HAL
open science

Atelier "Les traceurs sédimentaires pour comprendre la trajectoire morphologique d'un cours d'eau"

Fanny Arnaud, Mathieu Cassel, Guillaume Fantino, Daniel Vazquez-Tarrio, Anne Clemens, Emilie Mauron

To cite this version:

Fanny Arnaud, Mathieu Cassel, Guillaume Fantino, Daniel Vazquez-Tarrio, Anne Clemens, et al.. Atelier "Les traceurs sédimentaires pour comprendre la trajectoire morphologique d'un cours d'eau". Pêche aux outils scientifiques, GRAIE-ZABR, Oct 2020, Miribel, France. hal-02966972

HAL Id: hal-02966972

https://hal.science/hal-02966972v1

Submitted on 5 Nov 2020

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

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

Actes et synthèse | Les traceurs sédimentaires pour comprendre la trajectoire morphologique d'un cours d'eau

Pêche aux outils scientifiques – 9 octobre 2020 – Niévroz et Miribel (01)

Contexte de ce document de synthèse :

Le 9 Octobre 2020 le Graie et la ZABR ont organisé une journée d'échanges au bord de l'eau et en salle de travail pour permettre à une vingtaine de participants de découvrir ou approfondir leurs connaissances sur le **traçage sédimentaire grossier**.

La méthode approfondie et présentée par les chercheurs de la ZABR à cette occasion est le **suivi par transpondeur d'identification par radiofréquence** (RFID). Un historique des techniques de traçage par RFID a été présenté, les méthodes de traçage actives et passives ont également été détaillées et comparées. Une phase d'expérimentation a ensuite permis à chaque participant de manipuler ces méthodes de traçage sur le terrain. Un travail en salle a enfin permis aux inscrits d'appréhender les indicateurs qui permettent de mesurer la qualité d'un suivi, de découvrir comment choisir la méthode de traçage la plus adaptée à ses contraintes (budget, taille des traceurs, temps investi dans les recherches, objectif etc.).

Une ouverture a été proposée sur la standardisation des données collectées en vue d'une bancarisation et une optimisation de leur utilisation.

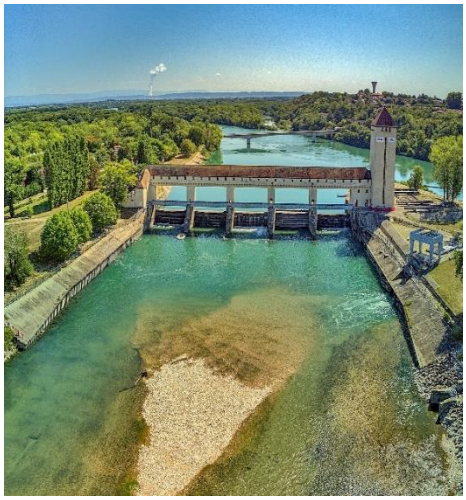
De manière générale, lors de la journée, chercheurs, bureaux d'études, collectivités et partenaires ont pu partager leurs questions et expériences à ce sujet.

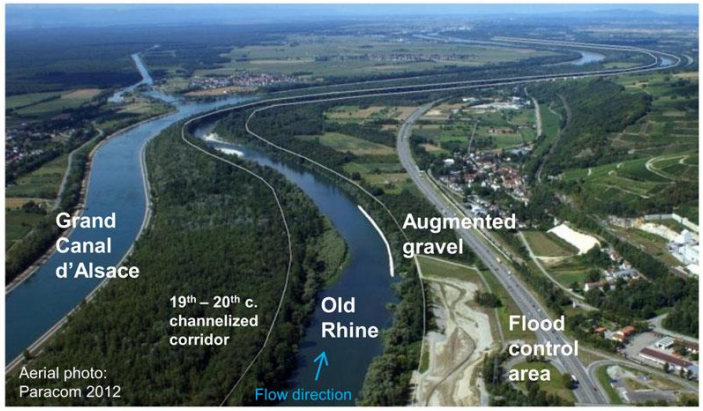
Le Graie, La ZABR et les chercheurs organisateurs de la journée vous proposent ce document synthétique en libre accès. Il vous permet d'accéder à un état des connaissances sur le sujet des traceurs sédimentaires RFID.

INTRODUCTION : LE TRAÇAGE DES SEDIMENTS GROSSIERS – ENJEUX, PRINCIPES ET TECHNIQUES DE TERRAIN

1. Enjeux

Depuis une vingtaine d'années, le traçage de sédiments grossiers avec des transpondeurs d'identification par radio-fréquence (RFID) est largement employé dans les cours d'eau à charge graveleuse. Cette technique permet de répondre à plusieurs objectifs : **étude de la dynamique morphologique du chenal, estimation des débits-seuil de mise en mouvement, quantification des flux de charriage, dimensionnement de mesures de restauration et suivi de leur efficacité** (surfaces impactées et durée des effets de la restauration)**,** ou encore **la qualification de l'effet de la présence d'ouvrages transversaux** (modification des flux amont/aval).





Banc mobile en aval d'un ouvrage transversal (source : M.Cassel)
Charriage initié au niveau d'un radier (source : M.Casssel)
Réinjection de sédiments en cordon linéaire le long du Vieux-Rhin de Kembs (source : Arnaud et al., 2017).

Ce livret a pour ambition de présenter succinctement les différentes techniques de traçage RFID, leur déploiement sur le terrain, et de fournir des clés pour choisir la méthode de traçage la plus adaptée en fonction des caractéristiques du site étudié, des objectifs du projet et de l'efficacité de prospection recherchée. Cet atelier a été construit sur la base des expériences antérieures de l'UMR 5600 EVS, de la société GeoPeka et des équipes de recherche partenaires en matière de traçage sédimentaire.

2. Principes

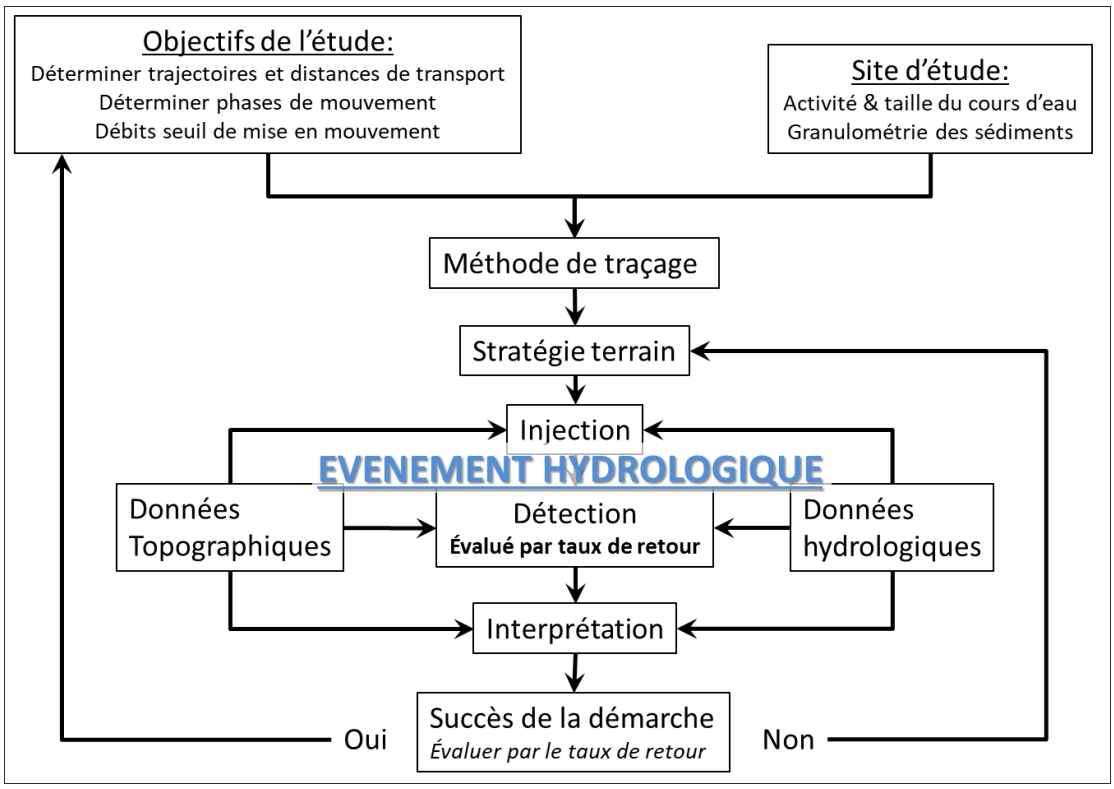


Figure 1. Démarche de conception d'une expérimentation de traçage sédimentaire (adapté d'après Hassan et Ergenzinger, 2003).

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. Après une crue, des opérateurs détectent leur position avec un système RFID (une antenne + un lecteur) connecté à un ordinateur et à un GPS. Les positions de départ et d'arrivée définissent des distances de déplacement, qui sont analysées en fonction du temps et de la magnitude de la crue, des granulométries et des formes des particules, ou du type de cours d'eau (Figure 1 et Figure 2).

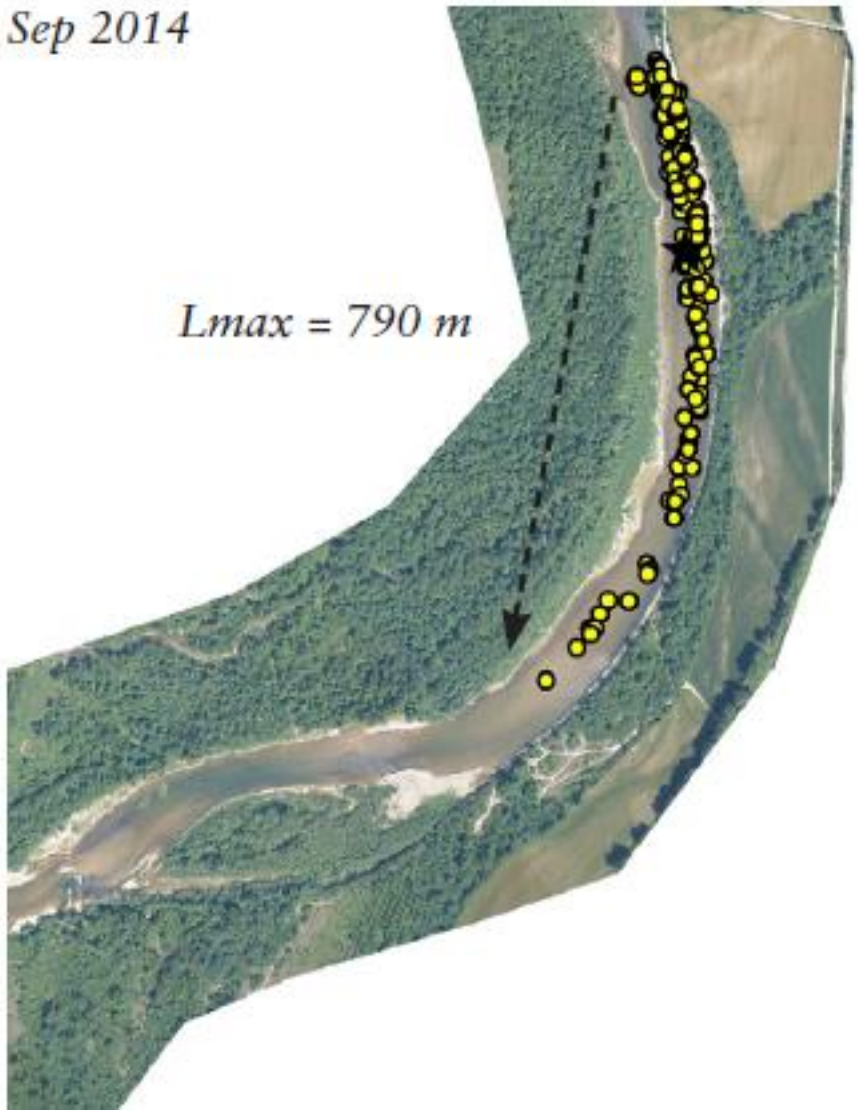


Figure 2. Positions et distance de déplacement de traceurs RFID relevés au cours d'un premier suivi sur la basse vallée de l'Ain (source : Muhar et al., 2019).

Deux technologies RFID sont principalement utilisées :

- La première repose sur des **transpondeurs passifs** (fonctionnant sans batterie), aussi appelés PIT-tags et communiquant en ondes basse fréquence (134.2 kHz).
- La seconde repose sur des **transpondeurs actifs** (avec batterie), les a-UHF-tags qui émettent un signal ultra-haute fréquence (433.9 MHz).

Ces deux technologies reposent sur l'émission (autonome pour les tags actifs ou en réponse à une charge pour les tags passifs) d'ondes radio contenant un numéro d'identification unique pour chaque traceur. Ces ondes sont captées par une antenne, démodulées par un lecteur puis affichées et/ou enregistrées sur un terminal informatique ou un GPS (Figure 3).

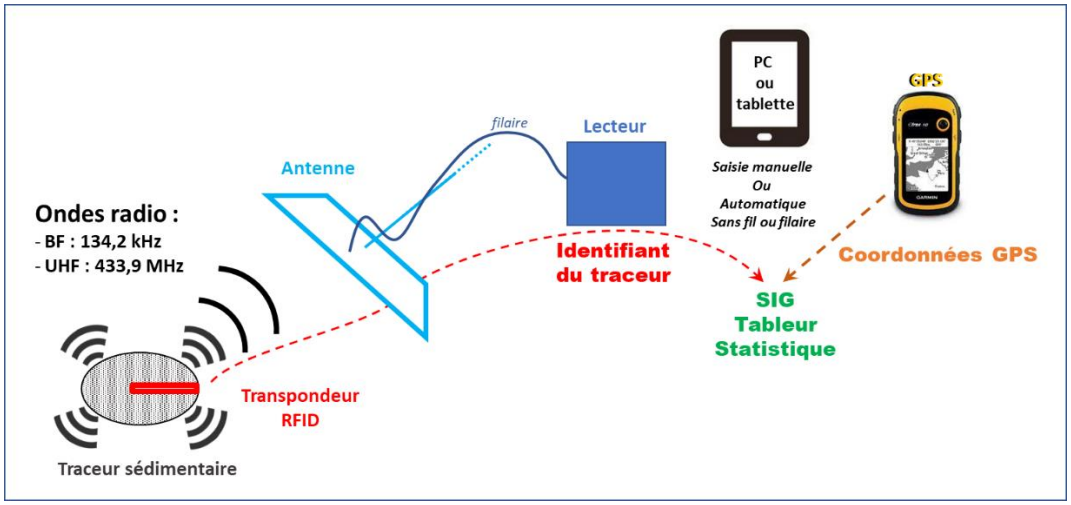


Figure 3. Représentation schématique d'un dispositif de traçage sédimentaire RFID.

Les traceurs RFID présentent de nombreux avantages par rapport aux traceurs classiques tels que ceux à cœur magnétique : un identifiant unique, une pérennité des étiquettes et ils peuvent être détectés enfouis. De plus, les caractéristiques techniques des traceurs actifs et passifs leur confèrent des avantages et inconvénients propres mais aussi une certaine complémentarité.

3. PIT-tags et a-UHF-tags

Déjà employés pour le suivi du déplacement des poissons, **les PIT-tags (technologie passive)** ont été adaptés au suivi de particules sédimentaires au début des années 2000. Ils présentent les avantages d'être **peu onéreux, de petite taille (12 à 32 mm de long), d'avoir une longue durée de vie et d'être détectables de manière équivalente dans tous les environnements (émergé, immergé, enfoui).** Cependant, ils ont une distance de détection inférieure à 1 m et les signaux radio entrent en « collision » si deux traceurs ou plus sont proches, ce qui les rend difficiles à détecter. C'est pourquoi ils sont souvent installés par centaines (voire par milliers) par site d'étude, en prévision des traceurs non retrouvés, et engendrent de longs temps de prospection lorsque les surfaces à prospecter sont importantes.

Les **a-UHF tags (technologie active)** ont été testés et déployés avec succès depuis les années 2010. Ils sont plus gros, plus onéreux et ont une durée de vie limitée (5

ans) mais **leur grande distance de détection** (jusqu'à 40 mètres en fonction de la hauteur d'eau) permet des suivis plus rapides et plus performants. En outre, **l'absence de collision entre les signaux** augmente significativement les taux de retour en cas de faible distance de transport et d'injection en amas et autorise également l'installation des traceurs sous forme de « colonne » dans la couche sédimentaire. Cela permet d'estimer l'épaisseur érodée par charriage mais aussi de mesurer dès le premier suivi, les vitesses de transport de particules déjà incorporées dans la couche de charriage.

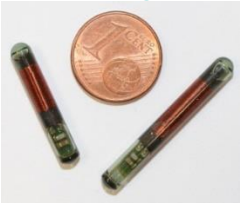
	PIT-tags	a-UHF-tags
		
Taille des transpondeurs	**Long.: 12-23-32 mm** **Diam.: 2 mm**	**Diam.: 31 mm** **Épaisseur : 8-15 mm**
Taille min. des particules équipées	**{16-22}** **{22-32}** **{32-45}**	**{32-45}**
Distance max. de détection	**< 1 m**	**< 40 m**
Précision de géolocalisation	**~ 0,5 m**	**0,5 m à 20 m**
Signal radio	**134.2 kHz** **Binaire (présence/absence)** **Problème de collision**	**433.9 MHz** **Trame RSSI** **(intensité de la détection)** **Protocole anti- collision**
Coût unitaire de fabrication	**10€**	**80€**

Tableau 1. Caractéristiques techniques des traceurs RFID actifs et passifs.

4. Choix de la méthode de traçage

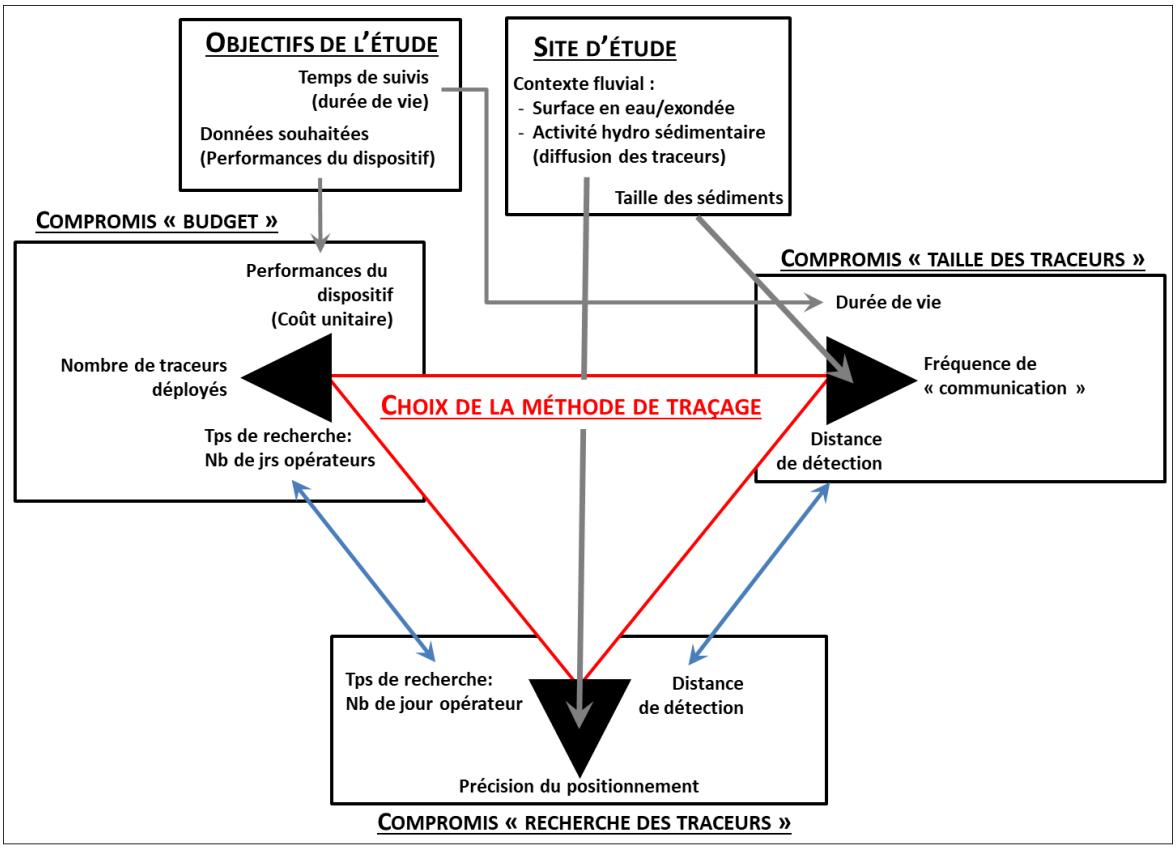


Figure 4. Réflexions et compromis liés aux choix d'une méthode de traçage sédimentaire (Cassel, 2017).

Le choix de la méthode de traçage sédimentaire la plus adaptée à une étude résulte d'un compromis entre les objectifs de l'étude, les caractéristiques morpho-dynamiques du site et le volet financier (Figure 4 dans Cassel (2017)). Ce dernier comprend bien sûr le coût du matériel (traceurs, antenne, lecteur) ainsi que le nombre de jours opérateurs pour l'installation sur site, mais aussi et surtout pour la réalisation des suivis post-crue sur toute la durée de l'étude. Évaluer la performance des technologies RFID et l'efficacité des méthodes de suivi est donc essentiel pour l'estimation du budget global.

a. Qualité et efficacité des suivis

COURS D'EAU	TYPE DE RFID	NB INJECTES	NB RETROUVÉS	SUPERFICIE DU SITE (HA)	DUREE DE PROSPECTION (H/OPERATEUR)
LA SÉVERAISSE	a-UHF	121	83	90,1	80
CANAL DE MIRIBEL A LA BRECHE DE NEYRON	a-UHF	100	64	7,7	80
			55	29,3	84
LE BUECH	a-UHF	148	105	34,6	40
LE RHIN	PIT tags 23 mm	1489	744	7	352
			155	8,5	24
LA DURANCE	PIT tags 23 mm	232	95	5,5	128
LE BOUINENC	PIT tags 23 mm	451	395	5,6	80
			291	5,6	80
			201	5,6	80
L'AIN	PIT tags 23-32 mm	1064	502	14,3	120
			377	16,7	88
HALFMOON CREEK	PIT tags 23-32 mm	300	294	0,4	200
			288	0,8	184
DANUBE	Radio accoustique	40	38	70	975

Tableau 2. Métadonnées de suivis de traçage sédimentaire par RFID. (extrait de Cassel et al., 2020)

L'efficacité d'un suivi de traçage sédimentaire est souvent appréhendée par le taux de retour, c'est-à-dire le nombre de traceurs retrouvés rapporté au nombre de traceurs injectés. Le taux de retour renseigne sur la représentativité des données récoltées mais il ne rend pas compte du travail de terrain, de l'effort de prospection, nécessaire pour l'atteindre.

b. Score d'efficacité

Les efforts de prospection rapportés dans les études du Tableau 3 sont aussi variables que les taux de retour obtenus, mais des tendances se dessinent dans la relation « Taux de retour – Effort de prospection » en fonction des techniques de traçage utilisées. On constate aussi que certaines durées de prospection sont très importantes et qu'elles constituent la majorité du budget de l'opération de traçage (Figure 5). Choisir la méthode de traçage la plus adaptée et la plus efficace à un contexte d'étude est donc crucial pour limiter le temps de terrain et le budget associé.

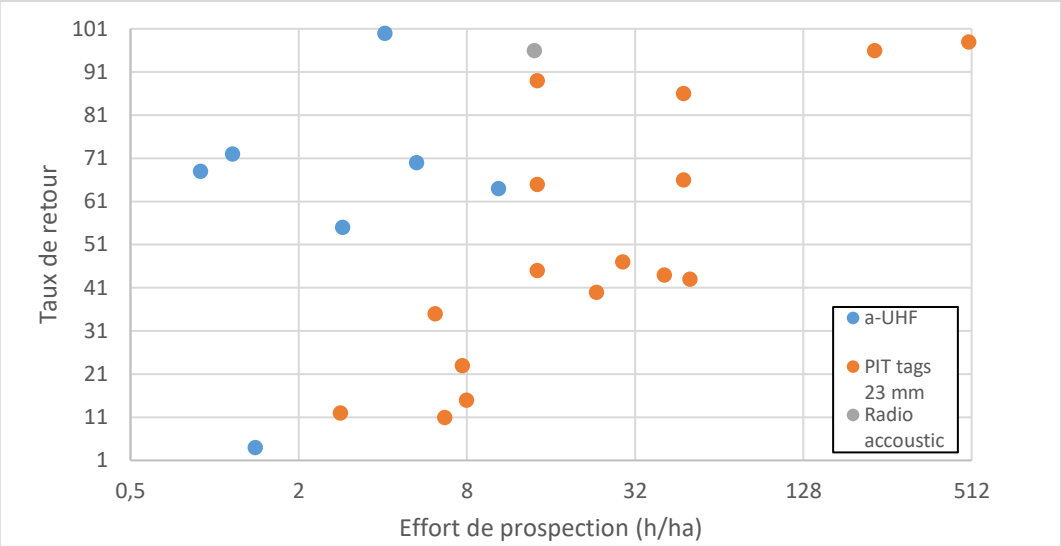


Figure 5. Comparaison des taux de retour et des efforts de prospections des différentes techniques de traçage RFID.

L'effort de prospection est fonction de trois éléments indépendants :

- La **performance du dispositif de traçage**, qui correspond à la facilité à détecter et positionner rapidement dans l'espace les traceurs au cours d'un suivi. Ce premier élément, technologique, est conditionné par les caractéristiques techniques des systèmes RFID et celles-ci sont relativement bien documentées (Chapuis et al., 2014; Arnaud et al., 2015; Cassel et al., 2016, 2017) pour les deux systèmes qui nous concernent ;
- **La taille et l'activité morpho-dynamique du système fluvial** étudié, qui conditionnent la surface sur laquelle rechercher les traceurs au cours des suivis successifs ;
- **L'opérateur humain,** qui grâce à son expérience du matériel et sa connaissance du système étudié, parvient à localiser rapidement les traceurs.

C'est pourquoi pour estimer l'efficacité d'un suivi ainsi que la performance d'une méthode de traçage sédimentaire, nous avons proposé un « score d'efficacité » intégrant le taux de retour et l'effort de prospection. Ce dernier est défini par la durée de recherche des traceurs rapportée à la surface prospectée (Cassel et al., 2020).

$$Score\ d'Efficacité(SE) = \frac{Taux\ de\ retour}{\left(\frac{Durée\ de\ prospection}{surface\ prospectée}\right)}$$

$$= \frac{Taux\ de\ retour}{Effort\ de\ prospection}$$

Dans ce score :

- Le taux de retour (en %) varie de 0 à 100 ;
- La durée de prospection (en h) est la durée de recherche multipliée par le nombre d'opérateurs ;
- La surface prospectée est en ha.

COURS D'EAU	TYPE DE RFID	TX DE RETOUR	SUPERFICIE DU SITE (HA)	DURÉE DE PROSPEC-TION	EFFORT PROSP. (H/HA)	SE
LA SÉVERAISSE	a-UHF	68	90,1	80	0,89	76,90
CANAL DE MIRIBEL A LA BRECHE DE NEYRON	a-UHF	64	7,7	80	10,39	6,20
		55	29,3	84	2,87	19,20
LE BUECH	a-UHF	72	34,6	40	1,16	62,30
LE RHIN	PIT tags 23 mm	43	7	352	50,28	0,85
		12	8,5	24	2,82	4,28
LA DURANCE	PIT tags 23 mm	40	5,5	128	23,27	1,70
LE BOUINENC	PIT tags 23 mm	89	5,6	80	14,28	6,20
		65	5,6	80	14,28	4,50
		45	5,6	80	14,28	3,10
L'AIN	PIT tags 23-32 mm	47	14,3	120	8,39	5,6
		35	16,7	88	5,27	6,7
MORAS CREEK	PIT tags 23 mm	86	0,21	10	47,62	1,80
		66	0,21	10	47,62	1,40
HALFMOON CREEK	PIT tags 23-32 mm	98	0,4	200	500	0,20
		96	0,8	184	230	0,42
DANUBE	Radio accoustique	96	70	975	13,93	6,91
LA DORDOGNE	PIT tags 23 mm	44	5,9	240	40,68	1,08
	a-UHF	100		24	4,07	24,58

Tableau 3. Métadonnées des suivis de traçage sédimentaire par RFID avec calcul du score d'efficacité.

5. Estimer l'effort de prospection

Idéalement, il est pertinent d'anticiper le ou les efforts de prospection qui seront à déployer au cours des suivis successifs afin de choisir la méthode de traçage la plus efficace pour l'environnement étudié. En pratique, cette démarche est souvent menée « à dire d'expert », mais il est judicieux d'aborder chronologiquement une série d'étapes utilisant des critères objectifs, quantifiables et mesurables pour parvenir à l'estimation de cet effort de prospection.

a. Estimation des surfaces à prospecter

De manière simplifiée, il est souvent considéré que les traceurs sont mis en mouvement lorsque le débit dans le chenal dépasse le débit seuil de mise en mouvement. Au-delà de ce débit, la puissance fluviale (dite en excès) contribue à transporter les traceurs plus ou moins loin selon leur taille, leur forme, leur imbrication et leur position de départ. Cette puissance fluviale en excès permet ainsi d'estimer des distances de déplacement théoriques (Figure 6) et donc les surfaces à prospecter.

Toutefois, ce cadre théorique peut se heurter à des contraintes de sites liées (Figure 7) :

- à la sécurité des opérateurs et/ou des infrastructures,
- à des autorisations d'accès,
- à l'hétérogénéité des milieux fluviaux et de leurs caractéristiques morphologiques favorisant le dépôt des traceurs dans certaines zones.

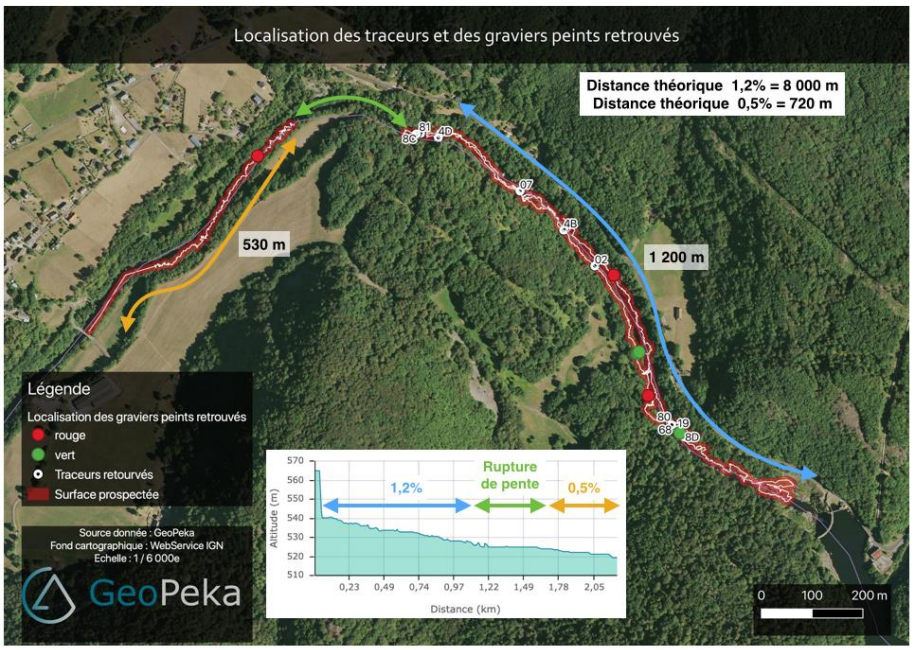


Figure 6. Exemple de variations de distance de déplacement théorique des traceurs en lien avec la pente du cours d'eau sur la Rhue.

Figure 7. Exemple de l'effet de la morphologie du cours d'eau sur le dépôt des traceurs sédimentaires sur la Séveraisse à Villard Loubière.

Pour déterminer des distances de déplacement théoriques, il faut :

- **1. Estimer les débits critiques de mise en mouvement** des particules (Recking et Etna, 2008) en se référant aux études préalables sur le site étudié, ou en utilisant les formules de Bathurst et al. (1987) (E1) et Schoklitsch (1962) (E2) basées sur les caractéristiques morphologiques du système (pente (*S*) du chenal, granulométrie (D_{16} - D_{40}), masses volumiques de l'eau (ρ)et du sédiment (ρ_s) et constante de gravitation (*g*)) :

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

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

NB1 : *Ces valeurs sont obtenues en m3 / 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.*

- **2. Sommer la puissance fluviale en** excès ($\omega - \omega_c$), **adimensionnelle (*) ou non,** pour une période inter-suivi ou cumulée depuis la date d'injection grâce aux chroniques hydrologiques (Figure 8) ;

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

Avec :

- ω_c donné par la formule de Bagnold (1966) : $\omega_c = \frac{\rho g \mathbf{Qc}\, S}{W}$ (E4)
- S : la pente
- W : la largeur du chenal
- g : la constante de gravitation
- ρ : la masse volumique de l'eau
- D_{50} : médiane des axes b des traceurs suivis

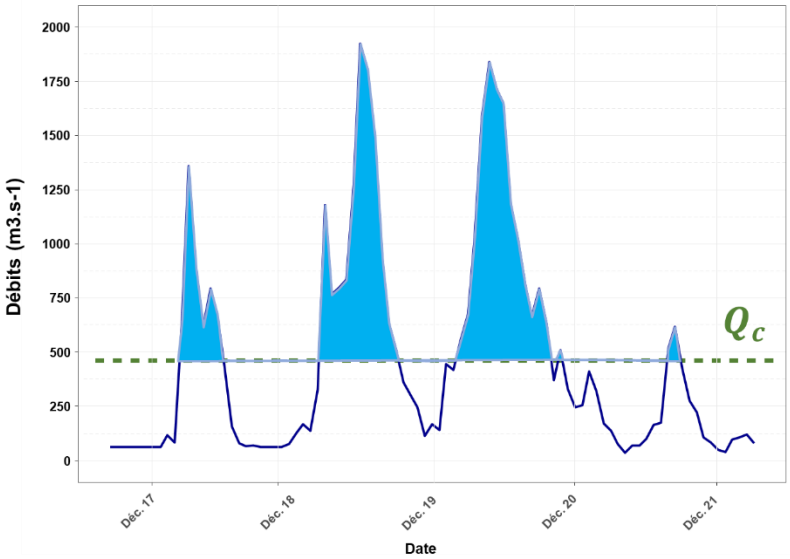


Figure 8. Illustration du cumul de puissance fluviale en excès sur une chronique hydrologique.

- **3. Estimer les distances de déplacement théoriques** pour les valeurs de puissance fluviale (en excès ou au pic de crue) à partir des modèles de la littérature (Kloesch et al., 2008; Vázquez-Tarrío et al., 2018; Vázquez-Tarrío and Batalla, 2019 : E5) ;

$$L_T = A' \cdot \left[1 - \log_{10}\left[\frac{D_i}{D_{50}}\right]\right]^b \cdot \omega_c^{*c} \cdot \left(\frac{\omega^*}{\omega_c^*}\right)^d \cdot t^e \cdot W_T^f \cdot D_{84}^l \qquad \text{(E5)}$$

Avec :

- L_T : 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
- ω* : la puissance fluviale adimensionnelle (ω^*_c est la puissance critique)
- *t* : la durée de la crue
- W : la largeur du chenal actif.

D'autres formules ont été proposées par exemple par Klösch et Habersack (2018).

- **4.** Finalement, les **distances de déplacement théoriques** et la largeur moyenne du chenal (mesurée sur photographies aériennes par ex.) permettent d'**estimer les surfaces à prospecter**.

b. Des surfaces à prospecter jusqu'au temps de prospection

Après avoir estimé la surface à prospecter, il convient de :

- **Délimiter les surfaces homogènes d'un point de vue de la profondeur d'eau**, notamment car cela conditionne le moyen de cheminement dans le chenal ;
- **Déterminer les modes de prospection** (en bateau, à pied, par drone) les mieux adaptés à ces surfaces et aux besoins/contraintes de l'étude (rapidité, précision de géolocalisation, etc.) ;
- **Déterminer l'effort de prospection adapté à chaque espace (en h/ha) grâce aux données de la bibliographie ;**

	PIT-tag	a-UHF-tag
Chenaux profonds (prospection en bateau)	68 (50 à 91)	7.4 (5 à 10)

Chenaux peu profonds (<30 cm) et bancs émergés	15.1 (7 à 500)	1.85 (0.4 à 4)

Tableau 4. Effort moyen de prospection (en h/ha) en fonction des méthodes de traçage et des environnements à prospecter. Les valeurs entre parenthèses sont les bornes minimales et maximales rapportées dans la littérature d'après CASSEL ET AL., 2020.

- **Sommer sur l'ensemble du site** pour obtenir le temps total de prospection ;
- **Sommer avec les coûts d'équipement et de temps opérateur.**

	PIT-TAG	A-UHF-TAG
ÉQUIPEMENT SITE 1 000 TRACEURS	10 000 €	80 000 €
ÉQUIPEMENT SITE NBR DE TAG RETROUVES EQUIVALENT = 140	0.4 taux de retour = 350 inj. 350 * 10 = 3 500 €	0.7 taux de retour = 200 inj. 200 * 80 = 16 000 €
PROSPECTION 5 HA	75,7 h = 9 437 € Tot. avec équipement = 12 937€	9,25 h = 1 556 € Tot. avec équipement = 17 556€
PROSPECTION 20 HA	302 h = 37 750 € Tot. avec équipement = 41 250€	37 h = 4 625 € Tot. avec équipement = 20 625€

Tableau 5. Quelques éléments de chiffrages d'équipement et de suivis en fonction des méthodes de traçage par RFID (coût opérateur = 500 €/jr/opérateur)

La figure 7 représente une évolution relative des coûts totaux (équipement + suivis successifs) de traçages sédimentaires en fonction de la surface du site d'étude, des environnements (émergé/peu profond à pied = gris ; immergé par bateau = bleu ; par drone = rouge), des techniques de traçages et des méthodes de prospection employées.

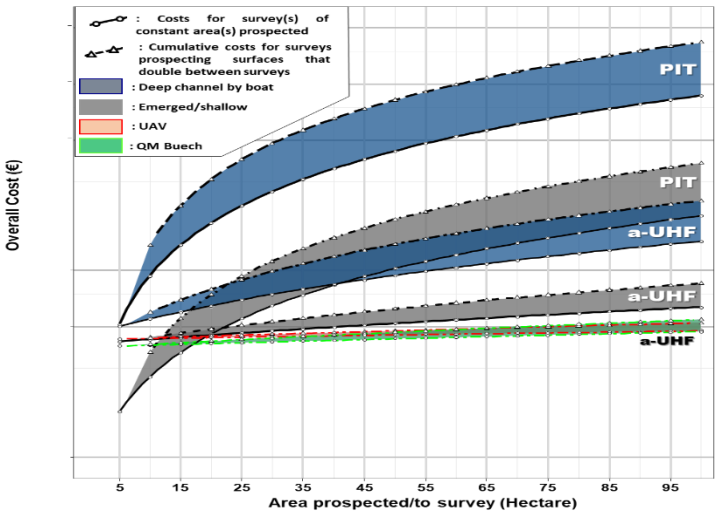


Figure 9. Estimation des coûts totaux d'expérimentations de traçage sédimentaire en fonction de la superficie du site, de la méthode de traçage et des environnements rencontrés (d'après CASSEL ET AL., 2020).

Cette figure 9, dont nous avons volontairement enlevé les unités de coût, permet de comprendre que selon les environnements et les surfaces à prospecter, le surcoût d'équipement lié à l'emploi des traceurs a-UHF est compensé par l'efficacité des suivis, au-delà de 15 ha (1 suivi de 15 ha = 3 suivis de 5 ha, ou 1 suivi de 5 ha + 1 suivi de 10 ha) en environnement émergé ou peu profond. En environnement immergé nécessitant une prospection en bateau, les expérimentations utilisant des PIT tags sont théoriquement plus coûteuses.

6. Pour aller plus loin : Contrôles sur les distances de propagation des particules

L'un des objectifs des géomorphologues fluviaux utilisant du traçage sédimentaire est d'identifier les paramètres contrôlant le déplacement des particules. Le rôle de des différents contrôles est fondamental pour une estimation plus réaliste du transport solide par charriage. La nature de ces contrôles est déterminante pour le choix des mesures de terrain à accomplir, complémentaires aux techniques de traçage. Après plusieurs décennies d'observations terrain avec les méthodes de traçage sédimentaire, nous pouvons aujourd'hui commencer à fournir des éléments de réponse.

Les contrôles hydrauliques sont les premiers qui viennent à l'esprit. L'occurrence d'une crue plus intense va entrainer des déplacements plus importants qu'une crue moins forte. Mais est-ce vraiment aussi simple ? La littérature confirme cette relation avec l'hydraulique, mais elle montre aussi une forte dispersion des résultats : pour des crues de magnitude comparable, sont observées des différences de plusieurs ordres de grandeur dans les distances de propagation mesurées. De plus, la durée de la crue et/ou le débit cumulé des évènements de crue ne sont pas systématiquement précisés dans les articles scientifiques et cela limite les conclusions sur l'importance relative du contrôle hydraulique.

Toutefois, quelques études exhaustives permettent un examen approfondi de l'ensemble des facteurs de contrôle et de leur rôle dans la variabilité des résultats de traçage sédimentaire. La largeur du chenal est le paramètre expliquant la part la plus importante de la variabilité, et ce de manière plus importante que la magnitude du pic de crue ou la durée de la crue (Figure 10), corroborant ainsi les observations de Beechie (2001) sur des rivières des États-Unis et en Ecosse. Ces observations soulignent les effets d'échelle liés à la taille du chenal : des déplacements plus importants sont attendus dans un chenal plus large que dans un lit plus petit, en raison d'un simple effet de la taille.

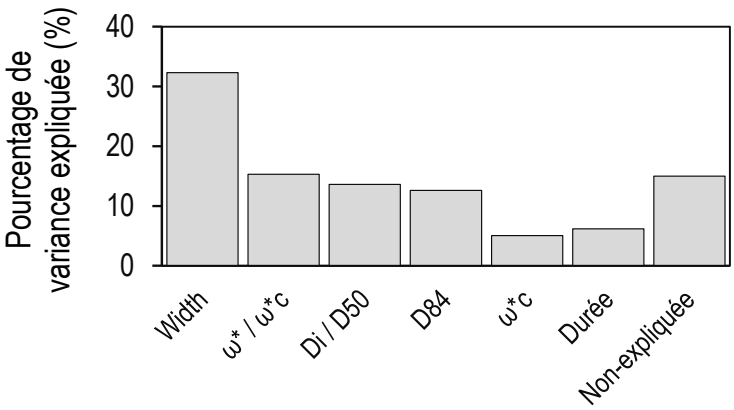


Figure 10. Pourcentage de variance expliquée par les différentes variables dans un jeu de données de traçage sédimentaire. Le jeu de données est composé des études de Gintz et al. (1996); Lamarre and Roy (2008); Liébault et al. (2012); Nathan Bradley and Tucker (2012); Dell'Agnese et al. (2015); Papangelakis and Hassan (2016), extrait de Vázquez-Tarrío and Batalla (2019).

Lorsqu'on intègre cet effet de taille, les données de la littérature s'agrègent en tendances différentes en fonction du « style » morphologique (Figure 11). Il a ainsi été mis en évidence un autre contrôle sur le déplacement des traceurs : la diversité morphologique et les macro-formes du chenal qui guident les écoulements et le flux de sédiments.

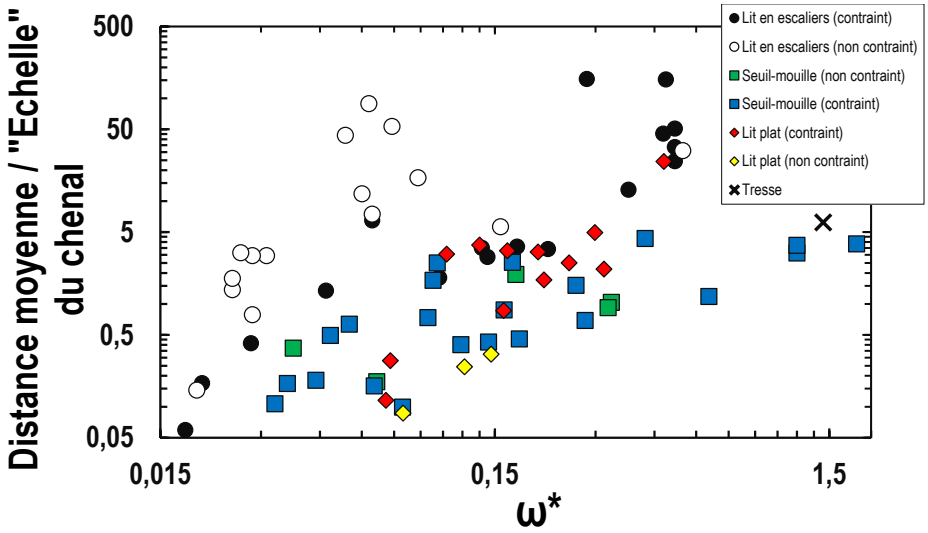


Figure 11. Distances moyennes de transport normalisées par l'unité morphologique du chenalen fonction de la puissance fluviale adimensionnelle. L'unité morphologique du chenal est : la distance entre deux seuils dans les rivières à seuils/mouilles ; la distance moyenne entre cascades dans les rivières en escaliers ; la largeur du chenal dans les rivières à lit plat.

Bien que les facteurs influençant les distances de déplacement des galets soient complexes et interdépendants à l'échelle du site d'étude, c'est le contrôle hydraulique (pic de crue + durée) qui reste dominant, avec dans un second temps la morphologie du chenal (taille, macro-formes, rugosité du lit). C'est pourquoi un nombre important de suivis RFID, de sites et d'environnements sont essentiels à l'affinage des modèles de transport sédimentaire.

7. Conclusion : Intérêts de la régionalisation, contraintes de la bancarisation

Les modèles de prédiction de distances de transport nécessitent des données de qualité et bien documentées. Au cours de suivis long terme, cela permet de calibrer puis mettre à jour un modèle spécifique au site. A plus large échelle, les données de plusieurs sites permettent de mieux explorer l'influence des différents contrôles et de produire des estimations plus robustes. En France, de nombreux suivis de traçage ont déjà été réalisés ces quinze dernières années, dans des environnements et des conditions hydro-sédimentaires variés. Ces données représentent un haut potentiel pour faire avancer notre connaissance du transport solide par charriage. Encore faut-il que ces observations et ces mesures soient référencées et mutualisées d'une façon systématique, homogène et précise.

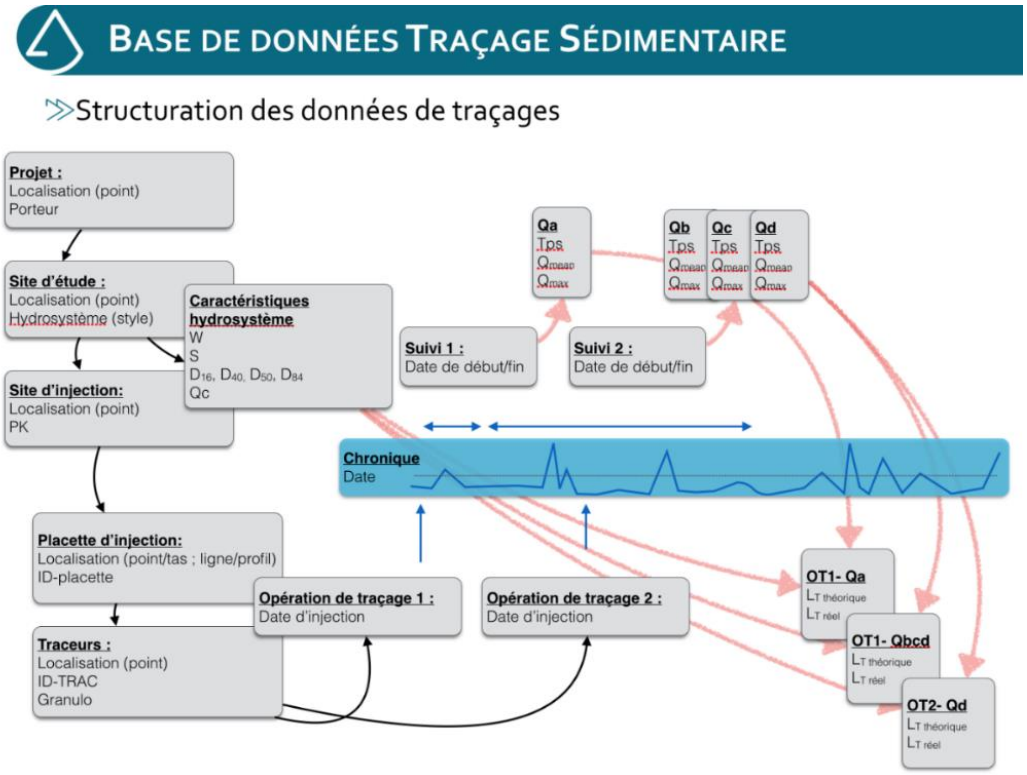


Figure 12. Principes pour la structuration d'une base de données mutualisée des suivis RFID.

Les données nécessaires pour une bancarisation rigoureuse des données sont :

- les caractéristiques des sites d'étude (largeur du chenal, pente, granulométrie du lit, Qc),
- la description granulométrique des galets tracés (axes a, b et c, masse),
- les méthodes de prospection pour chacun des suivis (terrestre/embarqué, type d'antenne, type de GPS, type de prospection),
- les durées de prospection,
- le nombre d'opérateurs.

Pour le traitement des données, une harmonisation des pratiques est également souhaitable avec :

- le calcul des erreurs de géo-positionnement des traceurs,
- le calcul du taux de traceurs mobiles,
- les calculs des surfaces réellement prospectées (avec enregistrement des traces GPS de prospection - Figure 13)
- les calculs de distances de déplacement en ml (sur un référentiel commun, par exemple en utilisant la couche Cours d'eau de la BD Carthage, PK=0 aux exutoires).

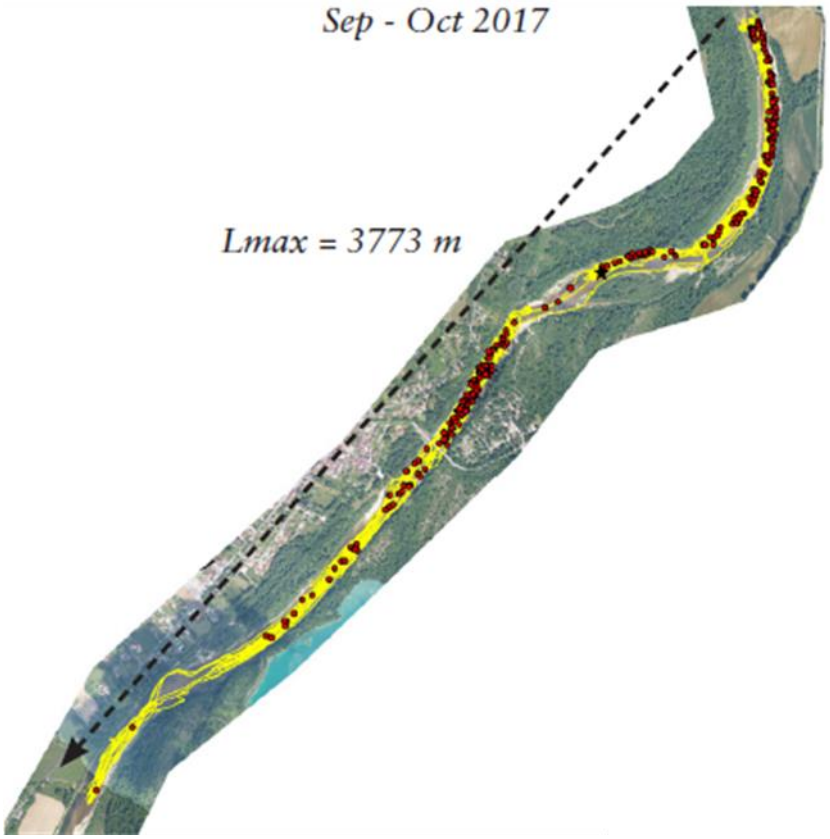


Figure 13. Positions et distance de déplacement de traceurs RFID relevés au cours d'un suivi sur la basse vallée de l'Ain, avec enregistrement des traces GPS de prospection (Source : Muhar et al., 2019).

7. Références bibliographiques

Arnaud F, Piégay H, Béal D, Collery P, Vaudor L, Rollet A-J. 2017. Monitoring gravel augmentation in a large regulated river and implications for process-based restoration. Earth Surface Processes and Landforms **42** : 2147–2166. DOI: 10.1002/esp.4161

Arnaud F, Piégay H, Vaudor L, Bultingaire L, Fantino G. 2015. Technical specifications of low-frequency radio identification bedload tracking from field experiments: Differences in antennas, tags and operators. Geomorphology **238** : 37–46. DOI: 10.1016/j.geomorph.2015.02.029

Bagnold RA. 1966. An approach to the sediment transport problem from general physics . USGS Numbered Series. U. S. Govt. Print. Off., [online] Available from: http://pubs.er.usgs.gov/publication/pp422I (Accessed 21 November 2018)

Bathurst JC, Graf WH, Cao HH. 1987. Bed load discharge equations for steep mountain rivers. In Sediment Transport in Gravel-Bed Rivers , Thorne CR, Bathurst JC, and Hey RD (eds). Hoboken, NJ, USA; 453–492.

Beechie TJ. 2001. Empirical predictors of annual bed load travel distance, and implications for salmonid habitat restoration and protection. Earth Surface Processes and Landforms **26** : 1025–1034. DOI: 10.1002/esp.251

Cassel M. 2017. Caractérisation des particules dans les lits à galets : expérimentation, développements, méthodologiques et applications in situ . Lyon [online] Available from: http://www.theses.fr/2017LYSEN087 (Accessed 4 May 2018)

Cassel M, Dépret T, Piégay H. 2017. Assessment of a new solution for tracking pebbles in rivers based on active RFID: a new solution for tracking pebbles in rivers based on active RFID. Earth Surface Processes and Landforms **42** : 1938–1951. DOI: 10.1002/esp.4152

Cassel M, Piégay H, Fantino G, Lejot J, Bultingaire L, Michel K, Perret F. 2020. Comparison of ground-based and UAV a-UHF artificial tracer mobility monitoring methods on a braided river. Earth Surface Processes and Landforms : esp.4777. DOI: 10.1002/esp.4777

Cassel M, Piégay H, Lavé J. 2016. Effects of transport and insertion of radio frequency identification (RFID) transponders on resistance and shape of natural and synthetic pebbles: applications for riverine and coastal bedload tracking: Transport and Rfid-Insertion Effects on the Fragility of Pebbles. Earth Surface Processes and Landforms DOI: 10.1002/esp.3989 [online] Available from: http://doi.wiley.com/10.1002/esp.3989 (Accessed 4 August 2016)

Chapuis M, Bright CJ, Hufnagel J, MacVicar B. 2014. Detection ranges and uncertainty of passive Radio Frequency Identification (RFID) transponders for sediment tracking in gravel rivers and coastal environments. Earth Surface Processes and Landforms **39** : 2109–2120. DOI: 10.1002/esp.3620

Dell'Agnese A, Brardinoni F, Toro M, Mao L, Engel M, Comiti F. 2015. Bedload transport in a formerly glaciated mountain catchment constrained by particle tracking. Earth Surface Dynamics **3** : 527–542. DOI: 10.5194/esurf-3-527-2015

Gintz D, Hassan MA, Schmidt K-H. 1996. Frequency and Magnitude of Bedload Transport in a Mountain River. Earth Surface Processes and Landforms **21** : 433–445. DOI: 10.1002/(SICI)1096-9837(199605)21:5<433::AID-ESP580>3.0.CO;2-P

Kloesch M, Tritthart M, Liedermann M, Habersack H. 2008. Sediment input and selfinitiated riverbank erosion to mitigate channel incision: methods for monitoring the effectiveness of a new management technique. 505–512 pp. [online] Available from: http://www.riverfoundation.org.au/admin/multipart_forms/mpf__resource_309_8___Reference_06_DRAMURCI_Gosdorf_SedidmentTransport_ECRR.pdf (Accessed 5 May 2015)

Lamarre H, Roy AG. 2008. The role of morphology on the displacement of particles in a step–pool river system. Geomorphology **99** : 270–279. DOI: 10.1016/j.geomorph.2007.11.005

Liébault F, Bellot H, Chapuis M, Klotz S, Deschâtres M. 2012. Bedload tracing in a high-sediment-load mountain stream: bedload tracing in a high-sediment-load mountain stream. Earth Surface Processes and Landforms **37** : 385–399. DOI: 10.1002/esp.2245

Nathan Bradley D, Tucker GE. 2012. Measuring gravel transport and dispersion in a mountain river using passive radio tracers. Earth Surface Processes and Landforms **37** : 1034–1045. DOI: 10.1002/esp.3223

Papangelakis E, Hassan MA. 2016. The role of channel morphology on the mobility and dispersion of bed sediment in a small gravel-bed stream. Earth Surface Processes and Landforms **41** : 2191–2206. DOI: 10.1002/esp.3980

Recking A, Etna U. 2008. Evaluation des formules de transport solide en rivière avec prise en compte de l'échelle temporelle. : 41.

Schoklitsch A. 1962. Handbuch des Wasserbaues: Zweiter Band . 3rd ed. Springer-Verlag: Wien [online] Available from: https://www.springer.com/cn/book/9783709180891 (Accessed 3 October 2019)

Vázquez-Tarrío D, Batalla RJ. 2019. Assessing Controls on the Displacement of Tracers in Gravel-Bed Rivers. Water **11** : 1598. DOI: 10.3390/w11081598

Vázquez-Tarrío D, Recking A, Liébault F, Tal M, Menéndez-Duarte R. 2018. Particle transport in gravel-bed rivers: revisiting passive tracer data: Particle transport in gravel-bed rivers. Earth Surface Processes and Landforms DOI: 10.1002/esp.4484 [online] Available from: http://doi.wiley.com/10.1002/esp.4484 (Accessed 31 August 2018)

Annexes

Table A1: Different objectives of studies using sediment tracking methods	
Main objective	**References**
Studying particle transport paths	Thorne and Lewin(1979), Church and Hassan(1992), Habersack (2001), Ferguson et al. (2002), Milan (2013), Chapuis et al. (2015)
Investigating effects of particle mass and shape on particle mobility	Schmidt and Gintz (1995), Sear et al. (2008)
Understanding bed form or channel morphology dynamics	Lamarre and Roy (2008) ; Goode and Wohl (2010) ; Papangelakis and Hassan (2016) ; Ferguson et al. (2017))
Determining spatial and temporal variability of bed mobility	Wilcock et al., 1996; Ferguson and Hoey, 2002; McNamara and Borden, 2004; Rovira and Kondolf, 2008; Camenen et al., 2010; Mao and Surian, 2010; May and Pryor, 2014; Olinde and Johnson, 2015; Mao et al., 2016a)
Quantifying bedload fluxes	Wilcock, 1997; Haschenburger and Church, 1998; Liébault and Laronne, 2008; Vázquez-Tarrío and Menéndez-Duarte, 2014, 2015; Mao et al., 2016b)
Establishing travel distance distributions	Hassan et al. (1991); Pyrce and Ashmore (2003); Lamarre et al. (2005); Liébault et al. (2012); Nathan Bradley and Tucker (2012); Hassan et al. (2013); May and Pryor (2014); Klösch and Habersack (2018)
Monitoring the effectiveness of restoration measures	Kloesch et al. (2008), MacVicar et al. (2015), Arnaud et al. (2017), Gilet et al. (2018)
Calibrating numerical models, including particle paths	Liedermann et al. (2013), Lauer et al. (2016), Liedermann et al. (2018),Tritthart et al., (2018)
Linking distance of travel with abrasion	Cassel et al. (2018)

Élaboration du guide de travail et contacts :

Rédaction :

Fanny Arnaud, Ingénieure de Recherche, CNRS UMR 5600 EVS - fanny.arnaud@ens-lyon.fr

Mathieu Cassel Post-doc, Laboratoire EVS – UMR 5600 - ENS de Lyon - mathieu.cassel@ens-lyon.fr

Guillaume Fantino Chef de projet à GeoPeka, guillaume.fantino@geopeka.com

Daniel Vazquez Post-doc, Laboratoire EVS – UMR 5600 – CNRS daniel.vazquez_tarrio@ens-lyon.fr

Avec l'aide du GRAIE et la ZABR :

Anne Clémens, directrice de la ZABR et Émilie Mauron, chargée de mission
anne.clemens@zabr.org – emilie.mauron@graie.org

Rencontre organisée en appui sur :

Avec le soutien de