Faciès	Plat lentique	Plat lentique	Plat lentique

Figure 4.47 : Classification des profils du Pont des Biards par faciès (R. Létondot, 2019)

Le profil en long du **Pont des Biards** illustre très bien l'**homogénéité** sur ce tronçon ne se situant que quelques kilomètres en aval du Pont de la République (Figure 4.46). En effet, la pente de la ligne mais également la pente du fond y sont **très faibles** et aucune rupture vraiment marquée ne peut y être discernée (Figure 4.41). Les faciès sur ce site sont totalement similaires et seul le **plat lentique** peut être observé sur la longueur du tronçon (Figure 4.47 et 4.48). On constate que le fond du chenal est majoritairement constitué de **graviers fins et de sables** et que son **épaisseur varie entre 50 et 105 cm** en moyenne sur les différents profils réalisés (Figure 4.47).



Figure 4.48 : L'absence de diversité morphologique au Pont des Biards (R. Létondot, 2019)

- Sur le secteur de la Mazure :

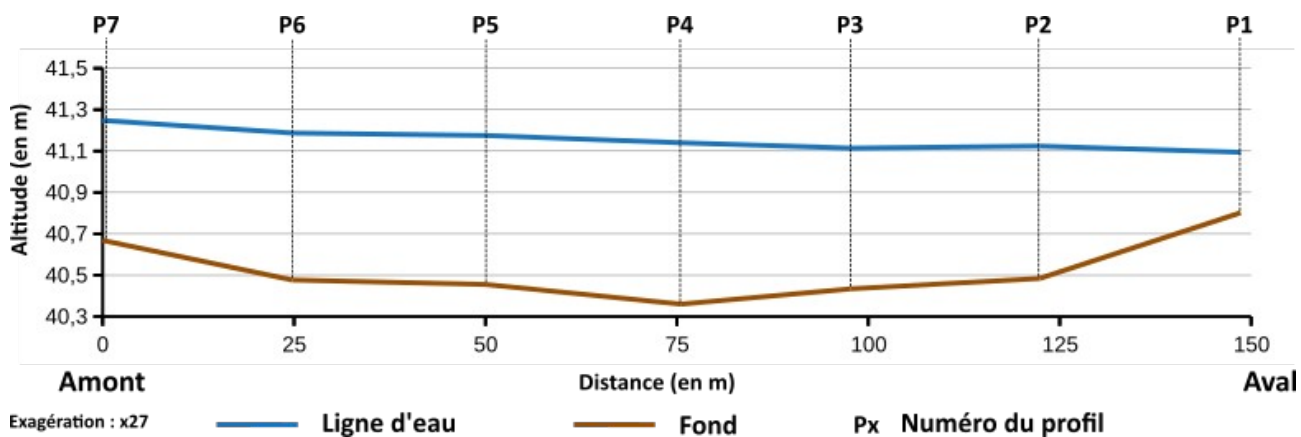


Figure 4.49: Profil en long (fond et ligne d'eau) à la Mazure (R. Létondot, 2019)

Profil	1	2	3	4
Hauteur d'eau (m)	0,29	0,64	0,68	0,78
Vitesse	Forte	Moyenne	Moyenne	Moyenne
Géométrie	Symétrique	Symétrique	Asymétrique	Symétrique
Granulométrie dominante	Pierres fines	Sables et graviers fins (15 cm)	Sables (20 cm)	Sables et graviers fins (15 cm)
Faciès	Radier	Plat lentique	Fosse/Mouille	Chenal Lotique

Profil	5	6	7
Hauteur d'eau (m)	0,72	0,71	0,58
Vitesse	Moyenne	Moyenne	Moyenne
Géométrie	Asymétrique	Asymétrique	Symétrique
Granulométrie dominante	Sables et graviers fins (15 cm)	Sables et graviers fins (10 cm)	Graviers fins, cailloux grossiers et sables (10 cm)
Faciès	Fosse/Mouille	Fosse/Mouille	Chenal lotique

Figure 4.50 : Classification des profils de la Mazure par faciès (R. Létondot, 2019)

Le dernier site, **la Mazure**, est caractérisée par une **hauteur d'eau assez élevée** sur tout le tronçon étudié et un fond en **pente douce** excepté à l'approche du **radier** qui représente ici le premier profil (Figure 4.49 et 4.50). En amont de ce dernier, le fond semble donc former une **légère dépression**. La géométrie en travers est tout de même **plus diversifiée que sur le site précédent** et des faciès illustrant **l'activité morphogène de sur ce secteur** peuvent être observés. C'est notamment le cas des **fosses ou mouilles** dont la présence résulte de l'érosion marquée en rive droite, le cours d'eau étant contraint par un versant **constitué de roches dures**, les cornéennes, en rive gauche (Figure 4.49). Constituée majoritairement de **sables et de graviers fins** sur une épaisseur moyenne de 10 cm, la granulométrie du lit se diversifie de plus en plus et on note la **présence d'un radier**, même si ce dernier est surtout composé de pierres fines.



Figure 4.51 : La Sélune à la Mazure (R. Létondot, 2019)

Analyses et discussions des résultats :

La diversité des faciès au **Pont de la République** résulte de **plusieurs facteurs que ce site cumule**. Situé le plus en amont du barrage l'influence de ce dernier à été moindre et **les réajustements morphologiques ont pu débiter dès la première étape** d'abaissement du niveau d'eau, la remise en eau n'ayant que très peu impactée ce site. La **présence des ponts** entraîne également une dissipation de l'énergie qui provoque des processus d'érosion et de dépôt venant **modifier la géométrie en travers**. Toutefois, les **berges restent encore très homogènes** suite aux travaux de remaniement empêchant le façonnement de faciès réellement « naturels ». Ce site paraît donc propice à **la réémergence de faciès d'écoulement bien différents des anciens lacs** et qui pourrait **favoriser la mise en place d'habitats variés**. Les **populations piscicoles**, et notamment le saumon, pourraient, après restauration totale de la continuité écologique, y trouver des **secteurs favorables à leurs conditions de vie** ainsi qu'à **leur reproduction** et ce notamment sur les faciès de radiers ou la vitesse d'écoulement s'accélère. Le radier du profil 1 est d'ailleurs classé en tant que rader favorable à la reproduction du

saumon dans la typologie précédente (cf. 4.4.1). Cependant, cette rediversification pourrait être **freinée voire détruite** par une concentration trop importante des écoulements dans le chenal principal et **l'impossibilité pour le cours d'eau de déborder sur sa plaine alluviale**. Ce risque étant **important sur ce site** comme nous l'avons vu précédemment (cf. 4.3.3).

Au **Pont des Biards**, la grande homogénéité des faciès d'écoulement est provoquée, comme déjà évoqué, par la présence d'un **banc de sable et de gravier très épais** qui occupe **toute la largeur du lit** et par la mise en place de **travaux de remaniement** de la géométrie de ce dernier. Les **hauteurs d'eau restent très faibles** et la pente **empêche tout réajustement du cours d'eau** sur ce secteur. Migrant peu à peu vers l'aval, ce banc d'accumulation recouvre en plus ce qui devrait être **le véritable substrat du lit**. La question du temps que celui-ci mettra **à réapparaître et à se rééquilibrer** se pose alors sachant que les **puissances spécifiques sur ce site restent très faible** (cf. 4.2.1 et 4.3.3). Le secteur n'est donc **pas, pour le moment, propice à la diversification des habitats** et à la réémergence de faciès favorables aux espèces piscicoles telles que le saumon. Le tronçon au niveau du Pont des Biards devra ainsi probablement faire l'objet de **nouvelles interventions afin de pallier ce problème** qui pourrait engendrer des conséquences tout aussi préoccupantes que l'enneigement d'un fond de vallée.

A la Mazure, des **faciès d'écoulement lotiques** semblent émerger peu à peu malgré un **potentiel de réajustement relativement faible** sur ce site. On remarque également que les berges, avec la présence de **blocs et de souches d'arbres** datant d'avant l'enneigement, sont **plus hétérogènes qu'au Pont de la République ou des Biards** où ces éléments atypiques ont été évacués. Ainsi, même si la granulométrie reste encore soit trop grossière soit trop fine, ce tronçon possède un **certain potentiel en terme de rediversification des habitats aquatiques**. Sa situation en méandres permettant des réajustements morphologiques et une **diversification des formes**. La **large plaine alluviale** en rive droite étant un élément important qui aura **un rôle à jouer dans le développement d'une biodiversité riche**. Les espèces piscicoles pourraient y trouver des **espaces d'abris et de la nourriture**. Reste tout de même la question de **la temporalité de ces réajustements** et des possibles **travaux de restauration qui auront probablement lieu sur ce site** et qui viendront modifier cette morphologie.

L'étude des **nouveaux faciès d'écoulement** en amont du barrage de Vezins permet de rendre compte du **potentiel de la Sélune** dans ce domaine et des **impacts que peut avoir une intervention anthropique** dans les réajustements du fleuve. On remarque que pour que ces faciès puissent se diversifier et donc **améliorer l'état hydromorphologique du cours d'eau**, cette intervention doit être réfléchie et permettre des **variations d'énergie** sur le linéaire concerné. De plus, **la distance en amont du barrage** aura également une influence sur les temporalités de leur façonnement. Après avoir montré que le **Pont de la République** semble être **propice au développement de faciès variés**, que ces derniers **émergent lentement à la Mazure** mais sont **complètement homogénéisés au niveau du Pont des Biards**, il apparaît nécessaire d'apporter une **gestion plus appropriée aux particularités de chaque site**. Dans le cas d'une **opération réussie et pleinement efficiente**, la Sélune pourrait donc retrouver une **dynamique favorable aux faciès de type lotique** qui eux même permettraient le retour **d'espèces animales variées** et de **poissons migrateurs** comme le saumon. Ce dernier aura notamment besoin de **secteur à radiers** répondant à ses critères de reproduction. **Une typologie** de ces derniers, cette fois ci à l'échelle de la retenue et une **étude de leur accessibilité** actuelle peut donc être réalisée afin de détailler cet **aspect essentiel dans l'hydromorphologie d'une rivière**.

Conclusion partielle/transition :

L'ensemble de ces résultats constituent **les éléments de réponse aux problématiques** posées sur les capacités de résilience de la Sélune après **la perturbation engendrée par l'ouverture** - dans un premier temps -, puis l'effacement du **barrage de Vezins**. La réalisation d'**un état initial**, nous montre ainsi que **le changement dans les paysages et la dynamique du fleuve sont considérables**. Les variables de contrôles, le débit liquide et solide, se retrouvent totalement modifié et cela ne sera, dans tous les cas, pas sans conséquences sur **l'équilibre dynamique de ce cours d'eau** qui n'est désormais **plus entravé par le barrage de Vezins**. La question de ses **capacités de résilience** était donc essentielle. Le calcul des nouvelles puissances spécifiques a révélé que **ces capacités sont présentes**, même si d'intensités différentes selon les sites, malgré **le contexte de faible à moyenne énergie**, un degré d'érodabilité des berges faible résultant de l'homogénéité des sols et des apports solides modérés provenant des affluents. **Typique des cours d'eau cet ensemble géologique** du Massif armoricain avec des **temps de réaction et de réponse plutôt longs**, ce n'est donc pas ici les capacités de résilience « théoriques » qui pourrait empêcher la Sélune de rééquilibrer sa balance hydromorphologique. En effet, le problème, si vrai problème il y a, réside dans **la forte anthropisation**, tant ancienne que récente, de ce système. L'inventaire et l'analyse des formes fluviales récemment dénoyées a ainsi démontré que **la plupart d'entre elles sont le résultat des aménagements anciens** (moulins, pêcheries, gués...) qui marquent encore de **réelles ruptures dans la continuité du fleuve**. Ces aménagements représentent aujourd'hui des **contraintes aux réajustements** et ce notamment en raison des protections de berges qui y sont liées et qui **empêchent le cours d'eau d'ajuster ses variables de réponse** (géométrie du lit...), selon les changements de sa dynamique fluviale. Cette anthropisation ancienne n'est de plus pas la seule à limiter le potentiel de réajustement de la Sélune. Plusieurs secteurs ont ainsi fait **l'objet de travaux de restauration** cette fois récents qui **impactent parfois fortement l'activité morphogène** de ce fleuve et pourraient être **la cause de l'absence de réajustements hydromorphologiques** en ce qui concerne les crues les plus fréquentes, ou tout au moins de l'étalement exagéré de leur durée dans le temps. Par effet du système, ces facteurs limitant les capacités de résilience de la Sélune auront alors **d'importantes conséquences sur la qualité et la diversité des habitats aquatiques qui constitue** une dimension primordiale dans une **opération de restauration de cette ampleur** compte-tenu de la législation environnementale. Nous avons effectivement pu mettre en évidence **la difficulté de réémergence de faciès d'écoulement variés**, et le **potentiel frayère, notamment du saumon, encore très limité**. Dans ce contexte, il est légitime de se demander quel sera **l'avenir de la Sélune et si l'opération de restauration apportera les résultats escomptés** pour en faire l'exemple international voulu.

Ces premières conclusions doivent donc maintenant être resituées dans **les limites de la méthodologie** employée et par la relativisation de la **précision des résultats** obtenus. Il est donc important maintenant d'évoquer **les biais et les compléments** qui pourraient être apportés à cette étude. Effectivement, ce travail ne porte que sur des **données recueillies immédiatement après l'ouverture du barrage de Vezins** et les temporalités de réajustement de ces systèmes démontrent qu'**elles ne peuvent suffire à déterminer les capacités de résilience finales de la Sélune**, d'autant plus qu'aucune crue significative n'a eu lieu depuis le début de cette étude. De plus, tous les paramètres rentrant en compte dans la définition de l'état hydromorphologique d'un cours d'eau n'ont pas ici été pris en compte, faute de temps ou de moyens et il convient donc d'évoquer **leurs rôles dans cette métamorphose fluviale**. Enfin, le sujet autour de cet effacement d'ouvrage étant également **beaucoup plus étendu que sa dimension physique et hydromorphologique**, la mention du **projet global de restauration** fera aussi partie des sujets développés dans cette dernière partie. Une attention particulière sera notamment consacrée **au second dérasement de barrage**, celui-ci de la Roche-qui-boit, prévu pour les années à venir. La Sélune n'a donc pas fini d'être perturbée et **son potentiel de réajustement sera encore amené à évoluer**.

V. Discussions et perspectives

5.1. Limites de l'étude et compléments potentiels

Il convient, dans tout travail de recherche, de revenir sur **les limites** que ce dernier comporte et sur **les compléments** qui pourraient y être apportés. En effet, ce projet, réalisé sur un **temps relativement court**, ne prétend ni être parfait, ni **cerner l'ensemble de la problématique hydromorphologique** du dérasement du barrage de Vezins sur la Sélune. Ainsi, rien que par **le nombre restreint de sites d'étude, la précision des appareils de mesures** les méthodes et résultats de ce mémoire se doivent d'être **critiqués**. De plus, **l'ensemble des paramètres** rentrant en compte dans les capacités de résilience, ici encore amenées à évoluer, n'ont pas été abordés et il est donc nécessaire d'évoquer **leur rôle dans les réajustements futurs du système**.

5.1.1. Des méthodes qui restent à approfondir et des résultats discutables

Ce travail a, comme nous l'avons vu, permis la mise en place de **méthodes de mesures et d'analyses variées**. Toutefois, la temporalité, **restreinte entre janvier et juillet 2019**, pour leur mise en place et l'apprentissage récent des différents protocoles conduit inévitablement à l'existence **d'incertitudes et de manques d'informations** dans chacun des traitements qui ont été effectués. Il est donc important d'évoquer **leurs biais** et d'expliquer comment, avec plus de temps et de données, certains d'entre eux **auraient pu être corrigés**.

Dans l'ordre, **l'état initial** avant ouverture du barrage de Vezins représente les premiers résultats de cette étude. Permettant d'avoir une **idée générale des paysages et de la géomorphologie** de la Sélune depuis la construction des ouvrages, sa réalisation aurait pu être améliorée. En effet, **la précision des données utilisées** (Modèle Numérique de Terrain, photographies aériennes, banque de données...) reste **limitée**. Des exemples comme le MNT ici d'une résolution de 25 m, alors que des précisions plus fines (15, 10, 5 m...) existent, ou encore la banque de données de l'occupation du sol, un élément soumis à une variation annuelle, peuvent être cités. De plus, le choix de **discrétiser l'ensemble des polygones en 9 classes** peut également être **sujet à discussion**, d'autant plus que seule **celle concernant l'amont du barrage de Vezins** a ici été détaillée. Ainsi, la réalisation de cet état initial en prenant en compte **plus de métriques** (bancs alluviaux, végétation rivulaire...) **permettant une analyse plus poussée de cet état** pourrait en améliorer la connaissance que nous en avons. Toutefois, c'est avant tout **la réalisation de ce travail après le dérasement des barrages** et les réajustements de la Sélune qui sera nécessaire. Une véritable **comparaison** permettra alors de montrer comment ce fleuve à réagi à cette perturbation et **si son équilibre à été rétabli sur l'ensemble de son linéaire**.

L'estimation du score géodynamique et des capacités de résiliences théoriques du fleuve peuvent **également être critiqués**. Ainsi, alors que la formule du calcul des puissance spécifiques est cohérente, c'est plutôt **les valeurs des paramètres** y rentrant en compte **qui sont ici discutables**. Effectivement, **les débits** ont été estimés selon une formule ne prenant en compte que la superficie amont du bassin versant et occultant par conséquent d'autres critères tels que **la densité des affluents** ou **les variations de pente**. Si les valeurs de **largeurs à pleins bords** peuvent aussi être **sujettes à rectification** en raison de leur estimation parfois biaisée sur le terrain, c'est surtout la **pente de la ligne d'eau** qui constitue **la principale limite de ces résultats**. Celle-ci n'a pu être définie que pour le cours d'eau **en période d'étiage** et serait donc à réestimer pour un plein bord. L'intérêt de la réalisation de mesures dans des **conditions plus optimales** n'est donc pas négligeable. De plus, **l'estimation de cette puissance sur un linéaire plus important** serait également profitable à la détermination de la capacité de travail de la Sélune en amont du barrage.

Concernant **le degré d'érodabilité des berges**, c'est notamment la question de **la représentativité de la mesure** qui peut poser problème. En effet, **seuls 6 prélèvements** ont été effectués et ils pourraient donc être complétés par d'autres prélèvements afin de confirmer, ou non, **la très forte homogénéité** des matériaux au sein de l'ancienne zone de retenue. La **méthode de caractérisation *in situ*** de la texture de ces berges étant également pu **être amélioré** notamment avec une description des horizons à l'état sec et à l'état humide. **L'augmentation du nombre de forage** ainsi que leur **analyse en laboratoire**, notamment à l'aide d'un granulomètre laser permettant de définir le pourcentage de chaque sols (sables, limons ou argiles) constituerait donc des **opérations supplémentaires permettant d'affiner ce diagnostic**. Les analyses en laboratoire, initialement prévues pour ce travail, n'ont pas pu être réalisées faute de temps.

La méthode servant à caractériser le dernier paramètre du score géodynamique de la Sélune dans cette partie, **les apports solides potentiels des affluents**, porte bien son nom. Effectivement, l'approche mise en place ne prend en compte que **le potentiel des affluents en termes d'apports sédimentaires** et ne permet donc pas vérifier si ces derniers sont bien **remobilisés par le fleuve**, une question qu'il conviendrait d'approfondir. Les **autres sources de sédiments** (versants, berges...) n'ont également pas été étudiées. De plus, les résultats se basent ici sur l'étude de **seulement 8 affluents sur les 45 répertoriés** et même si ces derniers représentent le mieux possible leur classe, il est **difficile de généraliser sur cet échantillon**. **L'analyse de plus d'affluents**, fait donc partie des **compléments qui permettraient d'améliorer ce travail**. Le remplacement du nombre d'ouvrage par **une densité** de ces derniers serait également pertinent afin de réduire l'effet de taille de certains bassins versants tels que l'Airon. Toutefois, et malgré ces manques, rappelons que la méthode employée permet tout de même de **mettre en évidence les capacités de résilience de la Sélune dans leur globalité**.

La troisième partie de ce travail de recherche, qui concerne **le potentiel réel de réajustement du fleuve** et les **contraintes imposées** à ce dernier, possède également **des carences** qu'il convient d'évoquer. Ainsi, la **précision dans la digitalisation du nouveau tracé de la Sélune** grâce au levé LIDAR trouve ses limites dans la période de réalisation de ce dernier, alors que toute la zone de retenue n'était **pas encore totalement dennoyée**. Il n'a donc pas été possible de redéterminer précisément le chenal d'écoulement et de mesurer ses variations de largeur. Par conséquent, **l'utilisation du nouveau levé LIDAR**, réalisé en juillet 2019, permettrait la construction **d'indices plus précis** concernant la répétition des **formes fluviales**. Ces formes, dont la **localisation est discutable**, bien qu'ici **suffisante**, en raison de la précision des outils mobilisés (GPS JUNO, kayak), mériteraient également **une analyse plus détaillée**. En effet, prévues initialement, les mesures de largeur, longueur, surface ou encore de volume des bancs de sédiments ou de la taille des blocs exhumés n'ont ainsi pas pu être effectuées en raison de la vitesse du courant et de la praticabilité du terrain. En plus de la **réalisation de ces relevés durant une période de débits encore plus faibles**, des **compléments de mesures** seraient donc à mettre en place afin d'apporter **une réelle analyse de l'émergence de ces formes**, celle-ci restant ici **très descriptive**.

Des constats similaires peuvent être fait pour **l'étude des berges** et de leur état ainsi que de la pente du linéaire étudié. En effet, encore une fois estimée grâce au levé LIDAR dont **les valeurs manquantes ont été interpolées** selon la topographie, **cette pente de la ligne d'eau pourrait être précisée** grâce au nouveau relevé correspondant plus aux conditions lors des mesures de terrain. De même, les lignes de blocs, murets et zones d'érosion n'ont **pas été caractérisés en termes de hauteur ou de taille** des pierres les composant et leur influence sur les différents secteurs dans lesquels elles se trouvent se doit d'être nuancée. **Plus de temps et des données plus récentes** pourraient donc permettre d'apporter des améliorations dans cette partie.

Enfin, **la méthode de ré-estimation des débits** de pleins bords afin de montrer les impacts des travaux de restauration sur l'hydrologie de la Sélune est elle **critiquable pour plusieurs raisons**. La première concerne **la détermination du coefficient de rugosité (ou de Strickler) qui est ici très**

subjective. Effectivement, celui-ci à du être choisi selon des tables fournissant **des ordres de grandeur** en fonction de la végétation rivulaire et de la forme du cours d'eau. Toutefois, le linéaire étudié ayant subi récemment un important abaissement du niveau d'eau, **ces paramètres sont encore difficiles à évaluer**. Bien que son extrapolation par rapport aux débits (ici encore une fois seulement estimés) du jour de la mesure, permet de palier ce problème, **les différences de rugosité entre le fond du lit et les berges** viennent également renforcer cette subjectivité (Degoutte, 2012). Un calcul plus précis, notamment par **la mesure des vitesses** d'écoulement et de **la taille des particules** du cours d'eau, serait donc ici nécessaire afin d'améliorer ces résultats, d'autant plus que **la pente prise en compte est encore une fois celle d'étiage** et non de pleins bords.

Pour finir ce retour réflexif sur les méthodes et résultats de travail, **les limites** de la dernière partie mettant en évidence **le potentiel de recolonisation piscicole** sont encore à évoquer. Celles-ci sont notamment liées **au niveau de développement de l'approche** qui ne constitue ici que **les prémices d'un sujet beaucoup plus large et complexe**. Ainsi, les faciès d'écoulement déterminés sur chacun des sites permettraient, grâce à **des mesures complémentaires et à des analyses hydrobiologiques et hydrodynamiques plus poussées**, de préciser la qualité et la diversité des habitats aquatiques (Malavoi et Souchon, 2002). Par exemple, et dans le cas de cette étude qui s'est d'ailleurs seulement concentrée sur le saumon, **une description et quantification plus détaillées** des paramètres structuraux serait nécessaire pour fournir **des conclusions plus pertinentes**. Les seuils des critères de discrimination des faciès pouvant également être discutés en raison des « *réalités physiques différentes en fonction des régions* » (Malavoi et Souchon, 2002). **La typologie des radiers** est également soumise aux mêmes limites. En effet, cette partie reste **très peu précise** notamment en raison de **l'estimation visuelle de la granulométrie dominante** de chaque radier et **le grand nombre d'autres critères qui devraient ici être pris en considération** (pente, vitesse d'écoulement, végétation, substrats additionnels...). De plus, le saumon est loin de constituer la seule espèce animale représentative de l'état hydromorphologique des cours d'eau et cette étude nécessiterait donc **un niveau d'analyse beaucoup plus conséquent**. Cependant, dans l'idée de fournir une première approche, immédiatement après l'ouverture du barrage de Vezins, et en considérant **le temps et les moyens disponibles**, les résultats obtenus permettent tout de même d'apporter **des premiers éléments de réponse** d'une problématique **tellement importante et sensible** sur ce fleuve qu'il convenait de l'évoquer, même partiellement.

Non exhaustive, la liste de ces **différents biais** et ces **divers compléments potentiels** de ce projet de recherche permet de rendre compte **des limites des méthodes employées**. Cela démontre, même si ce travail possède un **intérêt et une valeur relative** aux compétences disponibles, qu'il doit être **appréhendé avec un certain recul** et que ses résultats sont à **considérer dans leur globalité et selon leur pertinence parfois limitée**. Il convient également d'ajouter que seules les capacités de résilience sont ici représentées et que **tous les paramètres évoqués seront amenés à évoluer** selon l'évolution morphologique du fleuve Sélune et des futures opérations de restauration encore à venir. Une étude des **réajustements hydromorphologiques effectifs** sera donc nécessaire, d'une part pour savoir si l'équilibre du cours d'eau sera rétabli mais également pour déterminer **si le potentiel défini dans ce travail est vérifié** ou non. Pour cela, **divers traitements** pourront être mis en œuvre en plus de l'approfondissement de ceux déjà réalisés. C'est notamment le cas **de comparaisons morphologiques diachroniques** sur le temps long par l'utilisation de techniques telles que **la photogrammétrie**, dont la mobilisation à été écartée, après réflexion, de cette étude. Cette technique, qui consiste à « **modéliser un espace 3D à partir d'image 2D** » (in Laslier, 2018, Gervais, 2010) aurait en effet permis **la mise en évidence des premiers réajustements** observables sur la Sélune. Malheureusement, suite à des **problèmes d'ordre technique et aux temps de traitement** des données, cet aspect n'a pas été détaillé dans ce mémoire. Cela illustre le fait que **l'étendu du sujet** ne permet pas, en si peu de temps, de

s'attarder sur toutes les variables inhérentes à l'hydromorphologie de la Sélune. Il convient donc d'évoquer ces paramètres qui rentrent également dans les capacités de résilience du système et dans l'évaluation de l'efficacité de l'opération de restauration.

5.1.2. Les autres paramètres rentrant en compte dans la résilience du système fluvial

Ce travail de recherche permet de mettre en évidence les capacités de résilience de la Sélune au niveau hydromorphologique. Cependant, il reste très spécifique de la nouvelle dynamique morphologique du fleuve et il apparaît donc nécessaire d'évoquer les autres paramètres rentrant en compte dans le potentiel de réajustement de ce système. En effet, le rétablissement et les variations saisonnières des variables de contrôle (débit liquide et solide) joueront un rôle dans les temporalités et dans l'importance de ces réajustements. La qualité physico-chimique de l'eau résultera notamment de cette variabilité et de la restauration de ces flux. De même, la végétation rivulaire évoluera avec les modifications de la largeur du chenal et du niveau de la nappe d'accompagnement. Faisant tous l'objet de suivis dans le cadre de cette opération, il convient de montrer quel serait l'intérêt d'étudier ces aspects dans le cadre de ce sujet.

Nous l'avons vu, l'abaissement du niveau d'eau et le rétablissement de la continuité sédimentaire suite à l'ouverture du barrage auront d'importants impacts sur l'hydromorphologie du cours d'eau. En revanche, il est ici pertinent de préciser que la réponse morphologique du fleuve dépendra de la variabilité saisonnière de ces flux, et notamment du débit, et plus particulièrement des extrêmes hydrologiques comme les crues (Melun, 2012). L'ampleur et la temporalité des réajustements dépendront donc de la durée entre la vidange des lacs et la première crue prononcée (Melun, 2012) (Figure 5.1). En effet, si cette crue survient juste après l'ouverture du barrage, les berges n'ont pas eu le temps de se stabiliser et seront encore saturées en eau ce qui entraînera leur érosion mais si au contraire, la crue n'apparaît que plus tard, ses effets morphologiques auront tendance à diminuer avec l'assèchement des sédiments et le développement de la ripisylve (Melun, 2012). Le potentiel de réajustement diminue donc en fonction de cette durée (Figure 5.1).

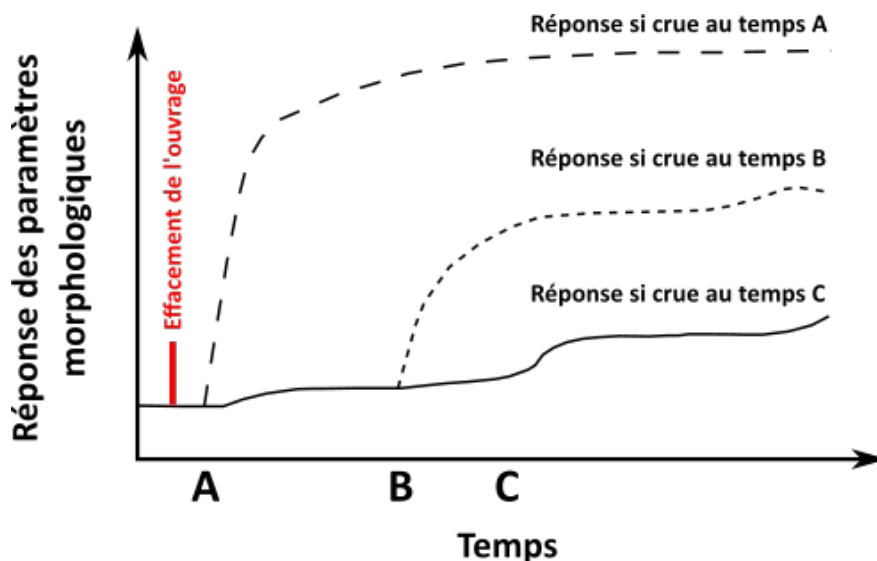


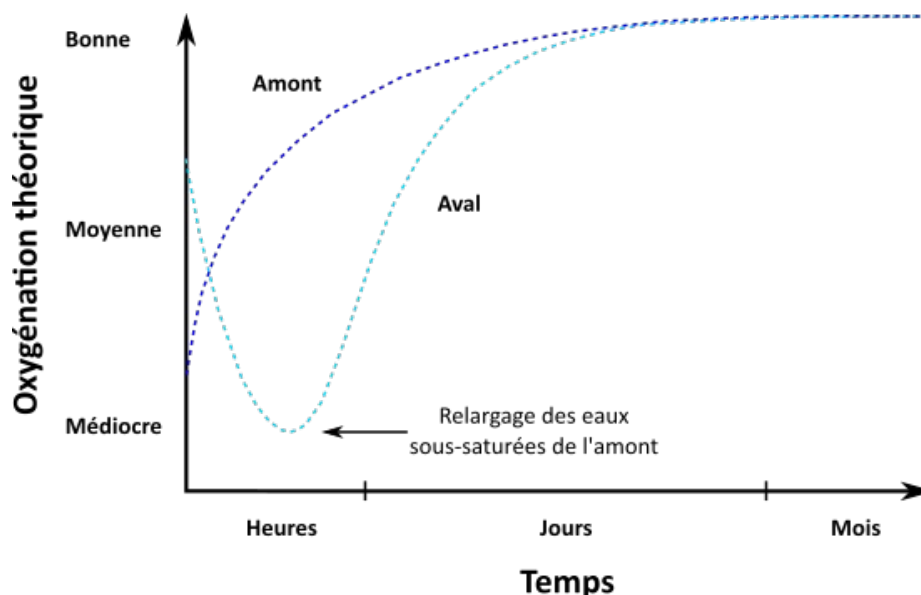
Figure 5.1 : Temporalités des réponses morphologiques selon l'occurrence d'une crue donnée (in Melun, 2012, d'après Doyle et al., 2002)

Cet aspect n'a cependant pas pu être étudié dans le cadre de ce mémoire en raison de sa temporalité ne permettant pas d'analyser les effets d'une potentielle crue, d'autant plus le le barrage

de Vezins à été **remis en eau durant l'hiver 2019**. Il serait donc intéressant de s'y intéresser lors de la première saison des hautes eaux suite à l'effacement du barrage.

Cette perturbation dans l'hydrologie du cours d'eau ne sera également pas sans conséquences sur **le transport solide du cours d'eau**. Ainsi, **la remobilisation, ou non, des sédiments** aura un impact sur **l'intensité des réajustements et la capacité de travail du la Sélune**. Seulement évoquée, une étude plus détaillée afin de **caractériser cette charge et ses conséquences** sur les processus de **rediversification des formes fluviales** au sein de l'ancienne zone de retenue serait un complément à apporter à ce travail. De plus, **la concentration des particules les plus fines**, les Matières en Suspension (MES), a connu une **forte augmentation** suite à son ouverture et en raison de la remobilisation des sédiments accumulés dans la retenue (Melun, 2012). En connaissant **le risque de dégradation de l'habitabilité** du cours d'eau si cette concentration est trop forte, son suivi devra être effectué afin de **préciser l'efficacité de l'opération de restauration**.

Des **risques de pollution ou de dégradation de la qualité de l'eau** lors d'effacement d'ouvrage de ce type sont également à craindre. Bien que cette dimension soit relativement plus éloignée de notre sujet, **la qualité physico-chimique** du cours d'eau aura tout de même un **impact sur les réajustements**, notamment biologiques du fleuve. Ainsi, à l'image des concentrations en oxygène dissous, dont **la teneur s'améliore** après le relargage des eaux sous-saturées de la retenue en aval (in Melun, 2012, Gerster et Rey, 1994) (Figure 5.2), plusieurs éléments (températures, substances nutritives, particules toxiques...) vont **se rééquilibrer entre l'amont et l'aval du barrage**. Cependant, avant cette amélioration, **un risque de dégradation post-opération est à craindre**. En effet, si la vidange n'est pas réalisée correctement, **un relâchement de ces éléments pouvant être nocifs à la vie aquatique** en trop grande quantité (phosphate, nitrates, métaux lourds...) alors accumulés dans les eaux de la retenue, pourrait provoquer **des dégâts considérables sur l'équilibre fragile** de l'hydrosystème (Melun, 2012, Michler, 2018).



La qualité de l'eau de la Sélune durant cette opération n'a pas ici été abordée en raison du **manque de connaissance**, de **l'éloignement du sujet** et de **la présence du barrage de la Roche-qui-boit** qui, comme cela sera détaillé par la suite, ne permet pas pour le moment une étude détaillée **des réajustements en aval** de l'ouvrage principal. **Suivi depuis les premières étapes de l'opération** de dérasement du barrage de Vezins, il convenait tout de même d'évoquer ce paramètre dont l'évolution

aura **des répercussions en terme d'atteinte des objectifs du bon état écologique** fixés par la législation en vigueur et notamment la **Directive Cadre sur l'Eau**. La question de **l'exploitation agricole** et des intrants pouvant ruisseler dans le cours d'eau et le polluer via **les versants des sous-bassins** des affluents serait donc par exemple une question pertinente pour apprécier l'évolution de **la qualité physico-chimique du fleuve**.

Les deux derniers paramètres pouvant **influer sur le potentiel de réajustement de la Sélune** et qui auraient pu constituer des compléments à ce travail sont très liés et concernent **le niveau de la nappe d'accompagnement** du fleuve et **la végétation rivulaire**. L'ouverture du barrage va ainsi entraîner une **forte diminution du niveau piézométrique de cette nappe** alluviale. Celle-ci va alors **se réajuster au niveau limnimétrique** (la nouvelle ligne d'eau) entraînant **l'assèchement et le ré-essuyage des berges**, facteur **d'aggravation de leur stabilité** dans un premier temps (Melun, 2012) (Figure 5.3). On voit alors apparaître des **fosses de dessiccation**, nombreuses sur les sites étudiés, provoquant des processus d'affouillement et de sapement en pied de berge (Melun, 2012) (Figure 5.3). On se rappelle ici les glissements et marque d'érosion au niveau du site de la Mazure ainsi que les fosses parfois très profondes en berges.

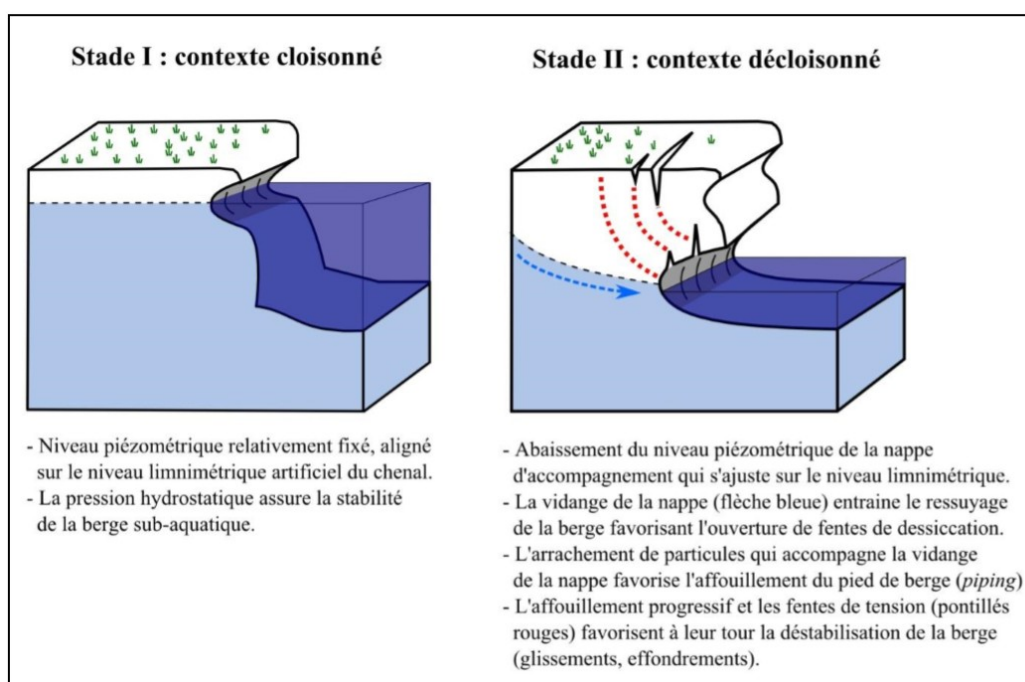


Figure 5.3 : Impact de l'abaissement du niveau d'eau sur la nappe d'accompagnement du cours d'eau et les réajustements morphologiques (in Melun, 2012)

La variation du niveau de cette nappe aurait donc pu, avec plus de temps et de moyens, faire **l'objet d'une partie de cette étude** afin de montrer comment celle-ci pourrait **influer les réajustements morphologiques** du chenal. De plus, cette conséquence de l'effacement du barrage aura également des **effets sur la nouvelle végétation riparienne** de la Sélune.

Ainsi, avec **le changement dans la dynamique fluviale** et la disparition des lacs de retenue, **la ripisylve**, qui recolonisera peu à peu les berges exondées est amenée à **suivre plusieurs stades de développement**. Sur la zone la plus éloignée du chenal et correspondant aux **anciennes berges**, la diminution de la ressource en eau inhérente à l'abaissement du niveau de la nappe et la stabilisation du sol, entraîne **l'émergence d'espèces ligneuses plus adaptées à ces conditions** (Figure 5.4) (Melun, 2012). Toutefois, dans le cas d'une **déconnexion trop importante** des conséquences en termes de **dépérissement, déstabilisation des berges** en raison du rôle de la végétation dans leur cohésion et de

dégradation des biomes en places peuvent être observées (Melun, 2012, Laslier, 2018). **L'espace nouvellement exondé** est lui **peu à peu colonisé par une végétation hygrophile** se développant sur les sédiments asséchés et qui constituent **le nouveau lit majeur du cours d'eau** (Figure 5.4) (Melun, 2012). Difficile à estimer, le temps de recolonisation de ces espèces **dépendra des conditions hydro-climatiques** et pourra s'étendre sur plusieurs années. Ce secteur est donc propice au **développement d'espèces invasives** ce qui pourrait provoquer un **appauvrissement des nouvelles biocénoses** (in Melun, 2012, Lenhart, 2000). Dans tous les cas, la revégétalisation de ce secteur influencera **la stabilité des berges** et impactera de ce fait **les réajustements latéraux** du cours d'eau (Melun, 2012). Le nouveau chenal est lui caractérisé par **l'apparition d'une végétation aquatique** conditionnée par les **vitesse d'écoulement** et les **apports en nutriments** (Melun, 2012) (Figure 5.4).

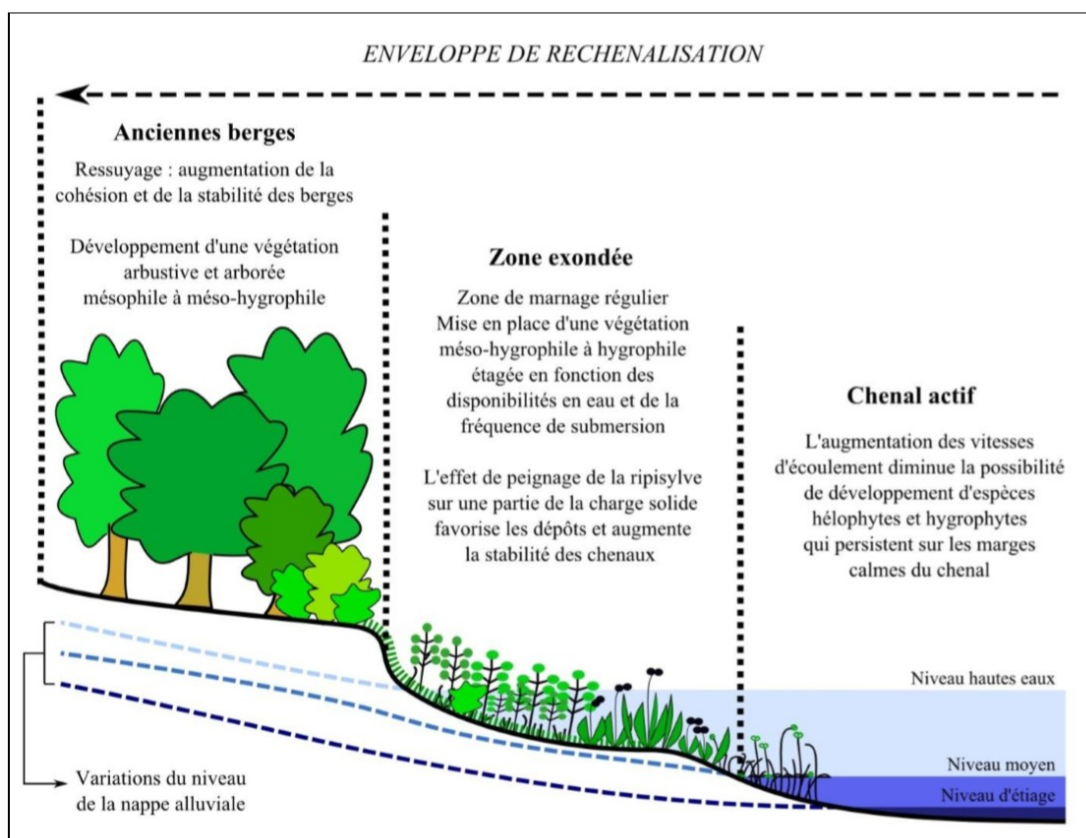


Figure 5.4 : Impacts du décloisonnement sur le développement de la végétation rivulaire (in Melun, 2012)

La végétation rivulaire joue un rôle **capitale dans le potentiel de réajustement du fleuve** et notamment sur la stabilisation de son lit mais également en ce qui concerne la rediversification des habitats et le développement de la biodiversité. On remarque ainsi que les zones de frayères du saumon sont beaucoup plus fréquentées si ces dernières possèdent un taux d'ensoleillement et d'ombrage optimal (AFB, 2019). Il avait initialement été prévu de s'intéresser à ce sujet sur la Sélune et notamment de **mettre en évidence ses répercussions sur la morphologie de la Sélune et sur la réémergence d'habitats aquatiques**. Toutefois, en raison de **la remise en eau** qui a provoqué le retour au point mort concernant cet aspect, celui-ci a été **mis de côté pour le moment**.

Cette partie démontre que le sujet ici abordé est **extrêmement large** et que de **multiples paramètres** influent sur **les réajustements du système** et sur ses capacités de résilience, impossible, donc, de tous les développer dans une temporalité aussi courte. Il était préférable de **centrer ce travail sur l'étude des capacités de résilience** dans le cadre de **l'anthropisation marquée du fleuve** et des contraintes que cela impliquait.

Transition :

Comme tout travail de recherche, ce mémoire comporte donc **ses limites** et doit d'être **appréhendé avec un esprit critique**. Son objectif n'était bien évidemment pas de fournir une analyse complète de la nouvelle dynamique fluviale de la Sélune et de **nombreux compléments pourrait y être apportés**. **L'évaluation de l'efficience de l'opération** de restauration nécessiterait de prendre en compte **l'ensemble des paramètres constituant l'hydromorphologie du fleuve** afin de mettre en évidence **les risques potentiels** que représente le dérasement de cet ouvrage pour **l'état écologique de la Sélune**. La **détermination des capacités de résilience**, sur lesquelles portent ici ce mémoire, ne constitue que **la première étape** d'une étude dans laquelle **tout ces aspects devront être considérés**. C'est d'ailleurs dans **un projet encore plus global** que s'inscrit le dérasement du barrage de Vezins et il convient maintenant d'évoquer **l'avenir de cette vallée** qui subit aujourd'hui **une perturbation et un important changement paysager**, et qui en subira de nouveau, dont les **répercussions ne concernent pas simplement sa dimensions physique**.

5.2. Le début d'une opération de restauration : quel avenir pour la vallée ?

Après avoir évoqué les **limites de ce travail** et les différents aspects qui auraient pu être étudiés **en complément** afin de cerner **l'ensemble de la problématique hydromorphologique** de la Sélune, il est maintenant essentiel de montrer que **l'avenir de la vallée toute entière** sera déterminé par **cette opération qui se veut exemplaire**. Il s'agira donc de revenir sur le fait que les réajustements dans ces milieux de faible à moyenne énergie ne pourront **se produire que sur le temps long** et que **l'équilibre du système** et les attentes en terme d'amélioration de l'état écologique **sont encore incertaines**. De plus, cette **restauration fluviale** ne saurait être abordée sans prendre en compte **la présence du second barrage**, celui de la Roche-qui-boit, dont le dérasement est également prévu, et qui **conditionnera l'ensemble des réajustements** de la Sélune. Enfin, la réussite de cette opération ne se limite pas à sa dimension physique écologique et **ses répercussions sur les usages et représentations de la vallée** se doivent d'être mentionnées.

5.2.1. Des capacités de résilience qui induisent des réajustements à suivre sur le long terme

La présente étude s'est attachée à déterminer, du mieux possible, **le potentiel de réajustement de la Sélune** en prenant en compte **l'intensité de son anthropisation** qui est ici très ancienne. Nos résultats ont ainsi montré que même si ce fleuve possède certaines capacités de résilience, caractéristiques d'un système de faible à moyenne énergie, il est, pour le moment, possible que les **réajustements hydromorphologiques soient trop contraints** pour se mettre en place après l'effacement du barrage. Par conséquent, **une réversibilité totale et un retour à l'état originel** (avant l'aménagement anthropique de la vallée) n'étant théoriquement envisageable qu'avec une **restauration parfaite des conditions ante-cloisonnement** (barrages comme aménagements plus modestes) (Melun, 2012), il est difficile de croire que cela pourrait **se produire sur ce fleuve**. Reste alors la question de **la temporalité de cette résilience** qui, selon les paramètres étudiés, peut s'étaler dans ce contexte, sur **plusieurs années voire plusieurs dizaines d'années**. Cependant, il est également possible que **certaines des variables ne connaissent jamais les réajustements** auxquels il aurait été possible de s'attendre. En effet, que cela soit en raison des contraintes imposées par des interventions calibrées selon des objectifs précis (limite de l'érosion latérale...) ou tout simplement parce que le système ne possède plus les capacités nécessaires, **leur résilience ne se met parfois jamais en place** suite au désaménagement (Melun, 2012). Ce phénomène peut également s'expliquer par des **modifications extrinsèques au système** survenues durant la période de cloisonnement. Ainsi, dans le cas la Sélune, la recolonisation potentielle des saumons pourrait être limitée par **le déclin de cet espèce depuis la construction des barrages** notamment en raison de leur surpêche en mer. La recolonisation de ces espèces migratrices ne pourra donc que **difficilement atteindre un niveau égal à celui d'avant la construction des barrages** (in Melun, 2012, Doyle *et al.*, 2005).

En ce qui concerne **les conditions hydromorphologiques**, le même constat peut être effectué. En effet, une **réversibilité complète** sous-entend que les variables de contrôle (débits liquide et solide) retrouvent **les mêmes caractéristiques que la période ante-construction** des barrages (in Melun, 2012, Doyle *et al.*, 2005) . La Sélune et son bassin versant ayant été de plus en plus artificialisés, ses paramètres s'en sont **forcément trouvé changés** même dans le cas d'un décroisonnement complet. Par conséquent, il est **extrêmement difficile d'estimer les temporalités** de cette résilience et si celle-ci sera effective pour l'ensemble des variables hydromorphologiques. De plus, les **seuls exemples comparables à cette opération**, que nous avons déjà évoqué (cf. 1.1.3), sont encore **trop récents** pour pouvoir déterminer quel serait **le temps de résilience d'un système tel que la Sélune**. Toutefois, des hypothèses théoriques peuvent être proposées. Ainsi, Doyle *et al.* distinguent **deux scénarii de réversibilité**, ou résilience, des systèmes fluviaux (Figure 5.5). Le premier correspondrait à la

réversibilité totale de toutes les variables ce qui correspondrait, à long terme, un retour du système à son état originel (Figure 5.5) (in Melun, 2012, Doyle *et al.*, 2005) . Cependant, vu les résultats de ce travail et **les capacités de résilience limitées de la Sélune**, il est plus probable que ce fleuve s'oriente vers **le second scénario**. Dans celui-ci, la résilience ne serait **pas pleinement effective**, même plusieurs dizaines d'années après la restauration de la dynamique fluviale, et **certaines composants du système pourrait même ne jamais se réajuster** (Figure 5.5) (in Melun, 2012, Doyle *et al.*, 2005).

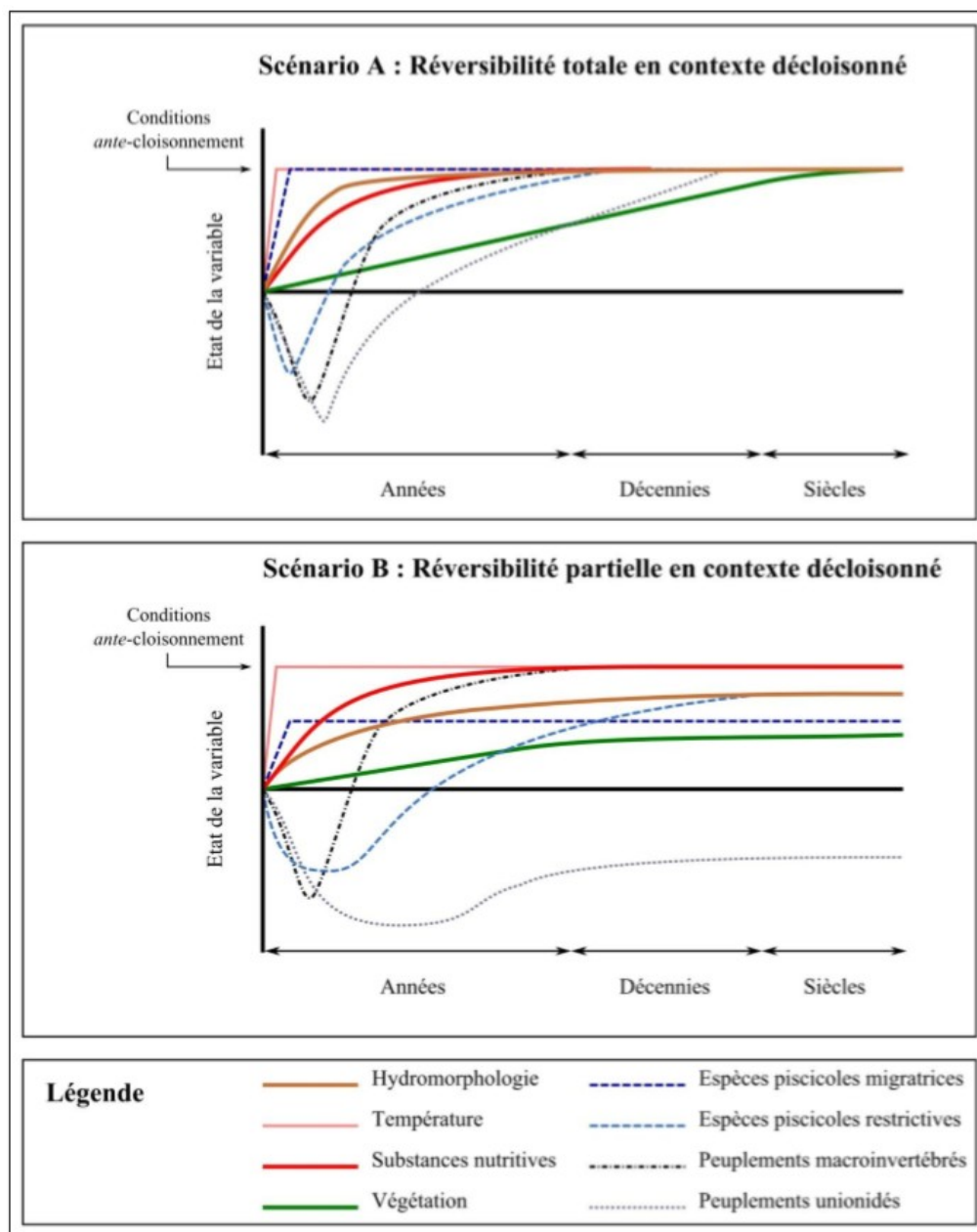


Figure 5.5 : Temporalités théoriques de la réversibilité des variables du système fluvial après effacement d'ouvrage (in Melun, 2012, Doyle *et al.*, 2005)

Ces graphiques montrent ainsi que **les réajustements d'un système fluvial**, et cela est encore plus vrai dans le contexte de faible à moyenne énergie de la Sélune, ne peuvent se mettre en place que **sur de très longues temporalités**. Ainsi, le retour des espèces migratrices ne peut s'effectuer que sur plusieurs années et la mise en place d'**un équilibre morphologique stable**, si cela est possible, prendre **plusieurs dizaines d'années** et parfois s'étendre sur un siècle (Figure 5.5). Sachant cela, il est donc nécessaire que **les réajustements de la Sélune fassent l'objet d'une étude sur le long, voir très long**

terme. Les capacités de résilience mises en avant dans ce travail démontrent en effet, que seul **le temps** pourra valider, ou non, l'efficacité de cette opération. De plus, il convient de rappeler que **l'intensité de cette perturbation** sera influencée par **le dérasement du barrage de la Roche-qui-boit** dont les travaux d'effacement n'ont pas encore commencé.

5.2.2. Un projet qui ne fait que commencer : un second barrage encore en place

Ce travail de recherche concerne ici les capacités de la résilience de la Sélune en un instant t , **quasiment immédiatement après l'ouverture du plus grand barrage** celui-ci de Vezins. Toutefois, outre les divers aménagements anthropiques qui devront faire l'objet d'une gestion appropriée, c'est surtout **la présence d'un second barrage**, celui de la Roche-qui-boit, qui pour l'instant empêche le rétablissement d'une véritable **continuité écologique**. En effet, nous l'avons vu, la Sélune n'était pas entravé par un mais bien par deux grands barrages espacés **seulement de 5 km l'un de l'autre**. Plus en aval mais aussi plus petit, celui de la Roche-qui-boit constitue **le dernier obstacle** conséquent de la Sélune avant sa confluence dans **la Baie du Mont-Saint-Michel** (Figure 5.6). Son dérasement fait donc partie du **projet global de restauration écologique du fleuve**.



Figure 5.5 : Le lac du barrage de la Roche-qui-Boit (R. Létondot, 2019)

Prévu pour **2021**, l'effacement de cet ouvrage représentera **le décroisement définitif de la Sélune** après qu'il ait fourni de l'électricité « propre » pendant plus de 90 ans. Le barrage de Vezins sera déjà déconstruit et cette seconde opération pourra donc **être améliorée grâce aux enseignements en termes d'impacts hydromorphologiques et écologiques de cette première suppression**. Cependant, **les risques de dégradation** seront encore plus importants car cette fois, aucun autre ouvrage plus en aval ne pourra servir de « tampon » **au relargage des sédiments et des eaux potentiellement pollués**. Les sédiments accumulés dans la retenue du barrage de Vezins ont en effet pu être stockés en partie dans cette seconde retenue. **Leur gestion devra par conséquent être d'autant plus adaptée** pour limiter l'altération de la qualité de l'eau plus en aval et ne pas reproduire une catastrophe écologique comme celle de 1993. La présence de ce second barrage renforce ainsi **la nécessité d'effectuer un suivi sur le long terme** de la résilience et des réajustements de la Sélune. De plus, une fois la continuité rétablie, il sera possible d'étudier **les réajustements de ce système en aval**. Effectivement, ces derniers ne peuvent pas encore faire l'objet d'un travail similaire à celui-ci puisque la retenue de la Roche-qui-

boit débute quasiment immédiatement après le barrage de Vezins. **Tout aussi important qu'en amont**, les effets de ce type d'opération sur l'aval du cours d'eau doivent également être appréhendés afin **d'évaluer l'efficacité de l'opération de restauration dans sa globalité**. Ce n'est que par l'étude de la réponse du système dans son ensemble que de réelles conclusions pourront être émises sur **l'ajustement du système vers son nouvel équilibre dynamique**.

Tous ces éléments démontrent que le cas de la Sélune et de l'effacement de ses barrages est **particulièrement unique**. L'hydromorphologie du fleuve était, par **le cumul de ces deux ouvrages**, profondément modifiée, et **la perturbation engendrée** par leur démantèlements successifs en sera alors **doublement importante**. Que cette opération, qui ne fait que commencer, devienne un exemple international ou pas, elle devra surtout **permettre de répondre à des objectifs d'amélioration de l'état hydromorphologique et écologique** du fleuve tout en proposant des **solutions pour conserver le dynamisme de cette vallée**. En effet, ces dérasements ne doivent pas être appréhendés selon leur seule dimension de restauration physique mais dans **un projet de renaturation global** qui doit également prendre en compte **le sociosystème construit autour de ce fleuve** qui, lui aussi, s'était **adapté à la présence des lacs** et de ces grands ouvrages hydroélectrique.

5.2.3. Un démantèlement qui doit s'accompagner d'un véritable projet de territoire

Dans l'étude de **l'impact hydromorphologique** du dérasement du **barrage de Vezins** et de celui de **la Roche-qui-boit** encore à venir, il ne faut pas oublier que cette opération **ne concerne pas seulement la dimension physique** du cours d'eau. Le **dynamisme de la vallée toute entière** se trouvera modifié par cette perturbation et il convient donc de rappeler la nécessité d'inscrire ces effacements d'ouvrages hydroélectriques dans **un véritable projet de territoire** prenant en considération toutes les dimensions qui sont liées, de près ou de loin, à ce fleuve.

Ces pour ces raisons que **le Schéma de Développement Durable de la Vallée de la Sélune** à été mis en place en 2011. Celui-ci à pour objectif d'étudier **le potentiel de cette vallée** et de **proposer des solutions de gestion** afin « *d'accompagner les acteurs locaux dans leur projet de reconversion* » (Germaine, date?). Cet aspect est **bien trop souvent absent des opérations de restauration** qui ont été mises en œuvre et même si ce Schéma de Développement est ici discutable notamment pour des questions budgétaires, il permettra **d'aider la prise de décisions des gestionnaires** qui se retrouvent face à un dérasement qui provoque de nombreux débats. En effet, au delà des **bénéfices écologiques** que pourrait apporter la suppression des barrages, elle engendre également des **changements socio-économique importants** notamment en ce qui concerne **les activités et le tourisme** de la vallée (SDD vallées de la Sélune, 2011). Ainsi, **la question des paysages** est très présente (et la revalorisation paysagère du cours d'eau ainsi que celle **du patrimoine historique nouvellement découvert** devra faire partie de **la renaturation du fleuve**. **La qualité de l'eau, la recolonisation piscicole et la préservation de la biodiversité** font également partie des **enjeux de cette opération** et rentreront en compte dans sa réussite. **La gestion des déchets et le développement de solutions énergétiques** suite à la perte des barrages rentrent bien évidemment aussi en compte dans ce Schéma de développement durable. **L'agriculture**, dont le lien avec l'eau est important, tant au niveau de **l'approvisionnement** dans un contexte d'augmentation de la durée des périodes de sécheresse que sur le maintien d'une **bonne qualité du milieu**, est un autre sujet qui nécessitera la mise en place d'une **gestion durable**. Enfin, et cela fait partie d'un point crucial dans l'opération de restauration de la Sélune, **des stratégies d'adaptation** devront être développées, notamment **au niveau touristique**, pour combler les pertes induites par les dérasements. Les lacs constituaient **une source d'activité et de loisirs** tant pour les habitants de la vallée, ses usagers (pêcheurs...) que pour les touristes. Il est donc important que **le projet s'accompagne d'une valorisation et d'une communication** qui permettront de donner à la

vallée un **nouveau dynamisme** pour ne pas provoquer son déclin. En effet, la **restauration de l'équilibre hydromorphologique** serait une réussite importante de l'opération mais encore faut-il qu'une certaine **sensibilisation autour de cette problématique** soit instaurée pour assurer sa **préservation**.

Quoi qu'il en soit, la mise en évidence de ces enjeux **dépassant la seule dimension physique** de la Sélune, démontre que cet hydrosystème ne doit pas ici être considéré dans la simple interaction entre toutes les composantes morphologiques, écologiques et biologiques mais plutôt, comme l'écrivent Jean-René Malavoi et Paul Bravard, « *un système plus complexe* » qu'il serait possible de **qualifier ici de géosystème** (Figure 5.6).

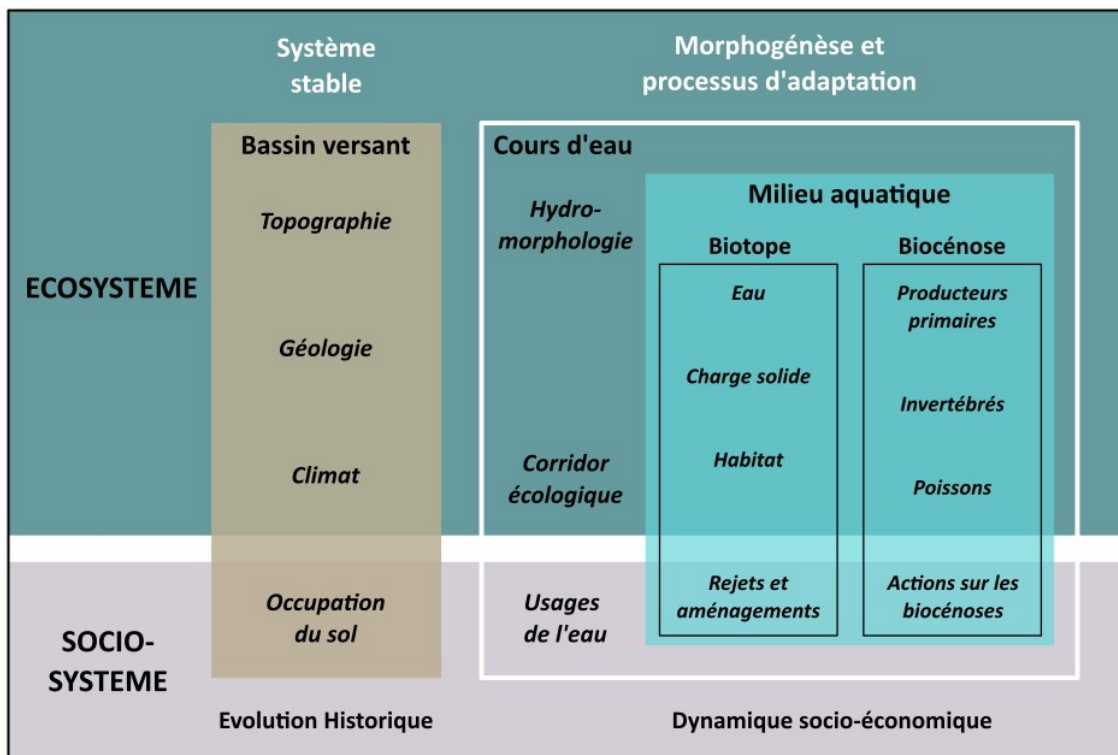


Figure 5.5 : Les différents compartiments de l'hydrosystème (Malavoi et Bravard, 2010, D'après P. Paris)

Ce schéma (Figure 5.6) montre ainsi que, dans **cette approche par l'hydrosystème de ce type d'opération** de restauration et dans l'anthropisation croissante de ces milieux, **les aspects physiques comme socio-économiques** doivent être abordés. Le terme de **résilience** est alors ici à **élargir à l'ensemble du système**. De ce fait, même si cela n'est pas le sujet de ce travail, les capacités de résilience de la Sélune concernerait **son potentiel de réajustement hydromorphologique** mais également **les capacités des populations à se réadapter et à trouver des stratégies pour revaloriser la vallée**. On pense notamment ici aux anciens aménagements (moulins, pêcheries...) dont certains pourrait être conservés dans un but patrimonial. Toutefois, **les désaccords et les difficultés d'une gestion concertée** entre les très nombreux acteurs (associations, agences environnementales, usagers, habitants...), peuvent, et ce particulièrement dans le cas de la Sélune, **générer des conflits souvent néfastes** au bon avancement de cette renaturation. **La réussite finale de l'opération** de dérasement des barrages de Vezins et de la Roche-qui-boit devra donc être évaluée en prenant en compte les résultats **en terme d'amélioration de l'état écologique**, objectif fixé par la DCE, mais également en **terme de redynamisation de la vallée** autour d'un **véritable projet de territoire** faisant, au maximum, consensus.

Conclusion partielle/Transition

Cette partie était importante afin de montrer quelle pouvaient être **les limites de ce travail**, qui sont tout de même nombreuses, et **les compléments** qu'il serait possible d'y apporter. **Les méthodes employées sont en effet critiquables** et plus de temps, de moyens ainsi que de données auraient été favorables à **l'amélioration de la précision des résultats** et des conclusions qui restent encore très partielles. De même, le **sujet étant extrêmement large**, des choix ont du être fait en ce qui concerne **les variables étudiées** et une analyse complète des capacités de résilience de la Sélune nécessiterait la prise en compte des **autres paramètres influençant ce potentiel de réajustement**. Il convient également de rappeler que l'opération de restauration et de renaturation de la Sélune **ne fait que débiter** et que son suivi devra s'étaler, en raison de la temporalité des réajustements, **sur le long terme**. L'effacement programmé du **barrage de la Roche-qui-Boit** confirme ce besoin d'un accompagnement pour permettre aux gestionnaires de faire **les choix les plus adaptés et les moins risqués pour le milieu**, la suppression d'un ouvrage de cette taille pouvant être tout aussi dangereux que sa construction. Ce suivi ne devra pas non plus se restreindre à la seule dimension physique du fleuve mais bien considérer **l'ensemble des problématiques inhérentes à une opération d'une telle ampleur**. Ce n'est qu'en **conciliant tous les intérêts et en répondant à tous les enjeux** que ce désaménagement **pourra devenir l'exemple voulu**, même si les résultats ne pourront pas faire l'objet de conclusions avant plusieurs années, au moins. La Sélune, cours d'eau déjà bien anthropisé par le passé, n'est ainsi **pas au bout de ses peines** et **longue sera sa rémission** face à la libération de ses eaux. Tout doit donc être mis en œuvre pour que le fleuve retrouve **un équilibre stable** répondant à **l'urgence environnementale**.

Il maintenant temps de **conclure sur l'ensemble de ce travail** de recherche qui se sera étalé sur presque une année. **Toutes les parties** seront donc dans cette conclusion liées entre elles afin de montrer que l'étude de **la réponse d'un cours d'eau face à une perturbation** et notamment face au désaménagement, est **plus complexe** qu'il n'y paraît. **L'importance de ce dérasement**, qui a réellement débuté très récemment, sera également évoqué **au sein du monde scientifique** et un retour sur **les apports personnels** que ce mémoire m'a apporté constituera le dernier paragraphe de cette conclusion.

Conclusion

La Sélune, comme tout système fluvial, possède **le potentiel d'ajuster ses conditions hydromorphologiques** en fonction des variations de son débit liquide et de son débit solide. Cette **résilience**, qui permet théoriquement au cours d'eau de rétablir, de lui même et en permanence, **son équilibre** grâce à ses capacités autorégulatrices, est la clé de **la restauration des différents composants de l'hydrosystème** suite à une perturbation. **Des perturbations**, la Sélune en subit depuis que les fleuves sont aménagés et utilisés par l'homme à des fins économiques ou énergétiques. Parmi ces dérèglements, aucun n'avaient, jusqu'à aujourd'hui, encore eu autant d'impacts sur ce système que **la construction des deux grands barrages hydroélectriques de Vezins et de la Roche-qui-boit**. N'échappant pas à la règle, ces ouvrages ont totalement bouleversé, pendant plus de 90 ans, **la dynamique fluviale de ce fleuve** en modifiant ses conditions morphologiques et en entravant sa continuité écologique. La mise en évidence des **conséquences de ce changement hydromorphologique** sur la qualité, la diversité et l'évolution de la biodiversité de ce fleuve se jetant dans une des plus belles baies du monde, a alors peu à peu entraîné **l'émergence d'un doute** quant à la rentabilité réelle de ces ouvrages. La législation, basée sur la restauration du bon état général des cours d'eau s'étant intensifiée, notamment en Europe et France, on assiste à une certaine **prise de conscience** qui remet en question **la balance coûts-bénéfices** de ces aménagements. Après plusieurs années d'expertises et de débats quant à l'avenir des deux barrages et de leurs lacs et l'apparition d'outils et d'organismes de gestion divers, **leur dérasement fut finalement officialisé par le gouvernement en 2017**. En raison de l'ampleur de cette opération, de sa singularité et de la nouvelle perturbation géodynamique qu'elle induit, la mise en œuvre **d'un suivi multi-disciplinaire était essentielle**. C'est dans ce contexte et dans l'objectif d'apporter des informations supplémentaires sur **les conséquences de l'ouverture puis de l'effacement du barrage de Vezins** que ce mémoire de recherche a été réalisé. Il a donc été question d'étudier **les capacités de résilience** de la Sélune en amont de cet ouvrage afin d'apprécier **son potentiel de réajustement** et les impacts que ces derniers pourront avoir sur **l'état hydromorphologique** du fleuve.

Pour répondre aux problématiques de ce travail, une **méthodologie basée sur la mobilisation de divers instruments de mesure et sur des analyses statistiques** a été employée à des échelles variées (retenues, sites...). Celle-ci nous a permis dans un premier temps de **définir les capacités de résilience théoriques du tronçon** étudié en déterminant **le score géodynamique de la Sélune** (calcul des puissances spécifiques, mesure du degré d'érodabilité des berges et estimation du potentiel d'apports solides). Toutefois, il a ensuite été nécessaire de déterminer quelles pouvaient être **les contraintes auxquelles seront soumis les réajustements** du fleuve. En effet, même si ce dernier possède les capacités de rétablir son équilibre, **sa forte anthropisation** pourrait limiter son potentiel d'ajustement et l'émergence des nouvelles formes fluviales. Une attention particulière a également été portée à **la possible recolonisation piscicole de ce secteur** en amont du barrage, cette problématique étant une des motivations principales de ce dérasement.

Malgré **les limites et les compléments qui pourraient être apportés à cette étude** afin d'améliorer sa précision, tous les traitements réalisés ont tout de même permis de proposer des premières conclusions en ce qui concerne **le potentiel de réajustement de la Sélune**. Ainsi, nous avons pu montrer que, fidèle à **son contexte topographique, géologique et climatique** et en lien avec la vidange des lacs qui occupaient une grande partie du fond de vallée, ce système possède des **capacités de résilience typiques des milieux de faible à moyenne énergie**. Sa puissance spécifique révèle ainsi l'existence d'un certain dynamisme mais qui, de par le faible degré d'érodabilité des berges et de modestes quantités d'apports solides, ne pourrait permettre la mise en place de ces réajustements **que sur le long terme**. Ce ne sont toutefois pas ici les conditions morfo-sédimentaire du cours d'eau qui

empêcheront vraiment le système de se rééquilibrer. En effet, **les contraintes potentielles aux réajustements** sont surtout matérialisées par **l'anthropisation, tant ancienne que récente**, de ce fleuve. Les **nombreux aménagements anciens construits au fil de l'eau** et qui étaient jusqu'alors ennoyés dans la retenue représentent aujourd'hui des **obstacles à la reconstitution complète de la dynamique fluviale** de la Sélune et à **la réémergence de formes fluviales** « naturelles ». Leur présence, couplée à l'influence qu'ont pu avoir les barrages sur l'ancienne zone de retenue (accumulation de sédiments, pollution de l'eau...) démontre qu'une **restauration passive du bon état hydromorphologique** est, dans ce cas, **difficilement envisageable**. C'est d'ailleurs pour cela que l'homme est intervenu, dans le cadre **d'une restauration active**, sur plusieurs secteurs afin **d'accompagner et de contrôler la réaction du fleuve** face à cette importante perturbation. Toutefois, nous avons pu mettre en évidence le fait que ces travaux, qui ont notamment concerné le remaniement des sédiments accumulés en berge, ne sont **pas forcément adaptés à cet hydrosystème** même si ces recalibrages répondent à d'autres objectifs notamment en ce qui concerne **la gestion des matières en suspension**. **Les faciès d'écoulement**, dont la qualité et la diversité conditionneront le développement d'une faune et d'une flore riches, sont ainsi **particulièrement impactés par ces travaux**. La gestion future du fleuve sera donc essentielle pour corriger, au besoin, certaines erreurs et **rétablir sa continuité écologique** dont dépendra **la recolonisation des espèces piscicoles migratrices** telles que le saumon. Des travaux devront donc, dans tous les cas, être réalisés mais ces derniers devront prendre en compte **l'ensemble des risques morphologiques et écologiques** inhérents à une opération de ce type notamment lors **du second dérasement**, celui du barrage de la Roche-qui-boit. L'effacement des barrages sera donc probablement **bénéfique à l'équilibre du système** mais dans un contexte d'une telle **pression anthropique**, des **dérèglements hydromorphologiques** sont possibles et pourraient **limiter les effets de ce désaménagement**.

Ce mémoire fait ainsi office d'une **première approche**, immédiatement après l'ouverture du barrage de Vezins, analysant **les capacités de résilience de la Sélune**. La question qui en découle concernera donc **les réajustements futurs ainsi que leur temporalité**. Dépendant de l'échelle spatiale, de l'énergie et des caractéristiques du cours d'eau au niveau du tronçon considéré, de la nature du réajustement et des contraintes qui lui sont imposées (Melun, 2012), il est encore **difficile d'estimer la durée sur laquelle s'étendront ces réajustements** et si ces derniers **seront réellement effectifs**. Un suivi sur **le long terme** et en prenant en compte **tous les autres paramètres pouvant influencer cette capacité de résilience** du fleuve est alors nécessaire afin d'évaluer **l'efficacité de cette opération** de restauration dans sa globalité. Ce suivi a d'ailleurs débuté en 2014 et devrait s'étaler encore pendant plusieurs années ce qui permettra **d'accompagner les choix de gestion** pour faire de ce dérasement l'exemple voulu. Il convient de rappeler que pour cela, il est important, et c'est le cas, que ce suivi concerne également **la dynamique socio-économique de la vallée** et les impacts de l'effacement des deux barrages sur cette dernière. L'objectif étant la construction **d'un projet de territoire** intégrant tous les acteurs et les enjeux liés, plus ou moins directement, à cette renaturation de la Sélune. En sachant que **toute modification d'un des composants du système**, le mot système étant ici à prendre dans son sens le plus large, **aura des répercussions sur tous les autres**, aucun d'entre eux ne devra être écarté de cette revalorisation.

Ainsi, même si cette **opération d'effacement de grands barrages** n'est, paradoxalement à sa médiatisation et hormis les acteurs locaux, que peu connue du grand public, **son retentissement dans le monde scientifique est très important**. En effet, de par son ampleur et les problématiques qu'il induit, ce dérasement représente **un enjeu majeur dans la récente tendance qui préconise la restauration écologique** de tous les cours d'eau. Malgré la Directive Cadre sur l'Eau et la Loi sur l'Eau et les Milieux Aquatiques, encore **peu d'opérations similaires** ont été entreprises et si celles-ci ont tout de même permis **un début d'amélioration de l'état hydromorphologique des rivières** concernées,

aucune ne peut vraiment être comparée à la suppression des barrages de Vezins et de la Roche-qui-boit dont **la taille constitue leur particularité**. L'objectif n'est donc pas ici de seulement permettre au cours d'eau **de retrouver un état le moins perturbé possible**, bien que cela reste le plus important, mais également de savoir **si le mode de gestion de ce dérasement est assez efficace pour être reproduit** dans les futures opérations de restauration. Aujourd'hui il est **difficile d'évaluer la reproductibilité de cette méthode** de dérasement mais il est tout de même possible de mettre en évidence **ses limites** afin de l'améliorer et de ne pas reproduire à l'avenir, les erreurs du passé.

Les nombreuses attentes du dérasement des deux ouvrages de la Sélune sont illustrées par **l'organisation de plusieurs réunions et comités scientifiques** au sein de ce bassin versant. La Commission Hydrosystème du Comité National Français de Géographie a ainsi choisi ce site pour **ses Journées annuelles des Hydrosystèmes** qui se sont déroulées du 10 au 12 juillet 2019 et auxquelles j'ai pu participer. De même, **un colloque international** organisé par l'association **European Rivers Network** se déroulera dans la région de ce fleuve en septembre 2019 sur cette problématique. Les événements se sont en effet accélérés cette année et c'est notamment durant ces Journées Nationales des Hydrosystèmes que **le démantèlement du barrage de Vezins a véritablement commencé** comme le montre ces photographies prise le 12 juillet :



Cette journée a ainsi marqué **l'aboutissement d'une décision qui fait et fera encore longtemps débat**. L'avenir de la Sélune dépendra donc maintenant **des choix** qui seront faits dans le cadre **d'une gestion** qui se devra d'être **la plus concertée possible** en répondant aux **intérêts de chacun** tout en permettant **l'amélioration du fonctionnement hydromorphologique du fleuve**. Dans un monde qui s'apprête à subir **des changements majeurs**, notamment climatiques, ce sont **ces décisions face aux problèmes environnementaux** qui détermineront **l'avenir** de la planète et par extension, celui de l'humanité.

Table des figures

Figure 1.1 : L'emboîtement de l'hydrosystème au sein du système fluvial.....	9
Figure 1.2 : La balance de Lane en équilibre.....	10
Figure 1.3 : Temps de réponse du cours d'eau après perturbation.....	11
Figure 1.4 : Les compartiments morphologiques du cours d'eau.....	12
Figure 1.5 : Fonctionnement d'une centrale hydroélectrique.....	14
Figure 1.6 : Échelle temporelle des réajustements suite à la construction d'un barrage.....	16
Figure 1.7 : Impacts de la construction d'un barrage sur la continuité écologique et les habitats.....	17
Figure 1.8 : Synthèse des impacts physiques et biologiques d'un barrage.....	18
Figure 1.9 : Chronologie des textes réglementaires sur les milieux aquatiques.....	20
Figure 1.10 : Schéma théorique de la résilience d'un fleuve après perturbation.....	22
Figure 1.11 : Réajustements théoriques post-effacement d'ouvrage dans le sous-système amont du cours d'eau.....	23
Figure 1.12 : Réajustements négatifs et positifs potentiels faisant suite à l'effacement d'ouvrage.....	24
Figure 1.13 : Capacités de réajustements selon la puissance spécifique.....	25
Figure 1.14 : Le dynamitage du barrage de Saint-Etienne du Vigan en juin 1998.....	27
Figure 1.15 : Le barrage de Maisons-Rouges avant/après son dérasement.....	27
Figure 1.16 : La rechenalisation du cours d'eau en amont du barrage de Kresbach.....	28
Figure 1.17 : Le début du démantèlement du barrage de Retuerta en Espagne.....	29
Figure 2.1 : Carte de localisation du bassin versant de la Sélune.....	31
Figure 2.2 : Carte topographique du bassin versant de la Sélune.....	32
Figure 2.3 : Carte géologique du bassin versant de la Sélune.....	33
Figure 2.4 : Diagramme ombrothermique à Saint-Hilaire-du-Harcouët.....	34
Figure 2.5 : Profil en long du fond de vallée de la Sélune.....	35
Figure 2.6 : Débits moyen mensuels de la Sélune (Ducey) de 1994 à 2019.....	35
Figure 2.7 : Synthèse des données hydrologiques de la Sélune.....	35
Figure 2.8 : Les barrages de Vézins et de la Roche-qui-Boit sur la Sélune.....	37
Figure 2.9 : Caractéristiques des barrages de Vézins et de la Roche-qui-Boit.....	37
Figure 2.10 : Comparaison entre les débits entrant à Vézins et en aval de la Roche-qui-Boit.....	39
Figure 2.11 : Étude comparative des débits lors des périodes de crue ou d'étiage entre l'amont et l'aval des barrages.....	40
Figure 2.12 : Concentration en MES entre l'amont et l'aval des barrages sur la période 2016-2018.....	41
Figure 2.13 : Variation de la granulométrie des radiers (tête et milieux) en aval de la Roche-qui-Boit.....	41
Figure 2.14 : La Sélune en 2006 au niveau du lac Vézins.....	42
Figure 2.15 : Evolution de l'IPR de 1995 à 2008 sur la Sélune.....	44
Figure 2.16 : Chronologie de la décision d'arasement des barrages.....	45
Figure 2.17 : La retenue du barrage de Vézins avant/après la vidange d'avril 2019.....	46
Figure 2.18 : Chronologie des étapes des vidanges du barrage de Vézins (Mai 2018 à Juill. 2019).....	47
Figure 3.1 : Emboîtements des échelles de travail sur la Sélune.....	49
Figure 3.2 : Localisation des sites d'études au sein de la zone de retenue du barrage.....	51
Figure 3.3 : Le site du Pont de la République avant/après l'ouverture du barrage de Vézins.....	52
Figure 3.4 : Le site du Pont des Biards avant/après l'ouverture du barrage de Vézins.....	53
Figure 3.5 : Le site de la Mazure avant/après l'ouverture du barrage de Vézins.....	54
Figure 3.6 : Extraction du bassin versant de la Sélune.....	55
Figure 3.7 : Extraction du fond de vallée de la Sélune.....	57
Figure 3.8 : Création des polygones de Thiessen.....	57
Figure 3.9 : Calcul de l'indice de sinuosité.....	58
Figure 3.10 : Calcul de l'indice de confinement.....	58

Figure 3.11 : Surface en eau, de végétation arborée et de prairie/parcelle agricole au sein des polygones...	59
Figure 3.12 : Tableau des moyennes et écarts-types des métriques sur le tronçon étudié.....	60
Figure 3.13 : Rappel des capacités de réajustements selon la puissance spécifique.....	61
Figure 3.14 : Mesure de la pente de la ligne d'eau et du fond sur le terrain à la lunette topographique.....	63
Figure 3.15 : Correction de la distance entre deux points par le théorème d'Al Kashi.....	63
Figure 3.16 : Mesure de la largeur à plein bord moyenne sur le tronçon étudié.....	64
Figure 3.17 : Degrés d'érodabilité des berges selon leur constitution sédimentologique.....	65
Figure 3.18 : Ligne de bloc en pied de berge sur la Sélune.....	65
Figure 3.19 : Sondage à la tarière à main sur les berges de la Sélune.....	66
Figure 3.20 : Exemple de carottage suite au sondage à la tarière.....	66
Figure 3.21 : Clé de détermination de la texture d'un sol selon le test du boudin.....	67
Figure 3.22 : Le charriage des sédiments dans le cours d'eau.....	68
Figure 3.23 : Extraction des affluents et de leur bassins versant en amont du barrage de Vezins à partir de la BD alti au 25m.....	69
Figure 3.24 : Exemple de caractérisation d'une forme d'accumulation à la confluence d'un affluent.....	70
Figure 3.25 : Mesure de la géométrie du chenal et échantillonnage granulométrique des radiers.....	70
Figure 3.26 : Mise en place des mesures granulométriques basées sur le protocole Wolman sur les radiers identifiés.....	71
Figure 3.27 : Différence du niveau d'eau avant/après ouverture du barrage dans l'ancienne retenue.....	72
Figure 3.28 : Exemples des formes fluviales relevées sur la Sélune.....	73
Figure 3.29 : Résultat du levé LIDAR au Pont de la République.....	74
Figure 3.30 : MNT du fond de vallée de la Sélune et nouveau tracé du chenal.....	74
Figure 3.31 : Descente en kayak de la Sélune muni d'un GPS JUNO.....	75
Figure 3.32 : Processus d'érosion/aggradation des berges et dans un méandre.....	76
Figure 3.33 : Exemple d'érosion et d'empierrement des berges sur la Sélune.....	76
Figure 3.34 : Segmentation de la zone tampon en sous-tronçon de 20 m.....	77
Figure 3.35 : Rôle du débit dans l'ensemble du système fluvial.....	78
Figure 3.36 : Recalibrage du lit de la Sélune au niveau du Pont des Biards.....	79
Figure 3.37 : Table des ordres de grandeur du coefficient de Strickler.....	80
Figure 3.38 : Protocole de la réalisation des profils en travers au D-GPS.....	81
Figure 3.39 : Mesures des surfaces et périmètres mouillés des profils en travers.....	82
Figure 3.40 : Photographie d'une frayère.....	83
Figure 3.41 : Caractéristiques optimales des zones de frayères pour le saumon.....	83
Figure 3.42 : Classes des radiers concernant leur potentiel frayères.....	84
Figure 3.43 : Clé de détermination des principaux faciès d'écoulement des cours d'eau.....	86
Figure 3.44 : Mesure de la hauteur d'eau pour chaque section en travers à l'aide du niveau de chantier.....	87
Figure 3.45 : Tableau d'analyse du substrat du fond du chenal pour chaque section en travers.....	87
Figure 4.1 : Tableau des variances intra et inter classes pour 9 classes.....	90
Figure 4.2 : Dendrogramme de la CAH au nombre de 9 classes.....	90
Figure 4.3 : Tableau des barycentres des 9 classes selon leur caractéristiques.....	91
Figure 4.5 : Graphique des valeurs des métriques de la classe 8.....	93
Figure 4.6 : Estimation théorique de la puissance spécifique au Pont de la République.....	94
Figure 4.7 : Estimation théorique de la puissance spécifique au Pont des Biards.....	94
Figure 4.8 : Estimation théorique de la puissance spécifique à la Mazure.....	95
Figure 4.9 : Synthèse des calculs des puissances spécifiques sur la Sélune.....	95
Figure 4.10 : Profils pédologiques des carottages réalisés sur les berges des trois sites d'étude.....	97
Figure 4.11 : Photographie des berges sur les trois sites d'étude de la Sélune.....	98
Figure 4.13 : Cartographie de la typologie des affluents en amont du barrage de Vezins.....	99
Figure 4.14 : Caractéristiques "physiques" des affluents par classe.....	100
Figure 4.15 : Densité des occupations du sol par classe.....	100
Figure 4.16 : Caractéristiques et écarts aux barycentres des affluents étudiés.....	101

<i>Figure 4.17 : Résultats des mesures terrains pour les affluents de la classe 1.....</i>	<i>102</i>
<i>Figure 4.18 : Photographie des affluents de la classe 1.....</i>	<i>102</i>
<i>Figure 4.19 : Résultats des mesures terrains pour les affluents de la classe 2.....</i>	<i>103</i>
<i>Figure 4.20 : Photographie des affluents de la classe 2.....</i>	<i>104</i>
<i>Figure 4.21 : Résultats des mesures terrains pour l’affluent de la classe 3.....</i>	<i>104</i>
<i>Figure 4.22 : Photographie de l’affluent de la classe 3.....</i>	<i>105</i>
<i>Figure 4.23 : Résultats des mesures terrains pour l’affluent de la classe 4.....</i>	<i>105</i>
<i>Figure 4.24 : Photographie de l’affluent de la classe 4.....</i>	<i>106</i>
<i>Figure 4.25 : Localisation des points GPS résultant de la campagne de terrain.....</i>	<i>108</i>
<i>Figure 4.26 : Cartographie des formes fluviales et anciens aménagements du secteur 1.....</i>	<i>109</i>
<i>Figure 4.27 : Cartographie des formes fluviales et anciens aménagements du secteur 2.....</i>	<i>110</i>
<i>Figure 4.28 : Cartographie des formes fluviales et anciens aménagements du secteur 3.....</i>	<i>111</i>
<i>Figure 4.29 : Fréquences des formes sur les trois secteurs étudiés.....</i>	<i>112</i>
<i>Figure 4.30 : Exemple des versants rocheux sur la Sélune.....</i>	<i>114</i>
<i>Figure 4.31 : Cartographie des méandres sur le linéaire étudié.....</i>	<i>115</i>
<i>Figure 4.32 : Représentation graphique des linéaires de lignes de blocs et de murets en fonction de la pente dans la zone de l’ancienne retenue du barrage de Vezins.....</i>	<i>116</i>
<i>Figure 4.33 : Représentation graphique des linéaires d’érosion en fonction de la pente dans la zone de l’ancienne retenue du barrage de Vezins.....</i>	<i>116</i>
<i>Figure 4.34 : Localisation et formes des 7 profils en travers au Pont de la République.....</i>	<i>118</i>
<i>Figure 4.35 : Statistiques et illustrations des profils au Pont de la République.....</i>	<i>119</i>
<i>Figure 4.36 : Localisation et formes des 7 profils en travers au Pont des Biards.....</i>	<i>120</i>
<i>Figure 4.37 : Statistiques et illustrations des profils au Pont des Biards.....</i>	<i>121</i>
<i>Figure 4.38 : Localisation et formes des 7 profils en travers à la Mazure.....</i>	<i>122</i>
<i>Figure 4.39 : Statistiques et illustrations des profils à la Mazure.....</i>	<i>123</i>
<i>Figure 4.40 : Cartographie de la typologie des radiers.....</i>	<i>127</i>
<i>Figure 4.41 : Chute d’eau au niveau de l’ancien Grand Moulin des Biards.....</i>	<i>128</i>
<i>Figure 4.42 : Secteur à radier à la granulométrie très grossière.....</i>	<i>129</i>
<i>Figure 4.43 : Profil en long (fond et ligne d’eau) au Pont de la République.....</i>	<i>130</i>
<i>Figure 4.44 : Classification des profils du Pont de la République par faciès.....</i>	<i>130</i>
<i>Figure 4.45 : Exemple de faciès d’écoulement au Pont de la République.....</i>	<i>131</i>
<i>Figure 4.46 : Profil en long (fond et ligne d’eau) au Pont des Biards.....</i>	<i>131</i>
<i>Figure 4.47 : Classification des profils du Pont des Biards par faciès.....</i>	<i>131</i>
<i>Figure 4.48 : L’absence de diversité morphologique au Pont des Biards.....</i>	<i>132</i>
<i>Figure 4.49 : Profil en long (fond et ligne d’eau) à la Mazure.....</i>	<i>132</i>
<i>Figure 4.50 : Classification des profils de la Mazure par faciès.....</i>	<i>133</i>
<i>Figure 4.51 : La Sélune à la Mazure.....</i>	<i>133</i>
<i>Figure 5.1 : Temporalités des réponses morphologiques selon l’occurrence d’une crue donnée.....</i>	<i>139</i>
<i>Figure 5.2 : Evolution théorique post-effacement de barrage de l’oxygénation d’un cours d’eau.....</i>	<i>140</i>
<i>Figure 5.3 : Impact de l’abaissement du niveau d’eau sur la nappe d’accompagnement du cours d’eau et les réajustements morphologiques.....</i>	<i>141</i>
<i>Figure 5.4 : Impacts du déclouisonnement sur le développement de la végétation rivulaire.....</i>	<i>142</i>
<i>Figure 5.5 : Temporalités théoriques de la réversibilité des variables du système fluvial après effacement d’ouvrage.....</i>	<i>145</i>
<i>Figure 5.5 : Le lac du barrage de la Roche-qui-Boit.....</i>	<i>146</i>
<i>Figure 5.5 : Les différents compartiments de l’hydrosystème.....</i>	<i>148</i>

Bibliographie

AFB. *Le recueil d'expérience sur l'hydromorphologie* [en ligne]. AFB. 2010. Disponible sur : <https://professionnels.afbiodiversite.fr/node/217#obs>

AFB. *Carhyce - Caractérisation hydromorphologique des cours d'eau, Protocole de recueil de données hydromorphologiques à l'échelle de la station sur les cours d'eau prospectables à pied* [en ligne]. Eau France. 2017. Format PDF. Disponible sur : https://professionnels.afbiodiversite.fr/sites/default/files/pdf/guide_technique_carhyce.pdf

BEAUCHAMP A. TD Cartographie et SIG : Délimitation automatique d'un bassin versant à partir d'un modèle numérique de terrain. Obtenu en 2018. 5 p.

BELLMORE J. *Etats-Unis : des effacements de barrage peu et mal étudiés* [en ligne]. Observatoire de la continuité écologique et des usages de l'eau. 2016. Disponible sur : <http://continuite-ecologique.fr/usa-effacements-de-barrages/>

BRAVARD JP., MALAVOI JR., *Éléments d'hydromorphologie fluviale* [en ligne]. ONEMA. 2010. Format PDF. Disponible sur : <https://professionnels.afbiodiversite.fr/fr/node/77>

BRAVARD JP., PETIT F. *Les cours d'eau : dynamique du système fluvial*. Paris : Armand Colin, Collection U. 1997. 222 p.

CAIRAULT A. *Évaluation de l'état hydromorphologique de cours d'eau du bassin Artois-Picardie à partir de la méthode AURAH-CE*. Mémoire de fin d'étude en Ingénierie. École des Métiers de l'Environnement Rennes. 2013. 132 p.

CFBR. *L'histoire des barrages, document technique* [en ligne]. 2013. Format PDF. Disponible sur : <https://www.barrages-cfbr.eu/IMG/pdf/histoirebarrages.pdf>

CHOLLEY F. *et al. Expertise du projet d'effacement des ouvrages de Vezins et La Roche-qui-Boit sur la Sélune* [en ligne]. Mars 2015. Format PDF. Disponible sur : https://www.economie.gouv.fr/files/files/directions_services/cge/Rapports/2015_04_22_Selune.pdf

CIGB/ICOLD. Commission international des grands barrage [en ligne]. Mis à jour en 2019. Disponible sur : <https://www.icold-cigb.org/home.asp>

DAM REMOVAL EUROPE. Dam removal europe, cut it out [en ligne]. Mis à jour en 2019. Disponible sur : <https://www.damremoval.eu/>

DDTM 50. *Expertise sur le rôle des barrages de la Sélune lors des crues*. Egis Eau. 2012. Format PDF.

DDTM 50. *Démantèlement des barrages de Vezins et de la Roche-qui-boit sur la Sélune, état initial de l'étude d'impact* [en ligne]. SOGREA. 2011. 6 parties. Format PDF. Disponible sur : <http://www.etudes-normandie.fr/accueil?id=913>

DDTM 50. La Sélune « INFO TRAVAUX » [en ligne]. DDTM 50. 2018. 7 documents. Format PDF. Disponible sur : <http://www.manche.gouv.fr/Dossiers/Vidange-et-gestion-sedimentaire-de-la-retenu-du-barrage-de-Vezins/La-Selune-INFO-TRAVAUX>

DDTM 50. *Le schéma de développement durable de la vallée de la Sélune* [en ligne]. Gorges de la Sélune. Format PDF. N°2. Septembre 2013. p. 1-11

DEGOUTTE G. *Cours d'hydraulique, dynamique et morphologie fluviale* [en ligne]. Université Paris VI. 2012. Format PDF. Disponible sur : <https://tice.agroparistech.fr/coursenligne/courses/COURSD-HYDRAULIQUEDYN/>

Eau France. Banque Hydro [en ligne]. Mis à jour en 2019. Disponible sur : <http://hydro.eaufrance.fr/>

Eau France. Eaufrance, le service public de l'information sur l'eau [en ligne]. Mis à jour en 2019. Disponible sur : <https://www.eaufrance.fr/>

Electricité de France. *Une brève histoire des barrages hydrauliques* [en ligne]. Mis à jour en 2019. Disponible sur : <https://www.edf.fr/edf/accueil-magazine/une-breve-histoire-des-barrages-hydrauliques>

ENSEEIH. Modélisation des écoulements environnementaux [en ligne]. INPT. Mis à jour en 2019. Disponible sur : <http://hmf.enseeiht.fr/travaux/mode/2016/impact-dun-l%C3%A2cher-deau-sur-des-zones-de-frai/introduction>

FAGOT P. *Sensibilité géomorphologique d'un système de faible énergie face au désaménagement : cas de l'arasement du moulin de Ver sur la Sienne*. Mémoire de Géographie. Université Caen Normandie. 2012. 138 p.

FORGET G. et al. *Mise au point des méthodes de caractérisation de l'état du peuplement de poissons et espèces assimilées sur la Sélune*. INRA. 2014. Format PDF.

France Nature Environnement. *Restauration de la continuité écologique des cours d'eau et des milieux aquatiques Idées reçues et préjugés* [en ligne]. FNE. 2014. Format PDF. Disponible sur : <https://www.fne.asso.fr/eau/idees-recues-sur-la-continuita-a-cologique.pdf>

France Nature Environnement. *Morphologie des cours d'eau* [en ligne]. FNE. 2010. Format PDF. Disponible sur : https://www.fne.asso.fr/eau/guide_morpho-new2012-.pdf

GERMAINE MA. et LESPEZ L. *Le démantèlement des barrages de la Sélune (Manche). Des réseaux d'acteurs au projet de territoire ?* [en ligne]. Développement durable et territoire. Vol. 5. n°3. 2014. Disponible sur : <https://journals.openedition.org/developpementdurable/10525?lang=en#toc-to1n1>

GILET et al. *Suivi de l'évolution morphologique et sédimentaire de l'Yonne suite à la première phase du démantèlement du barrage de la Pierre-Glissotte (Massif du Morvan)* [en ligne]. PIREN-Seine. 2016. Format PDF. Disponible sur : https://www.piren-seine.fr/sites/default/files/PIREN_documents/phase_7/rapports_annuels/2016/a2b4_1_Gilet_PIREN2016.pdf

GERMAINE MA *et al.* Hypothèses. La Sélune [en ligne]. Mis à jour en 2018. Disponible sur : <https://selune.hypotheses.org/> (Germaine, 2014), (Germaine et Barraud, 2013), (Barraud et Germaine, 2011).

INRA. Restauration écologique du fleuve Sélune [en ligne]. Mis à jour en 2014. Disponible sur : <https://programme-selune.com/fr/>

Institut Géographique National. Géoportail [en ligne]. Mis à jour en 2019. Disponible sur : <https://www.geoportail.gouv.fr/>

IRSTEA. *Hydrobio DCE, bioindication pour l'évaluation des eaux, des outils pour les applications DCE* [en ligne]. Mis à jour le ?. Disponible sur : <https://hydrobio-dce.irstea.fr/>

LASLIER M. *Suivi des impacts d'un arasement de barrage sur la végétation riveraine par télédétection à très haute résolution spatiale et temporelle*. Thèse de doctorat en Géographie. Université Bretagne Loire. 2018. 323 p.

LESPEZ L. et GERMAINE MA. *Le "désaménagement" des rivières en France, au Royaume-Uni et aux Etats-Unis* [en ligne]. Hydrauxois. 2016. Disponible sur : <http://www.hydrauxois.org/2016/09/le-desamenagement-des-rivieres-en.html>

LEBRECH D. *Synthèse bibliographique sur le saumon atlantique (de la reproduction au stade de taccou)* [en ligne]. FDPMA 35. 2009. Format PDF. Disponible sur : http://www.observatoire-poissons-migrateurs-bretagne.fr/images/pdf/Saumon/synthese-bibliographique_saumon_fdppma35-lebrech-2009.pdf

LISSAK C. TD 4 SIG AGIRE Analyse hydrographiques – Arcgis. Obtenu en 2018. 17 p.

LISSAK C. Cartographie des espaces contributifs en apports sédimentaires - Définir les différentes unités géomorphologiques dans la vallée du Guil et ses affluents. Obtenu en 2018. 15 p.

MALAVOI JR. *Manuel de restauration hydromorphologique des cours d'eau*. Agence de l'eau Seine Normandie. 2007. Format PDF. Disponible sur : http://www.trameverteetbleue.fr/sites/default/files/01manuel_restoration.pdf

MALAVOI JR. et SOUCHON Y. *Description standardisée des principaux faciès d'écoulement observables en rivière : clé de détermination qualitative et mesures physiques* [en ligne]. Bulletin fr. Pêche Pisc. 2001. Format PDF. Disponible sur : <https://www.kmae-journal.org/articles/kmae/pdf/2002/02/kmae2002365p357.pdf>

MALAVOI JR. BRAVARD JP. *Éléments d'hydromorphologie fluviale* [en ligne]. Comprendre pour agir. 2010. Disponible sur : <https://professionnels.afbiodiversite.fr/fr/node/77>

Météo-france. Météo et climat [en ligne]. Mis à jour en 2019. Disponible sur : <http://www.meteo-france.com/accueil>

MELUN G. *Évaluation des impacts hydromorphologiques du rétablissement de la continuité hydro-sédimentaire et écologique sur l'Yerres aval*. Thèse de doctorat en Hydromorphologie. Université Paris Diderot – Paris VII. 2012. 335 p.34

MICHLER L. *Impacts hydromorphologiques et sédimentaires du décroisement de l'Yerres*. Thèse de doctorat en Géographie. Université Sorbonne – Paris – Cité. 2018. 484 p.

NDOM M *et al.* Programme Sélune, Phase pré-arasement, Rapport Bilan 2017-2018, Dynamique fluviale, Flux hydriques, sédimentaires et chimiques. Agence de l'eau Seine-Normandie. 2019. Format PDF.

Office internationale de l'eau. Gest'eau La communauté des acteurs de la gestion intégrée de l'eau [en ligne]. Mis à jour en 2019. Disponible sur : <http://www.gesteau.fr/>

Office international de l'eau. Glossaire eau et milieux aquatiques [en ligne]. Mis à jour en 2019. Disponible sur : <http://www.glossaire-eau.fr/>

ONEMA. *Pourquoi rétablir la continuité écologique des cours d'eau ?* [en ligne]. ONEMA. 2010. Format PDF. Disponible sur : http://www.driea.ile-de-france.developpement-durable.gouv.fr/IMG/pdf/brochure-continuite_cle058b11-1-2.pdf

PETIT F. *et al.* *Détermination des puissances spécifiques critiques dans des rivières à charge de fond caillouteuse* [en ligne]. Revue géographique de l'Est. Vol. 40. n°1-2. 2000. Disponible sur : <https://journals.openedition.org/rge/4203>

ROLLET AJ. *Étude et gestion de la dynamique sédimentaire d'un tronçon fluvial à l'aval d'un barrage : le cas de la basse vallée de l'Ain*. Thèse de doctorat en Géomorphologie. Université Jean Moulin - Lyon III, 2007.

ROLLET AJ. *et PIEGAY H.* *De l'intérêt de la quantification pour la gestion des systèmes fluviaux : exemple de la basse vallée de l'Ain* [en ligne]. Géomorphologie, relief, processus, environnement. vol. 19. n° 1, 2013. p. 63-78. Disponible sur : <https://journals.openedition.org/geomorphologie/10132>

ROLLET AJ *et al.* Programme Sélune, Phase pré-arasement, Rapport Bilan 2013-2015, Dynamique fluviale, Géomorphologie. Agence de l'eau Seine-Normandie. 2016. Format PDF.

SOUCHON Y., NICOLAS V. *Barrages et seuils : principaux impacts environnementaux* [en ligne]. ONEMA/CEMAGREF. 2011. Format PDF. Disponible sur : <http://www.fomodo.fr/files/ONEMABarrages.168.pdf>

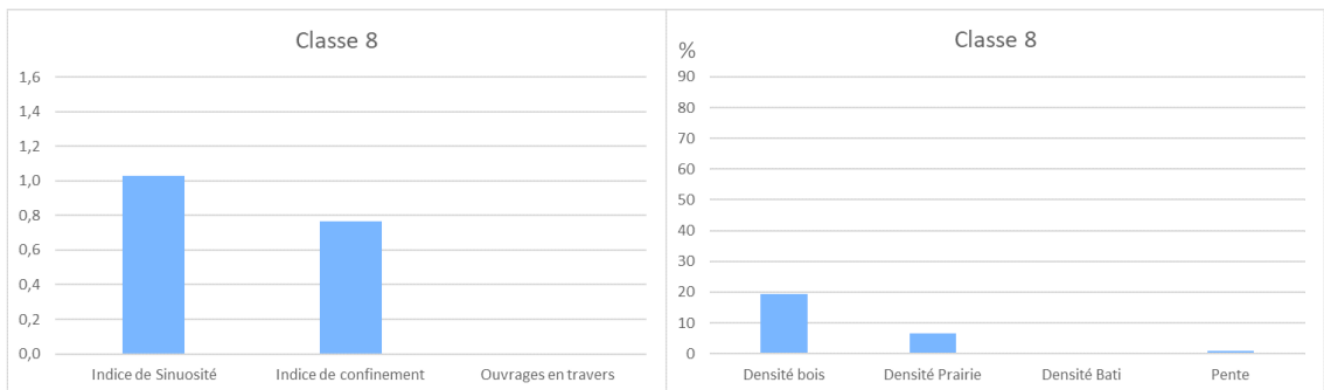
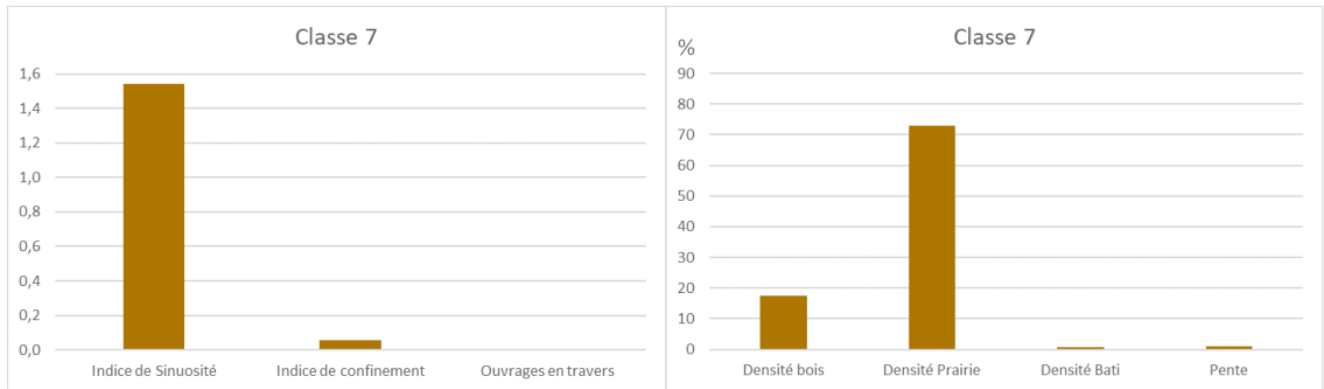
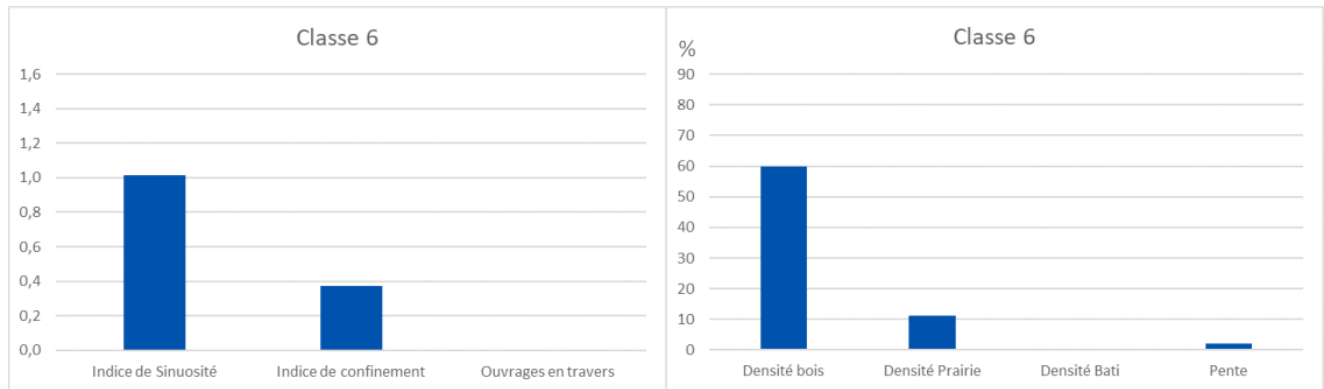
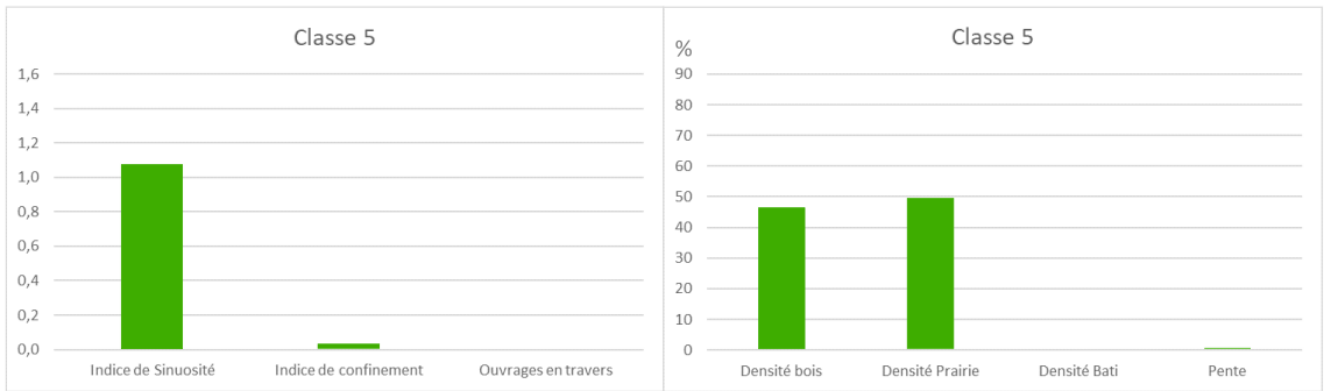
Syndicat Mixte du Bassin de la Sélune. Bassin de la Sélune, SAGE (2001) [en ligne]. Mis à jour en 2018. Disponible sur : <http://bassin-selune.fr/>

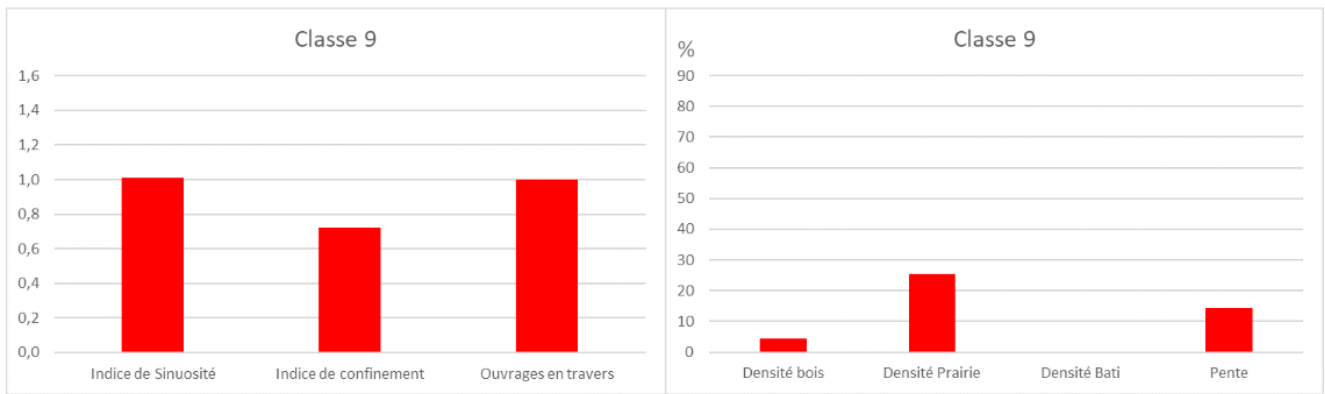
WIEDERKEHR E. *Apports de la géomatique pour une caractérisation physique multi-échelle des réseaux hydrographiques*. Thèse de doctorat en Géographie. Université de Lyon. 2013. 287 p.

Annexes

Annexe 1 : Caractéristiques des classes 1 à 9 de la typologie des sous-tronçons homogènes







Annexe 2 : Photographies des carottages réalisés sur les trois sites d'études

Pont de la République (rive gauche et rive droite) :



Pont des Biards (rive gauche et rive droite) :

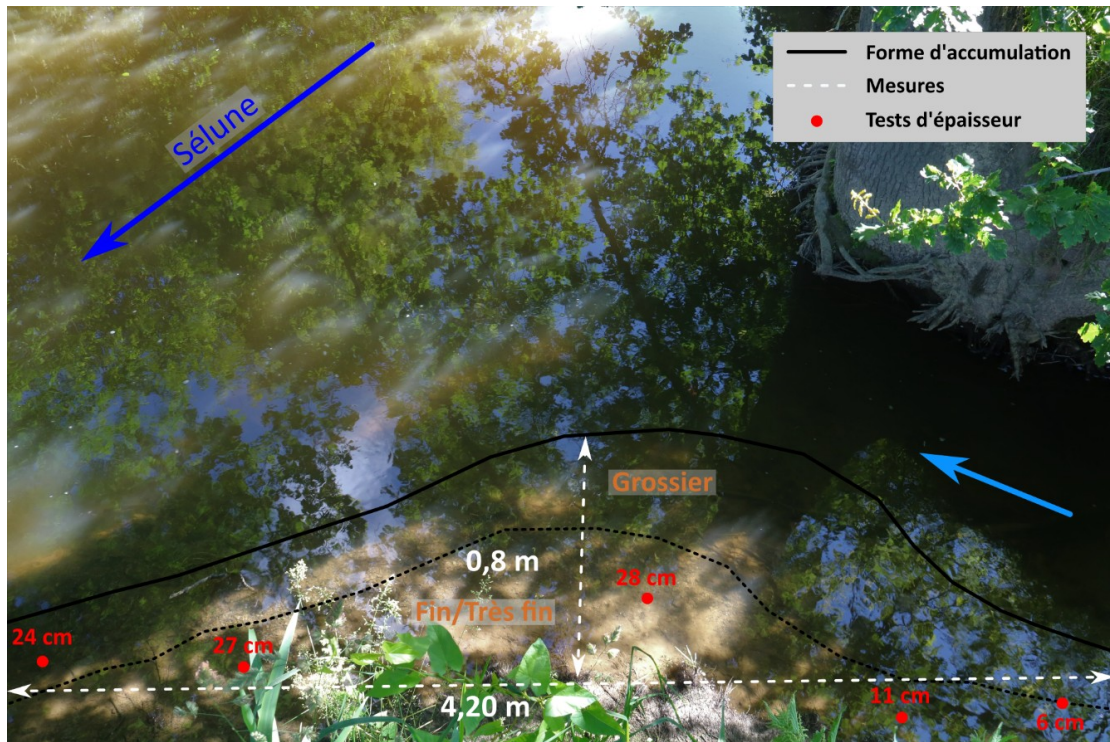


La Mazure (rive gauche et rive droite) :

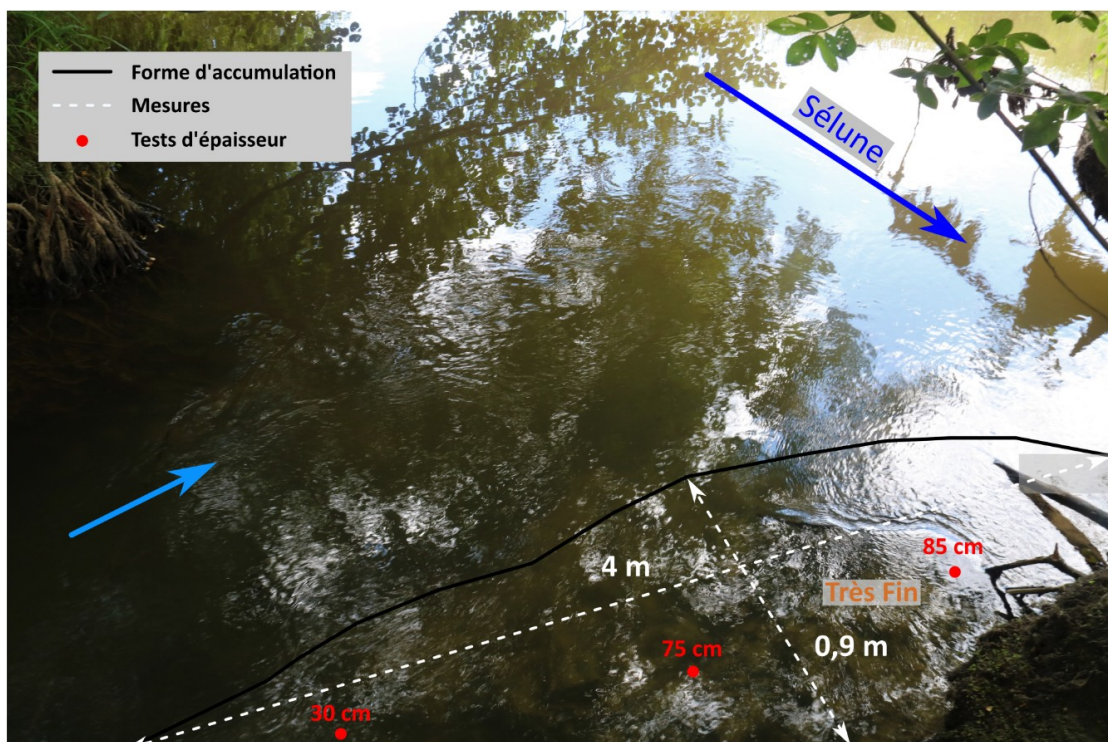


Annexe 3 : Photographies et mesures des zones de confluence des affluents étudiés sur le terrain

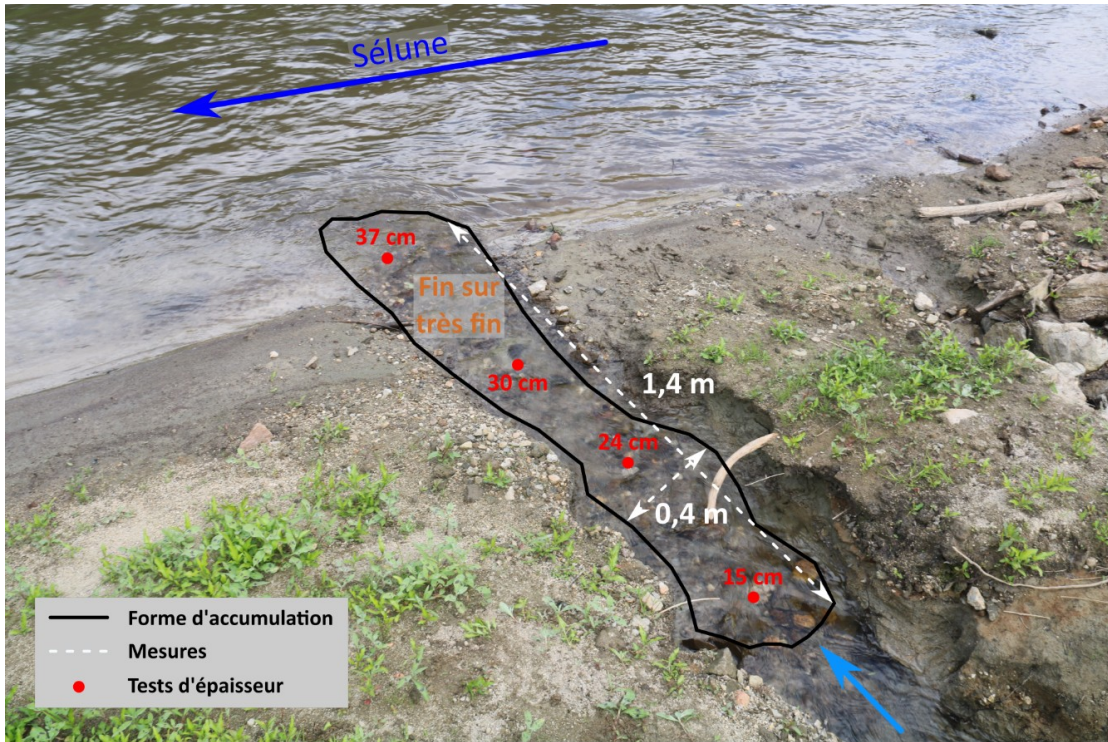
Ruisseau de Mesnelle (classe 1)



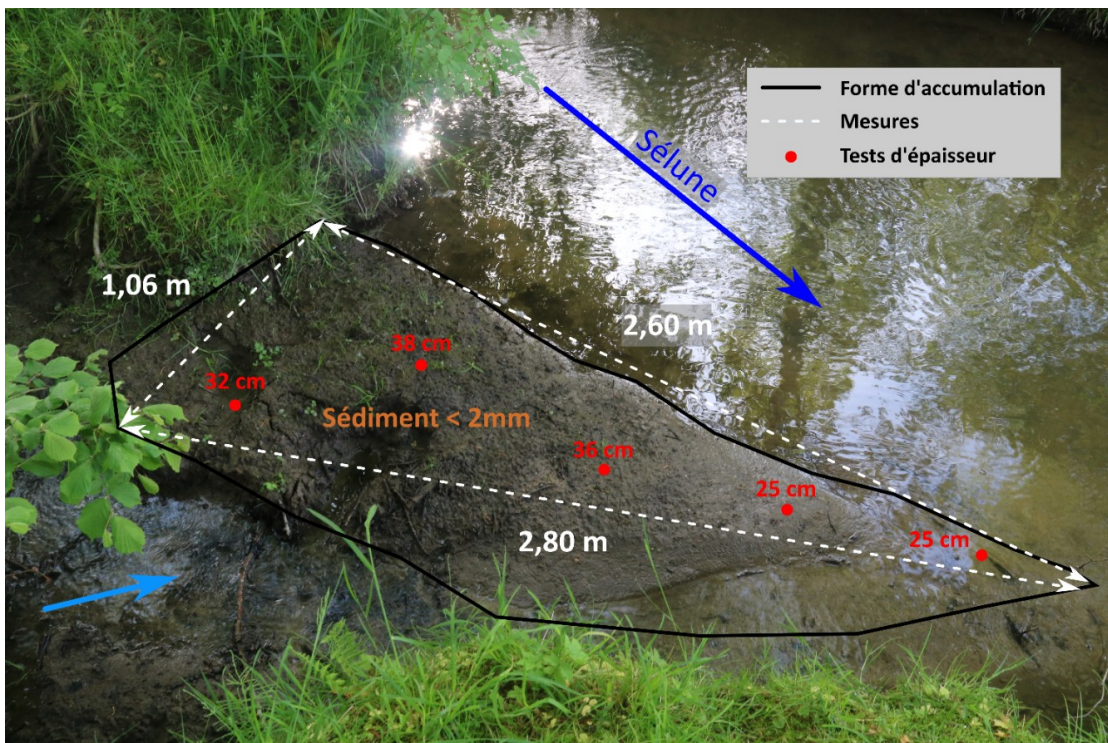
La Douenne (classe 1)



Sans nom 23 (classe 1)



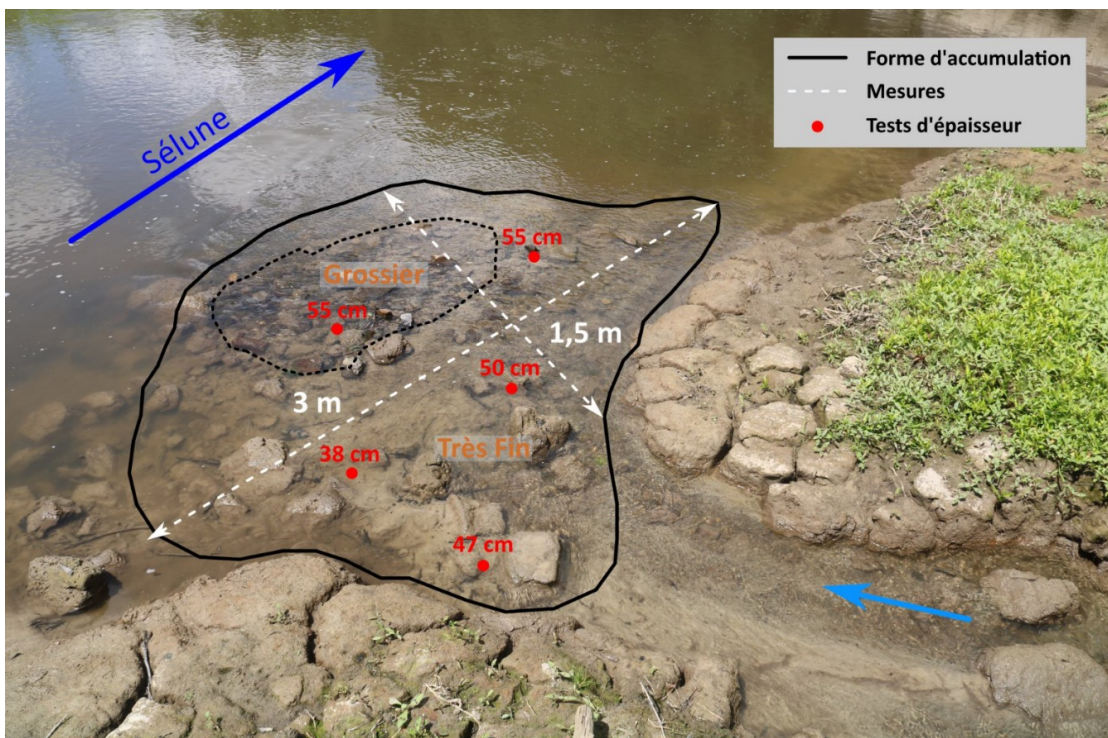
Sans nom 5 (classe 2)



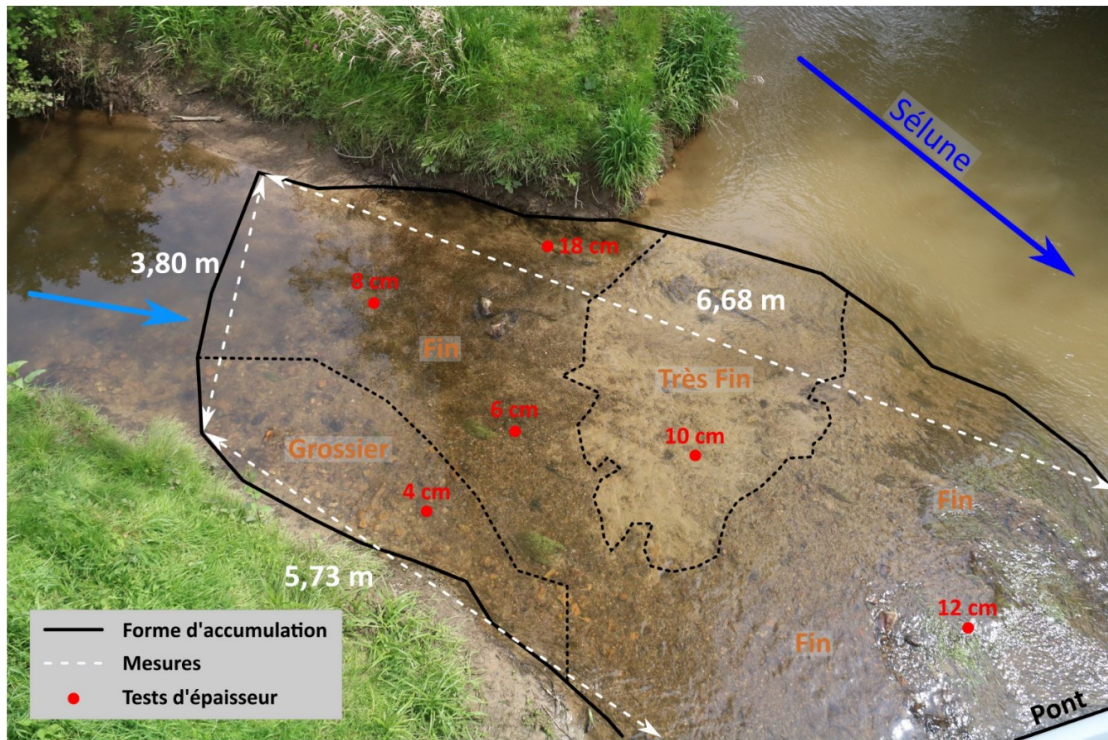
Sans nom 15 (classe 2)



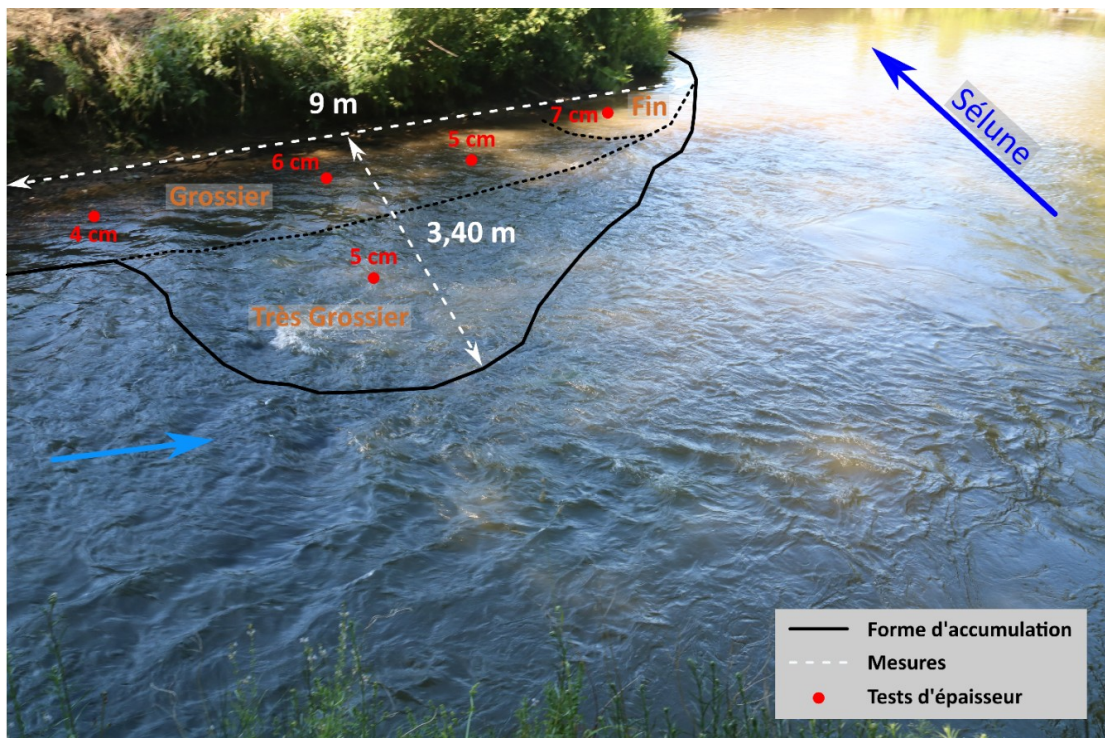
Sans nom 24 (classe 2)



La rivière Saint-Jean (classe 3)



L'Airon (classe 4)



Annexe 4 : Grille d'analyse et de localisation des formes fluviales au GPS JUNO

Type de forme	Début	Fin	Granulométrie dominante	Hauteur d'eau	Commentaire
Radiers					
Bancs d'accumulation					
Blocs exhumés					
Lignes de blocs					
Murets					
Érosions					
Glissements					
Autres (îlot)					

Les cellules grisées correspondent aux cellules qui n'ont pas été rempli pour ce type de forme. Lorsque qu'aucun commentaire n'était nécessaire (simple localisation) la case à été marqué d'un « x » afin de localiser la forme.

Table des matières

Introduction.....	6
I. Les barrages dans le système fluvial.....	9
1.1. Les cours d'eau : des systèmes dynamiques en perpétuelle évolution.....	9
1.1.1. <i>Le système fluvial et l'hydrosystème : deux concepts clés en hydrologie.....</i>	<i>9</i>
1.1.2. <i>Les notions d'équilibre dynamique et de résilience du cours d'eau.....</i>	<i>10</i>
1.1.3. <i>L'importance de l'hydromorphologie dans la viabilité du système.....</i>	<i>11</i>
1.2. Impacts des barrages sur les milieux physiques et biologiques du cours d'eau.....	14
1.2.1. <i>Historique et usages des barrages.....</i>	<i>14</i>
1.2.2. <i>La perturbation des flux et ses effets sur la morphologie fluviale.....</i>	<i>15</i>
1.2.3. <i>Entrave à la continuité écologique et modification des habitats.....</i>	<i>17</i>
1.3. L'arasement/dérasement d'ouvrage en milieu de faible à moyenne énergie.....	20
1.3.1. <i>Une tendance de plus en plus générale au démantèlement : la législation en vigueur.....</i>	<i>20</i>
1.3.2. <i>Les réajustements hydromorphologiques théoriques post-effacement.....</i>	<i>21</i>
1.3.3. <i>Les spécificités des cours d'eau de faible à moyenne énergie : quels exemples ?.....</i>	<i>25</i>
Conclusion partielle/Transition :.....	30
II. La Sélune : un fleuve entravé par deux grands barrages.....	31
2.1. Contexte géographique : la Sélune et son bassin versant.....	31
2.1.1. <i>Localisation et situation de la Sélune.....</i>	<i>31</i>
2.1.2. <i>Un contexte physique typique du Massif Armoricain.....</i>	<i>32</i>
2.1.3. <i>...expliquant le régime hydrologique typique du fleuve.....</i>	<i>34</i>
2.2. Les barrages de Vezins et de la Roche-qui-boit : une dynamique fluviale bouleversée.....	37
2.2.1. <i>Présentation et histoire des barrages.....</i>	<i>37</i>
2.2.2. <i>Impacts des barrages sur les flux liquides et solides de la Sélune.....</i>	<i>38</i>
2.2.3. <i>Répercussions des modifications hydromorphologiques sur l'état écologique du fleuve.....</i>	<i>42</i>
2.3. Historique de la décision de dérasement et suivi scientifique de l'opération.....	45
2.3.1. <i>L'effacement des barrages : l'histoire d'une décision qui ne fait pas consensus.....</i>	<i>45</i>
2.3.2. <i>L'opération d'effacement du barrage et les travaux connexes.....</i>	<i>46</i>
Conclusion partielle/transition :.....	48
III. Méthodologie de la recherche.....	49
3.1. Échelles de travail et choix des sites pour l'étude hydromorphologique.....	49
3.1.1. <i>Emboîtement des échelles de travail sur la Sélune.....</i>	<i>49</i>
3.1.2. <i>Critères de sélection et localisation des sites.....</i>	<i>50</i>
3.1.2. <i>Description des sites et comparaison avant/après ouverture du barrage.....</i>	<i>51</i>
3.2. Définition de l'état initial ante-ouverture du barrage.....	56
3.2.1. <i>Constitution de la base de travail.....</i>	<i>56</i>
3.2.2. <i>Extraction des métriques géomorphologiques.....</i>	<i>58</i>
3.2.3. <i>Réalisation de la Classification par Ascendance Hiérarchique des tronçons homogènes.....</i>	<i>59</i>
3.3. Estimer les capacités de résilience du fleuve Sélune.....	61
3.3.1. <i>Calcul de la puissance spécifique.....</i>	<i>61</i>
3.3.2. <i>Mesure de l'érodabilité des berges.....</i>	<i>64</i>
3.3.3. <i>Potentiel d'apports solides du bassin versant.....</i>	<i>68</i>

3.4. Déterminer le potentiel réel de réajustement face aux contraintes anthropiques.....	72
3.4.1. Inventaire et cartographie des formes fluviales post-ouverture du barrage.....	72
3.4.2. Détermination des contraintes aux réajustements latéraux sur la Sélune.....	76
3.4.3. Estimer l'impact des travaux de restauration sur les débits de pleins bords.....	78
3.5. Évaluer la possible recolonisation piscicole liée aux nouveaux faciès d'écoulement.....	83
3.5.1. Estimation du futur potentiel frayères en amont du barrage de Vezins.....	83
3.5.2. Détermination des nouveaux faciès d'écoulement sur la Sélune.....	85
Conclusion partielle/transition :	89
IV. Résultats et analyses.....	90
4.1. Un cours d'eau influencé par les barrages pendant 90 ans.....	90
4.1.1. Résultats de la typologie morphologique des tronçons homogènes (CAH).....	90
4.1.2. Cartographie finale de la typologie : l'état initial de la Sélune.....	91
4.2. Les capacités de résilience théoriques de la Sélune.....	94
4.2.1. Des puissances spécifiques contrastées suite à l'ouverture du barrage.....	94
4.2.2. Des berges au degré d'érodabilité relativement faible.....	96
4.2.3. Un potentiel d'apport solide typique des milieux de faible énergie.....	98
4.3. Un cours d'eau anthropisé : les contraintes aux réajustements.....	108
4.3.1. La morphologie de la Sélune post-ouverture : entre aménagements anciens et nouvelles formes fluviales.....	108
4.3.2. Une activité morphogène contrainte par une anthropisation ancienne.....	115
4.3.3. Les travaux de restauration actuels : modifications du débit de pleins bords.....	117
4.4. Conséquences de l'opération en terme de recolonisation piscicole potentielle.....	126
4.4.1. Première approche du nouveau potentiel frayère pour le saumon.....	126
4.4.2. La lente émergence des nouveaux faciès d'écoulement encore amenés à évoluer.....	129
Conclusion partielle/transition :	135
V. Discussions et perspectives.....	136
5.1. Limites de l'étude et compléments potentiels.....	136
5.1.1. Des méthodes qui restent à approfondir et des résultats discutables.....	136
5.1.2. Les autres paramètres rentrant en compte dans la résilience du système fluvial.....	139
5.2. Le début d'une opération de restauration : quel avenir pour la vallée ?.....	144
5.2.1. Des capacités de résilience qui induisent des réajustements à suivre sur le long terme.....	144
5.2.2. Un projet qui ne fait que commencer : un second barrage encore en place.....	146
5.2.3. Un démantèlement qui doit s'accompagner d'un véritable projet de territoire.....	147
Conclusion partielle/Transition.....	149
Conclusion.....	150
Table des figures.....	154
Bibliographie.....	157
Annexes.....	161
Table des matières.....	171