

**Traçage d'armures sédimentaires :
concentration sur la technique RFID par
transpondeurs passifs**

Protocole de traçage des armures sédimentaires
sur la barre forcée du site de Mareau-aux-Prés
(45)



Martin BORTOLOTTI

Source : (Projet pluridisciplinaire
BioMareau - INRA, 2020)

Sous la direction de M. Stéphane RODRIGUES

Enseignant chercheur, responsable de la Filière Ingénierie des Milieux
Aquatiques spécialité Aménagement - Environnement Polytech Tours

Sommaire

SOMMAIRE.....	2
INTRODUCTION	4
PARTIE 1 : PRESENTATION DES ACTEURS IMPLIQUES ET DES DOCUMENTS ETUDIES DANS LE CADRE DE LA CONSTITUTION DE CE PROTOCOLE CE TRAVAIL.....	7
PARTIE 2 : MATERIELS ET METHODES	9
1. SITE D’ETUDE ET ELEMENTS DE CONTEXTE.....	9
1.1. <i>Dynamique hydro-sédimentaire du site d’étude.....</i>	<i>9</i>
2. ETUDES GRANULOMETRIQUES ET STRUCTURELLES (GEOMORPHOLOGIE) COMPLEMENTAIRES	11
3. METHODES GEOMORPHOLOGIQUES ET SEDIMENTOLOGIQUES.....	14
3.1. <i>Chaînes d’érosion couplées à la topographie et suivies par image (ballon...)</i>	<i>15</i>
3.2. <i>Relevé topographique et suivi par image</i>	<i>15</i>
3.3. <i>RFID (Radio Frequency IDentification).....</i>	<i>17</i>
3.3.1. Généralités.....	17
3.3.2. Échantillonnage de particules, taille de sédiments et techniques de prélèvement	18
3.3.3. Matériel de détection.....	19
3.3.4. Prospection et taux de retour	20
PARTIE 3 : RESULTATS, INTERPRETATION ET OUVERTURE	22
1. METHODES GEOMORPHOLOGIQUES ET SEDIMENTOLOGIQUES.....	22
1.1. <i>Rupture des armures</i>	<i>22</i>
1.2. <i>Suivi de particules grossières sur la barre RFID</i>	<i>25</i>
CONCLUSION.....	27
BIBLIOGRAPHIE	29

TABLE DES ANNEXES	31
--------------------------------	-----------

Introduction

Dans un contexte d'amélioration de la compréhension des phénomènes hydromorphologiques et bio/géomorphologique au sein des cours d'eau, l'étude de la lithologie et de la dynamique fluviale et sédimentaire occupe une place prépondérante.

Le nombre d'études sur des structures sédimentaires lithologiques s'est largement étendue et se base de plus en plus sur un suivi individuel des particules (VERVYNCK, 2019) par traçage sédimentaire. Ce suivi individuel est nécessaire dans la mesure où les structures étudiées sont dynamiques. L'identification particulière est nécessaire dans le cas où l'objectif est de mettre en relation le déplacement d'une particule avec des caractéristiques qui lui sont propre (granoclassement, déplacement selon la classe granulométrique, point de dépôt...). Le traçage sédimentaire constitue une discipline de la géomorphologie qui permet d'affiner la compréhension de la mobilité d'une charge solide dans un cours d'eau. Le traçage sédimentaire possède des moyens d'applications extrêmement diversifiés selon le type de traceur ainsi que le type de structure à l'étude. La dynamique sédimentaire est étroitement liée aux conditions hydrauliques appliquées au cours d'eau faisant l'objet de l'étude. La structure lithologique étudiée est largement renseignée pour les cours d'eau à lithologie graveleuse et en cours d'apport de connaissance pour les substrats sablograveleuse, il s'agit des armures sédimentaires. Il s'agit de la résultante d'un tri granulométrique qui se voit, par la chasse (expulsion) de sédiments fins en surface, composé d'une couche de sédiments grossiers (sus-surface), peu mobile qui renferme une sous-couche de sédiments fins qui ne sont pas directement sujets au transport solide par augmentation des conditions hydrauliques. L'état de la recherche sur les armures sédimentaires (BORTOLOTTI, 2019 non publié) abordé en prémisses à ce travail a rendu compte de la suspicion de responsabilité de ces structures dans de nombreux phénomènes bio (WINTENBERGER, 2015) et géomorphologiques.

L'étude du transport solide et de la structuration sédimentaire en Loire Moyenne est une thématique largement renseignée et d'intérêt majeur dans la compréhension hydromorphologique la Loire. Les éléments de réponse de cette étude seront intégrés aux travaux de recherche en sédimentologie et aux différentes communautés faunistiques et floristiques présentes en Loire Moyenne. Le site des Îles de Mareau-aux-Prés, situé en aval d'Orléans, fait l'objet de nombreux travaux de recherche car il offre un réservoir de biodiversité unique, façonné par la dynamique morphosédimentaire de la Loire (cf « Site d'étude et éléments de contexte » partie 2). Ses caractéristiques en font un terrain d'étude préférentiel pour le suivi de travaux d'entretien du lit de la Loire (Projet BioMareau-I) ainsi que l'étude du fonctionnement sédimentaire, du paysage et des éléments de biodiversité (BioMareau-II) (Projet pluridisciplinaire BioMareau - INRA, 2020). L'interaction entre l'étude des caractéristiques géomorphologiques et le suivi de communautés ligneuses sur le site de Mareau a fait naître la suspicion d'une influence du phénomène de rupture d'armure sédimentaire (structures sédimentaire particulières) (BORTOLOTTI, 2019) sur la qualité d'implantation des semis de peupliers noirs (suivis des semis ligneux en Loire Moyenne (WINTENBERGER, 2015). Suite à l'investissement de l'Université de Tours dans des PIT tags permettant d'effectuer un traçage de particules par RFID passif. La commande se résume en l'établissement d'un protocole applicable au site de Mareau-des-Prés, qui consiste à étudier les armures sédimentaires par marquage (implantation de PIT tags) pour, *in fine*, caractériser leur influence dans la dynamique de végétalisation des barres forcées.

Comme dit précédemment, l'état de l'art réalisé sur le traçage d'armures sédimentaires (BORTOLOTTI, 2019) sert de point de départ à ce travail visant la constitution d'un protocole pour la mise en place de dispositifs de traçage sédimentaire dans les sédiments constitutifs des structures sédimentaires étudiées en vue d'élargir la connaissance des armures sédimentaires en Loire Moyenne et de caractériser leurs conséquences sur la morphologie fluviale.

L'articulation de ce protocole se fera en trois étapes.

- La présentation de la dynamique sédimentaire et hydrologique du site d'étude ainsi que des moyens (matériels, stratégiques, méthodologiques...) mis en place dans ce protocole (voir Partie 1).
- Le détail du protocole proposé et des résultats scientifiques potentiels ainsi que la mise en place de méthodes appliquées simultanément sur le site pour la caractérisation des ruptures d'armures sédimentaires (voir Partie 2).
- Le suivi des particules grossières avec l'envisagement de scénarii chiffrés en temps de travail et en matériels utilisés. De plus, il s'agit d'ajouter, en termes de discussion, des résultats d'autres projets de traçages mis en place pour l'aide à l'interprétation des résultats (voir Partie 3).

Ce protocole vise à répondre à des questions posées par la communauté scientifique mais également par les gestionnaires des lits de cours d'eau.

Partie 1 : Présentation des acteurs impliqués et des documents étudiés dans le cadre de la constitution de ce protocole ce travail

Les différents acteurs de ce projet réunissent leurs compétences afin de produire une étude pluridisciplinaire du site et de ses enjeux. L'aspect particulièrement développé dans ce travail se rapporte au volet « Fonctionnement hydrosédimentaire et biogéomorphologie » coordonné par Stéphane RODRIGUES. L'UMR CITERES (*UMR Cité, TERritoires, Environnement et Société*) est l'entité qui coordonne l'ensemble des projets de recherche menés par le CNRS et l'Université de Tours. Cette dernière bénéficie d'un atout majeur : la capacité de croiser les différents champs d'étude. Depuis sa création en 2004, l'objectif de l'UMR CITERES est d'analyser les dynamiques spatiales et territoriales des sociétés. En vue d'étudier et d'appréhender les relations espace-société-nature à différentes échelles (du site d'étude jusqu'au fleuve dans son ensemble), l'équipe DATE (Dynamique et Actions Territoriales et Environnementales) a été constituée à la croisée des sciences écologiques, sociales et territoriales afin d'apporter des connaissances pour la gestion, la préservation et la restauration des socio-écosystèmes (7324, s.d.).

A l'initiative de plusieurs établissements de recherche (INRA, IRSTEA, Université de Tours, Loiret Nature Environnement, INSA Val de Loire, CBNBP, Entomotec) et soutenue par de nombreux partenaires (Région Centre-Val-de-Loire, FEDER, Etablissement public Loire, Zone Atelier Loire, Mairie de Mareau-aux-Prés), le projet BioMareau a pour objectif la mesure et l'étude de la reconquête de la biodiversité sur des îlots impactés par de lourds travaux d'entretien (Projet pluridisciplinaire BioMareau - INRA, 2020).

Il se décline en deux volets distincts :

- BioMareau-I (2012-2015)

Lancé à la suite des travaux d'entretien ayant eu lieu en septembre 2012 pour l'étude des conséquences de ces derniers sur le lit de la Loire et sur d'autres aspects de biodiversité caractéristiques du site.

- BioMareau-II (2016-2019)

Inscrit dans la continuité du premier projet, BioMareau-II se focalise sur la dynamique de recolonisation de la biodiversité après les travaux d'entretien du lit de la Loire.

Partie 2 : Matériels et méthodes

1. Site d'étude et éléments de contexte

1.1. Dynamique hydro-sédimentaire du site d'étude

La Loire voit son cours subdivisé en trois parties (Loire amont, Loire moyenne et Loire aval) et s'étend sur plus de 1000 km, drainant un bassin versant de 117 000 km². La Loire moyenne se situe entre le Bec d'Allier et le Bec de Maine, au niveau de la ville d'Angers (49). **THESE** Son régime hydrologique présente de fortes disparités selon les années. « *Les débits moyens interannuels varient entre 182 m³ .s⁻¹ à Nevers (Bec d'Allier) et 853 m³ .s⁻¹ à Montjean-sur-Loire.* » (CLAUDE, 2012).

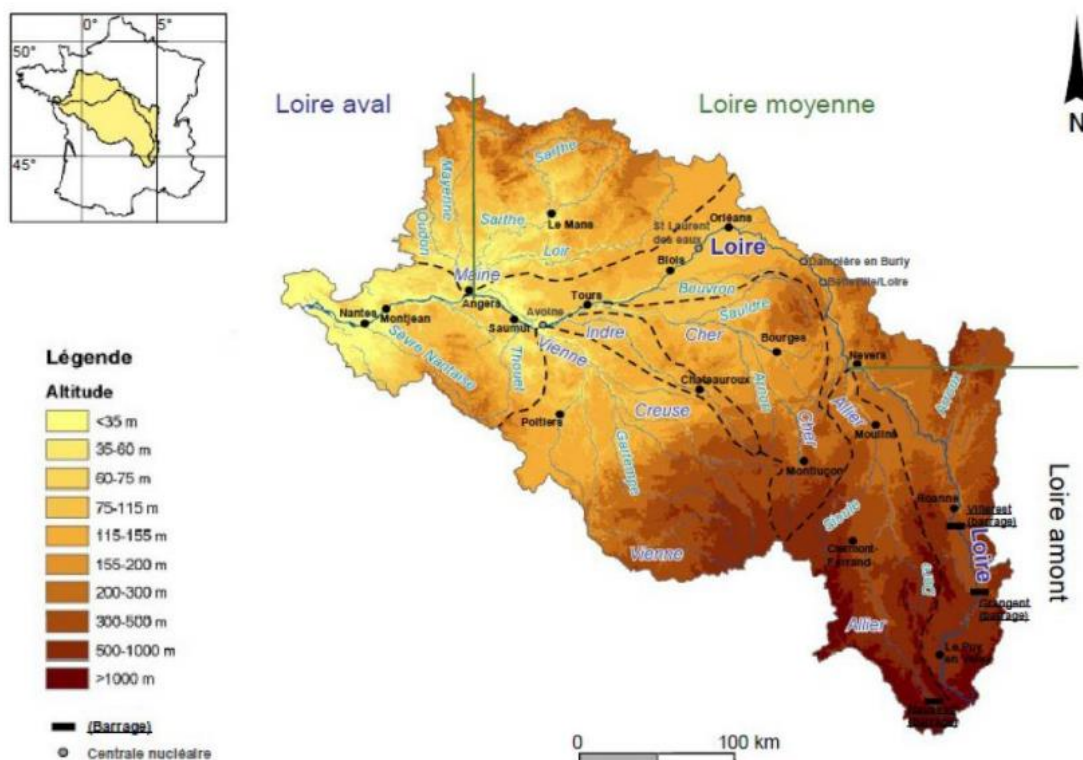


Figure 1 : Situation géographique du site d'étude (Loire) (CLAUDE, 2012)

Localisé en Loire moyenne en aval d'Orléans (45), environ à 500m en aval de la confluence avec le Loiret, le site des îles de Mareau-aux-Prés est constitué d'une mosaïque de quatre îlots sur une superficie de treize hectares (Projet pluridisciplinaire BioMareau - INRA, 2020).

Ce site d'étude est intégré à la Réserve Naturelle Nationale de Saint-Mesmin et constitue le support de travaux de recherche en sédimentologie et sur les différentes communautés faunistiques et floristiques (WINTENBERGER, 2015).

La présence en ce lieu d'une barre sédimentaire forcée (non migrante) s'explique par l'hétérogénéité des apports sédimentaires. Pendant les épisodes de crue, modulés par la présence de végétation (ligneux) et l'effet de déflexion induit par la topographie du site, une accrétion de la charge sédimentaire du fond des chenaux environnants a lieu. La ségrégation des tailles de grains due à ce phénomène induit une structure verticale de dépôt de sédiments qui s'apparente, à certaines positions du site, à une armure sédimentaire. En effet, l'hétérogénéité du mélange sédimentaire évolue vers deux couches distinctes : une sub-surface exempte de sédiments fins et une sous-surface composée, à l'inverse, de ces sédiments fins (matériau stocké). L'interdépendance de ces deux couches en termes de mobilité, par l'effet de masquage exercé par la sub-surface, a souvent été remise en question dans les travaux de recherche (KOMAR et SHIH, PARKER et KLINGEMANN, LISLE) mais semble se rapporter à un transport sélectif lié à la taille du sédiment.

Sur le site d'étude, les armures sédimentaires sont notamment présentes au niveau de la tête des barres sédimentaires. En effet elles sont localisées généralement sur les parties amont et centrale de la barre, du fait de la taille plus importante des sédiments déposés, tandis que la partie aval d'une barre est classiquement constituée de sédiments plus fins et trié (WINTENBERGER, 2015). Les phénomènes de dépôt sont dépendants des variables hydrauliques, notamment des pics de crue (Stéphane Rodrigues, 2004). La barre non migratrice (forcée) du site n'en est pas moins dynamique, du fait de phénomènes d'érosion et de dépôt auxquels elle est exposée. Selon l'intensité des crues, le seuil de rupture des armures sédimentaires est atteint, ou pas. Ces structures constituent de points durs

associés à des zones « stables » qui peuvent conditionner l'implantation de végétation sur une barre sédimentaire ou sur une île (Coraline Lise Wintenberger, 2017). Un des rôles de ces structures sédimentaires est « *la dissipation de l'énergie susceptible de réduire la force de trainée exercée sur les semis* » (Coraline Lise Wintenberger, 2017).

2. Etudes granulométriques et structurales (géomorphologie) complémentaires

Les armures sédimentaires sont ainsi soumises à un seuil de rupture qui conditionne la libération du stock sédimentaire sous-jacent plus fin, phénomène qui se solde par une érosion marquée. Ces armures, sur le site de Mareau-aux-Prés, sont composées de sédiments « grossiers » ($> 2\text{mm}$) (cf paragraphe RFID et études granulométriques) dont la mise en mouvement peut être étudiée par des « *méthodes de mesures directes qui permettent d'évaluer les distances réellement parcourues, les seuils de mise en mouvement de la charge solide et les flux charriés* (Wilcock et al., 1996 ; Haschenburger et Church, 1998 ; Petit et al., 2005 ; Wong et al., 2007) » (Kevin Graff, 2018).

Ce seuil de rupture, dans le contexte d'un système sablo-graveleux, reste inexploré par la recherche à ce jour, et donc inexploité. C'est la raison pour laquelle l'analyse granulométrique du site est capitale pour l'atteinte d'objectifs de suivi de particules, et surtout, de traçage de ces dernières par transpondeurs passifs.

Les études effectuées jusqu'alors, via des analyses granulométriques effectuées sur le site, permettent de constater une distribution spatiale particulière gouvernée par des événements hydrologiques et des écoulements. Ainsi, sur la barre forcée, les vitesses d'écoulement quotidiennes moyennes varient entre $0,9\text{m.s}^{-1}$ et $1,6\text{m.s}^{-1}$ (WINTENBERGER, 2015). Les vitesses décroissent du chenal principal vers le côté gauche et de l'amont vers l'aval. Il a été constaté que la contrainte de cisaillement du lit associé varie de 0 à 20 N.m^{-2} ; les valeurs moyennes et médianes étant égales respectivement à $4,6\text{ N.m}^2$ et $3,3\text{ N.m}^2$ (WINTENBERGER,

2015). La contrainte de cisaillement est plus élevée dans la partie amont de la barre qu'en aval. « *La relation entre la contrainte de cisaillement du lit calculée et la D50 des sédiments échantillonnés lors des crues a été intégrée dans le diagramme de Southard et Boguchwal (1990). Pour les faibles débits, la contrainte de cisaillement du lit était parfois insuffisante pour induire le mouvement des sédiments.* » (WINTENBERGER, 2015).

Les zones d'armure situées en amont de la barre sédimentaire constituent des points stabilisant les sédiments et sont explicables par des valeurs élevées du critère adimensionnel de Shields (rapport entre les forces de cisaillement qui tendent à la mise en mouvement et les forces de gravité qui tendent à l'empêchement de ce mouvement). La mise en mouvement d'une particule d'une taille donnée est dès lors régie par la contrainte de cisaillement que l'on peut obtenir par estimation à partir du diagramme de Shields. Dans le cas d'armures, on note que les paramètres précédents ne sont pas adaptés à ce type de structure car ils ne prennent pas en compte l'arrangement et la forme des grains sur le lit. Les armures ont pour caractéristiques de ne pas pouvoir se développer sur des sédiments uniformes ($D_{84}/D_{50} < 1,5$), et d'être gouvernées par l'augmentation de la rugosité du lit et la diminution d'apports sédimentaires.

La mise en mouvement d'une particule faisant partie d'une armure sédimentaire est exprimée par la formule suivante :

$$\theta_{ci} / \theta_{cD50} = (D_i / D_{50})^a$$

θ_{ci} = critère de Shields pour taille D_i (une taille donnée des sédiments de surface ou armure)

θ_{cD50} = de Shields pour taille 0.7 et -1.

L'étude réalisée par Coraline WINTENBERGER (2015) a permis d'affiner les valeurs de mouvements de particules grossières par le calcul du point auquel on remarque l'abandon de la charge de fond. Selon la granulométrie, la contrainte critique de cisaillement du lit nécessaire pour initier le mouvement des sédiments varie entre 0,02 et 50,3 N.m⁻². Cette dernière valeur correspond aux grosses particules constituant des couches d'armure présentes sur la barre.

Par interpolation des recherches effectuées sur des rivières à lit graveleux (Church, Malavoi...), le D_{50} de l'armure est environ 1,5 à 3 fois supérieur à celui de la sous-couche qu'elle renferme. L'identification et l'étude de ces structures est rendue possible par le croisement des données d'analyses granulométriques effectuées sur le site de Mareau-aux-Prés et des connaissances apportées sur les armures sédimentaires et leurs caractéristiques (BORTOLOTTI, 2019).

Le substrat offre un spectre granulométrique de sédiments non cohésifs qui est globalement sablo (max = 2 mm) – graveleux (max = 64 mm). Les analyses granulométriques ont été enrichies par l'étude de sédiments prélevés dans trois chenaux secondaires répartis sur le cours moyen de la Loire (Bréhémont [37], Souzay-Champigny [49], Ingrandes/Le Fresne-sur-Loire [44]) et sur une barre sédimentaire (Mareau-aux-Prés [45]). Ces dernières ont permis « *de tracer les courbes de fréquence cumulée des sédiments échantillonnés* (Figure 2 : Courbes des fréquences cumulées des tailles de grain (n=68) et D_{50} (n=98) (losanges) des sédiments de Loire en fonction des unités sédimentaires échantillonnées associées avec les courbes de fréquence cumulée de la taille des grains des sédiments utilisés pour remplir la fosse expérimentale (WINTENBERGER, Dynamique fluviale et végétation pionnière à Salicaceae en rivière sablo-graveleuse, 2015)) *De plus, le travail de thèse de Latapie (2011) a permis de compléter le spectre granulométrique rencontré en Loire moyenne avec le D_{50} d'échantillons de sédiments provenant de chenaux secondaires, de barres sédimentaires ainsi que du fond de chenal.* » (WINTENBERGER, 2015)

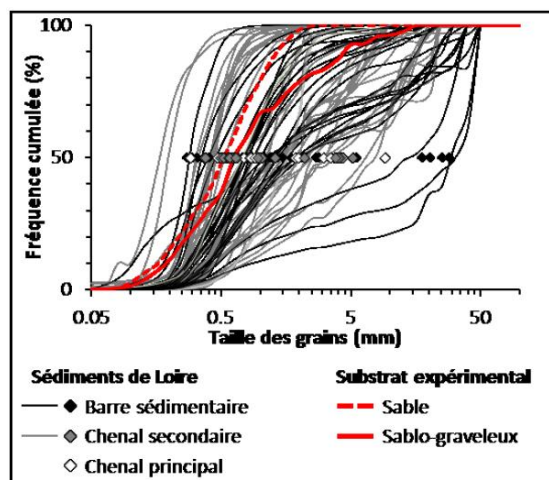


Figure 2 : Courbes des fréquences cumulées des tailles de grain (n=68) et D50 (n=98) (losanges) des sédiments de Loire en fonction des unités sédimentaires échantillonnées associées avec les courbes de fréquence cumulées de la taille des grains des sédiments utilisés pour remplir la fosse expérimentale (WINTENBERGER, Dynamique fluviale et végétation pionnière à Salicaceae en rivière sablo-graveleuse, 2015)

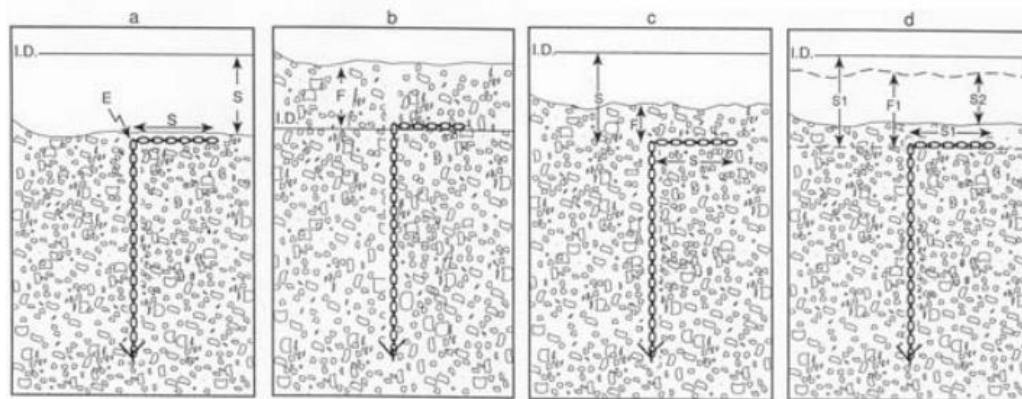
L'un des points clés de l'analyse des armures sédimentaires concerne l'acquisition de la granularité du lit. Ce point, déjà renseigné pour différents sites d'études en Loire moyenne est en cours de généralisation à l'ensemble de la Loire moyenne via une opération en cours de montage. Il s'agit du projet « Info sed 2 » porté par le laboratoire GeHCO de l'Université de Tours et de l'Observatoire des Sédiments de la Loire et de ses Affluents (OSLA). L'objectif de ce projet est de compléter le spectre granulométrique rencontré en Loire moyenne avec le D50 d'échantillons de sédiments provenant de chenaux secondaires, de barres sédimentaires ainsi que du fond de chenal.

3. Méthodes géomorphologiques et sédimentologiques

Il est opportun de procéder de façon pluridisciplinaire et multifactorielle lors la constitution d'un projet de suivi de structures sédimentaires complexes. L'utilisation de la RFID constitue un axe important pour la réalisation d'une analyse dynamique des sédiments qui constituent une armure sédimentaire. Il faut toutefois rappeler qu'il est essentiel de prendre en compte des données antérieures et déjà existantes concernant le site d'étude, telles que l'historique des variables hydrauliques, des travaux d'entretien ainsi que l'historique des analyses et projets d'études se centrant sur ce site. Le traçage sédimentaire par transpondeur passif constitue dès lors une source d'information majeure, qu'il faut néanmoins mettre en relations avec plusieurs autres variables déjà à disposition.

3.1. Chaînes d'érosion couplées à la topographie et suivies par image (ballon...)

Des dispositifs de chaînes d'érosion ont été implantés au sein du chenal afin de pouvoir mesurer, en un point, l'épaisseur de sédiments érodés, ainsi que celle du dépôt subséquent (WINTENBERGER, 2015). Ces outils sont capitaux dans la mise en relation des événements hydrologiques passés. Les chaînes d'érosion permettent de témoigner de l'impact des crues rencontrées et de leurs impacts au niveau sédimentaire. Elles permettent de quantifier les deux épaisseurs suivantes : celle du matériel érodé lors de crues mobilisatrices (sus-surface), et celle due à l'accumulation de sédiments déposés à l'arrêt de la mobilisation des sédiments (sub-surface).



quatre scénarii pouvant être enregistrés par les chaînes d'érosion, Laronne et al (1994)

Cas a : Erosion uniquement, la longueur S horizontale correspond à l'épaisseur de matériel érodé.

Cas b : Accumulation uniquement, on mesure aisément l'épaisseur « F » de sédiments accumulés

Cas c : Erosion suivie d'une accumulation : Même cas que « a » ; mais une épaisseur « F » de sédiments recouvre la partie horizontale de la chaîne.

Cas d : Erosion S1, accumulation F1 et à nouveau érosion S2. Cela est un scénario supposé car l'observation de terrain est identique au cas « c »

Figure 3 : Quatre scénarii pouvant être enregistrés par les chaînes d'érosion, Laronne et al (1994) (MOLS Julien)

3.2. Relevé topographique et suivi par image

Le site de Mareau-aux-Près bénéficie d'une source de relevés et de mesures particulièrement complète de par son état de « Zone atelier Loire » qui en fait un site d'étude préférentiel pour l'analyse des communautés faunistiques et floristiques (WINTENBERGER, 2015) et pour l'analyse des dynamiques sédimentaires et des réactions du lit du cours d'eau aux aménagements (voir le projet BioMareau 2016-2019 : *Dynamique de recolonisation de la biodiversité*

après travaux d'entretien du lit de la Loire, financement INRA, IRSTEA, FEDER, Région Centre – Val de Loire).

Le site a donc été renseigné pendant les périodes de basses eaux, notamment dans le cadre de la thèse de Coraline WINTENBERGER, en différents points et selon plusieurs méthodes :

- **Topographie** : suivi de l'évolution morphologique et appréhension des bilans sédimentaires
- **Chaines d'érosion** : intensité du processus d'érosion-dépôt
- **Analyse granulométrique** : évolution de la granularité des sédiments
- **Photographie par ballon captif** : détermination de manière qualitative de la répartition granulométrique des sédiments et de l'évolution morphologique globale des sites (peu propice au site de Mareau)
- **Suivi de la ligne d'eau** : enregistrement par des sondes de mesures de différentiels de pression (sondes Diver) via l'installation de piézomètres
- **Coupes sédimentaires** : archivage sédimentaire permettant de travailler sur les conditions de dépôt et sur la vitesse d'enregistrement

Pour le suivi en période de crue, « le site de Mareau-aux-Prés a fait l'objet d'un suivi de la dynamique hydro-sédimentaire au cours des épisodes de crue. Les trois sites étant distant d'environ 100 km, il n'était pas possible de suivre un même événement hydrologique sur plusieurs sites à la fois. Des mesures de bathymétrie mono-faisceaux et multifaisceaux ont permis d'appréhender l'évolution (i.e. morphologie, migration) des formes du lit (i.e. barre, dune) au cours des épisodes de crue. Les vitesses et directions des écoulements ont également été mesurées à l'aide de profils aDcp (acoustic Doppler current profiler). De plus, les sédiments transportés en charge de fond ont été échantillonnés à l'aide d'un cône berthois pour faire l'objet d'analyses granulométriques. » (WINTENBERGER, 2015)

Les coupes topographiques (sections transversales qui renseignent l'altitude en différents points exondés) et la bathymétrie (profils longitudinaux qui renseignent l'altitude en différents points inondés) sont des méthodes qui ne reposent pas sur la mesure des flux mais plutôt sur la quantification des changements morphologiques

du lit d'un cours d'eau au cours des crues. Leurs résultats font l'objet d'une confirmation dans l'interprétation que révèlent les autres méthodes dans le cas de notre étude.

Suite à des suivis morphologiques et sédimentologiques (topographie, GPS différentiels...), des analyses cartographiques (chaines d'érosion, relevés GPS...) et l'étude des paramètres hydrologiques et hydrauliques (débits journaliers, lignes d'eau, intensité et durée des crues...) du site, le Colloque ICSF, Leeds (UK) (WINTENBERGER, 2015), a énoncé des résultats ayant permis d'estimer les forces tractrices critiques nécessaires à la mise en mouvement à partir des D50 et D90.

Néanmoins, l'estimation de la quantification des stocks sédimentaires est fait de manière globale (bien que précise), et n'indique dès lors pas la part liée à l'apport suscité par la fragilisation voire la rupture d'une armure sédimentaire. Ce type d'apport, qu'il est primordial de pouvoir isoler lors d'une étude, **dépend des conditions hydrauliques, de la composition du mélange des couches (sous et sub-surface) et donc des tailles de D50 et D90 du mélange de sédiments.**

3.3. RFID (Radio Frequency IDentification)

Le débit solide peut être renseigné de différentes manières. En plus des données issues de relevés topographiques rendant compte du bilan sédimentaire, le traçage sédimentaire peut tout à fait être mis à profit dans l'évaluation des distances parcourues par la charge de fond au cours des événements de crue de différentes intensités. Également, la mise en place d'antennes radio, déployées le long de la rivière, permet de recevoir le signal lors du passage d'une particule marquée (par l'implantation d'un PIT-Tag) à l'approche de l'antenne, et ainsi de recevoir les signaux des grains composant les armures sédimentaires.

3.3.1. Généralités

Le traçage sédimentaire est une discipline de la géomorphologie qui a permis d'affiner la connaissance des dynamiques sédimentaires des cours d'eau et qui, de par la multiplication des études utilisant ses méthodes, a frottement évolué

ces dernières décennies (BORTOLOTTI, 2019). A la suite de l'application de méthodes permettant l'estimation des transferts sédimentaires et des budgets quantifiant les entrées et les sorties des stocks sédimentaires ayant lieu sur le site d'étude, il est nécessaire, par le biais de l'étude des structures sédimentaires (armures), d'analyser la mobilisation puis la redistribution des sédiments à l'aval du site de Mareau-aux-Prés durant des événements de crue capables de déstabiliser la surface d'armurage.

Pour ce faire, l'expérimentation de méthodes de traçage sédimentaire est tout à fait cohérente. Ainsi, l'expérimentation de la méthode de traçage basée sur l'utilisation de transpondeurs passifs RFID (PIT-Tags) permettra d'entrevoir la mobilisation et la distribution des sédiments par suivis individuel des particules.

L'évolution des techniques est en expansion concernant les traceurs. A ce jour, l'utilisation de « *radio-transmetteurs, donnant une information en continu sur la position des particules en surface et en profondeur durant une crue* » (Kevin Graff, 2018) pourrait être envisagée. Toutefois, les coûts sont bien trop importants en comparaison à la valeur ajoutée que dégageraient ces traceurs. Si les méthodes d'utilisation de la RFID passive sont relativement simples, l'implantation des traceurs dans des particules constitue une étape sensible, demandant un travail important qui peut parfois perturber l'imbrication des particules dans le lit mais aussi le temps de prospection nécessaire au retour des PIT-Tags.

3.3.2. Échantillonnage de particules, taille de sédiments et techniques de prélèvement

Le corpus scientifique s'intéressant au traçage sédimentaire par RFID passif fait l'objet d'une grande diversité selon les tailles de particules tracées (Hervé PIÉGAY, 2016). Dans le cas qui nous concerne, l'analyse fine de la granularité par des stratégies de comptage surfacique (échantillonnage de Wolman...) ne constitue pas une étape indispensable dans la méthode de traçage et de choix de particules à échantillonner (car les sédiments à échantillonnées sont conditionnées par l'étude granulométrique ciblée sur les armures sédimentaires) mais plutôt dans la méthode d'analyse des résultats. Les campagnes de traçage sédimentaires peuvent s'effectuer lors de périodes de basses eaux ce qui est une caractéristique qui aide à

la réalisation du protocole. C'est-à-dire que nous ne sommes pas en nécessité d'utiliser des méthodes de piégeage particulières.

Dans le cas présent, les sédiments en Loire moyenne sont composés de sables et de graviers siliceux. Sur le site de Bréhémont, (CLAUDE, 2012) a révélé que les sédiments du lit D50 et le D90 (diamètres pour lesquels 50% et 90% des particules, en masse, sont plus fines) sont respectivement de 1,33 mm et 5,18 mm (CLAUDE, 2012). Suite à des campagnes de mesures, combinant bathymétrie mono- et multifaisceaux, courantométrie et prélèvements de sédiments, réalisées en crue sur le site de Mareau-aux-Prés, la structure des grains s'est révélée disparate, peu triée voire aléatoire et approchant des ordres de grandeur de $D50 = [0,5-17,8]$ mm et de $D90 = [1,3-54,4]$ mm (WINTENBERGER, 2015). La technique de traçage par transpondeurs passifs a pour limite majeure les contraintes en termes de taille du transpondeur, qui se doit d'être adapté à la taille des sédiments traçables. Ainsi les traceurs se divisent en trois classes de taille différentes pour cette méthode : 12 mm, 23 mm et 32 mm (exemple de documentation technique de Tags de 12 mm en annexe). Concernant le matériel dans lequel l'Université de Tours a investi, il s'agit de PIT-Tags de taille 23 mm (en accord avec les sédiments qui constituaient les surfaces armurées), qui sont intégrés aux particules par implantation.

3.3.3. Matériel de détection

Les ressources disponibles en termes de matériel de traçage sédimentaire à l'échelle de l'Université de Tours sont les PIT-Tags, ou transpondeurs passifs, qui s'activent lors de l'émission d'un signal électromagnétique émis par une antenne (fixe ou mobile). C'est un des points clés de cette méthode de traçage, puisqu'elle permet le choix d'une antenne fixe sur le bord du cours d'eau qui reconnaît l'identifiant qui est attribué de façon individuelle à chaque transpondeur. Louis Vervynk dans son étude sur la « valorisation de résultat de traçage sédimentaire RFID et développement des techniques de prospection » a bien rassemblé les différents aspects des méthodes de détection : « Il a été déterminé que des traceurs pouvaient être détectés (dans certaines conditions) à une distance planimétrique maximale de 15,9 m lorsque ceux-ci sont enfouis sous 2,60 m de sédiments,

(Cassel et al., 2017). Les capacités de détection sont alors fortement influencées par :

- L'orientation de l'antenne vis-à-vis du substrat
- la direction de l'antenne vis-à-vis du traceur
- le nombre de détections pour un même traceur

Ainsi, les distances de détection verticale et horizontale, tout comme la précision de géolocalisation, sont intimement liées à la manière dont le matériel de détection est utilisé. Différentes méthodes de prospection furent étudiées par l'ENS de Lyon (UMR 5600) et par GeoPeka. (...) La comparaison des résultats de prospection entre ces deux méthodes indique que bien que le taux de retour obtenu en méthode rapide soit plus faible qu'avec la méthode de référence, celui-ci reste élevé avec 88% des traceurs retrouvés. La différence de positionnement entre la méthode rapide et la méthode de référence est de l'ordre de 8 mètres. De plus, la vitesse de prospection en méthode rapide est de 3,6 km/h contre 2,7 km/h avec la méthode de référence. Ces résultats semblent alors satisfaisants au regard des distances de déplacement observées par les particules lors du suivi (> 500 m) et justifie l'utilisation de la méthode rapide pour réduire le temps et les efforts fournis lors de campagnes de recherches. » (VERVYNCK, 2019)

3.3.4. Prospection et taux de retour

Bien que la prospection soit facilitée par rapport aux autres méthodes de traçage sédimentaire (peinture, magnétisme...), la portée de détection maximale reste un facteur limitant pour appliquer cette méthode à des conditions de profondeur et d'enfouissement importantes. L'enfouissement reste un évènement rendant difficile la prospection du terrain dédiée à la recherche des grains tagués pour la récupération des transpondeurs (qui possèdent une durée de vie d'environ 50 ans).

Les faibles taux de retour sont expliqués par le problème de chevauchement des signaux radio, par l'effort de prospection et sans doute également par l'enfouissement et la détérioration des traceurs. En effet le système RFID à basse fréquence est soumis à la détection aléatoire de plusieurs traceurs placés dans la zone de détection de l'antenne. Ainsi, dans le cas de transpondeurs disposés en

amas et non mis en mouvement, beaucoup ne seront pas détectés. Augmenter le taux de retour nécessite dès lors de passer plusieurs fois au même endroit et induit un renforcement de l'effort de prospection lorsque la densité de traceurs est forte. L'effort de prospection est sans doute également renforcé par les contraintes d'enfouissement et de détérioration des traceurs.

Partie 3 : Résultats, interprétation et ouverture

1. Méthodes géomorphologiques et sédimentologiques

1.1. Rupture des armures

En plaçant une série de chaînes d'érosion dans le lit mineur d'un cours d'eau, il est dès lors possible, pour une crue déterminée, de cartographier les zones affectées par le charriage et de différencier les zones accumulatives, érosives et stables (MOLS Julien).

L'intensité de la crue se rapporte à une valeur de débit, débit qui fait l'objet d'une analyse hydrologique sur le long terme pouvant permettre, par le croisement avec les résultats obtenus via le suivi des chaînes d'érosion après chaque évènement hydrologique, d'obtenir le débit permettant la mobilisation des sédiments. Le suivi des débits moyens mensuels à chaque évènement hydrologique doit être réalisé pour obtenir ce débit de mobilisation. De plus, la connaissance de la puissance spécifique des crues permet de montrer l'influence de cette variable par rapport à l'épaisseur de substrat qui a subi une érosion ou une accumulation de sédiment (couche active) (MOLS Julien).

Une corrélation entre la pente, la granulométrie de surface et le débit solide a été établie par V. BACCHI lors d'une étude expérimentale visant analyser l'influence du tri granulométrique pour des conditions hydrauliques proches du début de mouvement, typiques des torrents de montagne (BACCHI, 2011). L'auteur explique que cette corrélation avec le débit solide est admise pour des pentes de l'ordre de 13%. La Loire dans sa partie moyenne suit des pentes moyennes à faibles car la pente du cours d'eau diminue de 0,5 à 0,4‰. (CLAUDE, 2012) (WINTENBERGER, 2015). Cette étude n'est donc pas transposable directement à notre système fluvial mais laisse entrevoir des pistes de recherche supplémentaires.

Dans le cas de rivières à fond mobile tel que celui de la Loire, les fréquences de débit affectent l'évolution du lit, plus encore que leur intensité (CLAUDE, 2012). En ce qui concerne les armures sédimentaires, il est entendu que l'intensité est la variable principale entraînant une déstabilisation de ces structures. Le caractère particulier des cours d'eau de plaine, induisant de longues périodes de basses eaux (étiage) et des crues de faible amplitude ($Q < 2500 \text{ m}^3.\text{s}^{-1}$), fait l'objet d'un axe de réflexions sur les temporalités d'analyse nécessaires pour que l'étude soit révélatrice (témoin) d'une dynamique morpho-sédimentaire prouvée. Le projet se situe donc dans un cheminement de recherche à long terme pour, à terme, pouvoir établir des relations de cause à effet par l'analyse statistique des évènements.

L'estimation du transport solide au sein d'un cours d'eau est une source de débat au sein du corpus scientifique. Sur le site de Bréhémont, en amont du site de Mareau-aux-Prés, les formules de VAN RIJN, de MEYER-PETER et de MÜLLER ont été utilisées pour l'estimation du charriage (justifié par la présence du lit à charge sablo-graveleux à charriage modéré) en Loire moyenne (CLAUDE, 2012). Dans le corpus scientifique qui cible l'utilisation de formules empiriques pour quantifier la charge de fond, les approches sont basées le plus souvent sur le concept de force tractrice, le concept de la pente de la ligne d'énergie, le débit, les formes du lit, etc. Ces formules reposent sur des concepts alliant conditions hydrauliques et sédimentologiques soit, la capacité de mise en mouvement. La formule de Meyer-Peter et Müller s'applique dans le cas de sédiments uniformes. Son emploi est réservé aux lits à charge sablo-graveleuse et à charriage modéré (sans suspension).

$$g_{pf} R_h S(K)^{3/2} - 0.047g(\rho_s - \rho_f)D50 \pm 0.25\rho_f^{1/3} (g_b)^{2/3}$$

↓

Force tractrice * K (coef rugosité)
= force tractrice de grain
(due à la résistance des grains)

↓

Force tractrice critique

↓

transport de densité apparente sous eau par unité de
temps et de largeur (g_b) * ρ_f .

Les formules telles que celles citées précédemment estiment des taux de transport dans des conditions hydrauliques et morphologiques calibrées au

contexte d'étude dans laquelle elles ont été établies. La discontinuité du transport sédimentaire est une des caractéristiques principales de la déstabilisation des armures sédimentaires. En ce sens, il paraît complexe d'appliquer des formules sans risquer de tomber dans une faute d'interprétation.

Ceci permet de rappeler que l'utilisation de formules utilisées en ingénierie fluviale telles que la formule de Meyer-Peter et Müller (ci-dessus) permet d'atteindre des estimations de capacité de transport et non du débit solide des cours d'eau. Ces relations sont établies dans des conditions de pente, granularité (...) différentes selon les systèmes étudiés, ce qui rend les résultats difficilement comparables. De même, il est important de souligner que vis-à-vis de l'agencement des particules non cohésives entre elles (interaction en les fractions sur leur mise en mouvement), la somme des estimations de chaque fraction n'est pas possible en termes de méthode de traitement de donnée. Enfin, l'emploi de formules empiriques prend rarement en compte l'apport sédimentaire, les changements de structure du lit ainsi que les pulsations de transport solide en lien avec les formes du lit. En guise d'exemple, le travail effectué par (CLAUDE, 2012) sur Bréhémont en Loire moyenne révèle une disparité dans l'estimation de la charge de fond liée à la part de sédiments qui transite d'une dune à une autre sans participer à la migration de celle-ci.

Les levés topographiques réalisés avant et après la crue permettent d'avoir un aperçu général du bilan sédimentaire pour un transect donné. La présence d'une couche active de charriage et le bilan équilibré du transect montre un renouvellement des sédiments (CLAUDE, 2012).

Comme le montre CLAUDE, les surfaces armurées sont déstabilisées lorsque les crues atteignent des débits compris entre 2000 (crue biennale) et 3000 $\text{m}^3.\text{s}^{-1}$ (crue décennale). L'enjeu présent est donc la détermination des contraintes hydrauliques nécessaires pour mettre en mouvement ou briser les sédiments d'une armure sédimentaire. Il paraît dès lors opportun d'utiliser les techniques de traçage sédimentaire à transpondeur passif (RFID) (CLAUDE, 2012) (voir Partie 2 : Matériels et Méthodes).

La taille des grains présents en Loire moyenne, et plus particulièrement sur notre site d'étude, nous permet de marquer les particules constitutives des surfaces

armurées. Nous en venons alors à la disposition de ces dispositifs qui dépend de la possibilité de marquer des particules de la surface armurée mais aussi de la sous-couche de l'armure, à savoir, un marquage des sédiments de la colonne ou des sédiments déposés. La première étape est l'obtention des informations granulométriques sur la différence de taille entre les grains des deux couches. IL faut ensuite synthétiser les informations des crues et les puissances spécifiques associées pour établir une relation avec la mise en mouvement des particules grossière qui compose le lit du site d'étude (voir Partie 1).

1.2. Suivi de particules grossières sur la barre RFID

Le travail le plus important à effectuer lors de la constitution d'un protocole précis concernant le traçage sédimentaire par RFID concerne le nombre de traceurs à mettre en place et la métrique à utiliser pour l'analyse des mobilités sédimentaire. Les chercheurs se sont penchés sur la question et constituent une vaste source d'inspiration et d'informations pour l'évolution de ce travail et le chiffrage nécessaire des efforts à fournir en termes de détection selon le nombre de traceurs mis en service pour établir un protocole opérationnel. Une analyse de l'étude réalisée par Hervé PIÉGAY (2016) permettrait d'affiner cette variable du nombre d'outils à déployer.

L'analyse des résultats et leur fiabilité dépendra notamment du taux de retour qui induira une fiabilité des données obtenues (ou non). Vázquez-Tarrío et al. Fixent une limite de 75 % de taux de retour pour retenir la donnée.

Comme énoncé en amont (voir Partie 2), « *la technique de traçage par transpondeur passif présente l'inconvénient de la taille du transpondeur qui se doit d'être adapté à la taille des sédiments traçables* ». En ce sens, des méthodes plus anciennes telle que le traçage de particules identifiées à la peinture, peuvent être utilisées, soit de manière additionnelle à d'autres méthodes, soit de manière unique dans le cas où l'on voudrait effectuer une comparaison des deux méthodes de traçage sédimentaire en Loire moyenne. Elle peut constituer un complément de méthodes plus modernes non applicables aux classes granulométriques les plus fines (cas du traçage des particules de la sub-surface d'une armure sédimentaire).

Dans un objectif de comparaisons inter-suivis, un travail de compilation de données permettrait d'approfondir la mise en relation entre les études de traçage. Cela devra alors s'inscrire dans une dynamique d'uniformisation de la présentation des résultats, lorsque cela se révèle possible.

Conclusion

La présente étude renforce la compréhension de **l'influence des processus hydro-sédimentaires sur la survie des semis** de ligneux pionniers à fine échelle spatio-temporelle et sur la capacité des semis à résister aux contraintes associées à ces processus. De plus, la stabilité des barres forcées, et leur potentiel d'accueil et de survie des ligneux pionniers, peut permettre **d'élaborer des plans de gestion** s'inscrivant sur une longue durée. Plus largement, les enseignements de cette étude peuvent participer à l'amélioration de la planification spatiale et temporelle des travaux de gestion de la végétation ligneuse sur les grands cours d'eau au regard des objectifs visés.

La meilleure compréhension des phénomènes d'armurage (Bastien Sacré) (A Bensahri, 1998) (Synthèses des connaissances et proposition d'une méthode d'évaluation de l'impact des ouvrages transversaux sur la continuité sédimentaire des cours d'eau, 2013), par l'analyse de la dynamique de ces dernières, permet d'appréhender la notion d'énergie mobilisable par le cours d'eau du point de vue sédimentaire mais aussi morphologique. CLAUDE (2012) et RODRIGUES (2004) ont montré que la déstabilisation de ces structures a une importance dans l'édification et la **migration de formes de lits** telles que les dunes. La déstabilisation est suivie d'une forte érosion et, dans le cas de la présence de ces structures au niveau de l'entrée de chenaux secondaires (en Loire), elles peuvent permettre l'abaissement de certains seuils permettant l'alimentation en matériaux grossiers du chenal secondaire. Avec la diminution des débits, l'énergie du système devient insuffisante pour assurer la migration des dunes présentes sur le seuil. Par la suite, le tri sélectif se poursuivra par la mise en place de nouvelles surfaces armurées (CLAUDE, 2012). Ces processus peuvent aller jusqu'à provoquer la déconnexion d'un chenal secondaire.

Ce type de dynamiques et de relations de cause (déstabilisation d'une armure sédimentaire) à effet (déconnexion partielle ou totale d'un chenal secondaire) pourraient être anticipé en amont par une connaissance profonde de ce type de structures. Le projet entrepris ici a donc de nombreuses applications possibles dans la résolution de problématiques associées aux dynamiques sédimentaires en Loire moyenne puis, *in fine*, dans d'autres systèmes qui présentent des similitudes.

Comme dit précédemment, la mission finale portée par ce projet est l'évolution de la connaissance en dynamique fluviale dans **le but de prévoir de façon plus précise les projets de** restauration des lits de cours d'eau effectués (en Loire moyenne) par des instances telles que la DREAL.

L'objectif de ce travail est **d'améliorer les connaissances dans le domaine de la biogéomorphologie fluviale appliquée aux espèces ligneuses pionnières** mais également de transmettre ces connaissances aux gestionnaires comme outils d'aide à la décision pour une **meilleure gestion des environnements fluviaux**, plus particulièrement du lit de la Loire.

L'application de ce protocole sur le site de Mareau-aux-Prés peut permettre dans un premier temps d'effectuer une campagne de comparaison, par le biais d'une étude, avec les valeurs obtenues dans des systèmes (sites ou cours d'eau) présentant plus ou moins de similitudes avec le nôtre.

En vue d'une extension à d'autres sites de la Loire moyenne, il peut être intéressant de mettre en place ce type de protocole de traçage, adapté à la granulométrie du site en question, et d'effectuer une comparaison des comportements associés aux armures sédimentaires des différents sites. Ainsi, la connaissance de ces structures serait enrichie pour, *in fine*, obtenir une anticipation précise et pertinente des déplacements des sédiments composant les surfaces armurées et donc des pulsations de transport solide induites par les cours d'eau.

Bibliographie

- 7324, C. U. (s.d.). Récupéré sur <http://citeres.univ-tours.fr/>
- A Bensahri, C. C. (1998). Transport des sédiments marins.
- BACCHI, V. (2011, Juin 23). Etude expérimentale de la dynamique sédimentaire d'un système à forte pente soumis à des conditions hydrauliques faibles. doi:tel-00625381
- Bastien Sacré, J. T. (s.d.). Système RFID de détection automatique de poisson. Récupéré sur https://www6.inrae.fr/cahier_des_techniques/content/download/4843/49051/version/1/file/CTh2016_Sacre.pdf
- BORTOLOTTI, M. (2019). Traçage d'armure sédimentaire : concentration sur la technique RFID par transpondeur passif. *Etat de l'art*.
- CLAUDE, N. (2012, Juin 25). Processus et flux hydro-sédimentaires en rivière sablograveleuse. *influence de la largeur de section et des bifurcations en Loire moyenne (France)*.
- Coraline Lise Wintenberger, S. R. (2017). Survie des semis de ligneux pionniers dans les lits fluviaux : approche in et ex situ des facteurs de contrôle abiotiques et biologiques des espèces *Populus nigra* et *Salix alba*. vol. 23, 233-252. Biogéomorphologie. doi:<https://doi.org/10.4000/geomorphologie.11789>
- Hervé PIÉGAY, F. A.-J. (2016). SUIVI PAR RFID DE LA MOBILITÉ DES GALETS : RETOUR SUR 10 ANS D'EXPÉRIENCE EN GRANDES RIVIÈRES. Récupéré sur <https://popups.uliege.be/0770-7576/index.php?id=4476&file=1>
- Kevin Graff, V. V.-F. (2018). Traçage sédimentaire d'une lave torrentielle dans le bassin de la Peyronnelle (Queyras, Alpes françaises du Sud). *Tracing sedimentary mobilization from debris flows in the Peyronnelle watershed (Queyras, Southern French Alps)*, 24, 43-57. doi:<https://doi.org/10.4000/geomorphologie.11967>
- MOLS Julien, H. G. (s.d.). Etude de l'épaisseur de la couche active de charriage de cours d'eau à charge graveleuse à l'aide de chaînes d'érosion. Laboratoire

d'Hydrographie et de Géomorphologie fluviale – Département de Géographie – Université de Liège. Récupéré sur https://orbi.uliege.be/bitstream/2268/172797/1/Poster_Namur_cha%C3%A9nes.pdf

Projet pluridisciplinaire BioMareau - INRA. (2020). Récupéré sur INRAE 2020: <https://www6.val-de-loire.inrae.fr/biomareau/>

Stéphane Rodrigues, J.-G. B.-J. (2004, Décembre 20). Impact des crues sur les bilans sédimentaires de chenaux secondaires de la Loire moyenne (France). doi:<https://doi.org/10.1016/j.crte.2004.12.005>

Synthèses des connaissances et proposition d'une méthode d'évaluation de l'impact des ouvrages transversaux sur la continuité sédimentaire des cours d'eau. (2013, Juin 7). DEAL Centre. Récupéré sur http://www.donnees.centre.developpement-durable.gouv.fr/etudes/TS_OuvragesT_V2_20130607.pdf

VERVYNCK, L. (2019). Valorisation de résultats de traçage sédimentaire RFID et développement des techniques de prospection.

WINTENBERGER, C. (2015, Juin 2). Dynamique fluviale et végétation pionnière à Salicaceae en rivière sablo-graveleuse. *Etudes in et ex situ de la survie des semis durant les premiers stades de la succession biogéomorphologique en Loire Moyenne*. Tours.

Table des annexes

ANNEXE 1 : DOCUMENTATION TECHNIQUE TAG HDX 12 MM	
(SOURCE : HTTP://WWW.TI.COM/LIT/GPN/TRPGR30TGC)	32

Annexe 1 : Documentation technique
Tag HDX 12 mm (source :
<http://www.ti.com/lit/gpn/trpgr30tgc>)

PARAMETER	TRPGR30TGC
Functionality	Read only
Memory (bits)	80(64-bit UID + 16-bit CRC)
Memory (pages)	1
Resonance frequency	134.6 kHz
Modulation	FSK (frequency shift keying) 134.2 kHz/124.2 kHz
Transmission principle	HDX (half duplex)
Power source	Powered from the reader signal (battery-less)
Typical reading range	≤ 60 cm
Typical reading time	70 ms
Case material	Glass
Protection glass	Hermetically sealed
EMC	Programmed code is not affected by natural electromagnetic interference or x-rays
Signal penetration	Transpondeur can be read through almost all non metallic material
Mechanical shock	IEC 60068-2-32 free-fall drop test, 20 times from 1.5 m height
Dimensions	Ø 2.12 ± 0.05 mm x 12.0 ± 0.5 mm
Weight	0.10 g