

## **Projet de Fin d'Etudes (PFE) 2020-2021**

### **Traçage sédimentaire des surfaces armurées en Loire Moyenne**



[val-de-loire.inrae.fr](http://val-de-loire.inrae.fr)

Directeur de recherche :  
M. Stéphane RODRIGUES

**BORTOLOTTI Martin**

# **Traçage sédimentaire des surfaces armurées en Loire Moyenne :**

## **Etude de la dynamique des armures sédimentaires sur la barre forcée de Mareau-aux-Prés selon la méthode de traçage RFID passive**

**Directeur de recherche :  
M. Stéphane RODRIGUES**

**Auteur :  
BORTOLOTTI Martin**

**2020-2021**

# AVERTISSEMENT

---

Cette recherche a fait appel à des lectures, enquêtes et interviews. Tout emprunt à des contenus d'interviews, des écrits autres que strictement personnel, toute reproduction et citation, font systématiquement l'objet d'un référencement.

Les auteurs de cette recherche ont signé une attestation sur l'honneur de non plagiat.

# Formation par la recherche, Projet de Fin d'Etudes en génie de l'aménagement et de l'environnement

---

La formation au génie de l'aménagement et de l'environnement, assurée par le département aménagement et environnement de l'Ecole Polytechnique de l'Université de Tours, associe dans le champ de l'urbanisme, de l'aménagement des espaces fortement à faiblement anthropisés, l'acquisition de connaissances fondamentales, l'acquisition de techniques et de savoir-faire, la formation à la pratique professionnelle et la formation par la recherche. Cette dernière ne vise pas à former les seuls futurs élèves désireux de prolonger leur formation par les études doctorales, mais tout en ouvrant à cette voie, elle vise tout d'abord à favoriser la capacité des futurs ingénieurs à :

- Accroître leurs compétences en matière de pratique professionnelle par la mobilisation de connaissances et de techniques, dont les fondements et contenus ont été explorés le plus finement possible afin d'en assurer une bonne maîtrise intellectuelle et pratique,
- Accroître la capacité des ingénieurs en génie de l'aménagement et de l'environnement à innover tant en matière de méthodes que d'outils, mobilisables pour affronter et résoudre les problèmes complexes posés par l'organisation et la gestion des espaces.

La formation par la recherche inclut un exercice individuel de recherche, le projet de fin d'études (P.F.E.), situé en dernière année de formation des élèves ingénieurs. Cet exercice correspond à un stage d'une durée minimum de trois mois, en laboratoire de recherche, principalement au sein de l'équipe Dynamiques et Actions Territoriales et Environnementales de l'UMR 7324 CITERES à laquelle appartiennent les enseignants-chercheurs du département aménagement.

Le travail de recherche, dont l'objectif de base est d'acquérir une compétence méthodologique en matière de recherche, doit répondre à l'un des deux grands objectifs :

- Développer toute ou partie d'une méthode ou d'un outil nouveau permettant le traitement innovant d'un problème d'aménagement
- Approfondir les connaissances de base pour mieux affronter une question complexe en matière d'aménagement.

**Afin de valoriser ce travail de recherche nous avons décidé de mettre en ligne sur la base du Système Universitaire de Documentation (SUDOC), les mémoires à partir de la mention bien.**

# REMERCIEMENTS

---

Je souhaite remercier l'ensemble du corps enseignant de Polytech Tours pour son accompagnement au cours de ce projet de recherche. Je remercie également l'ensemble des personnes qui ont contribué au succès de ce Projet de Fin d'Etude et à sa rédaction.

Tout d'abord, je tiens à remercier Stéphane RODRIGUES pour la confiance qu'il m'a apporté tout au long de ce projet et qui m'a permis de structurer les idées développées dans ce document à la suite de nos nombreux échanges. Je le remercie également pour les connaissances qu'il m'a inculquées lors des trois dernières années de ma formation et pour avoir grandement participé à l'éveil de mon intérêt pour l'hydromorphologie.

Je souhaite remercier Louis VERVYNCK et Théo BULTEAU, pour avoir répondu à mes questions et pour m'avoir donné les suggestions nécessaires au respect de la logique des stratégies proposées dans ce travail. De par leur expérience respective dans les domaines du transport solide et du traçage sédimentaire, ils m'ont transmis énormément de choses, tant techniquement que dans mon rapport au domaine de la recherche.

Enfin, je souhaite remercier mon camarade Angel NEUENSCHWANDER, pour m'avoir assisté dans la relecture de ce rapport.

# TABLE DES MATIERES

---

## Table des matières

I.	Préambule .....	8
II.	Introduction.....	8
III.	Approche et Matériel .....	9
1.	Site d'étude .....	9
1.	Localisation et dimensionnement.....	9
2.	Caractéristiques et disposition des matériaux .....	10
2.	Méthode de traçage RFID et approche retenue .....	11
IV.	Résultats.....	13
1.	Contexte et objectifs .....	13
2.	Protocole d'étude.....	14
3.	Manipulations préalables à l'implantation des traceurs .....	16
4.	Stratégies d'implantation et d'injection .....	18
1.	Implantation des transpondeurs et injection des sédiments équipés : stratégie principale.....	18
2.	Implantation des transpondeurs et injection des sédiments équipés : stratégie secondaire .....	20
V.	Prospection et résultats attendus .....	21
1.	Généralités et points techniques .....	21
2.	Stratégie de prospection des opération de suivis.....	22
1.	Cas de la détection locale via un système de résultat binaire : présence / absence 23	
2.	Cas de la recherche en aval de la barre sédimentaire .....	24
3.	Distances de déplacement théoriques et couplage aux données flux liquide .....	25
VI.	Discussion .....	27
VII.	Conclusion .....	30
VIII.	Annexes .....	31
IX.	Bibliographie .....	37

# TABLES DES FIGURES ET DES TABLEAUX

Figure 1 : Configuration morphologique du site d'étude. L'unité morphologique étudiée est encadrée en rouge et les traits continus rouges matérialisent le lit endigué (Wintenberger, 2015).....	9
Figure 2 : Situation surfacique des coupes transversales qui ont fait l'objet d'analyses granulométrique et bathymétrique sur la barre sédimentaire de Mareau-aux-Prés (Wintenberger, 2015).....	10
Figure 3 : Moyennes des point d'échantillonnage considérant les D50 et les D90 de chaque point. ....	11
Figure 4 : Cartographie de la position des points de prélèvement granulométrique. CS1. Le transect le plus en amont (CS1) présente trois points de prélèvement (C1, C2, C3) et une distance de 50 m entre C1 et C3. CS2. Le transect suivant (CS2) présente les points de prélèvement (C4, C5, C6, C7, C8) avec une distance d'environ 60 m entre C4 et C8. CS3'. Transect créé pour l'opération de traçage, dédié à l'implantation de particules marquées. Distance d'environ 75m entre les deux limites (traits bleus) indiquant l'espace dans lequel l'implantation de sédiments équipés sera possible. CS3. Le transect suivant (CS3) présente les points de prélèvement (C9, C10, C11, C12, C13, C14, C15) avec une distance d'environ 120 m entre C9 et C15.....	13
Figure 5 : Tableau de résultat pour évaluer la limite de détection d'une particule enfouie. Ce tableau suggère d'obtenir une réponse sous forme de présence/absence du signal pour une particule de 32.5 mm .....	15
Figure 6 : Axes d'un sédiment et outil de Wolman (streaming-canal-u.fms) .....	16
Figure 7 : Bilan financier matériel et humain de l'opération d'injection des sédiments équipés de PIT tags. ....	19
Figure 8 : Coût total de l'opération réalisée par deux ingénieurs d'étude.....	19
Figure 9 : Formules de Bathurst et al. (1987) (E1) et Schoklitsch (1962) adapté par le papier suivant (Arnaud, et al., 2020).....	25
Figure 10 XX : Puissance fluviale en excès ( $\omega - \omega_c$ ), adimensionnelle (*) ou non (Arnaud, et al., 2020).....	26
Figure 11 XXX : Exemple de formule proposée pour estimer les distances de déplacement théoriques (Kloesch et al., 2008; Vázquez-Tarrío et al., 2018; Vázquez-Tarrío and Batalla, 2019) .....	26
Figure 12 : Carte précisant la localisation de la Station de jaugeage d'Orléans (pointeur rouge) par rapport au site d'étude (complexe d'île de Mareau-aux-Prés) .....	26

## **I. Préambule**

Le présent projet fait suite à une analyse de l'état de la recherche et du corpus bibliographique se rapportant à un phénomène sédimentaire particulier, les armures sédimentaires et à une méthode de traçage sédimentaire, le traçage par RFID passive.

Ce projet de recherche est centré sur l'étude du fonctionnement sédimentaire et écologique de l'hydro-système Loire qui a été largement étudié dans le cadre des travaux d'entretien du lit du fleuve réalisés par les services de l'État pour la protection des populations contre le risque inondation.

## **II. Introduction**

La Loire est un fleuve qui a fait l'objet de nombreuses interventions humaines qui ont conduit au ralentissement de sa vitalité dans sa partie active (lit mineur). En cause, l'ensemble des opérations de dragage, de chenalage (navigation) et d'extraction de matériaux voués à la construction. L'accrétion graveleuse en Loire moyenne a été favorisée par les campagnes d'endiguement qui ont eu lieu sur l'ensemble du bassin versant (Castanet, et al., 2003) ce qui a causé une augmentation de la vitesse d'onde de crue.

Chaque épisode de crue représente un événement de mobilisation des sédiments qui se traduit par de fortes phases d'érosion et de dépôt. Ces séries d'événements hydrologiques conduisent à la formation de schémas de mise en place des sédiments particuliers. Dans la phase de diminution de la force d'écoulement, à la surface des îles et des barres sédimentaires édifiées, a lieu la chasse des matériaux fins qui sont encore en mesure d'être transportés pour laisser place à une surface armurée qui renferme un stock de sédiments hétérogène (sub-surface).

Le traçage sédimentaire est un moyen technique qui s'est généralisé dans l'étude de la dynamique sédimentaire des cours d'eau dans les années 1960 (Ramette, et al., 1962), (Leopold, et al., 1966), et qui a connu deux grandes périodes d'évolution dans ses moyens de mise en œuvre et dans ses applications : les années 1980 et les années 2000. Cette évolution résulte du fait de l'augmentation du nombre d'études de géomorphologie utilisant cette méthode.

L'objet de la présente étude est la caractérisation de la taille et de la dynamique des sédiments composant les armures sédimentaires. Le moyen à l'étude est la technique de traçage par RFID passive, soit l'injection de PIT tags (Transpondeurs Passifs Intégrés) dans les sédiments.

L'utilisation de PIT tags dans un cours d'eau à charge sablo-graveleuse comme la Loire, permettra d'obtenir des moyens de mise en œuvre de la méthode de traçage sédimentaire « RFID passive » sur ce type d'hydro-système afin d'étudier la structure et la dynamique des armures sédimentaires. La mise en œuvre d'un protocole de traçage sédimentaire par RFID passive répondra à plusieurs objectifs :

- Etude de la dynamique morphologique de la barre forcée de Mareau-aux-Prés.
- Estimation des débits de mise en mouvement d'une armure sédimentaire et du comportement des sédiments de la sub-surface.
- Détermination des phases de mouvements des sédiments transportés par un événement hydrologique.

Il s'agit d'étudier dans quelles mesures il est possible de prévoir le mouvement des armures sédimentaires d'un point de vue temporel (fréquence des crues mobilisatrices) et spatial.



### III. Approche et Matériel

#### 1. Site d'étude

##### 1. Localisation et dimensionnement

En termes de localisation, il est possible de situer le site d'étude selon trois échelles. D'une part, la barre sédimentaire forcée (non-migrante) de Mareau-aux-Prés évolue en Loire Moyenne (340 km entre le Bec d'Allier et le Bec de Vienne) dans la Réserve Naturelle de Saint-Mesmin, à 649 km en aval de la source du cours d'eau. Ensuite, la Loire, dans ce contexte géographique, est caractérisée par des formes de lit (dunes) conduisant à l'édification d'îles. Localisé en aval d'Orléans (45), environ à 500 m 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 (INRAE, 2020). Enfin, la barre sédimentaire faisant l'objet de cette étude, évoluant dans le ce complexe d'îles, représente un point dur dans ce dernier.



Figure 1 : Configuration morphologique du site d'étude. L'unité morphologique étudiée est encerclée en rouge et les traits continus rouges matérialisent le lit endigué (Wintenberger, 2015)

Dans ce tronçon de rivière, ce complexe évolue au centre d'un chenal qui se caractérise par une bande active qui fluctue entre 300 et 450 m, et une pente moyenne de 0.22‰, à l'image des caractéristiques attribuées au lit de la Loire dans sa partie moyenne (0.4‰).

La Loire présente une période de forts débits qui a lieu entre l'hiver et le printemps. Une station de jaugeage est située en amont du site d'étude sur la commune d'Orléans (45 234). Elle mesure les débits ainsi que la hauteur d'eau de la Loire. La station relève un débit moyen de 344 m<sup>3</sup>/s et un débit de crue sur deux ans de 1700 m<sup>3</sup>/s. Lors des hauts débits, période de crue, le débit provenant du chenal principal est réparti entre les différents chenaux créés par les îles et la barre sédimentaire. La dynamique générale de la barre sédimentaire se compose d'une forte érosion pendant la phase ascendante de la crue. De plus, la phase de dépôt qui est nécessaire pour l'approvisionnement en sédiment est remarquée après le débit le plus fort de la crue pour des crues de faibles débits. Dans le cas de crues de plus grande ampleur, les sédiments sont mobilisés depuis le canal principal, avant le débit de pointe. Sont à noter, les deux processus suivants qui précisent la dynamique des sédiments sur la barre sédimentaire : la force de trainée (dragage) et l'érosion des sédiments.

Dans sa localisation, la barre sédimentaire étudiée se situe dans un tronçon de la Loire qui présente une morphologie fluviale sous forme d'anabranches, avec une zone d'expansion/contraction qui fait varier la largeur du chenal entre 270 et 430 mètres. Au droit du site, le lit de la rivière est donc élargi.

En termes de dimensions, la barre sédimentaire présente une superficie de 26 700 m<sup>2</sup> et une longueur de 260 m. La barre étudiée a une forme plane triangulaire et son altitude moyenne est de 83,8 m au-dessus du niveau de la mer. Les sédiments sont principalement constitués d'un mélange

de particules siliceuses allant des galets aux sables fins, même si certains galets de silex résultant de l'altération du substrat rocheux calcaire sont présents.

Sur cette barre non-migratrice, lors des crues, deux zones sont à distinguer, la zone centrale qui est fixe car soumise seulement à des faibles phénomènes d'érosion et de dépôt et les zones au bord de la barre qui sont eux, très mobiles (Wintenberger, 2015). Au sein de cette zone centrale citée précédemment, précisons que la moitié amont constitue un site préférentiel pour le développement d'armures sédimentaires.

## 2. Caractéristiques et disposition des matériaux

Des études de granulométries ont été réalisées sur la barre sédimentaire de Mareau-aux-Prés répartis sur 6 des 12 coupes transversales qui ont été définis pour la bathymétrie.

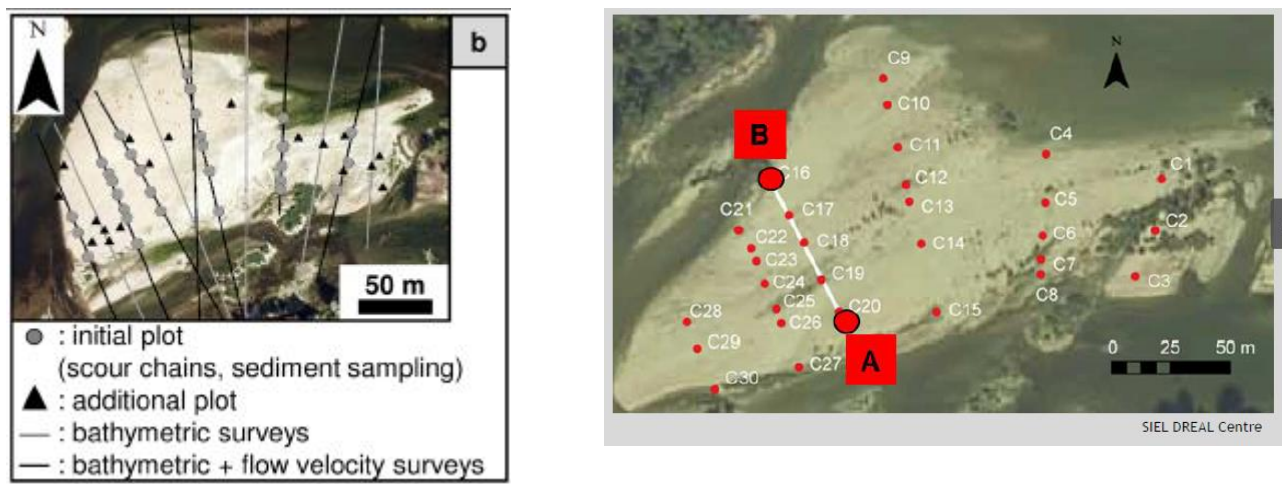


Figure 2 : Situation surfacique des coupes transversales qui ont fait l'objet d'analyses granulométrique et bathymétrique sur la barre sédimentaire de Mareau-aux-Prés (Wintenberger, 2015)

Les sédiments ont été échantillonnés en surface pour la plupart des échantillons, et un prélèvement en profondeur a été effectué lorsqu'il a été remarqué la présence de surfaces armurées (ces points de prélèvement présentent donc un échantillon de surface et un échantillon de sous-couche). Le D50 (granulométrie médiane), le D90 (90% de l'échantillon est plus fin que cette taille) et les autres paramètres granulométriques ont été obtenus en utilisant la feuille de calcul Gradistat 4.0 (Blott, et al., 2001) à la suite d'une analyse par tamisage (Wintenberger, 2015).

Les caractéristiques granulométriques de la barre sédimentaire qui fait l'objet de cette étude ont été analysées. **Trois tailles de grain différentes** sont à distinguer sur l'ensemble de la barre : les sédiments fins ( $D50 < 2.10^{-3} m$ ) apportés par le chenal principal lors des crues, les sédiments moyens ( $2.10^{-3} < D50 < 6.10^{-3} m$ ) et les sédiments grossiers ( $D50 > 6.10^{-3} m$ ) qui correspondent aux surfaces armurées.

Comme dit précédemment, deux zones distinctes sont à noter au niveau de la dynamique de mobilisation des sédiments. La partie amont et centrale de la barre sédimentaire est caractérisée par des zones fixes avec peu de remodelages des couches sédimentaires de la barre. La partie aval de la barre sédimentaire constitue une zone de mouvement intense des sédiments qui sont constamment érodés (Wintenberger, 2015). Les échantillons qui présentent une majorité de gravier ( $D50 > 2.10^{-3} m$ ) par rapport aux sables sont ceux situés sur la partie amont de la barre sédimentaire. La différence des proportions moyennes de graviers entre les points C1 à C8 (amont) et les points C16 à C27 est de 12% (Blott, et al., 2001) (Figure 3). Le positionnement des matériaux disponibles sur le site d'étude a été précisé par une analyse rapide synthétisée sur la figure ci-après.

Section transversale	mm
CS1 : moyenne D50 C1 à C3	17.6
CS1 : moyenne D90 C1 à C3	38.8
CS2 : moyenne D50 C4 à C8	11.3
CS2 : moyenne D90 C4 à C8	30.7
CS3 : moyenne D50 C9 à C15	11.9
CS3 : moyenne D90 C9 à C15	38.7
CS4 : moyenne D50 C16 à C20	2.8
CS4 : moyenne D90 C16 à C20	21.0
CS5 : moyenne D50 C21 à C27	1.8
CS5 : moyenne D90 C21 à C27	11.4
CS6 : moyenne D50 C28 à C30	1.3
CS6 : moyenne D90 C28 à C30	12.2

Figure 3 : Moyennes des point d'échantillonnage considérant les D50 et les D90 de chaque point.

La zone d'intérêt principale concernant les armures sédimentaires se traduit donc, d'après la disposition surfacique des matériaux sur les transects d'études les plus en amont (Figure 2).

Concernant la disposition verticale des matériaux, la barre sédimentaire de Mareau-aux-Prés présente une gamme de tailles de sédiments plutôt homogène sur la partie aval. La moitié amont de la barre présente un gradient vertical de taille. La prise en compte de cette variable pour la mise en œuvre d'un protocole de traçage efficace est capitale mais doit tout de même concorder avec les limites de la technique de traçage employée (I.2, I.3, I.4 Protocole).

Dans l'étude des armures sédimentaires, le choix qui est fait, pour préciser leur dynamique par leur capacité à se mettre en mouvement par rapport à un événement hydrologique donné, est celui de l'étude par le gradient vertical qui est associé à la structure de l'armure sédimentaire. Au second plan, l'étude surfacique est tout de même possible par le repérage des surfaces qui sont encore en place sur la barre (soit les traceurs toujours présents).

## 2. Méthode de traçage RFID et approche retenue

La capacité d'un sédiment à accueillir un PIT tag se rapporte à sa taille. Les technologies RFID voient leur performance augmenter avec le type d'ondes émises (basse ou ultra-haute fréquence) et par conséquent avec les types de transpondeurs utilisés (passifs ou actifs).

Les transpondeurs passifs ont l'avantage de présenter différentes tailles selon les matériaux à tracer (**longueurs de 12,21 ou 32 mm pour un diamètre de 2 mm**), tandis que les transpondeurs actifs nécessitent une taille de particule supérieure à 32 mm (ce qui ne convient pas aux matériaux disponibles). Ainsi, sont associées à ces tailles de traceur, des classes de tailles de sédiments qui sont susceptibles de pouvoir recevoir le traceur. Les traceurs à disposition pour cette étude sont d'une longueur de 23 mm, par conséquent la taille minimale des particules équipées est de 24 mm jusqu'à 32 mm.

Additionnellement aux contraintes de tailles évoquées précédemment, la méthode RFID passive présente des avantages non négligeables en matière de coût, sous réserve d'une stratégie d'implantation cohérente avec les objectifs d'une telle opération (II).

Le principe du traçage RFID est d'équiper des galets naturels ou artificiels par **perçage**, entaille à la surface ou insertion du traceur à l'intérieur du galet. Les particules ainsi équipées, sont **mesurées** et **pesées**, puis **installées** et **géolocalisées** dans un cours d'eau. Ainsi, deux méthodes d'implantation de PIT tags sont possibles. La première consiste à « coller » les tags sur une des parois du sédiment. Cette méthode convient lorsque le sédiment est assez grossier pour que ça n'influence pas sa mobilité dans son rapport aux autres matériaux, c'est-à-dire lorsque le sédiment est assez gros pour que la taille du traceur soit négligeable. La méthode utilisée est l'implantation du traceur

dans la structure de la particule par perçage et le comblement de l'incision faite par des matériaux adaptés.

La technique RFID passive pour la caractérisation de la charge sédimentaire grossière (certains éléments associés au D90 de la sous-couche d'armure sédimentaire et au D50 des surfaces armurées dans notre cas) en rivière repose sur la mise en place d'une ou plusieurs antennes dont la portée est plus ou moins importante : pour les transpondeurs passifs, c'est le champ magnétique généré par l'antenne qui active le transpondeur implanté dans la particule. Les champs magnétiques émis par les antennes en méthode passive sont généralement d'une portée de 95 cm en vertical, soit en détection libre (ne comprenant pas le franchissement de zones aqueuses ou solides) (Fantino, et al., 2018).

Le type d'antenne reste à être étudié. En effet, dans notre situation hydromorphologique, d'après les retours d'expérience énoncées dans la littérature (Fantino, et al., 2018) (Chapuis, et al., 2014), le type d'antenne devant être utilisé sera déterminé par l'appréciation de la compatibilité entre le choix de la méthode « RFID passive » et le secteur géographique dans lequel les sédiments transportés au cours des épisodes de crue pourront se déposer.

Il est opportun de procéder selon des techniques diverses de collecte de donnée 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 que le site d'étude a fait l'objet de nombreuses mesures antérieures (Wintenberger, 2015). Le traçage sédimentaire par transpondeur passif constitue dès lors une source d'information majeure, qu'il faut néanmoins mettre en relations avec plusieurs autres résultats déjà existants.

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) avec une précision centimétrique. Elles ont été placées le long des coupes transversales. Ces outils sont capitaux dans la mise en relation des événements hydrologiques passés et de la caractérisation des flux sédimentaires. Les chaînes d'érosion permettent de témoigner de l'impact des crues rencontrées d'un point de vu 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).

La recherche des chaînes d'érosion est une mission qui s'établit à l'aide d'un détecteur de métaux et qui servira au croisement des données obtenues par traçage sédimentaire. Ainsi, la pratique de cette méthode nécessite l'utilisation du matériel de détection par un opérateur. Ce dispositif de chaîne d'érosion étant déjà en place, il ne nécessite pas d'être comptabilisé dans une tranche financière allouée au protocole présenté ci-après or les données qu'elles permettent de récolter seront utiles en confirmation de certains résultats obtenus par le traçage RFID passive (IV).

Les informations qui ont été apportées par les chaînes d'érosion sont les suivantes : l'idée d'une quantification de la dynamique sédimentaire par les forces tractrices critiques de chaque sédiment (estimées à partir des D50 et D90 grâce à l'application du critère adimensionnel de Shields) atteint une limite dans les zones végétalisées (due au piégeage des sédiments par les végétaux (Wintenberger, 2015), ce qui modifie localement les forces nécessaire pour la mise en mouvement des sédiments (lié au double rôle de piège et de stabilisateur de la végétation (Wintenberger, 2015) (McKenney, et al., 1995).

## IV. Résultats

### 1. Contexte et objectifs

Au vu des phénomènes hydrologiques et de transport sédimentaire que présente la Loire dans le tronçon étudié (III.1), il semble que l'implantation des PIT tags au moment de l'injection doit être conforme à une stratégie bien définie. En effet, la disposition des particules marquées conditionnera les résultats de cette étude en termes de recherche des traceurs au moment de leur récupération.

Six transects ont été établis lors des études antérieures de granulométrie, au droit desquelles des chaînes d'érosion ont été mises en place sur l'ensemble de la barre de Mareau-aux-Près. Les trois transversales de la moitié amont de la barre sédimentaire sont espacées d'environ 50m chacune. C'est sur cette partie amont que la présence d'armure sédimentaire est la plus certaine (III.2) (Figure 5). Une 4<sup>ème</sup> section transversale a été ajoutée entre CS2 et CS3 (Figure 4) afin d'optimiser les résultats de cette étude par l'augmentation du nombre de particules tracées implantées. L'ajout de profils transversaux qui seront suivis méthodiquement lors des campagnes d'implantation des particules marquées est possible mais repose sur l'hypothèse que la granulométrie conférée aux sédiments le long de cette transversale soit sensiblement la même que celles présentées par les autres transversales. De plus, cet ajout est proposé dans le but d'affiner les données obtenues, même s'il représente un surplus en termes de manipulation et de temps passé. Il ne présente pas de modification en termes de matériel utilisé car il est le même que pour les autres transversales (DGPS...).

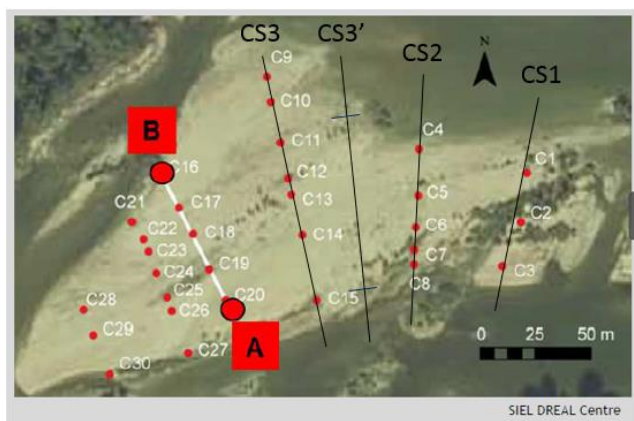


Figure 4 : Cartographie de la position des points de prélèvement granulométrique. CS1. Le transect le plus en amont (CS1) présente trois points de prélèvement (C1, C2, C3) et une distance de 50 m entre C1 et C3. CS2. Le transect suivant (CS2) présente les points de prélèvement (C4, C5, C6, C7, C8) avec une distance d'environ 60 m entre C4 et C8. CS3'. Transect créé pour l'opération de traçage, dédié à l'implantation de particules marquées. Distance d'environ 75m entre les deux limites (traits bleus) indiquant l'espace dans lequel l'implantation de sédiments équipés sera possible. CS3. Le transect suivant (CS3) présente les points de prélèvement (C9, C10, C11, C12, C13, C14, C15) avec une distance d'environ 120 m entre C9 et C15.

Rappelons les dimensions de la barre sédimentaire étudiée, ayant fait l'objet de vérification par l'outil de mesure de Géoportail, qui se caractérise par une longueur de 260 m et une superficie de 26 700 m<sup>2</sup> (III.1).

Les transversales sont au nombre de 4, dont 3 suivent les transversales préétablies dans les études granulométriques antérieures, et elles couvrent la moitié amont de la barre sédimentaire sur une longueur de 140 m.

Dans cette partie seront présentées les réflexions méthodologiques du point de vue de la stratégie d'implantation et de la succession des étapes à réaliser afin d'être fidèle aux objectifs alloués au traçage de la barre sédimentaire de Mareau-aux-Près et plus particulièrement des armures sédimentaires de ce site d'étude. Ces étapes devront permettre d'évaluer le budget nécessaire pour

réaliser ces manipulations, le nombre et la taille des traceurs mis en place, le temps investi pour la mise en place du protocole et la recherche des particules tracées, ainsi que l'objectif de chaque manipulation.

## 2. Protocole d'étude

Les prérequis pour établir une stratégie d'implantation de particules marquées par RFID passive est de prendre en compte les limites que présente cette méthode, notamment au sujet des collisions de signaux (détection d'une particule individuelle impossible car seulement un signal détecté pour deux transpondeur) qui peuvent avoir lieu dans le cas où les transpondeurs seraient proches d'environ 1 m ou moins. Ce phénomène implique donc un écartement nécessaire entre deux particules équipées.

L'objectif étant d'obtenir des résultats sur une structure qui présente un gradient vertical de taille des particules (armures sédimentaires : matériaux grossier en surface et matériaux plus fin en sous-couche), on entrevoit l'intérêt d'une imbrication des particules marquées selon un axe vertical afin d'étudier le mouvement des différentes couches en réaction à un événement hydrologique donné. Néanmoins, deux versants de la méthodologie d'implantation des particules dans la barre sédimentaire sont à prendre en compte :

- Verticalité : la mise en place en colonne avec des particules marquées qui seraient superposées verticalement à des paliers d'altitude différents (facilité de mise en place mais éventuels problèmes de collision de signaux)
- Horizontalité : mise en place des particules selon les transects transversaux, avec un enfouissement du même ordre pour toutes les particules (permet d'évaluer la largeur mobile de la barre)

Dans un premier temps, si l'objectif est de placer plusieurs particules en colonne (avec les mêmes coordonnées x,y), il est nécessaire de tenir compte de la **distance de détection** allouée à l'antenne vis-à-vis du traceur mais aussi, du fait des phénomènes de **collision du signal**, de l'impossibilité de dissocier individuellement les particules imbriquées dans une même colonne si lors de la détection ces particules sont toujours superposées, autrement dit dans le cas où elle ne seraient pas mises en mouvement. La distance de détection du PIT tag par l'antenne en profondeur semble être estimée par l'ensemble du corpus bibliographique (Lamarre, et al., 2005) à environ 0.60 m (Annexe 3). Cette variable dépend des caractéristiques physiques et chimiques des sédiments, du type de traceur utilisé ainsi que du type d'antenne de détection. L'ensemble des études ayant réalisé ce type de suivis par RFID passive sont issues de systèmes fluviaux à lit graveleux. Cela indique qu'il est opportun de réaliser des détections tests, afin d'affiner nos connaissances en matière de détection pour un substrat sablo-graveleux, comme le présente la Loire dans sa partie moyenne. Cette valeur de détection n'est pour l'instant pas finement renseignée dans la bibliographie pour ce type de substrat.

Afin de réaliser cette opération de manière peu couteuse et précise, il est proposé d'implanter 4 PIT tags dans 4 sédiments et de les installer dans le substrat à des profondeurs différentes, puis de faire un test de détection avec une antenne qui servira à la détection lors des campagnes de prospection et lors de la suite du protocole de traçage. Analyser cela, permet de tester la profondeur d'enfouissement pour laquelle la particule reste détectable. La manipulation est la suivante : il est recommandé de prendre 2 classes de taille différentes de sédiments traçables (entre 30 mm et 35 mm d'axe a pour la première classe, puis entre 40 mm et 50 mm d'axe a pour la seconde (Figure 5) et les imbriquer à deux niveaux d'enfouissement différents verticalement, 0.5 m et 0.6 m. Les



profondeurs d'enfouissement ont été choisies par rapport aux limites de détection déterminées dans les études de traçage sédimentaire par RFID passive mais aussi par rapport à la structure verticale de l'armure sédimentaire. En effet, la surface armurée n'excède pas 10 cm et la part de la sous-couche dans laquelle nous voulons obtenir des données est d'environ 40 cm. Ainsi obtenir une limite de détection au-delà de 60 cm serait superflu. Il est tout de même possible d'effectuer le même test avec plus de particules et d'autres profondeurs d'enfouissement afin d'alimenter la connaissance et d'obtenir une information qui pourrait s'avérer utile dans le cas de l'utilisation de la RFID passive, par exemple pour d'autres travaux de géomorphologie/en dehors de l'étude des armures sédimentaires.

		Taille particule (mm)	
		±32.5	±45
Profondeur d'Enfouissement (cm)	50		
	60		

Figure 5 : Tableau de résultat pour évaluer la limite de détection d'une particule enfouie. Ce tableau suggère d'obtenir une réponse sous forme de présence/absence du signal pour une particule de 32.5 mm

Cette manipulation est réalisable pour tout site d'étude qui présente une gamme de sédiments sablo-graveleux.

Pour ce qui est des phénomènes de collision des signaux dans la colonne d'implantation des particules au sein les sédiments de la barre sédimentaire, il est nécessaire d'espacer les PIT tags de plus d'un mètre afin de s'affranchir de cette limite. Par conséquent, la superposition des particules tracées dans une même colonne est possible dans deux cas :

- Si l'épaisseur érodée pendant un événement de crue est finement connue et permet de prévoir de façon certaine le transport du premier niveau d'imbrication. Ce cas présente la possibilité d'un résultat non exploitable dans l'éventualité où la particule la plus proche de la surface n'aurait pas été mise en mouvement, ainsi l'identification individuelle des particules serait rendue impossible.
- Par l'utilisation de transpondeurs actifs qui s'affranchissent de ce phénomène de collision des signaux. Ce cas pourrait être mis en place dans une étude connexe à celle-ci mais présente un coût trop élevé dans la mesure où les particules ne seraient pas retrouvées (cette méthode de RFID actif approfondie dans ce travail).

Afin de s'affranchir des méthodes actives et de tous résultats inexploitable, le choix fait ici en termes de stratégie d'implantation des particules est une stratégie d'implantation selon une orientation verticale mais qui propose un espacement horizontal/surfacique suffisant pour respecter les limites présentées par la méthode RFID passive.

Le protocole qui suit se base donc sur un espacement de 1.20 m entre chaque point d'implantation, horizontalement suivant l'axe des transects tracés pour les besoins de cette étude (Figure 4), et trois profondeurs différentes d'enfouissement des particules, verticalement. Rappelons ici que la dynamique sédimentaire présentée par la barre de Mareau-aux-Près (III.1) favorise la présence d'armures sédimentaires en position centrale de cette dernière. Le positionnement des sédiments qui seront équipés de PIT tags se concentrera donc sur la partie centrale (entre C1 et C3, entre C4 et C8, entre C9 et C15, entre C9' et C15' (Figure 4)) des sections transversales de la barre sédimentaire. Il s'agit d'utiliser les emplacements connus, relevés par les différents échantillonnages ayant été faits sur le site d'étude afin d'obtenir une continuité avec les données déjà existantes.

### 3. Manipulations préalables à l'implantation des traceurs

La première manipulation est une étape de prospection qui concernera le repérage des sections transversales sur la barre sédimentaire à l'aide d'un DGPS (GPS différentiel permettant de passer d'une précision de 15 mètres, pour un GPS classique, à 1-3 cm avec des implémentations), la mise en place de repères visuels et la récupération des sédiments qui se verront percés et équipés de PIT tags par la suite.

Il s'agit dans un premier temps de localiser les transects d'étude puis d'implanter des repères à leurs extrémités afin de pouvoir suivre la transversale aisément. En effet, par anticipation vis-à-vis de l'implantation des sédiments une fois tracés et de leur recherche au moment de la détection, il serait préférable d'effectuer cette étape de mise en place de repères visuels afin d'éviter l'utilisation permanente du DGPS à chaque manipulation. Le matériel nécessaire pour ce repérage est le suivant : un DGPS pour localiser la transversale, 2 bâtons repères pour chaque transversale, soit 8 au total, qui pourront être peints afin de les rendre plus visibles.

A la suite de ces mises en place, vient la récupération des matériaux destinés à être équipés. Cette étape clé dans le travail de traçage sédimentaire représente une tâche fastidieuse mais peu complexe. Il s'agit de prospecter autour et sur la barre sédimentaire avec un patron aux dimensions de la taille limite d'une particule pouvant être équipé par un traceur de 21 mm ; c'est-à-dire, un axe du sédiment supérieur ou égal à 23 mm (axe a) et un autre axe supérieur ou égal à 5 mm (axe b) ; sachant que le diamètre d'un traceur est de 2 mm, il est nécessaire que la particule soit assez « large » pour pouvoir résister au perçage qui lui permettra ensuite d'accueillir le traceur.



Figure 6 : Axes d'un sédiment et outil de Wolman ([streaming-canal-u.fmsih](http://streaming-canal-u.fmsih))

Différents outils peuvent être utilisés : un gabarit du type de celui de Wolman, créé aux dimensions souhaitées ou une règle ou équerre graduée (Figure 6). L'outil représenté sur la figure reste un moyen pratique, et précis qui permet une manipulation rapide pour la recherche des éléments disponibles. Le fonctionnement suggère d'essayer de faire passer la particule dans le carré prévu à cet effet et dans le cas où la particule peut traverser l'outil, le sédiment n'est pas retenu car il ne répond pas aux contraintes de taille qui sont soumises par un transpondeur passif. Il est opportun d'établir une séparation entre 2 types de sédiments. En effet, certains seront voués à être implantés dans la couche supérieure de l'armure sédimentaire qui est composée de sédiments graveleux et d'autres seront implantés dans les couches de sédiments plus profondes caractérisées par des sédiments plutôt sableux. D'un point de vue granulométrique, la sous-couche est caractérisée par une taille de grain de 13 mm pour le D50 et de 53 mm pour le D90 tandis que la couche armurée présente une taille de grain supérieure. Ainsi, en séparant les sédiments récupérés en deux classes de taille, la classe la plus grosse sera destinée à être injectée dans la couche armurée, soit une particule d'axe a entre 23 et 35 cm, injectée à la profondeur 8 cm. Tandis que la classe la plus fine sera au moment de l'injection destinée à être implantée plus en profondeur, axe a supérieur à 35 cm, injectée aux profondeurs 20 et 45 cm. Ceci implique donc l'adaptation du gabarit avec une encoche prévue à cet effet (dimension de l'encoche : 36 mm). Cette étape se justifie par la dynamique sédimentaire qui serait perturbée par une implantation de sédiments grossiers dans la



sous-couche de l'armure sédimentaire qui créerait une sorte de blindage de par l'imbrication des sédiments hétérogènes entre eux, ce qui modifierait la dynamique de transport des couches sédimentaires.

Une variable importante à prendre en compte dans cette étape de collecte est le poids de l'ensemble des sédiments récupérés. Il est extrêmement coûteux de transporter du substrat graveleux (voir constitué de blocs) et les moyens techniques à mettre en place seraient beaucoup plus conséquents. Cette variable de poids sera détaillée lors du choix de la stratégie d'implantation impliquant de définir le nombre de traceurs mis en place. Ce critère nous amène à nous questionner par rapport à la manipulation suivante qui est l'implantation du PIT tag dans la particule, qui peut s'effectuer en laboratoire (transport des matériaux exigée) ou sur place (pas de transport des matériaux).

- Sur place : de manière générale, pour le traçage sédimentaire les techniques permettant d'implanter les transpondeurs sur la particule directement sur le site d'étude implique le placement du transpondeur sur la particule et sa fixation à l'aide d'une pâte collante résistante à l'eau. Cette méthode est largement critiquable du fait de la masse qui est ajoutée à la particule. Le poids ainsi que la dimension de la particule tracée se voient modifiés, ce qui est sujet à des modifications de la réaction du sédiment par rapport au matériel sédimentaire (autres particules) et aux événements hydrologiques (capacité de mise en mouvement plus faible).

Les résultats conférés par cette méthode ne sont donc pas adaptés aux objectifs du traçage des armures de la barre sédimentaire de Mareau-aux-Près.

- En laboratoire : le transport des matériaux collectés est donc nécessaire afin d'implanter les PIT tags dans les sédiments. Il s'agit tout d'abord de renseigner la longueur des axes a, b et c puis de percer les particules pour les préparer à l'insertion des traceurs. Deux outils sont utilisables pour cette étape, la perceuse à colonne pour percer un trou qui accueillera le transpondeur ou une meule qui coupera une entaille sur la surface du gravier. L'utilisation de la perceuse à colonne est recommandée, d'autant plus que le laboratoire de sédimentologie à Chinon possède ce type de matériel. Chaque trou doit être rempli d'une résine époxy après l'insertion du transpondeur afin de le fixer à l'intérieur et de refermer l'ouverture faite par la perceuse (Cassel, 2017). La méthode la plus courante pour les petits cailloux (axe b inférieur à 32 mm) est le perçage dans l'axe a (Figure 6) par la perceuse à colonne car c'est le seul axe assez long pour pouvoir encapsuler le transpondeur de 21 mm de long.

Bien qu'il soit recommandé d'effectuer l'implantation du transpondeur selon l'axe c (Figure 6) de la particule pour maximiser la distance de détection (Arnaud, et al., 2015), il est probable qu'au vu du matériel disponible sur le site d'étude, les variabilités dans les longueurs des axes b et c rendent l'appréciation de cette variable trop coûteuse en temps de manipulation pour une amélioration trop négligeable de la distance de détection considérant notre cas d'étude. Cette piste pourrait être approfondie en étudiant la capacité de résistance d'un galet du lit de la Loire face à ce type de forage, en s'intéressant à son indice de forme et son point de résistance par rapport à ses caractéristiques chimiques (calcaire marneux, argile...) (Arnaud, et al., 2015).

Une fois le sédiment équipé du transpondeur passif, et ce dernier encapsulé par de l'époxy, il s'agit d'écrire le numéro du PIT tag sur le caillou et de le biper avec l'antenne pour vérifier le bon fonctionnement du système. Il faut également rentrer sa référence dans une base de données (

Annexe 7, Annexe 8, Annexe 9, Annexe 10).

## 4. Stratégies d'implantation et d'injection

### 1. Implantation des transpondeurs et injection des sédiments équipés : stratégie principale

Une fois équipés, les sédiments sont voués à être placés via l'enfouissement (vertical) et le positionnement (horizontal) sur le terrain. Cette étape fait l'objet d'une stratégie adaptée aux objectifs de l'étude, soient l'étude de la dynamique des armures sédimentaires et de la dynamique sédimentaire de la barre forcée de Mareau-aux-Près. L'adaptation des profondeurs d'enfouissement aux limites de détection conférées aux traceurs, qui seront évaluées par une manipulation effectuée en amont de cette partie du protocole (IV.2), devra se faire en connaissance des résultats de cette dernière. Néanmoins, pour évaluer la dynamique des couches d'une armure sédimentaire, le choix effectué est celui de 3 profondeurs d'enfouissement avec un espacement de 1.20 m entre chaque point d'enfouissement (Partie IV 2.). Ainsi une stratégie d'implantation a été établie et renseignée sur les (

Annexe 7, Annexe 8, Annexe 9, Annexe 10) qui détaillent les points d'implantation sur les transects de la barre sédimentaire.

Ensuite, la période du placement sur le site de Mareau-aux-Près des particules préalablement équipées en laboratoire. Cette opération présente une difficulté en terme de manipulation terrain car il s'agit de faire preuve d'une grande attention pour les différentes manœuvres à effectuer. Tout d'abord, dans la mesure où les transversales (suivant leur positionnement vu à la (Figure 4) ont été marqués lors des périodes de collecte des sédiments par l'enfoncement de piquets en bois peints, le repérage et le suivis des transversales lors de l'implantation se voit facilitée. Ainsi, seule la distance surfacique entre les points d'enfouissement et la profondeur d'enfouissement sont des variables qui demandent un effort de précision important.

La stratégie d'implantation a été construite à la connaissance de la dynamique et des caractéristiques sédimentaires de la barre forcée qui fait l'objet de cette étude (III.1). Le nombre de traceurs par transversale dépend largement de la longueur de celle-ci. Les caractéristiques de chaque section ont été détaillées dans les études granulométriques de la barre sédimentaire (Wintenberger, 2015) et ont été centralisées, pour les variables importantes dans une feuille de calcul (

Annexe 7, Annexe 8, Annexe 9, Annexe 10).

Les informations qui ont permis d'établir la stratégie sont notamment, la distance entre les deux points d'analyse les plus éloignées sur la même transversale (leur tiers et leur 2 tiers pour détailler cette distance), l'évolution de la granulométrie le long de la transversale, la position surfacique de la transversale (

Annexe 7, Annexe 8, Annexe 9, Annexe 10). La décision de produire 3 profondeurs d'enfouissement est liée à la structure de l'objet faisant l'objet du traçage (armures sédimentaires sur la barre) et dépendra des résultats d'une manipulation en amont de cette étape du protocole. Pour le moment, les profondeurs estimées cohérentes pour l'enfouissement des particules, respectant les limites de détections estimées et les contraintes de la mise en œuvre du protocole, sont les 3 profondeurs suivantes : 8cm (surface armurée), 20 cm (atteinte de la sous-couche de l'armure), 45 cm (évaluation de la profondeur d'érosion et de couche active à la suite du mouvement de la surface armurée) (

Annexe 7, Annexe 8, Annexe 9, Annexe 10). Techniquement, l'enfouissement peut se réaliser par deux méthodes différentes. La première, généralement utilisée dans le cas de substrats graveleux, consiste à positionner un stock sédimentaire dans une colonne avec le traceur positionné à la hauteur prévue d'enfouissement du sédiment qui encapsule le transpondeur afin de le libérer à la

bonne profondeur dans le substrat. La seconde méthode, moins conventionnelle, consiste en la fabrication d'un outil de type piquet ou bâton à bout creux qui pourrait servir à enfouir un caillou équipé d'un PIT tag dans le substrat. Trois bâtons (pour trois profondeurs d'enfouissement différentes) de taille légèrement supérieure à la profondeur d'enfouissement voulue pour implanter la particule à la bonne profondeur. L'outil est décrit de la manière suivante : 10 cm pour la prise en main de l'objet, x cm pour la profondeur d'enfouissement voulue, bout creux de la taille de la particule ; il est utilisé de la manière suivante : poser la particule au sol à la position à laquelle le sédiment doit être enfouir, poser l'outil de manière à ce que la particule s'insère dans l'encoche prévue à cet effet, pousser la particule dans le substrat jusqu'à la marque qui indique la distance de x cm entre le manche et la particule.

L'absence de végétation sur la barre sédimentaire de Mareau-aux-Près permet au prospecteur d'utiliser un GPS dans le but d'obtenir une donnée convenable et précise du positionnement de la particule sur un plan surfacique. Cette donnée sera entrée dans une base de donnée, chaque position de traceur sera associée à la profondeur d'enfouissement de ce dernier ainsi qu'à son identifiant unique. En effet, l'utilisation du GPS est rendue possible par l'absence de végétation ou toute autre perturbation de signal. Cela implique un effort de prospection important, c'est pourquoi il est également possible d'utiliser un simple décamètre aligné sur la transversale suivie afin d'injecter la particule à la bonne position (

Annexe 7, Annexe 8, Annexe 9, Annexe 10).

Une estimation du coût du matériel combiné à l'estimation du temps passé pour l'injection des traceurs et de son coût associé a été effectué afin d'obtenir un ordre d'idée des dépenses que demande une telle opération de traçage (Figure 7, Figure 8) pour l'injection des particules tracées sur la barre sédimentaire. La figure ci-contre présente le bilan de temps passé et du matériel sur la période nécessaire pour l'ensemble de cette phase du protocole. Ces chiffres sont tirés des coûts détaillés par transversales (

Annexe 7, Annexe 8, Annexe 9, Annexe 10).

<b>COÛT TOTALE OPERATION (ingénieur)</b>	<b>1 913 €</b>
<b>COÛT TOTALE OPERATION (Travail par deux ingénieurs)</b>	<b>3 366 €</b>
Longueur totale de l'ensemble des transects (en m)	305
<b>Matériel</b>	
Nb de traceurs sur l'ensemble de l'opération	153
Taille du traceur (en mm)	23
Prix unitaire du traceur (en €)	3
<b>Prix du nombre de traceurs sur CS1</b>	<b>459 €</b>
<b>Humain</b>	
Temps pour la mise en place d'un traceur (en min)	10
Nb de traceurs sur l'ensemble de l'opération	153
Coût main d'œuvre technicien (en €/h)	51.5
Coût main d'œuvre technicien (en €/min)	0.86
Coût main d'œuvre ingénieur (en €/h)	57
Coût main d'œuvre ingénieur (en €/min)	0.95
Coût humain de la mise en place des traceurs (technicien)	1 313 €
Coût humain de la mise en place des traceurs (ingénieur)	1 454 €

Figure 7 : Bilan financier matériel et humain de l'opération d'injection des sédiments équipés de PIT tags.

Il est extrêmement probable que l'opération soit réaliser par deux opérateurs, ce qui implique de doubler les coûts de la main d'œuvre (humain) or le prix du matériel reste inchangé (Figure 8)

<b>COÛT TOTALE OPERATION (ingénieur)</b>	<b>1 913 €</b>
<b>COÛT TOTALE OPERATION (Travail par deux ingénieurs)</b>	<b>3 366 €</b>

Figure 8 : Coût total de l'opération réalisée par deux ingénieurs d'étude.

Ces montants sont à revoir à la hausse du dans la mesure où les déplacements et les autres dépenses additionnelles n'ont pas été prises en compte.

## 2. Implantation des transpondeurs et injection des sédiments équipés : stratégie secondaire

Le traçage sédimentaire par RFID passive offre une multitude de possibilités en termes de stratégie d'injection des particules équipées de transpondeur dans le substrat. Connaissant la structure des armures sédimentaires et leur dynamique générale qui implique un départ des particules de la sous-couche de l'armure, soient celles protégées par la surface armurée, il est possible d'établir d'autres stratégie d'implantation des particules équipées afin d'étudier d'autres phénomènes de transport sédimentaire sur la barre forcée de Mareau-aux-Près. Ces variations de stratégies permettant d'obtenir des données qui modifient les objectifs d'étude sont liées à deux facteurs : la stratégie d'implantation des traceurs et/ou la stratégie de prospection (détection et récupération des PIT-tags après les chaque évènement hydrologique. Ainsi, il est possible de faire varier les objectifs de l'étude par ces deux composantes du protocole de traçage sédimentaire par RFID.

En effet, lors de la constitution du protocole principal d'injection présenté dans la partie précédente, il a été question d'une autre stratégie d'implantation possible pouvant apporter des informations supplémentaires dans l'étude des armures sédimentaires. Il est possible de réaliser une injection des sédiments équipés de PIT tags en surface avec une imbrication selon une seule profondeur d'enfouissement. Un placement en surface (sédiment équipé placé sur la surface de la barre forcée) ne serait pas adapté du fait du probable du mouvement instantané des matériaux placés selon cette organisation à la suite du premier évènement de crue immergeant la barre sédimentaire. Ainsi, il est proposé l'intégration des particules équipées de PIT tags dans la surface armurée par le simple enfouissement par l'utilisation d'un pied et de recouvrir ces dernières avec les sédiments grossiers environnant composant les armures sédimentaires (dans ce cas, la profondeur d'enfouissement serait d'environ 5 cm). C'est une manipulation qui demande un investissement réduit en termes de temps de mise en place de traceur et qui a l'avantage de demander un moins grand recouvrement de surface tracée car elle correspond à une stratégie qui donne moins de renseignement sur la dynamique des sédiments de la couche armurée de l'armure sédimentaire. Ainsi, elle permet de réduire le nombre de PIT tags à implanter et par conséquent le poids de matériaux à collecter pour l'implantation de ces derniers.

Cette stratégie peut faire l'objet d'une campagne de traçage sédimentaire sur la barre de Mareau-aux-Près additionnelle à la première proposée et réalisée en amont de cette dernière, ou d'une campagne qui serait effectuée à la place mais qui modifierait les objectifs conférés à cette étude. En effet, ce schéma de mise en place des traceurs permet uniquement d'appréhender la dynamique des armures sédimentaires d'un point de vu surfacique, c'est-à-dire l'obtention de la capacité d'une armure à résister à un évènement hydrologique donné. Dans l'interprétation de ce type d'organisation, il est important de noter qu'il est probable que la distance de transport et le nombre de PIT tags mobilisés soient plus importants lors du premier évènement de crue que lors des suivants du fait de la superficialité des sédiments qui peuvent être parfois affleurant le substrat. L'objectif de ce type de schéma d'injection des PIT tags est donc l'étude de la sensibilité de la barre sédimentaire afin de cartographier les points les plus sujets aux écoulements causés par une crue d'une ampleur donnée.

Malgré l'apport moindre en termes de résultats d'étude de l'objet tracé (armure sédimentaire), le caractère archaïque de la manipulation, cette première campagne de traçage sédimentaire par RFID passive pourrait être bénéfique pour réaliser une première approche de cette méthode de traçage, obtenir un premier test de taux de retour et se familiariser avec l'équipement et les résultats, d'autant plus qu'elle est réalisable à un moindre coût.

## V. Prospection et résultats attendus

### 1. Généralités et points techniques

La performance d'un protocole de traçage sédimentaire par RFID passive dépend considérablement de la technique de détection utilisée. Celle-ci diffère dans la bibliographie selon les variables suivantes : le type d'antenne, le nombre et l'intervalle de temps entre chaque campagne de recherche et de suivi, etc. La réalisation de ces campagnes de détection post-crue représente le plus gros investissement, notamment en termes de temps de prospection, ce qui représente le coût financier principal des techniques de traçage sédimentaire par RFID passive.

La technique RFID passive pour la caractérisation de la charge sédimentaire grossière (certains éléments associés au D90 de la sous-couche d'armure sédimentaire et au D50 des surfaces armurées dans notre cas) en rivière repose sur la mise en place d'une ou plusieurs antennes positionnées parallèlement au plan de prospection pour les antennes fixes, ou sur la recherche des prospecteurs munis d'une antenne mobile, dont la portée est plus ou moins importante. Pour les transpondeurs passifs, c'est le champ magnétique généré par l'antenne qui active le transpondeur implanté dans la particule. « Le traceur reçoit l'énergie pour l'émission du signal à partir d'ondes électromagnétiques transmises par une antenne, qui fonctionne à la fois comme un fournisseur d'énergie et un récepteur de signal » (Cassel, 2017). Ainsi à la détection d'un transpondeur, son identifiant s'affiche à partir d'une unité de contrôle et de lecture reliée à un écran, un casque et à une batterie 12V. Les champs magnétiques émis par les antennes en méthode passive sont généralement d'une portée de 95 cm en vertical (Fantino, et al., 2018) dans le cas d'une absence d'interférence et d'une détection dans l'air sans enfouissement et sans milieu aqueux à traverser. La portée est vouée à être altérée par plusieurs facteurs : les caractéristiques chimiques du matériau, la conductivité de l'eau dans le cas de la recherche d'une particule enfouie dans un substrat immergé, ainsi que les potentielles ondes radio à proximité du site de détection.

Le type d'antenne conditionne en grande partie la distance de détection, les moyens de mise en place ainsi que les résultats d'un point de vue qualitatif. Dans le contexte hydromorphologique que présente la Loire dans sa partie moyenne, les préconisations énoncées dans la littérature et les retours d'expérience (Fantino, et al., 2018) (Chapuis, et al., 2014) nous permettent d'évaluer les forces et les faiblesses de chaque type d'antenne indispensables pour adapter la stratégie de l'enquête et pressentir les efforts demandés sur le terrain en fonction des objectifs de l'étude.

- La mise en œuvre d'antennes fixes représente une stratégie assez lourde en termes d'ajustement des matériaux et de calibrage de la méthode. La détection des transpondeurs par des antennes fixes confère aux données une précision supérieure à celle obtenue avec des antennes mobiles. Leur mise en place est certes complexe mais elles permettent un suivi qui se voit simplifié avec une grande réduction du temps de prospection nécessaire pour obtenir les données de passage des particules individuelles. Malgré ces avantages et la réduction probable du coût de l'opération de traçage, le matériel devant être mis en place pour ce type de détection nécessite « d'étendre » un dispositif filaire de longueur égale à la largeur du cours d'eau afin qu'il couvre l'étendue de la largeur dans laquelle la particule équipée d'un PIT tag peut se déplacer (être mis en mouvement). Ce premier prérequis a peu de chance de convenir à un hydrosystème qui présente une largeur de chenal de plus de 200 m aux abords du site d'étude. De plus, le dispositif doit être accompagné d'un système de liaison entre l'antenne déployée à travers le chenal et un générateur électrique permettant d'alimenter l'antenne. Ces prérequis mis en place au niveau du site d'étude ne sont pas compatibles avec les ressources présentées par le site d'étude, ce qui impliquerait la présence d'un générateur externe afin de pouvoir faire fonctionner le dispositif.

- Dans l’optique d’obtenir le nombre de traceurs mis en mouvement par un évènement hydrologique donné, la mise en œuvre d’une stratégie de détection par antenne mobile se voit plus adaptée aux objectifs de traçage des armures sur la barre sédimentaire de Mareau-aux-Prés. La détection des PIT tags par antenne mobile permet une recherche plus locale qui détermine la position des traceurs par un système binaire : « non détecté » dans le cas où aucun traceur ne se situe dans la zone de détection, ou « PIT tag détecté » avec l’ID du traceur affiché sur une console si un traceur est présent dans la zone de détection de l’antenne.

Le choix de l’utilisation d’antennes mobiles dans le but de balayer les surfaces de recherche est le plus adapté considérant l’hydromorphologie du site d’étude. Cette méthode implique donc une mise en œuvre particulière afin de mener à bien l’opération de détection tout en minimisant les facteurs d’erreur pouvant apporter un biais à l’analyse, ou les variables qui sont en mesure d’altérer l’efficacité de cette étape du protocole de traçage sédimentaire.

Tout d’abord, les étiquettes PIT tags communiquent à un lecteur via une antenne par radiofréquences. Ainsi, le choix d’une antenne mobile implique de se munir de celle-ci en obtenant l’outil ou encore en fabriquant l’outil manuellement. La fabrication reste possible mais la sensibilité du matériel est difficilement appréciable par l’opérateur, ce qui rend cette option inconfortable. Tandis que le choix d’une antenne industrielle permet d’avoir l’ensemble des variables renseignées dans un manuel. De plus les retours d’expérience sur le matériel renseignent sur la sensibilité de détection et son efficacité dans le type de substrat que présente cette étude. Dans la plupart des études ayant travaillé sur la faisabilité de cette technique, les équipements destinés à détecter les traceurs se composent d’une antenne de forme rectangulaire, un lecteur électronique (Arnaud, et al., 2015) et une tablette informatique sur laquelle un logiciel adapté à l’antenne est installé, permettant la localisation GPS du transpondeur repéré (Cassel, 2017).

## 2. Stratégie de prospection des opération de suivis

Au vu des stratégies d’injection retenues dans la première partie de ce protocole, les dispositions prises pour la stratégie de détection renseignée ci-après se doivent d’être cohérentes avec le schéma d’implantation choisi. La première manipulation essentielle dans la vérification du bon fonctionnement des outils et de la bonne imbrication des sédiments injectés comme indiqué dans la (IV.4) de ce document, est la première campagne de détection qu’il est nécessaire d’effectuer après le tout premier épisode hydrologique recouvrant la barre sédimentaire. En effet, effectuer une campagne de détection dans un intervalle de temps court après l’enfouissement se révèle utile afin de contrôler la traçabilité et la détectabilité des matériaux imbriqués sur le site d’étude. Par ailleurs, cette opération de vérification peut faire l’objet d’une phase importante pour la prise en main du matériel de détection. L’opération permet également de prospecter la barre sédimentaire et les matériaux implantés au temps  $t_0$  afin de constituer la base de données principale des PIT tags imbriqués dans le substrat.

Ces objectifs concordent également avec la possibilité d’effectuer cette manipulation seulement quelques heures (ou jours) après l’opération d’injection, car cela ne modifie pas les objectifs d’une telle première phase de détection. Ce choix peut se faire au grès de la personne réalisant l’étude. L’objectif final étant la vérification d’absence de collision de signaux, et d’obtenir des données permettant d’apprécier un premier taux de retour.

A la suite de cette première phase de détection, il s’agit d’élaborer une stratégie de détection pour la localisation de particules individuelles après des événements d’écoulement afin d’estimer la charge critique pour la mise en mouvement des armures sédimentaire, et la contrainte de

cisaillement critique de la mobilité au-dessus de laquelle les particules sont mobilisées (Cassel, 2017).

### 1. Cas de la détection locale via un système de résultat binaire : présence / absence

L'unique donnée à déterminer lors de cette phase de détection est le nombre de traceurs RFID qui seront mis en mouvement par un évènement hydrologique donné.

La méthodologie présentée ici consiste à prospecter la barre sédimentaire selon les transects qui ont servis pour l'injection des particules. Les matériaux de repérage (piquets en bois peints (IV)) serviront au prospecteur de marques pour la localisation précise du transect en cours de détection. Il s'agit de suivre la direction du point de repère opposé par la mise en place d'une ligne ou d'un autre point de repère pour l'alignement sur le transect afin de ne pas dévier de la zone surfacique dans laquelle se trouve les matériaux enfouis.

La recherche locale décrite dans cette partie suggère donc un résultat explicite, dans la mesure où les issues de cette opération de détection sont le repérage des PIT tags restés en place imbriqués dans la structure de l'armure sédimentaire, et l'absence de signal dans le cas d'un traceur qui ne serait plus présent car mis en mouvement par l'évènement d'écoulement. C'est la raison pour laquelle, il est important de réaliser les campagnes de prospection à la suite de chaque évènement hydrologique susceptible d'avoir mis en mouvement les structures tracées (V.2.3). En cas d'absence de repérage d'un PIT tag, il n'est pas nécessaire d'annoter son absence car de par les étapes de cette phase de détection il est admis que les traceurs n'ayant pas été détectés sont ceux ayant été mis en mouvement. Ainsi chaque transpondeur qui n'est pas récupéré, et donc qui ne figure pas comme « détecté » dans la base de données, fait l'objet de l'interprétation suivante : l'évènement hydrologique a permis la mise en mouvement du sédiment dans lequel il était encapsulé.

La dissociation entre un traceur qui ne serait pas détecté pour cause d'altération du signal par collision, ou par interférence avec une autre fréquence (limites associées à la méthode RFID), et un traceur qui n'est pas détecté pour cause d'une mise en mouvement présumée, est difficilement appréciable.

Objectifs remplis par cette opération : Cette stratégie de détection, étendue aux transects d'injection de la barre sédimentaire faisant l'objet de cette étude, est extrêmement robuste considérant la difficulté de la mise en place d'un protocole utilisant la méthode RFID passive en Loire moyenne. Elle présente l'avantage de pré-localiser précisément la zone dans laquelle les efforts de prospection seront concentrés. Cet avantage implique une réduction considérable du coût de la phase de détection des PIT tags tout en respectant les besoins de l'étude en termes de données utilisables pour la caractérisation de la dynamique des armures sédimentaires sur la barre forcée du site d'étude ; couplée aux données de flux liquides obtenues par l'analyse des variables fournies par la station de mesure d'Orléans (V.2.3). C'est donc cette approche qui est retenue comme indispensable dans la mise en œuvre de ce protocole de traçage sédimentaire. En termes de coûts, l'opération utilise un matériel qui ne représente pas de dépense significative (environ 1500€ pour un équipement comprenant une antenne et un lecteur). De plus, les surfaces à prospecter sont bien définies car elles correspondent aux transversales d'implantation des particules équipées. Ainsi on peut appréhender les dépenses, dans une tranche haute, de temps et donc de prix, pour une durée de 30 minutes nécessaire à l'opération de détection pour une seule transversale : ceci revient à passer environ 3 heures sur le site en comptant un temps de mise en place, ce qui en termes de dépense signifie environ 114€ (par heure pour 2 ingénieurs), multiplié par 3 (heures), ce qui représente 352 € pour le temps opérateur. Les coûts s'élèvent donc à 1852€ pour l'ensemble de l'opération de détection localisée sur les transversales de la barre sédimentaire.

L'absence d'un PIT tag à la suite de la détection, interprété comme mis en mouvement par un évènement hydrologique, peut donc faire l'objet d'une recherche additionnelle généralisée à



l'ensemble de la surface dans laquelle il est probable que le sédiment ait été déplacé. Pour estimer la destination vers laquelle la particule de l'armure s'est déplacée, on suppose d'après les caractéristiques hydrogéomorphologiques de l'hydrosystème Loire qu'elle a suivi la partie centrale du chenal dans laquelle les écoulements sont les plus intenses. Ainsi la recherche des particules transportées s'effectuera à l'aval de la barre sédimentaire de Mareau-aux-Prés dans la partie du tronçon de cours d'eau qui contient le chenal en périodes d'étiage. En effet cette partie du chenal représente l'axe du chenal dans lequel la vitesse de transport en crue est la plus élevée.

## 2. Cas de la recherche en aval de la barre sédimentaire

Dans l'objectif d'une analyse plus fine des comportements des particules composant les armures sédimentaires étudiées, il est possible d'investir un temps de recherche des transpondeurs n'ayant pas été comptabilisés dans les recherches localisées sur les transects d'implantation des particules tracées. L'effort d'enquête sur le terrain voit son importance augmentée en termes de temps de prospection par l'augmentation considérable de la zone dans laquelle les sédiments ont pu être transportés. Ainsi, dans le cas de l'application de cette recherche généralisée au tronçon de cours d'eau actif en période d'étiage, le taux de retour (défini ensuite) se révèle être une donnée jugeant de l'efficacité de la méthode de traçage, dans la mesure où le temps de prospection passé doit être mis en relation avec le nombre de traceurs retrouvés afin d'obtenir une rentabilité maximale de cette opération. De plus, selon les retours d'expérience analysés pour le biais de notre étude (Cassel, 2017), une des variables principales en termes de précision de la donnée (détection) est la distance entre les différents passages de l'antenne et donc du prospecteur. En résulte une augmentation du temps de prospection pour une surface donnée. C'est la raison principale de l'augmentation des coûts de l'opération de traçage sédimentaire.

Les réflexions concernant les recommandations établies pour la mise en œuvre d'une stratégie de détection généralisée comme celle proposée dans cette partie sont énoncées ci-après. Le poids de la particule se voit augmenté par l'équipement (transpondeur et résine époxy (IV.4) ce qui peut impliquer une modification de la capacité de transport de cette particule devant être estimée en amont de l'implantation de cette particule dans le substrat. Ainsi il est de mise d'ajouter à la première partie du protocole, orientée sur la collecte des matériaux, des étapes de pesée de chaque particule avant l'implantation des PIT tags et après leur implantation afin d'étudier la différence de poids qu'implique l'équipement.

Lors de la détection d'une particule ayant été mise en mouvement, la donnée surfacique permet également de calculer les distances de transport associées à la vitesse de transport solide pour ce type de particule de manière assez précise avec les coordonnées xy de départ et les coordonnées xy de la position du sédiment transporté. Cette méthode permet également de quantifier la profondeur d'affouillement (

Annexe 6) dans le cas où il serait relevé la profondeur, c'est-à-dire la distance de la particule par rapport au substrat affleurant à la position à laquelle le sédiment a été retrouvé.

Les complications qu'infèrent les limites présentées par la méthode RFID passive dans son ensemble à la recherche par la détection des sédiments équipés de PIT tags à l'aval du site d'étude sont amplifiées dans le cas présenté ci-avant. En effet, les inconvénients en matière de fréquences de



perturbation du signal des ondes émises par l'antenne de détection se révèlent très problématiques du fait du biais que ces dernières peuvent provoquer. Ainsi il s'agirait de quantifier le nombre d'échantillons à détecter, associé au temps que demandent les recherches correspondant à ce nombre de détection, pour évaluer dans un premier temps le temps nécessaire à l'obtention d'un échantillon intéressant granulométriquement, puis dans un second temps l'efficacité de la stratégie de recherche et le rapport coût financier/temps demandé, d'une telle recherche. Les limites technologiques de cette stratégie de détection peuvent être causées par « un enfouissement supérieur à la distance de détection, une recherche incomplète de la surface explorée, une dispersion des traceurs au-delà de la zone d'étude, des interférences du signal liées à la présence de matériaux ferreux à proximité des radio-étiquettes ou encore la destruction du traceur et de sa radio-étiquette » (Cassel, 2017).

La recherche ne présente pas de complexité techniquement parlant, cependant le facteur influant principalement sur le coût de l'opération est la main d'œuvre qu'elle représente sur le terrain. C'est la raison pour laquelle il est recommandé de mettre en place la stratégie de détection localisée dans un premier temps afin d'effectuer une première approche du domaine sur le site de Mareau-aux-Prés qui n'a fait l'objet d'aucune opération de traçage sédimentaire jusqu'à présent.

### 3. Distances de déplacement théoriques et couplage aux données flux liquide

La pertinence de la démarche d'analyse de la position d'arrivée des sédiments tracés transportés par les écoulements se réfère à une bonne anticipation des surfaces à prospector lors de ces opérations, c'est-à-dire aux distances théoriques de déplacement. L'obtention de cette variable permet d'estimer le temps de prospection à prévoir pour récupérer les PIT tags. Ce temps a été étudié en profondeur par (Arnaud, et al., 2020)

Pour se faire, certaines données quantifiables sont à analyser et doivent être recueillies avec les données de l'ensemble de l'hydrosystème, s'affranchissant des variables critiques spécifiques aux armures de la barre forcée du site de Mareau-aux-Prés. Les calculs permettant de déterminer les distances de déplacement théoriques s'appuient sur l'évaluation de variables :

- propres au cours d'eau dans le tronçon étudié pour le calcul des débits critiques de mise en mouvement (Figure 9) : largeur du chenal actif, pente du chenal, granulométrie ( $D_{16}$  -  $D_{40}$ ), masses volumiques de l'eau ( $\rho$ ) et du sédiment ( $\rho_s$ ), constante de gravitation ( $g$ )
- propres au cours d'eau dans le tronçon étudié ainsi qu'à des variables qui dépendent des sédiments tracés pour le calcul des puissances fluviales en excès pour une période inter-suivis depuis la date d'injection des traceurs grâce aux chroniques hydrologiques (débits occurrent par rapport au débit critique calculé précédemment) (Figure 10)
- propres au cours d'eau dans le tronçon étudié et à une crue particulière :  $LT$  : distance moyenne de transport,  $A'$  : le coefficient d'interception du modèle,  $D_i$  : la taille du traceur,  $D_{50}$  et  $D_{84}$  les valeurs de la médiane et du percentile 84 des sédiments du lit,  $\omega^*$  : la puissance fluviale adimensionnelle ( $\omega^*c$  est la puissance critique),  $t$  : la durée de la crue,  $W$  : la largeur du chenal actif (Figure 11)

$$(E1) \quad Q_c = (g D_{16}^3)^{1/2} 0.21 S^{-1.12}$$

$$(E2) \quad Q_c = (0.25 ((\rho_s - \rho) - 1)^{5/3} D_{40}^{3/2}) / S^{7/6}$$

**NB1** : Ces valeurs sont obtenues en m<sup>3</sup> / s / m, il convient de les multiplier par la largeur du chenal.

**NB2** : Il est judicieux de profiter des crues de moindre ampleur, proches du débit critique, pour effectuer des suivis pour détecter la mobilité des particules (ont-elles été déplacées ou non ?) afin de comparer les estimations de Qc avec les observations in situ.

Figure 9 : Formules de Bathurst et al. (1987) (E1) et Schoklitsch (1962) adapté par le papier suivant (Arnaud, et al., 2020)

$$\sum \omega - \omega_c = \int_{ts}^{tf} \frac{\omega^{(*)} - \omega_c^{(*)}}{D_{50}} \quad (E3)$$

Avec :

-  $\omega_c$  donné par la formule de Bagnold

$$(1966) : \omega_c = \frac{pgQ_c S}{W} \quad (E4)$$

- S : la pente

- W : la largeur du chenal

- g : la constante de gravitation

-  $\rho$  : la masse volumique de l'eau

-  $D_{50}$  : médiane des axes b des traceurs suivis

Figure 10 XX : Puissance fluviale en excès ( $\omega - \omega_c$ ), adimensionnelle (\*) ou non (Arnaud, et al., 2020)

Figure 11 XXX : Exemple de formule proposée pour estimer les distances de déplacement théoriques (Kloesch et al., 2008; Vázquez-Tarrío et al., 2018; Vázquez-Tarrío and Batalla, 2019)

Les distances de déplacement théoriques associées à la largeur du chenal permettent d'obtenir la surface à prospecter en heures par hectares. Il s'agit ensuite de ramener ces surfaces à prospecter au temps de prospection, qui dépendra notamment du mode de prospection adapté en fonction des contraintes du site d'étude, afin d'obtenir les coûts de temps opérateur qui correspondent environ à 500 € par jour et par opérateur et qui seront à considérer avec les surfaces théoriques (Arnaud, et al., 2020) de déplacement. L'estimation du coût de prospection n'a pas été effectuée dans notre étude. Les coûts d'une telle opération estimés par les retours d'expériences pour un taux de retour de 0.4% (Arnaud, et al., 2020) s'élèvent à 10 000€ pour une surface de prospection de 5ha. Ainsi, l'estimation est possible en adaptant les variables présentées ci-avant aux valeurs de celles-ci sur le site d'étude de Mareau-aux-Prés.



Figure 12 : Carte précisant la localisation de la Station de jaugeage d'Orléans (pointeur rouge) par rapport au site d'étude (complexe d'île de Mareau-aux-Prés)

Au-delà de l'estimation des surfaces à prospecter, en termes de résultats il s'agit d'analyser les données collectées à l'aide des traceurs et des données flux liquides enregistrées par la station de jaugeage d'Orléans située environ à 500 m en aval de la confluence avec le Loiret. L'implantation de traceurs RFID passive a également pour objectif de mettre en valeur les débits critiques de la mise

en mouvement du matériel sédimentaire des armures. Ainsi, le travail de prospection détaillé ci-avant, doit s'effectuer en connaissance des débits de la Loire pendant les périodes de crues précédant les campagnes de récupération des sédiments transportés. A partir des données hydrologiques et de la granulométrie des traceurs ayant subi un mouvement, il est possible d'établir les débits seuils de mise en mouvement, et ainsi de déterminer la durée de dépassement de la force tractrice critique ( $\tau^*c$ ) afin de calculer les vitesses virtuelles de déplacement des particules (Wintenberger, 2015). Le but étant d'étudier la relation étroite entre la force des débits et le transport étudié par traçage sédimentaire. Certains phénomènes de piégeage des sédiments par les surfaces armurées pourront être mis en lumière par l'application des méthodes de traçage déployées dans les protocoles de cette étude. Il s'agit d'étudier la relation entre la force des débits en période de crue et le suivi des traceurs pour la même année, ou le même évènement hydrologique ; analysant les débits les plus forts ayant induits dans le passé une grande mobilisation de sédiments. Ainsi, les résultats suivant son attendus : la mobilisation des sédiments ne suivra pas des stades de mouvements linéaires mais plutôt un mouvement caractérisé par des impulsions de départ des particules. A la suite des évènements hydrologiques étudiés, l'analyse de l'épaisseur érodée, donnée fourni par les chaînes d'érosion, simultanément à l'analyse du détail de l'épaisseur érodée présumée par la méthode de traçage permettra d'entrevoir une corrélation avec l'hydrologie présenté par l'hydrosystème. Cette opération permet ainsi, d'observer le départ successif des couches de l'armure sédimentaire et de caractériser leur dynamique.

## VI. Discussion

L'étude des données et des propositions précédentes de protocoles s'inscrit dans le cadre de la proposition d'une stratégie élaborée, permettant la caractérisation des mouvements des matériaux composant les armures sédimentaires, selon une stratégie de traçage sédimentaire utilisant la technique par RFID passive. Certaines limites et certains éléments de réflexion de cette méthode de traçage ont été suggérés et mis en lumière. Il convient dans cette partie d'apporter des éléments additionnels de réflexion sur les tenants et aboutissants de ces stratégies de traçage, en fonction du tronçon du cours d'eau étudié et des caractéristiques des matériaux disponibles sur le site.

Tout d'abord, les sédiments faisant l'objet d'un équipement par un transpondeur passif sont sujets à des « discontinuités matérielles ou structurelles » de par leurs caractéristiques physiques et chimiques. Les particules sont sujettes à des fractures lors du forage ou de l'entaille (IV.3) mais pourraient également faire l'objet de dommages (fracture, fêlure...) ultérieurement lors du transport alluvial (Cassel, 2017). Ce paramètre doit donc faire l'objet d'une attention particulière lors de l'interprétation des détections ou des taux de retour des particules (VI). Cette attention doit être d'autant plus grande que certaines caractéristiques chimiques peuvent être un facteur aggravant de la fragilité de certains types d'alluvions. C'est le cas des calcaires qui n'ont pas encore été documentés en termes de résistance au forage, ils sont pour le moment soupçonnés d'être un facteur de faibles taux de récupération (Cassel, 2017).

Les stratégies d'implantation émises en partie IV 2. 4 ont été établies dans l'hypothèse d'une validité des emplacements des surfaces armurées sur la barre sédimentaire, ainsi il convient d'adapter le protocole de terrain concernant l'implantation aux caractéristiques granulométriques du site d'étude. En effet, il est admis la possibilité de l'absence de surfaces armurées au droit des points d'implantation prévus dans le protocole (

Annexe 7, Annexe 8, Annexe 9, Annexe 10), il est donc de mise de relever les points d'implantation pour lesquelles le site d'étude ne répond pas aux caractéristiques attendues. Ainsi, il devra être

prévu l'annotation de commentaires pour chacun des points présentant un type de matériaux différent.

Ensuite, concernant les distances de détections, dépendantes du type d'antenne utilisé, relèvent plutôt d'une réelle limite de détection que d'une distance de détection avérée. Cette différence est du ressort de la méthode RFID utilisée, active ou passive. Une grande part de la précision de la détection des transpondeurs passifs dépend de l'orientation directionnelle de l'antenne et bien-sûr de la distance entre le substrat et l'antenne, qui conditionne naturellement la distance entre le transpondeur et l'antenne.

Aussi, la durée de vie des traceurs est un paramètre important pour anticiper la durée pendant laquelle il est encore possible de détecter un transpondeur passif, c'est-à-dire anticiper la durée pendant laquelle il est possible de réaliser des suivis de détection avec la même phase d'injection des traceurs. Du fait de la durée de vie des PIT tags qui est supérieure à 50 ans, selon la plupart des constructeurs, il est possible d'établir un suivi sur le long terme. En effet, l'absence de batterie dans ces transpondeurs leur confère une durée de vie bien supérieure à celle des transpondeurs actifs qui est d'environ 1 an. Ensuite concernant la durée de vie du matériel, il est important de noter que l'ensemble du matériel nécessaire pour la mise en œuvre de la détection implique une batterie 12V fournissant l'énergie électrique nécessaire à l'antenne et au lecteur qui y est relié. Par conséquent il est recommandé lors des campagnes de détection de prévoir une batterie supplémentaire qui pourra être utilisée en secours. Cette anticipation présente l'avantage de ne pas mettre en suspend l'opération en cours pour cause de panne de batterie pouvant engendrer des coûts supplémentaires pour le retour sur le site d'étude afin de terminer la manipulation interrompue.

La technique de traçage sédimentaire par RFID passive présente d'importants avantages en termes de coût, de détection des particules en surface ou enfouies, de précision de la position à laquelle a été détectée le traceur, de durée de vie des transpondeurs, d'impact sur l'environnement et d'exploitation des données collectées. Néanmoins, la robustesse de cette méthode peut éprouver selon la morphologie du cours d'eau étudié et la hauteur d'eau pendant les périodes de détection qui peuvent également engendrer un coût bien supérieur à l'utilisation de traceurs actifs dans le cas de la recherche des traceurs à l'aval du site d'implantation des sédiments équipées de transpondeurs passifs.

Le caractère innovant de l'application de la méthode RFID passive dans un cours d'eau sablo-graveleux et large comme la Loire en fait une source de réflexion et un apport au corpus bibliographique sur la connaissance de ces hydrosystèmes et notamment sur l'adaptabilité de cette méthode de traçage pour caractériser une structure sédimentaire comme les armures. Ces méthodes sont mises en place dans le but d'établir la relation la plus fine possible entre les forces permettant la mise en mouvement des armures sédimentaires et les événements hydrologiques présentés par la Loire. Les problématiques étudiables par ce type de méthodes sont variées. Il est possible d'étudier le moment d'entraînement, les trajectoires de déplacement (préférentiellement en méthode active), etc. Il faut savoir que seulement un nombre réduit d'études ont eu recours à l'utilisation de transpondeurs passifs intégrés (PIT tags) sur des cours d'eau d'une grande largeur. Ainsi les taux de retour, paramètre qui juge de l'efficacité de la méthode car il conditionne la qualité des données possiblement obtenues, sont difficilement prévisibles de par le peu de retour d'expérience avec des conditions d'étude sensiblement proches de celles du tronçon comprenant la barre sédimentaire de Mareau-aux-Près. Il est tout de même admis dans la littérature traitant du traçage sédimentaire par RFID passive que l'efficacité d'une telle méthode diminue avec la taille du cours d'eau étudié. C'est une des raisons pour laquelle le choix de centraliser le protocole de détection est recommandé concernant notre étude (IV.3).

Afin d'appréhender de manière plus précise la composante « efficacité » des suivis décrits ci-avant, quelques pistes permettant d'apprécier les indices « taux de retour » et « score d'efficacité » sont abordées ici. Ce paragraphe s'inspire largement d'un travail d'évaluation de ces

variables dans la synthèse faite à la suite d'atelier « Pêche aux outils scientifiques » réalisé le 9 octobre 2020 par les chercheurs pionniers des méthodes de traçage sédimentaire par RFID en rivière : Fanny Arnaud, Mathieu Cassel, Guillaume Fantino et Daniel Vazquez avec l'aide du GRAIE et de la ZABR (Arnaud, et al., 2020).

Dans l'optique de produire des campagnes de détection à l'aval du site d'étude afin de caractériser la direction des sédiments transportés par les événements hydrologiques, il s'agit de produire des campagnes de détection additionnellement aux phases de détection ciblées sur le site d'implantation des traceurs. L'objectif de ces campagnes de prospection est la connaissance plus fine de la réaction des sédiments composant une armure sédimentaire afin de les mettre en relation avec le schéma de départ des sédiments, qui dans le cas de la structure étudiée représentent une impulsion de transport solide aboutissant à des processus d'érosion conséquents qui se veulent cycliques. Il s'agit, en appliquant cette stratégie de détection, de vérifier ce postulat. Or, le prérequis à l'interprétation de ce type de résultats est l'évaluation de l'efficacité de la méthode de détection utilisée, dans la mesure où la taille de l'échantillon doit être suffisante pour que cette opération de détection soit fructueuse.

Dans le but d'évaluer l'efficacité d'une méthode de prospection, il est nécessaire d'évaluer la variable statistique « taux de retour » qui représente un outil utilisé dans la plupart des études de traçage sédimentaire (Cassel, 2017) et qui se définit comme le nombre de traceurs retrouvés lors de campagnes successives de suivis, divisé par le nombre de traceurs injectés au départ du protocole de traçage. Il nous faut remettre en perspective les caractéristiques du tronçon de chenal étudié aux abords avalants du site d'étude qui se révèlent complexes à étudier de par sa largeur (III). Considérant cela, il en revient dans un premier temps d'estimer une valeur de taux de retour convenable pour ce type d'hydrosystème. En effet, à partir des retours d'expérience connus en RFID passive, les taux de retour restent très variables selon les études : ils varient de 36% à 100% (Annexe 4). Un exemple pouvant être mis en relation avec le système Loire faisant l'objet de notre étude est le cas d'une étude sur l'Ain (environ 100m de large) (Chapuis, et al., 2014) dans laquelle une distance de mobilisation de la charge sédimentaire a pu être estimée de manière satisfaisante avec un taux de retour de 36%. L'objectif à atteindre si l'on devait préconiser un taux de retour satisfaisant sur le site d'étude de Mareau-aux-Prés serait un taux d'environ 30%, qui se révélerait satisfaisant pour valider la méthode de détection et fournir une donnée interprétable. Cette appréciation nécessite l'étude des retours sur expérience dans la bibliographie (Annexe 4) pour pouvoir comparer la fiabilité et l'efficacité de la méthode dans la zone géographique dans laquelle on l'applique. Le score d'efficacité consiste à équilibrer les taux de retour par rapport à l'effort de prospection, afin de choisir la méthode la plus adaptée au contexte d'étude, ce qui est crucial pour limiter le temps de terrain et le budget associé (V.2) (Annexe 11).

## **VII. Conclusion**

L'élaboration d'un protocole de traçage par RFID passive, pour étudier les armures sédimentaires de la barre forcée de Mareau-aux-Prés, a soulevé certaines interrogations quant à l'efficacité des méthodes utilisées par rapport aux caractéristiques géomorphologiques de ce contexte d'étude. L'adaptation de ces méthodes, selon une stratégie spécifique pour chaque phase de ce protocole, au contexte hydrographique et aux objectifs de l'étude est donc primordiale pour mener à bien ce type d'opération de traçage sédimentaire.

Néanmoins, les avantages de la méthode RFID passive, en matière de facilité de mise en œuvre et de robustesse des résultats obtenus, en fait un outil puissant pour la caractérisation de la dynamique des armures sédimentaire dans la mesure où il est possible de travailler sur les stratégies de mise en œuvre afin d'amoindrir les limites de cette méthode.

Le projet entrepris ici a donc de nombreuses applications possibles dans la résolution de problématiques associées aux dynamiques sédimentaires en Loire Moyenne.

## VIII. Annexes

Annexe 1 : Analyse de la granulométrie de Mareau-aux-Prés (production personnelle)

Section transversale	mm
CS1 : moyenne D50 C1 à C3	17.6
CS1 : moyenne D90 C1 à C3	38.8
CS2 : moyenne D50 C4 à C8	11.3
CS2 : moyenne D90 C4 à C8	30.7
CS3 : moyenne D50 C9 à C15	11.9
CS3 : moyenne D90 C9 à C15	38.7
CS4 : moyenne D50 C16 à C20	2.8
CS4 : moyenne D90 C16 à C20	21.0
CS5 : moyenne D50 C21 à C27	1.8
CS5 : moyenne D90 C21 à C27	11.4
CS6 : moyenne D50 C28 à C30	1.3
CS6 : moyenne D90 C28 à C30	12.2

Annexe 2 : Tableau récapitulatif des portées, coûts avantages et contraintes de différentes méthodes de traçage sédimentaire

	Portée maximale de détection	Coût	Avantages de mise en œuvre	Contraintes	Matériel connexe
Traçage par particules peintes	Portée variable (Détection visuelle)	Faible (peinture)	Simple, coût faible	Impossibilité de retrouver et d'identifier les traceurs enfouis ou indiscernables dans les eaux profondes	
			Peut être appliquée sur l'ensemble du cortège granulométrique	Effacement de la peinture après plusieurs événements	
Traçage magnétique	0,8 m	<1 euros / aimant	Simple, coût faible, localise les traceurs enfouis et invisibles à distance	Impossibilité de retrouver et d'identifier les traceurs enfouis ou indiscernables dans les eaux profondes	Magnétomètre
RFID Basse Fréquences passif (PIT-tags) 125 KHz - 134,2 KHz	0,25 m émergé 0,80 m immergé	env. 3 à 4 euros / transpondeur	Attribution d'un identifiant intégré au transpondeur	Collision de signal, impossibilité de retrouver et d'identifier les traceurs enfouis ou indiscernables dans les eaux profondes	Antenne, Lecteur, Afficheur
			localise les traceurs enfouis et invisibles à distance		
			Accélère la recherche des traceurs sur le terrain	Difficile à appliquer en grande rivière (taux de retour faible, collision de signal, effort de prospection nécessaire et enfouissement)	
RFID Ultra Haute Fréquence actifs ou passifs 433 MHz - 860 MHz - 960 MHz	80 m émergé (annoncé par le fabricant) 2m / 2,60 m immergé ou enfoui	30 euros / transpondeur	Permet de localiser individuellement les éléments tracés exposés ou enfouis à plus longue distance	Plus volumineux que les PIT tags, augmente la taille minimale des éléments suivis, peut modifier la densité des particules	Antenne, Lecteur, Afficheur
			Prospection plus rapide que les RFID Passif (portée plus élevée)		
			Pas de collision de signal	Prix plus élevé	Dans le cas de particules artificielles elles doivent : Reproduire les propriétés des particules naturelles (taille, forme, densité), ne pas perturber le signal, être au moins aussi résistantes à l'abrasion
			Offre la possibilité de mettre en place des antennes fixes pour les suivis à distance		

Annexe 3 : Références bibliographiques de prix et de distance maximale de détection de transpondeurs passifs et actifs

Transpondeurs passifs		
Source	Prix par transpondeur	Portée maximale de détection (m)
Nichols, 2004	3,59 USD	1,00
Lamarre et al., 2005	3,00 USD	0,60
Rollet et al., 2008	2,35 €	0,25
Lamarre and Roy, 2008	nr	0,25
Camenen et al., 2010	3,00 €	< 1,00
Arnaud, 2012	3,82 €	1,00
Liébault et al., 2012	nr	0,70
Chapuis, 2012 (thèse)	nr	0,45
Chapuis et al., 2014	nr	0,40
Arnaud et al., 2015	5,00 USD	0,92
Piégay et al., 2016	nr	< 0,70

Transpondeurs actifs		
Source	Prix par transpondeur	Portée maximale de détection (m)
Piégay et al., 2016	30 €	2 m enfoui

Annexe 4 : Tableau de retour de différentes méthodes de traçage (Cassel, 2017)

<b>Radio étiquettes passive basse fréquences (RFID)</b>	Nichols (2004)	96
	Lamarre <i>et al.</i> (2005)	87-96
	Allan <i>et al.</i> (2006)	18-41-100
	Carré <i>et al.</i> (2007)	97
	Rollet (2007)	25-36
	Lamarre et Roy (2008a)	84-100
	Lamarre et Roy (2008b)	57-92
	Rollet <i>et al.</i> (2008)	36
	Benelli <i>et al.</i> (2009)	n/a
	Lauth et Papanicolaou (2009)	n/a

	Liébault <i>et al.</i> (2009)	88
	Camenen <i>et al.</i> (2010)	12-80
	Schneider <i>et al.</i> (2010)	30
	Capanni (2011)	47-95
	Houbrechts <i>et al.</i> (2011)	n/a
	MacVicar et Roy (2011)	66-94
	Miller <i>et al.</i> (2011)	0-100
	Arnaud (2012)	42
	Biron <i>et al.</i> (2012)	54-100
	Houbrechts <i>et al.</i> (2012)	80-97
	Liébault <i>et al.</i> (2012)	25-78
	Nathan Bradley et Tucker (2012)	>93
	Miller et Warrick (2012)	93-100
	Phillips <i>et al.</i> (2013)	62-100
	Milan (2013)	43-92
	Phillips et Jerolmack (2014)	62-100
	Chapuis (2012) ; Chapuis <i>et al.</i> (2015)	40
	Dell'Agnese <i>et al.</i> (2015)	54-100
	Mao <i>et al.</i> (2016)	44
	Imhoff et Wilcox (2016)	68-86
	Arnaud <i>et al.</i> (2017)	11-43



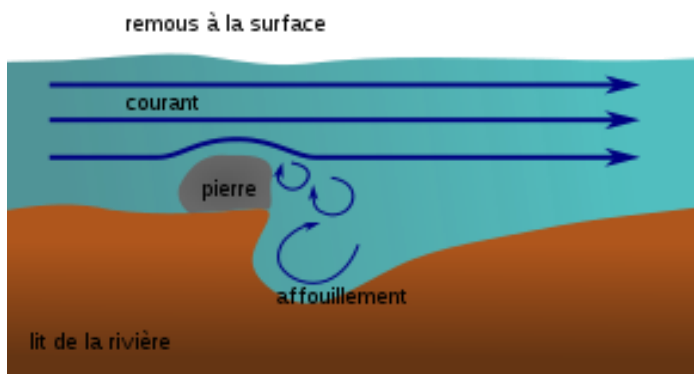
Annexe 5 : Méthodes de traçage des sédiments (Cassel, 2017)

Types de traceur	Avantages	Inconvénients	Durée de vie	Problématiques étudiées
<b>Particules exogènes</b>	Bon marché, facile à mettre en œuvre, recherche en surface	Limité à la surface, faible taux de retour	Permanent	Affinement granulométrique, Tx. de météorisation, dispersion spatiale, Id. des sources et des destinations
<b>Particules peintes</b>	Bon marché, facile à mettre en œuvre, recherche en surface	Limité à la surface, faible taux de retour, abrasion de la peinture	Fonction de l'abrasion de la peinture < 3 ans	Dist. de transport, Q de mise en mouvement, vit. virtuelle, dispersion spatiale, Id. des sources et des destinations
<b>Particules Fluorescentes</b>	Non toxique, facile à injecter, Bon marché, adapté aux systèmes à évolution lente, Beaucoup de particules équipées	Difficile à détecter, information quantitative uniquement, export rapide, transfert sur particule non suivies, affecté par la température, la lumière et la salinité	Fonction du type de colorant	Cf. Particules peintes
<b>Particules Radioactive</b>	Taux de retour élevés, très puissant, détection des particules en surface et enfouies	Toxique pour le milieu, risque pour l'environnement et le public, manipulation compliquée, besoins d'équipement spécifique, limité aux zones sans fond radioactif	Limité par demi-vie de l'élément radioactif	dist. de transport, Q de mise en mouvement, disp. spatiale 3D, profondeur d'enfouissement, vol. de sédiment mobile, Id. des sources et des destinations
<b>Revêtement d'oxyde ferrique</b>	Bon marché, facile à mettre en œuvre	Limitée aux particules > 11 mm, affecté le bruit généré par des déchets métalliques, recherches laborieuses sur le terrain, difficile à adapté en eau profonde, abrasion du revêtement	Cf. particules peintes	dist. de transport, vit. virtuelle, profondeur ou enfouissement, disp. 3D, Q de mise en mouvement, vol. de sédiment mobile, Id. des sources et des destinations
<b>Bandes ou bouchons métalliques</b>	Bon marché, facile à mettre en œuvre	Affecté le bruit généré par des déchets métalliques, décollement des particules, limité à des particules larges, recherches perturbent le lit, Recherches laborieuses sur le terrain, difficile à adapté en eau profonde	Fonction de l'abrasion et de la fracture des particules	Cf. revêtement d'oxyde ferrique
<b>Cœur ferrique</b>	Longue durée de vie, bon marché, facile à mettre en œuvre, détection des particules en surface et enfouies	Limité à des particules larges, Tx. de retour faible, affecté le bruit généré par des déchets métalliques, recherches laborieuses sur le terrain, difficile à adapté en eau profonde, recherches perturbent le lit, peu altérer la densité des particules	Permanent	Vit. virtuelle, profondeur ou enfouissement, disp. 3D, Id. des sources et des destinations, vol. de sédiment mobile, Tx. de météorisation, Q de mise en mouvement, affi. granulométrique, dist. de transport
<b>Insertion d'aimant</b>	Tx. de retours élevés, détec. des particules en surface et enfouies, bon marché, Facile à mettre en œuvre	recherches laborieuses sur le terrain, affecté par bruit de fond, difficile à adapter en eau profonde, recherches perturbent le lit	Permanent	Cf. cœur ferrique

Types de traceur	Avantages	Inconvénients	Durée de vie	Problématiques étudiées
<b>Magnétisme naturel</b>	Pas de cout, nombre de traceurs illimité, facile à mettre en œuvre	Difficile de tracer individuellement des particules, système de détection fixe, nécessite équipement de terrain et technicien spécialisé, affecté par bruit de fond, Recherches perturbent le lit	Permanent	Cf. cœur ferrique
<b>Magnétisme artificiel</b>	Taux de retour élevés, facile à mettre en œuvre	Relativement bon marché, affecté par bruit de fond, recherches perturbent le lit, caractéristiques des particules différentes du matériel naturel	Permanent	Cf. cœur ferrique
<b>Magnétisme optimisé</b>	Toute taille peut être équipée, taux de retour raisonnables, détection des particules en surface et enfouies	Recherches perturbent le lit, cout de préparation, nécessite un four spécifique, forte teneur en fer du matériau, fracture lors de stress thermique, relativement bon marché, recherches laborieuses sur le terrain	Permanent	Cf. cœur ferrique
<b>Radio transmetteur</b>	Performant, taux de retour élevés, fêction des particules en surface et enfouies, suivi en continue de la position de la particule durant les crues	Couteux Limité aux particules grossières Nombre de traceurs limités	≈ 1 an	Dist. d'un mouvement et durées d'arrêt, moment d'entraînement, dist. de transport, enfouissement et profondeurs, trajectoire de déplacement, Id. sources et destination, vol. de sédiment, vit. virtuelle
<b>Radio étiquette passive : PIT-tags. Techno. RFID</b>	Suivi individuel des particules, détection par système mobile ou fixe, détection des particules en surface et enfouies, facile à mettre en œuvre, durable	Recherches laborieuses sur le terrain, Limité aux particules > 40 mm, affecté par bruit de fond, difficile à adapté en eau profonde, recherches perturbent le lit, efficacité diminue avec la taille des cours d'eau	Longue (> 50 ans)	Cf. cœur ferrique

Tableau 9. Méthodes de traçage des sédiments (adaptée d'après Hassan et Roy, 2016)

Annexe 6 : Schéma décrivant l'affouillement (Wikipedia, Affouillement)



*Annexe 7: Stratégie d'implantation de particules équipées d'un transpondeur passif sur la transversale CS1 (coûts associés)  
(production personnelle)*

CS1	PIT ID	Distance (d) (en m)	z = {8;20;45} (m)
		C1 : d = 0m	
	PIT 1	8	8
	PIT 2	9.2	20
	PIT 3	10.4	45
	PIT 4	16.5	8
	PIT 5	17.7	20
	PIT 6	18.9	45
	PIT 7	20.1	8
	PIT 8	21.3	20
	PIT 9	22.5	45
	PIT 10	27.4	8
	PIT 11	28.6	20
	PIT 12	29.8	45
	PIT 13	31	8
	PIT 14	32.2	20
	PIT 15	33.4	45
	PIT 16	39.6	8
	PIT 17	40.8	20
	PIT 18	42	45
		C3 : d = 50m	

Longueur du transect (m)		50
1/3 (m)		16.7
2/3 (m)		33.3

Matériel		
Nb de traceurs sur CS1		18
Taille du traceur (mm)		23
Prix unitaire du traceur (€)		3
Prix du nombre de traceurs sur CS1		54 €

Humain		
Temps pour la mise en place d'un traceur (min)		10
Nb de traceurs sur CS1		18
Coût main d'œuvre technicien (€/h)		51.5
Coût main d'œuvre technicien (€/min)		0.86
Coût main d'œuvre ingénieur (€/h)		57
Coût main d'œuvre ingénieur (€/min)		0.95
Coût humain de la mise en place des traceurs (technicien)		155 €
Coût humain de la mise en place des traceurs (ingénieur)		171 €

*Annexe 8 : Stratégie d'implantation de particules équipées d'un transpondeur passif sur la transversale CS2 (coûts associés)  
(production personnelle)*

CS2	PIT ID	Distance d (en m)	z = (8;20;45) (m)
		C4 : d = 0	
	PIT 19	5	8
	PIT 20	6.2	20
	PIT 21	7.4	45
	PIT 22	10	8
	PIT 23	11.3	20
	PIT 24	12.4	45
	PIT 25	13.6	8
	PIT 26	14.8	20
	PIT 27	16	45
	PIT 28	17.2	8
	PIT 29	18.4	20
	PIT 30	19.6	45
	PIT 31	20.8	8
	PIT 32	22	20
	PIT 33	23.2	45
	PIT 34	24.4	8
	PIT 35	25.6	20
	PIT 36	26.8	45
	PIT 37	28	8
	PIT 38	29.2	20
	PIT 39	30.4	45
	PIT 40	31.6	8
	PIT 41	32.8	20
	PIT 42	34	45
	PIT 43	35.2	8
	PIT 44	36.4	20
	PIT 45	37.6	45
	PIT 46	38.8	8
	PIT 47	40	20
	PIT 48	41.2	45
	PIT 49	48	8
	PIT 50	49.2	20
	PIT 51	50.4	45
	PIT 52	51.6	8
	PIT 53	52.8	20
	PIT 54	54	45
		C8 : d = 60	

	Longueur du transect (en m)	z = 60
	1/3 (en m)	20.0
	2/3 (en m)	40.0

Matériel	
Nb de traceurs sur CS1	36
Taille du traceur (en mm)	23
Prix unitaire du traceur (en €)	3
Prix du nombre de traceurs sur CS1	108 €

Humain	
Temps pour la mise en place d'un traceur (en min)	10
Nb de traceurs sur CS2	36
Coût main d'œuvre technicien (en €/h)	51.5
Coût main d'œuvre technicien (en €/min)	0.86
Coût main d'œuvre ingénieur (en €/h)	57
Coût main d'œuvre ingénieur (en €/min)	0.95
Coût humain de la mise en place des traceurs (technicien)	309 €
Coût humain de la mise en place des traceurs (ingénieur)	342 €

Annexe 9 : Stratégie d'implantation de particules équipées d'un transpondeur passif sur la transversale CS2 (coûts associés)  
(production personnelle)

CS3	PIT ID	Distance d (e z = {8;20;45} (m)			
		C9 : d = 0			
	PIT 55	5	8		
	PIT 56	6.2	20		
	PIT 57	7.4	45		
	PIT 58	18	8		
	PIT 59	19.2	20		
	PIT 60	20.4	45		
	PIT 61	21.6	8		
	PIT 62	22.8	20		
	PIT 63	24	45		
	PIT 64	25.2	8		
	PIT 65	26.4	20		
	PIT 66	27.6	45		
	PIT 67	28.8	8		
	PIT 68	30	20		
	PIT 69	31.2	45		
	PIT 70	32.4	8		
	PIT 71	33.6	20		
	PIT 72	34.8	45		
	PIT 73	45	8		
	PIT 74	46.2	20		
	PIT 75	47.4	45		
	PIT 76	48.6	8		
	PIT 77	49.8	20		
	PIT 78	51	45		
	PIT 79	52.2	8		
	PIT 80	53.4	20		
	PIT 81	54.6	45		
	PIT 82	60	8		
	PIT 83	61.2	20		
	PIT 84	62.4	45		
	PIT 85	63.6	8		
	PIT 86	64.8	20		
	PIT 87	66	45		
	PIT 88	67.2	8		
	PIT 89	68.4	20		
	PIT 90	69.6	45		
	PIT 91	70.8	8		
	PIT 92	72	20		
	PIT 93	73.2	45		
	PIT 94	74.4	8		
	PIT 95	75.6	20		
	PIT 96	76.8	45		
	PIT 97	90	8		
	PIT 98	91.2	20		
	PIT 99	92.4	45		
	PIT 100	93.6	8		
	PIT 101	94.8	20		
	PIT 102	96	45		
	PIT 103	97.2	8		
	PIT 104	98.4	20		
	PIT 105	99.6	45		
	PIT 106	100.8	8		
	PIT 107	102	20		
	PIT 108	103.2	45		
	PIT 109	104.4	8		
	PIT 110	105.6	20		
	PIT 111	106.8	45		
		C15 : d = 120			

Longueur du transect (en m)	120
1/3 (en m)	40
2/3 (en m)	80

<b>Matériel</b>	
Nb de traceurs sur CS3	57
Taille du traceur (en mm)	23
Prix unitaire du traceur (en €)	3
<b>Prix du nombre de traceurs sur CS1</b>	<b>171 €</b>

<b>Humain</b>	
Temps pour la mise en place d'un traceur (en min)	10
Nb de traceurs sur CS3	57
Coût main d'œuvre technicien (en €/h)	51.5
Coût main d'œuvre technicien (en €/min)	0.86
Coût main d'œuvre ingénieur (en €/h)	57
Coût main d'œuvre ingénieur (en €/min)	0.95
Coût humain de la mise en place des traceurs (technicien en euro)	489.1
Coût humain de la mise en place des traceurs (ingénieur en euro)	542.1

Annexe 10 : Stratégie d'implantation de particules équipées d'un transpondeur passif sur la transversale CS3' (coûts associés)  
(production personnelle)

CS3'	PIT ID	Distance d (en m)	z = {8;20;45} (m)		
		C9' : d = 0			
	PIT 112	5	8		
	PIT 113	6.2	20		
	PIT 114	7.4	45		
	PIT 115	8.6	8		
	PIT 116	9.8	20		
	PIT 117	11	45		
	PIT 118	20	8		
	PIT 119	21.2	20		
	PIT 120	22.4	45		
	PIT 121	23.6	8		
	PIT 122	24.8	20		
	PIT 123	26	45		
	PIT 124	27.2	8		
	PIT 125	28.4	20		
	PIT 126	29.6	45		
	PIT 127	30.8	8		
	PIT 128	32	20		
	PIT 129	33.2	45		
	PIT 130	34.4	8		
	PIT 131	35.6	20		
	PIT 132	36.8	45		
	PIT 133	38	8		
	PIT 134	39.2	20		
	PIT 135	40.4	45		
	PIT 136	50	8		
	PIT 137	51.2	20		
	PIT 138	52.4	45		
	PIT 139	53.6	8		
	PIT 140	54.8	20		
	PIT 141	56	45		
	PIT 142	57.2	8		
	PIT 143	58.4	20		
	PIT 144	59.6	45		
	PIT 145	60.8	8		
	PIT 146	62	20		
	PIT 147	63.2	45		
	PIT 148	64.4	8		
	PIT 149	65.6	20		
	PIT 150	66.8	45		
	PIT 151	68	8		
	PIT 152	69.2	20		
	PIT 153	70.4	45		
		C15' : d = 75			

Longueur du transect (en m)	75
1/3 (en m)	25
2/3 (en m)	50

<b>Matériel</b>	
Nb de traceurs sur CS3'	42
Taille du traceur (en mm)	23
Prix unitaire du traceur (en €)	3
<b>Prix du nombre de traceurs sur CS1</b>	<b>126 €</b>

<b>Humain</b>	
Temps pour la mise en place d'un traceur (en min)	10
Nb de traceurs sur CS3'	42
Coût main d'œuvre technicien (en €/h)	51.5
Coût main d'œuvre technicien (en €/min)	0.86
Coût main d'œuvre ingénieur (en €/h)	57
Coût main d'œuvre ingénieur (en €/min)	0.95
Coût humain de la mise en place des traceurs (technicien en euro)	361 €
Coût humain de la mise en place des traceurs (ingénieur en euro)	399 €

$$\begin{aligned} \text{Score d'Efficacité(SE)} &= \frac{\text{Taux de retour}}{\left( \frac{\text{Durée de prospection}}{\text{surface prospectée}} \right)} \\ &= \frac{\text{Taux de retour}}{\text{Effort de prospection}} \end{aligned}$$

## IX. Bibliographie

**Arnaud F [et al.]** Actes et synthèse | Les traceurs sédimentaires pour comprendre la trajectoire morphologique d'un cours d'eau = Pêche aux outils scientifiques. - Niévroz et Miribel (01) : [s.n.], 2020. - GRAIE, ZABR .

**Arnaud F [et al.]** Technical specifications of low-frequency radio identification bedload tracking from field experiments: Differences in antennas, tags and operators. - 2015. - Geomorphology. - Vol. 238. - p 37-46.

**Blott Simon J. et Pye Kenneth** GRADISTAT: a grain size distribution and statistics package for the analysis of unconsolidated sediments. - 2001. - Earth surface Processes and Landforms. - Vol. 26 :. - p 1237-1248.

**Cassel M** Caractérisation des particules dans les lits à galets : expérimentation, développements, méthodologiques et applications in situ. - 2017. - Géographie, Université de Lyon.

**Castanet C [et al.]** Le val d'Orléans : dynamique fluviale transglaciaire et holocène, interactions entre les facteurs géodynamiques et anthropiques. - 2003. - BRGM/RP-52552-FR. - 68 p., 84 fig. (volume séparé).

**Chapuis M [et al.]** Detection ranges and uncertainty of passive Radio Frequency Identification (RFID) transponders for sediment tracking in gravel rivers and coastal environments. - 2014. - Earth Surface Processes and Landforms. - Vol. 39. - p 2109-2120.

**Fantino G [et al.]** Retours d'expérience sur l'efficacité des suivis de mobilité de la charge grossière par RFID. - 2018. - GEOPEKA, CNRS UMR 5600.

**INRAE** Projets pluridisciplinaires BioMareau [En ligne]. - 2020. - <https://www6.val-de-loire.inrae.fr/biomareau>.

**Lamarre H, MacVicar B et Roy A.G** Using Passive Integrated Transponder (PIT) Tags to Investigate Sediment Transport in Gravel-Bed Rivers. - 2005. - Journal of Sedimentary Research. - Vol. 75. - p 736-741.

**Leopold L.B., Emmett W.W. et Myrick R.M.** Channel and Hillslope Processes in a Semiarid Area. - 1966. - New Mexico, in : Geological Survey Professional Paper. U.S. Government Printing Office. - p 193-252.

**McKenney R, B.Jacobson R et C.Wertheimer R** Woody vegetation and channel morphogenesis in low-gradient, gravel-bed streams in the Ozark Plateaus, Missouri and Arkansas. - 1995. - Geomorphology. - Vol. 13. - p 175-198.

**Ramette et Heuzel** Le Rhône à Lyon. Étude de l'entraînement des galets à l'aide de traceurs radioactifs. - 1962. - Blanche, La Houille.

**Wintenberger Coraline** Dynamique fluviale et végétation pionnière à Salicaceae en rivière sablo-graveleuse. Thèse / éd. Tours Université François Rabelais de. - 2015.

**Directeur de recherche :  
Stéphane RODRIGUES**

**Etudiant :  
Martin BORTOLOTTI  
PFE/DAE  
IMA  
2020-2021**

## **Traçage sédimentaire des surfaces armurées en Loire Moyenne : Etude de la dynamique des armures sédimentaires sur la barre forcée de Mareau-aux-Prés selon la méthode de traçage RFID passive**

### **Résumé :**

Ce projet de fin d'étude expose le travail réalisé sur l'adaptation des techniques de traçage sédimentaires dans le contexte géomorphologique sablo-graveleux caractéristique de la Loire dans sa partie moyenne. Le traçage sédimentaire RFID passive est l'outil technique à l'étude dans cette réalisation. L'objectif principal est la caractérisation de la dynamique de structures, particulièrement importante dans l'ensemble des phénomènes sédimentaires, les armures sédimentaire qui se forment notamment sur les îles et les barres sédimentaires en Loire. Il est donc question dans ce document, de déterminer comment procéder à l'élaboration d'une méthode de traçage par RFID passive pour étudier les armures sédimentaires. Pour atteindre ce but les axes abordés portent sur la stratégie d'implantation des transpondeurs passifs, l'injection de particules « traceurs » dans une barre sédimentaire forcée, la stratégie mise en place pour la détection des transpondeurs pendant des périodes de suivis et la mise en relation avec le flux liquide.

### **Mots Clés :**

Armures sédimentaires, Traçage sédimentaire, RFID basse fréquence, Transpondeurs passifs intégrés, Transport sédimentaire, Protocole de terrain