

## SUIVI PAR RFID DE LA MOBILITÉ DES GALETS : RETOUR SUR 10 ANS D'EXPÉRIENCE EN GRANDES RIVIÈRES

Hervé PIÉGAY, Fanny ARNAUD, Mathieu CASSEL, Thomas DÉPRET,  
Adrien ALBER, Kristell MICHEL, Anne-Julia ROLLET, Lise VAUDOR

### Résumé

L'objectif de la présente contribution est de synthétiser les résultats acquis au cours des 10 dernières années concernant la mobilité des galets par traceurs RFID (Radio Frequency Identification) passifs et actifs sur plusieurs grands cours d'eau français. Les résultats sont présentés tout d'abord sous un angle thématique, permettant de caractériser la mobilité sédimentaire en fonction des conditions d'injection ou des événements hydrologiques suivis. Des déplacements de plusieurs centaines de mètre sont généralement observés pour les crues courantes. Les sections pavées plus rugueuses que les sections à transport solide actif, enregistrent des distances de parcours des particules significativement plus faibles. Le lien entre la distance parcourue et la taille des particules n'est que rarement observé. Les suivis permettent d'établir des modèles statistiques liant la distance moyenne des particules à la fréquence du débit.

Les résultats sont aussi méthodologiques. Les limites des RFID passifs sont analysées et différentes approches sont proposées pour les repousser. Les acquis sont liés au développement d'antennes, à l'optimisation des protocoles ou encore aux tests de nouvelles techniques de traçage s'appuyant sur des RFID actifs détectables plus facilement (distance galet – antenne de plus de 2 m, absence de collision des signaux permettant de détecter des particules, même voisines). Du fait de leur plus grande taille, ces nouveaux traceurs imposent cependant de concevoir des particules artificielles au sein desquelles ils sont insérés.

### Mots-clés

transport solide, mobilité de la charge de fond, protocole de suivi, PIT tags

### Abstract

*The aim of this paper is to summarize the results achieved over the last 10 years on several large French rivers concerning the mobility monitoring of pebbles equipped with passive and active RFID (Radio Frequency Identification). The results are presented first from a thematic perspective, to characterize the sediment mobility based on injection conditions or according to hydrological events. Pebble movements of several hundred meters are generally observed for current floods. In the paved reaches which are rougher than the active transport reaches, observed distances of pebbles are significantly lower. The relationship between distance and particle size is rarely established. Monitoring provides statistical models linking pebble average distance and discharge frequency.*

*The results are also methodological. The limits of passive RFID use are explored and different approaches are proposed to improve surveys. Advances are related to development of antennas, monitoring protocol optimization, and test of new tracking techniques based on active RFID. These new tracers are easier to detect than passive ones. Detection distance reaches more than 2 m and there is no signal collision between equipped particles. But these new RFID require the design of artificial particles within which they are inserted.*

### Keywords

*Bedload transport, pebble mobility, monitoring framework, PIT tags*

## I. INTRODUCTION

La quantification du transport solide est un enjeu important dans le domaine de la géomorphologie et de l'ingénierie fluviales, dans la mesure où ce processus contrôle la géométrie du lit et son évolution temporelle (Schumm 1977). L'approche repose sur des lois physiques intégrant à la fois la géométrie

du cours d'eau, qui régit l'écoulement, et la taille des particules, qui influence la résistance de la charge solide à la traction (Recking *et al.*, 2012). Beaucoup de travaux ont été réalisés dans des chenaux expérimentaux et les capacités prédictives des lois de transport solide peuvent encore être améliorées afin d'être appliquées en conditions réelles (Gomez et Church 1989 ; Recking 2010 ;

Nelson *et al.*, 2016). Des mesures *in situ* permettant de valider ou d'étalonner ces lois, voire même simplement de mesurer le transport solide réel en essayant de réduire les incertitudes associées ou de comprendre les facteurs en jeu, sont ainsi conduites (Bunte *et al.*, 2008 ; Liébault et Laronne 2008). Ces mesures sont cependant difficiles à réaliser et exigent souvent des efforts importants sur le terrain, ou des équipements *ad hoc* (Garcia *et al.*, 2000 ; Rickenmann *et al.*, 2014).

C'est dans ce cadre que le suivi du déplacement des galets par traçage est souvent préconisé. Il s'agit d'un champ de recherche important qui renaît ces dernières années grâce à des avancées technologiques. Le traçage sédimentaire est réalisé avec différentes techniques qu'il s'agisse de particules peintes, aimantées, radioactives, ou encore équipées de radio-émetteurs, permettant notamment d'assurer un suivi à l'échelle de l'événement hydrologique (Sear *et al.*, 2000 ; Hassan et Roy, 2016). Associées à la technique des chaînes d'érosion, les distances de transport des particules reconstituées *via* les méthodes de traçage permettent de quantifier le transport solide dans une section fluviale (Liébault et Laronne, 2008). Depuis les années 2000, une nouvelle technique de traçage utilisant la technologie RFID (Radio Frequency Identification) émerge. Les transpondeurs passifs intégrés, fonctionnant par radio-fréquence (PIT tags basse fréquence), ont d'abord été utilisés pour suivre la mobilité des poissons (Armstrong *et al.*, 1996). Cette technique a ensuite été transposée à la mesure du mouvement des galets. Appliquée pour la première fois sur un petit cours d'eau canadien (Lamarre *et al.*, 2005), elle s'est ensuite largement diffusée en France. Les premiers travaux ont été réalisés par Rollet (2007) sur l'Ain, suivis par ceux conduits sur l'Arc (Camenen *et al.*, 2010), le Rhin (Arnaud, 2012), le Bouinenc (Liébault *et al.*, 2012), le Cher (Dépret, 2014), la Durance (Chapuis *et al.*, 2015), etc. Les PIT tags sont également utilisés sur des cours d'eau en Belgique (Houbrechts *et al.*, 2012, 2015 ; Petit *et al.*, 2015) (Tableau 1). Si les traçages s'appuyant sur des RFID passifs basse fréquence ont des contraintes et des limites qui sont aujourd'hui de mieux en mieux identifiées, le domaine des RFID actifs Ultra Haute Fréquence (UHF) (Cassel *et al.*, soumis) offre de nouvelles perspectives, nécessitant de nouveaux investissements pour évaluer leur domaine d'application et leur pertinence (Tableau 2).

Référence	Site d'étude	Largeur de bande active (m)	$Q_{galets}$ (m <sup>3</sup> /s)	$D_{50}$ (mm)	$D_{90}$ (mm)	$n$ tags injectés	Taux de retour (%)	$Q_{max}$ (m <sup>3</sup> /s)	Distance max de transport (m)
Lamarre <i>et al.</i> (2005)	Moras Creek (Canada)	7	3,8	70	42-252	204-362	96-87	3,5	-
Lamarre et Roy (2008)	Spruce Creek (Canada)	6	2	90	86	196	92-57	3,4	2-8*
Camenen <i>et al.</i> (2010)	Arc (France)	70	-	-	40-300 <sup>a</sup>	300	80-12	500	> 100
Bradley et Tucker (2012)	Halfmoon Creek (USA)	10	5,7	60	60	893	98-93	14,5	835
Liébault <i>et al.</i> (2012)	Bouinenc (France)	24	2,5*	20	53	451	89-45	41	> 2229
Gaerman (2013)	Grass Valley Creek (USA)	8	2,8*	37	60	153-402	69-49	12,7	46
Phillips <i>et al.</i> (2013)	Mameyes River (Puerto Rico)	20	-	120	120-130	150	93-62-100-95	2,75*	- 1300
Dépret (2014)	Cher (France)	26	102-31-58*	25,6	39,5-37,7	552-641	85-82	84	11,2-17,9
Chapuis <i>et al.</i> (2015)	Durance (France)	290	170*	40	49	232	40	1156	668
Schneider <i>et al.</i> (2014)	Erlenbach (Suisse)	3,5	0,48*	64	90	303-733	77-1	9,3	6,9-143*
Houbrechts <i>et al.</i> (2012, 2015)	Asne (Belgique)	14	23,8	92	80	-	97-62	48	897
MacVicar <i>et al.</i> (2015)	Wilket Creek (Canada)	11	1*	58 (sans corrélation) 115 (sans résidu)	50-70	143-300	92-89-88-87	1,13*	4,2-29 <sup>b</sup> 3-55 <sup>c</sup>
Petit <i>et al.</i> (2015)	Eau blanche (Belgique)	-	29	19	28	100	77	40,6	-
Rollet (2007)	Ain-Gévieux (France)	90	350*	46	79-60	400 (banca) 428 (berge)	37-11-20-10	1060	- 2800
Rollet (2007)	Ain-Varambon (France)	75	350*	> 60	99	150	25-23	1060	- 480
Piégay <i>et al.</i> (2016)	Ain-Terre Soldat (France)	75	350*	> 60	41	1044	47-23	904	2100
Arnaud (2012)	Rhin (France-Allemagne)	100	550*	> 60	71	1489	43-11	2480	3180

\* Débit critique de mise en mouvement. <sup>a</sup> Hauteur d'eau à plein bord. <sup>b</sup> Gamme de valeurs d'axe b. <sup>c</sup> Hauteur d'eau en crue. <sup>d</sup> Distance moyenne de transport. <sup>e</sup> Distance moyenne de transport dans la classe qui inclut le  $D_{50}$ .

**Tableau 1.** Synthèse des suivis RFID répertoriés dans la littérature. Les lignes grisées indiquent les grands cours d'eau

	Basses Fréquences	Hautes Fréquences	Ultra-Hautes Fréquences	Micro-Ondes
Gammes de fréquences	100 - 500 KHz	10 - 15 MHz	433- 960 MHz	1 - ... GHz
Fréquences les plus utilisées	125 KHz 134,2 KHz	13,56 MHz	433 MHz 860-960 MHz	2,45 GHz
Alimentation du tag en énergie	Passif	Passif/Actif	Passif/Actif	Passif/Actif
Portée	< 1 m	= 1 m	= 2 - 90 m	= 10 m
Pénétration du signal (dans des milieux autres que l'air)	+	-	--	---
Vitesse de lecture/capacité de lecture des tags groupés	--	-	+	++
Exemple de packaging				

**Tableau 2.** Caractéristiques générales des RFID actifs et passifs utilisés pour le suivi des galets

L'objectif de cette contribution est de faire la synthèse des acquis scientifiques de l'équipe lyonnaise de l'UMR 5600 EVS (Environnement - Ville - Société) dans ce domaine au cours des dix dernières années. Nous proposons tout d'abord une synthèse des avancées thématiques dans l'utilisation des RFID passifs basse fréquence pour le suivi de la mobilité des galets. Les sites d'étude sont des rivières dont le chenal peut atteindre plusieurs mètres de profondeur pour une largeur au miroir supérieure à 50 mètres. Nous présentons dans un second temps plusieurs démarches expérimentales qui ont permis d'optimiser l'utilisation des traceurs passifs. Enfin, nous abordons quelques perspectives relatives à la mise en œuvre de nouvelles techniques RFID s'appuyant sur des traceurs actifs UHF.

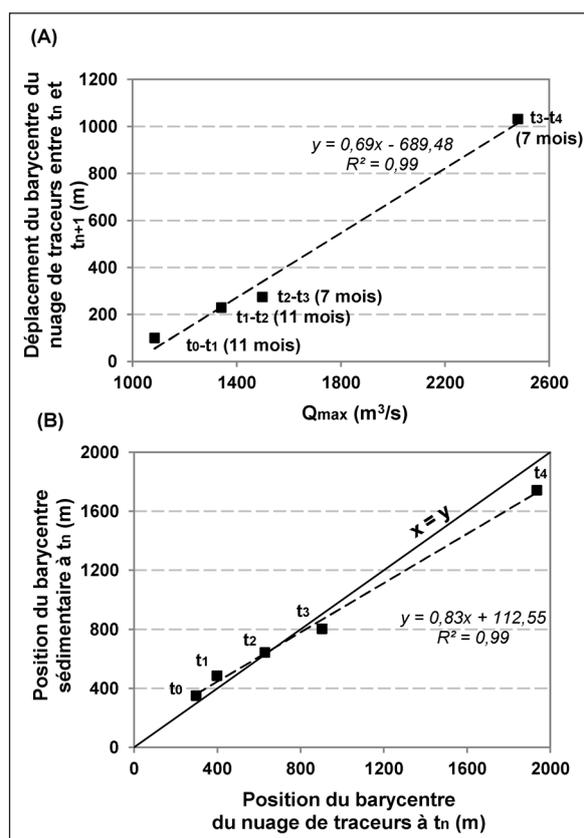
## II. AVANCÉES THÉMATIQUES POUR L'UTILISATION DES RFID PASSIFS EN GRANDES RIVIÈRES

Les travaux ont été conduits sur l'Ain à l'aval de Pont d'Ain (~ 20 km en amont de la confluence avec le Rhône) et sur le Rhin à l'aval du barrage de Kembs (~10 km en amont de Bâle). Cinq injections différentes de PIT tags et 12 suivis ont été effectués sur ces deux sites entre 2005 et 2015. Il a été possible de montrer que le déplacement annuel des particules sur l'Ain ( $D_{50} = 41$  mm) et le Rhin ( $D_{50} = 71$  mm) est en moyenne de 390 m (écart-type = 400 m) et 270 m (écart-type = 220 m). L'effet d'une crue d'occurrence 15 ans sur la mobilité des particules du Rhin a également pu être observé (déplacement moyen = 1020 m ; écart-type = 490 m).

L'utilisation de ces traceurs RFID permet de mesurer des distances de déplacement des galets dans des contextes particuliers de restauration sédimentaire, où une charge est artificiellement injectée dans un chenal. Les suivis permettent également de comparer des situations contrastées en matière de transport solide afin de comprendre la dynamique des sédiments et les facteurs qui la contrôlent.

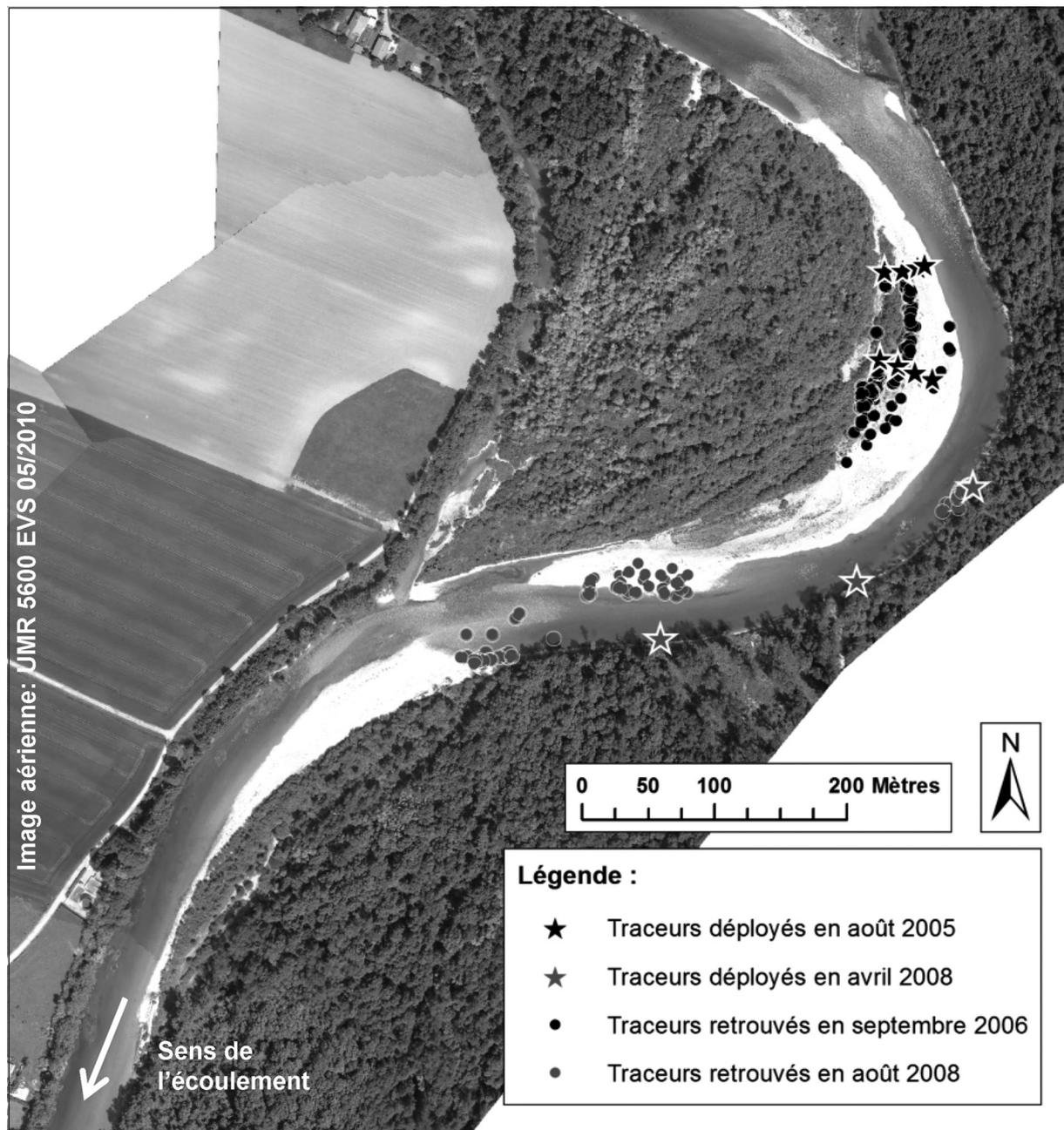
Le comportement du chenal a pu être étudié lors de recharges sédimentaires sur les deux cours d'eau. Plus de 20 000 m<sup>3</sup> de graviers ont été introduits dans le chenal du Rhin en novembre 2010 (Arnaud, 2012). À travers quatre périodes de suivi, il a été possible de montrer quelles étaient les distances de mobilité des traceurs en fonction de l'intensité et de la durée des événements hydrologiques. Un premier modèle empirique a été établi, permettant de prédire la distance moyenne de déplacement en fonction des débits (Figure 1A), et de mettre en relation le transport solide avec cette même distance moyenne (Figure 1B) (Arnaud *et al.*, soumis).

Des suivis RFID ont également permis d'observer les échanges sédimentaires entre le lit mineur et le lit majeur. Sur l'Ain, les travaux de Rollet (2007) ont montré que les traceurs déployés sur un banc convexe ( $n = 400$ ) n'ont pas été redistribués dans le chenal lors des événements de crue, mais ont été piégés sur le banc qui s'est végétalisé ; celui-ci est donc bien un site de stockage piégeant les particules pour plusieurs décennies. Inversement, les traceurs déployés sur la berge concave ( $n = 428$ ) en voie d'érosion (Piégay *et al.*, 2016) ont



**Figure 1.** Mobilité des particules du Rhin : (A) Déplacement du barycentre du nuage de traceurs en fonction des débits de crue, et (B) Lien entre la position du barycentre sédimentaire (déduit de profils en travers topo-bathymétriques) et la position du barycentre du nuage de traceurs.  $t_0, t_1, t_2, t_3$  et  $t_4$  correspondent aux différentes campagnes de suivi.  $t_0$  donne les positions initiales des barycentres du nuage de traceurs et du dépôt sédimentaire injecté sur une section fluviale de 600 m de long.  $t_n-t_{n+1}$  correspondent aux suivis consécutifs des traceurs une fois le dépôt mis en mouvement

été transportés dans la zone mobile du chenal dès la première crue et ont ensuite migré sur plusieurs kilomètres en aval, une partie seulement d'entre eux venant effectivement alimenter le banc de galets immédiatement à l'aval (Figures 2 et 3A). Les traceurs RFID peuvent également être utilisés de manière expérimentale pour comparer des tronçons qui ont des caractéristiques de transport différentes. Sur l'Ain toujours, un secteur considéré comme déficitaire en sédiments et largement pavé, et un secteur où le transport solide est actif et où il n'y a pas de déficit sédimentaire (Rollet *et al.*, 2013) ont été comparés. Il apparaît que les distances de transport pour des événements hydrologiques comparables sont très différentes. Dans le cas du secteur pavé, une crue dont la période de retour est de deux ans induit des distances de

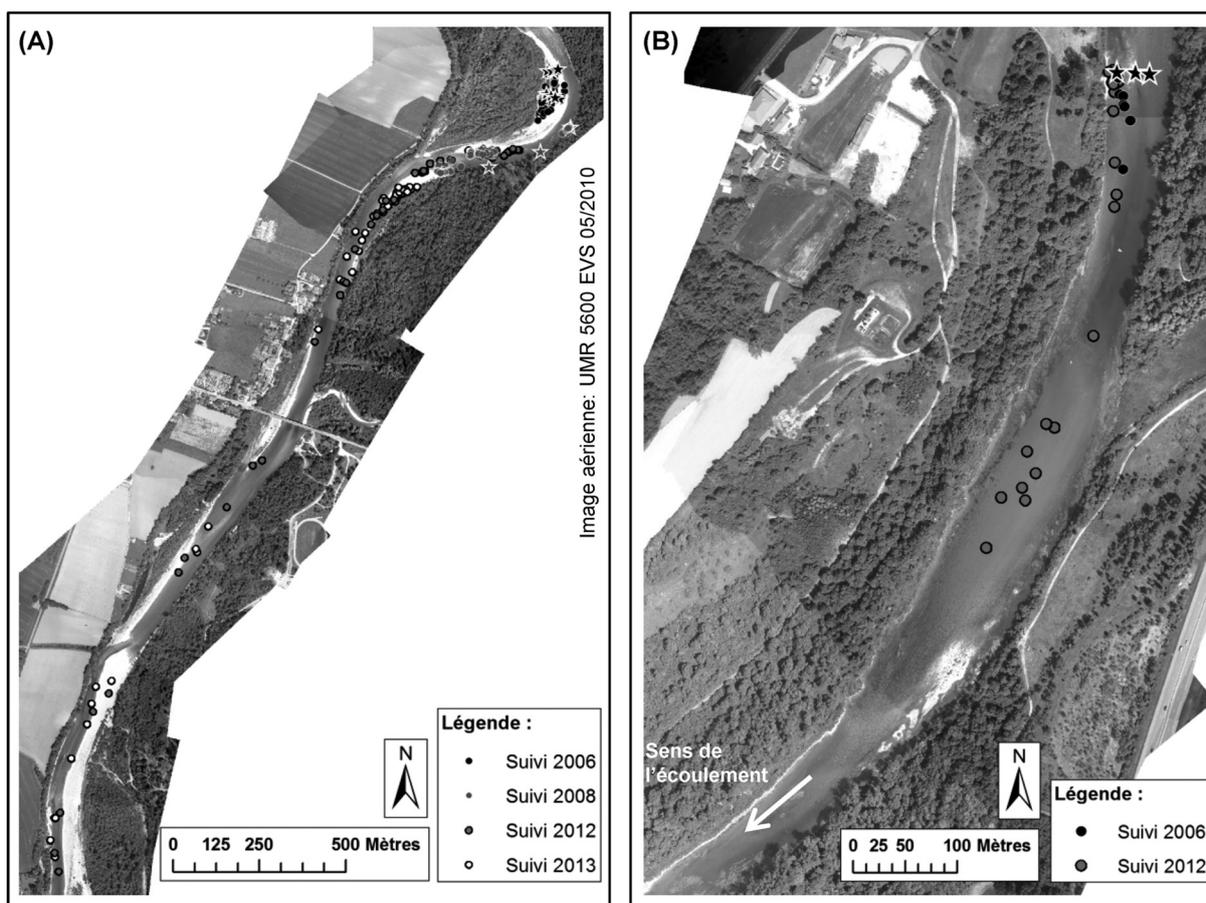


**Figure 2.** Suivi RFID de l'Ain à Gévrioux. Les traceurs représentés en noir ont été déployés sur le banc de convexité en août 2005 et la recherche a été effectuée en septembre 2006. Les traceurs représentés en gris ont été déployés sur la berge concave en avril 2008 et recherchés en août 2008. De nouveaux suivis ont été réalisés en 2012 et 2013 et aucun traceur noir n'a été observé à l'aval

déplacement de 46 m dans la veine de courant la plus active avec une distance maximale de 96 m ( $n = 150$  ;  $D_{50}$  des traceurs = 99 mm). Dans le second cas, les déplacements atteignent 70-80 m dans la veine de courant la plus active avec une distance maximale de 153 m ( $n = 400$  ;  $D_{50}$  des traceurs = 79 mm) (Figure 3A et 3B). En s'appuyant sur les expérimentations en canal conduites sur le Rhin (Koll *et al.*, 2010), il est probable que cette différence de transport soit liée

au fait que la charge en transit sur la section pavée est moins mobile car elle est pour partie piégée dans les interstices du pavage, alors que dans la section mobile l'ensemble de la masse sédimentaire est en transit, aucun lien entre taille des particules et distance mobilisée n'étant observé.

L'effet de la taille des particules sur leur mobilité a en effet fait l'objet d'une attention particulière. Dans la plupart des cas, ce lien n'est pas observé



**Figure 3.** Synthèse des suivis RFID de l'Ain : (A) Gévrieux-sector mobile, (B) Varambon-sector déficitaire et pavé. Localisation des traceurs retrouvés entre 2006 et 2013

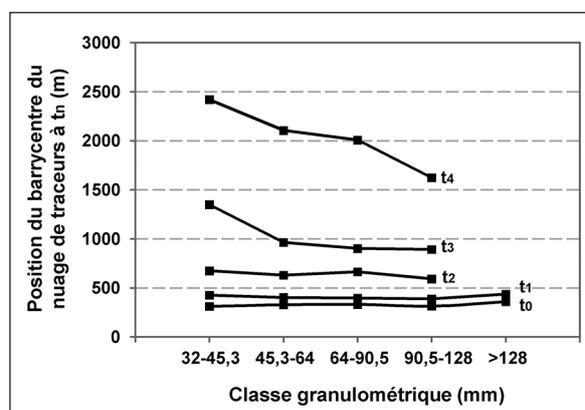
car le transport s'opère par charriage et met en mouvement tout le lit (Wilcock, 1997). Sur le Rhin, où le nombre de traceurs injectés était important ( $n = 1489$ ), il a ainsi été possible de constater qu'il n'existe pas de lien entre la granulométrie et la distance de mobilité lors des premiers suivis. Ce lien est en revanche observé lors du dernier suivi ( $t_4$ , Figure 4), ce qui pourrait souligner que le transport solide devient plus sélectif. Le processus de diffusion de la charge étant alors bien avancé, un transport solide partiel (Church et Hassan 1992) pourrait indiquer qu'un pavage est à nouveau en formation (Figure 4). Ces observations tendent à montrer qu'une telle action de recharge sédimentaire doit se concevoir de manière répétée si l'on veut maintenir durablement les habitats qui ont été créés.

### III. RETOURS D'EXPÉRIENCE DES SUIVIS RFID EN GRANDES RIVIÈRES

Ces suivis RFID de la charge de fond en grand cours d'eau ont permis de mettre en évidence un

certain nombre de limites quant à l'utilisation de cette technique, la principale étant qu'il est très difficile d'obtenir des taux de retour importants. En effet les valeurs sont de 10 à 47 % pour l'ensemble des suivis réalisés.

Les faibles taux de retour sont expliqués par le problème de chevauchement des signaux radio, par



**Figure 4.** Mobilité des particules du Rhin en fonction de la classe de taille et de la date de suivi ( $t_0$ ) à  $t_4$ , voir Figure 1)

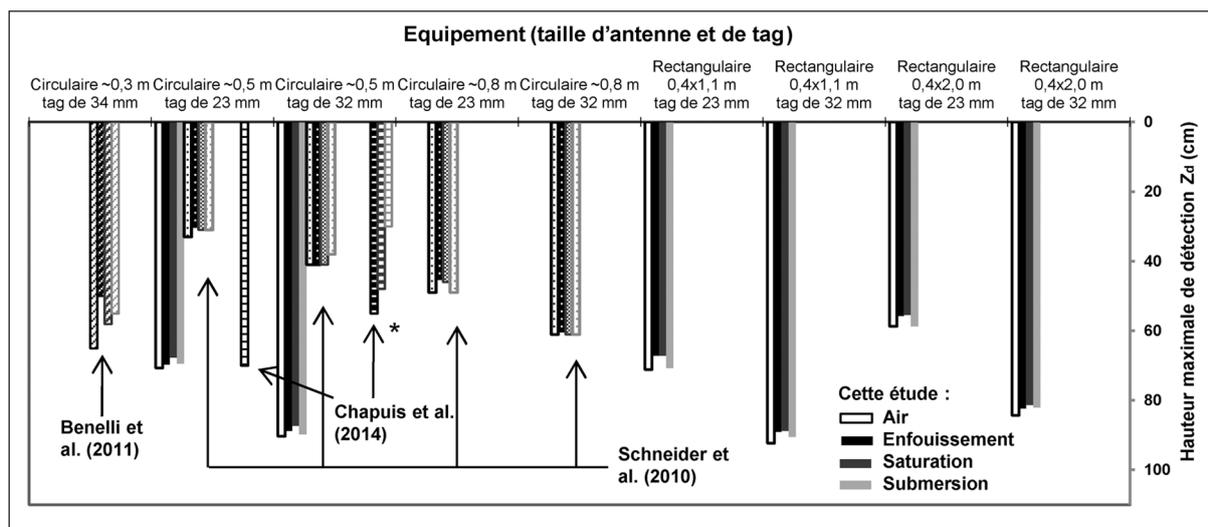
l'effort de prospection et sans doute également par l'enfouissement et la détérioration des traceurs. En effet le système RFID basse fréquence détecte aléatoirement plusieurs traceurs placés dans la zone de détection de l'antenne. Ainsi dans le cas de transpondeurs disposés en amas et non mis en mouvement, beaucoup ne seront pas détectés. Augmenter le taux de retour nécessite dès lors de passer plusieurs fois au même endroit et conduit à renforcer l'effort de prospection lorsque la densité de traceurs est forte. L'effort de terrain est par ailleurs variable d'une campagne à l'autre, fonction de la disponibilité des opérateurs dans la fenêtre temporelle allouée au suivi, et les surfaces à prospecter en grandes rivières sont importantes. Il demeure difficile de savoir quelle pression de recherche est nécessaire pour assurer un taux de retour donné. De plus, le transport solide de ces cours d'eau étant parfois actif et les formes mises en mouvement importantes (épaisseurs sédimentaires  $> 1$  m), certains traceurs peuvent être enfouis à une profondeur supérieure à la distance de détec-

tion de l'antenne ( $< 0,7$  m). Enfin il est possible que les particules se cassent lors du transport et que les transpondeurs soient endommagés ou séparés de leur galet hôte (Lamarre *et al.*, 2005).

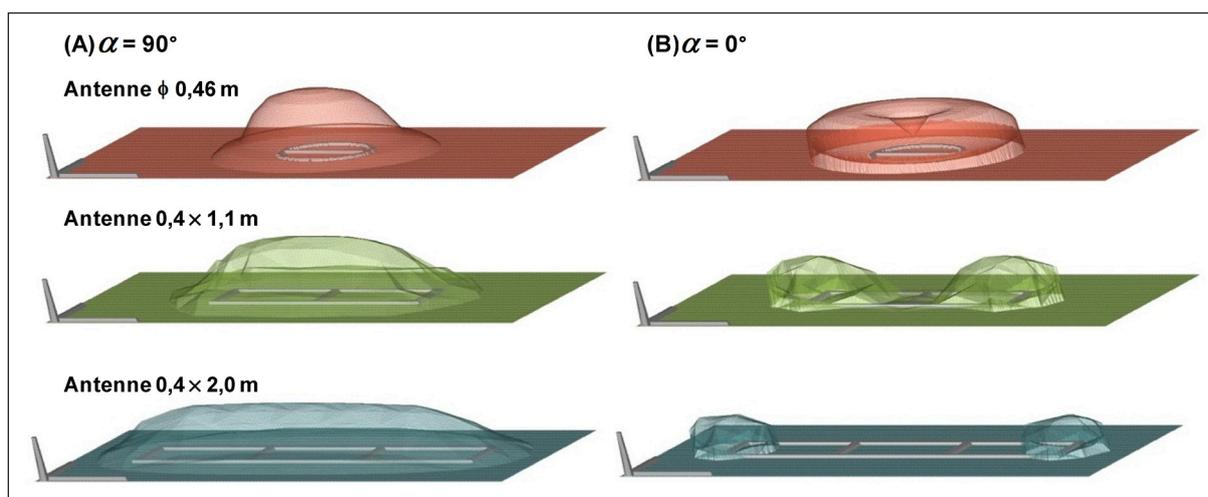
Pour pallier ces difficultés nous avons travaillé avec CIPAM, la société française qui commercialise les traceurs et les antennes de détection, afin de disposer de nouvelles antennes permettant de s'adapter aux conditions de terrain, notamment pour intervenir dans la masse d'eau et minimiser les temps de prospection. Nous avons conçu des antennes de plus grande taille pouvant être tractées derrière un Zodiac (Figure 5). Dans ce cadre, plusieurs types de travaux ont été engagés. Le premier a été de tester les antennes dans différents environnements *in situ* (air, masse sédimentaire, eau ; Figure 6). Le second a été d'analyser le comportement des traceurs en fonction de leur position par rapport au plan de l'antenne de manière à maximiser les distances de détection lors des suivis (Figure 7) (Arnaud *et al.*, 2015). Cela nous a conduit à préconiser que le



Figure 5. Recherche embarquée de traceurs avec une antenne de 0,4 x 1,1 m (source : D. Béal, Vieux Rhin)



**Figure 6.** Maximums de détection mesurés *in situ* par Arnaud *et al.* (2015) et comparaison avec la littérature. Les maximums se réfèrent à un tag vertical ( $\alpha = 90^\circ$ ) détecté au centre de l'antenne (hauteur  $Z_d$ ), excepté \* (Chapuis *et al.*, 2014) qui correspond au 95<sup>ème</sup> percentile de la détection mesurée dans le plan de l'antenne ( $X, Y$ )



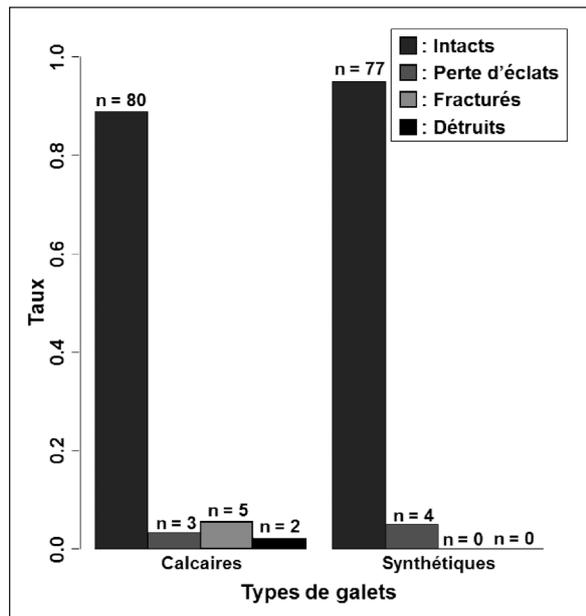
**Figure 7.** Enveloppes 3D de détection dans l'air. Tag de 23 mm de long positionné (A) perpendiculairement et (B) parallèlement au plan de l'antenne. Les enveloppes sont représentées sur un même plan 279 x 165 cm. Les barres d'échelle mesurent 50 cm (d'après Arnaud *et al.*, 2015)

traceur soit inséré suivant l'axe  $c$  de la particule et non pas l'axe  $a$ , compte-tenu de l'agencement préférentiel des particules sur le fond du lit, afin que le traceur soit le plus fréquemment possible en position verticale et ainsi mieux détecté dans le plan de l'antenne qui est tractée sur le fond.

En chenaux expérimentaux, nous avons également testé la résistance des particules durant le transport. Nous avons constaté qu'après 2 km pour les galets calcaires et 3,4 km pour les galets synthétiques, la détérioration des particules équipées était relativement modérée. 91 % des particules synthétiques sont en effet intactes à la fin de l'expérimentation,

les 9 % restantes ayant seulement subi quelques éclats. Aucune n'est fracturée ou détruite. Ce résultat est bien meilleur que celui observé pour les calcaires (Figure 8). Qui plus est, ces dommages avaient le plus souvent pour origine des discontinuités dans la structure lithologique du galet présentes avant les tests. Les résultats montrent aussi que les détériorations ne sont pas liées au rapport entre la longueur du galet équipé (axe  $a$  ou axe  $b$ ) et la longueur du tag (Cassel *et al.*, soumis).

Les taux de retour dans les grands cours d'eau étant faibles, le choix a été fait d'injecter un grand nombre de traceurs de manière à pouvoir en re-



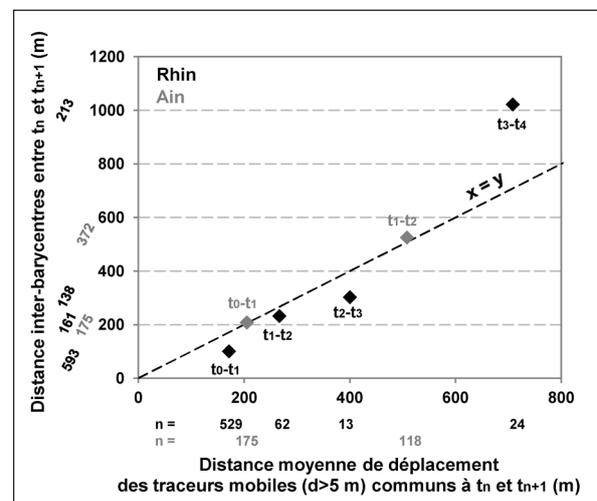
**Figure 8.** Pourcentage de résistance de galets calcaires et synthétiques en canal expérimental après un parcours de 2 km et 3,4 km respectivement (3 heures d'expérimentation avec deux conditions successives de vitesses moyennes : 1.4 et 1.5 m.s-1)

trouver une quantité qui reste importante et qui permet de dessiner des nuages de traceurs consistants. Ainsi avec plusieurs centaines de traceurs retrouvés, les suivis du Rhin et de l'Ain s'appuient sur des échantillons qui, en valeur absolue, sont significatifs par rapport à d'autres travaux, e.g. Lamarre *et al.* (2005) ( $n = 177$  à 196), Liébault *et al.* (2012) ( $n = 203$  à 401), Gaeuman (2013) ( $n = 90$  à 277), Phillips *et al.* (2013) ( $n = 93$  à 150), Chapuis *et al.* (2015) ( $n = 92$ ), ou MacVicar *et al.* (2015) ( $n = 126$  à 267).

La question se pose de savoir quelles métriques utiliser pour analyser les mobilités sédimentaires : doit-on utiliser les trajectoires individuelles des particules pour calculer des distances moyennes ? Cette stratégie impose de travailler à partir d'un faible nombre de traceurs retrouvés, ceux-ci devant être observés à  $t_n$  et  $t_{n+x}$ . Peut-on utiliser sinon les barycentres des différents nuages de traceurs et calculer les distances inter-barycentres ? Cette stratégie présente l'avantage de ne pas dépendre des seuls traceurs communs présents à  $t_n$  et  $t_{n+x}$ . Le calcul des barycentres repose sur l'hypothèse que le nuage de traceurs est représentatif de l'ensemble des traceurs, ce qui est potentiellement le cas si le problème des faibles taux de retour est lié au chevauchement des signaux et à l'effort de prospection. Les suivis du

Rhin et de l'Ain reposant sur un grand nombre de traceurs ont permis de comparer les deux métriques de déplacement, issues des trajectoires individuelles d'une part, et des barycentres des nuages de traceurs d'autre part. Sur l'Ain, les différences sont insignifiantes (Figure 9). Sur le Rhin, il existe des différences, notamment lors de la quatrième campagne de suivi ( $t_3-t_4$ ) où la diffusion du nuage est la plus importante. Il est fort possible ici que l'hypothèse de représentativité des traceurs retrouvés à  $t_4$  versus injectés à  $t_0$  ne soit plus respectée du fait de l'effet granulométrique. Ceci montre que les deux métriques peuvent avoir du sens et qu'il peut être judicieux de les comparer si l'on dispose de suffisamment de particules communes à  $t_n$  et  $t_{n+x}$ .

Lors de nos suivis, nous avons choisi de maximiser le nombre de traceurs injectés à  $t_0$  de manière à retrouver un nombre conséquent de traceurs à  $t_n$ , même si le taux de retour était faible. L'enjeu est maintenant d'essayer d'optimiser les méthodes d'échantillonnage. Dans ce cadre une procédure de ré-échantillonnage (« *bootstrap* ») a été appli-



**Figure 9.** Distance moyenne de déplacement déterminée selon : (en x) les distances individuelles parcourues par les traceurs communs à  $t_n$  et  $t_{n+1}$ , et (en y) les distances inter-barycentres des nuages de traceurs entre  $t_n$  et  $t_{n+1}$ . Une distance de 5 m a été retenue comme valeur seuil de mobilité des traceurs, correspondant à la marge d'erreur associée au protocole de recherche par bateau. Les chiffres noirs (Rhin) et gris (Ain) correspondent au nombre de traceurs retrouvés dans chaque cas. Les deux métriques donnent des résultats similaires sur l'Ain. Cela valide l'utilisation des barycentres dans le cas du Rhin, où le faible nombre de traceurs communs à  $t_n$  et  $t_{n+1}$  limite l'analyse des trajectoires individuelles

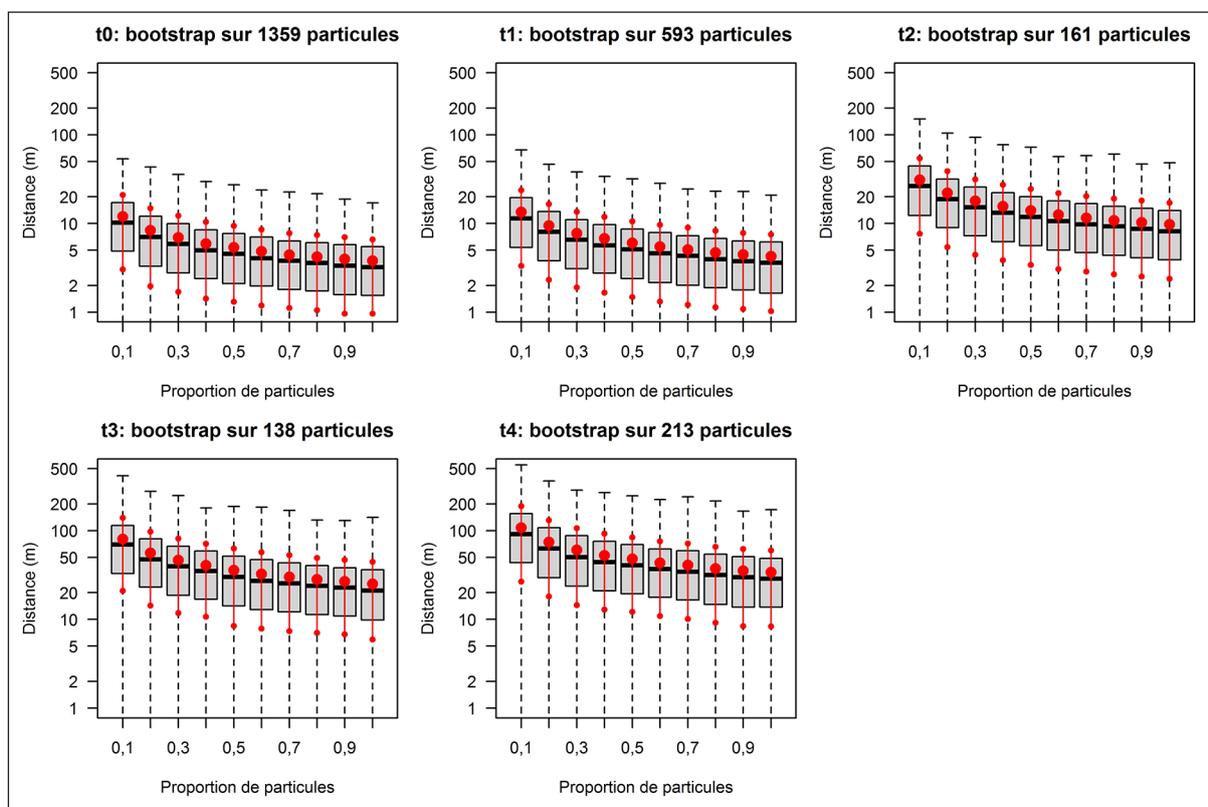
quée sur la population de traceurs retrouvés sur le Rhin à chaque date de prospection, de manière à déterminer une erreur de géopositionnement du nuage de traceurs. L'évolution de l'erreur de géopositionnement des barycentres en fonction de la taille de l'échantillon est présentée sur la Figure 10. En conditions initiales ( $t_0$ ), nous constatons que l'erreur médiane de géopositionnement du barycentre du nuage est de 10 m seulement si 10 % des 1489 particules injectées sont échantillonnées. Ce résultat indique une marge de sécurité satisfaisante pour exploiter les nuages de traceurs, dans le contexte fluvial où la mobilité sédimentaire observée atteint plusieurs centaines de mètres. Nous constatons également que pour un nombre comparable de particules échantillonnées, les erreurs augmentent progressivement au fil des campagnes, en lien avec le processus de diffusion et l'allongement du nuage.

L'investissement à fournir pour la détection, qui devient extrêmement marqué lorsqu'il s'agit de prospecter des superficies importantes avec des densités de traceurs de plus en plus faibles, est une

question très importante qu'il est nécessaire de mieux évaluer. Dans ce cadre, il est essentiel de bien enregistrer la surface prospectée (traces GPS de prospection) et les temps de recherche afin de commencer à ébaucher des abaques permettant de mieux évaluer l'effort nécessaire pour obtenir un certain taux de retour dans un contexte fluvial donné.

#### IV. NOUVELLES PERSPECTIVES EN MATIÈRE D'UTILISATION DES RFID ACTIFS

Un nouveau champ de recherche vise à tester le potentiel de systèmes RFID utilisant des tags actifs Ultra Haute Fréquence pour le suivi de la mobilité des galets. Des premiers travaux ont montré que les UHF passifs, fonctionnant à des fréquences allant de 860 à 960 MHz, ne sont pas très pertinents dans le contexte fluvial car leur détection dans l'eau ne peut pas se faire à plus de 10-20 cm (Tedjini *et al.*, 2015). En revanche les *COIN-HC*, qui sont des traceurs actifs commercialisés



**Figure 10.** Erreur de géopositionnement du barycentre d'un nuage de traceurs en fonction du nombre de particules échantillonnées. Cinq cas sont donnés : ( $t_0$ ) le nuage de traceurs injectés sur la recharge sédimentaire du Rhin et ( $t_1$ ) à ( $t_4$ ) les quatre nuages suivis postérieurement. Le trait noir horizontal représente la médiane et le rectangle gris représente l'interdistance entre le 25ème et le 75ème percentiles ; Le plus gros point gris représente la moyenne et les deux petits, l'écart-type. Toute la distribution est représentée.

par la société ELA Innovation© et qui émettent à 433,92 MHz, ont un potentiel plus intéressant en matière de détection car ils peuvent être repérés à plusieurs mètres sous l'eau (Cassel *et al.*, soumis).

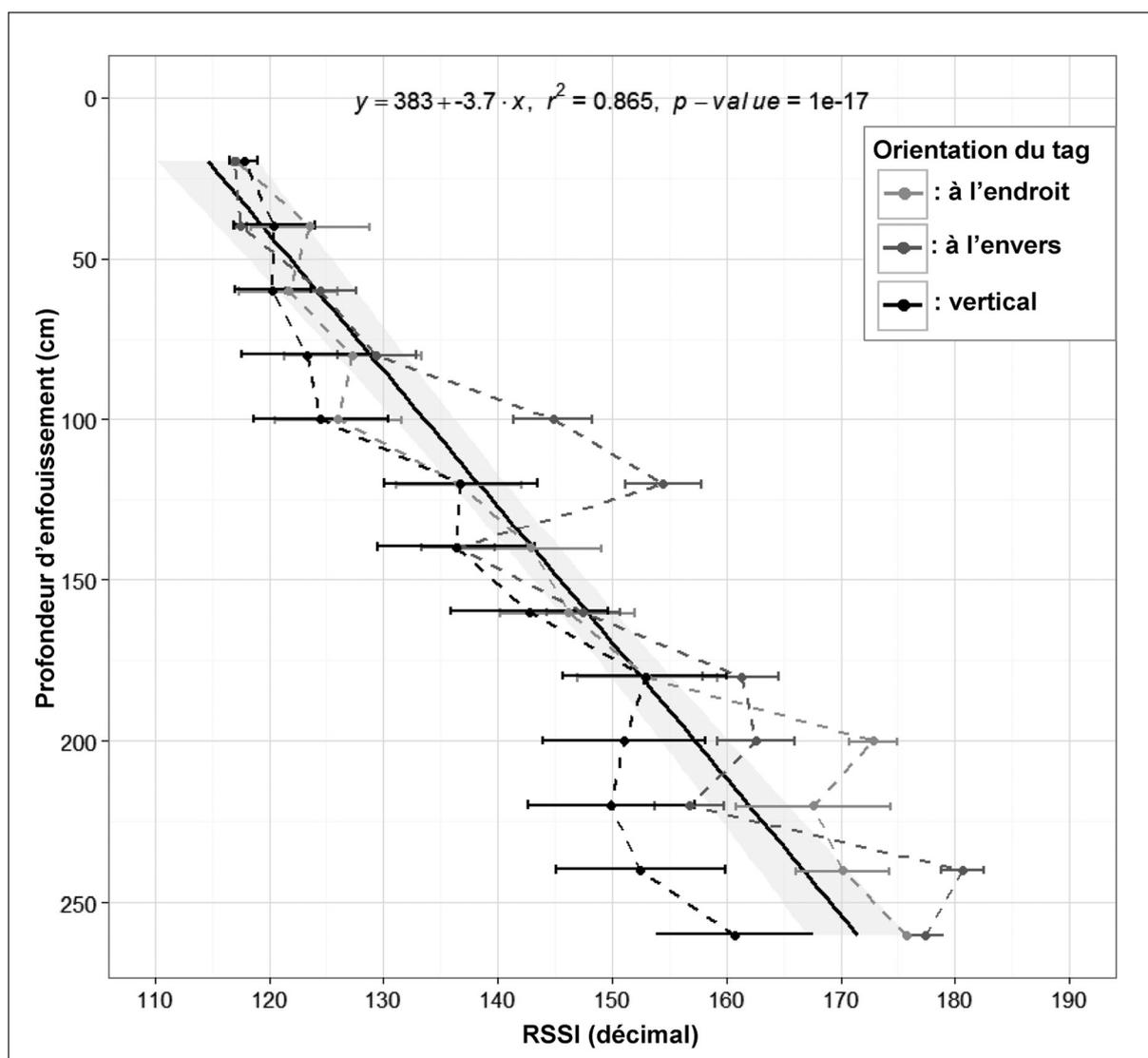
Par rapport aux tags passifs qui émettent un simple signal lorsqu'ils sont activés par le champ électromagnétique de l'antenne, les tags actifs émettent un signal dont l'intensité est mesurée à la réception par le système de lecture. Cette intensité (la trame RSSI : *Received Signal Strength Indication*, exprimée en unité décimale définie par chaque fabricant de système de lecture, en dBm ou en mW) constitue une information nouvelle qui est très utile pour envisager des prospections beaucoup moins chronophages. Cela ouvre également la voie à la possibilité de déterminer la profondeur d'enfouissement des traceurs et ainsi de mesurer le transport solide (épaisseur de la couche active \* distance de déplacement) avec cette seule technique. Par ailleurs, compte tenu de leur plus longue portée (plusieurs mètres) et de l'absence de collision de signaux dans les hautes fréquences (Tableau 1), l'utilisation des tags actifs devrait permettre de réduire significativement le nombre de particules à suivre et le temps nécessaire à leur géolocalisation. De fait le surcoût unitaire d'un tag actif est rapidement compensé par le gain en temps de prospection.

Comparativement à leurs homologues passifs basse fréquence, les tags actifs UHF nécessitent un équipement spécifique (antenne et lecteur). Ils sont également plus coûteux ( $\approx 30$  € pièce), ont une durée de vie limitée à quelques années ( $\approx 8$  ans) et sont d'une plus grande taille. Cette dernière contrainte nécessite la confection des particules artificielles au sein desquelles les traceurs sont insérés. L'utilisation de traceurs actifs pour le suivi du transport solide et la conception de particules artificielles est un champ de recherche en soi (Busskamp 1994 ; McNamara et Borden 2004 ; May et Pryor 2014 ; Olinde et Johnson, 2015). La question se pose de concevoir une particule présentant une densité définie, d'analyser la résistance de ces particules et de mieux comprendre les conséquences de leur forme et de leur densité sur les distances parcourues car cela aura des contraintes fortes sur la conception. À ce jour, plusieurs pistes sont ouvertes et différents matériaux ont été testés. La résistance des tags actifs aux conditions de transport est bonne : ils continuent à émettre après un parcours de 3,5 km en chenal expérimental.

Au-delà des questions scientifiques associées à la conception de particules artificielles, le travail exploratoire porte sur l'étude des potentialités des tags eux-mêmes pour le suivi du transport solide. Ceci concerne la distance maximale de détection et le géopositionnement des traceurs, ce dernier reposant sur l'étude de la trame RSSI. Cette approche diffère sensiblement de celle mise en œuvre pour les PIT tags basse fréquence (Figures 11 et 12).

Des premiers tests *in situ* ont été effectués pour identifier les distances maximales de détection des tags actifs dans l'eau et dans le gravier saturé d'eau. Les résultats montrent que les particules sont détectées jusqu'à 2,2 m dans le premier cas, et à plus de 2,6 m dans le second cas (Figure 11). En termes de géopositionnement, des tests ont été réalisés à la surface d'un banc de galets (Figure 12) et de nouvelles expérimentations sont en cours dans la masse d'eau. Les résultats sont particulièrement encourageants. Nous observons une réduction significative du temps de prospection des tags actifs par rapport aux PIT tags, et une bonne précision de leurs positions dans le chenal. La précision dépend du délai entre chaque émission du tag que l'opérateur peut régler (1,1 à 4,3 secondes), de la distance parcourue par unité de surface et de la vitesse de cheminement de l'opérateur. Avec un tag qui émet toutes les 4 secondes, un opérateur qui marche normalement (4 km/h) et un seul profil (390 m parcourus sur 5233 m<sup>2</sup> en 7 minutes, soit 0,07 m/m<sup>2</sup>), la précision moyenne est voisine de 3 m. En densifiant les profils de prospection (5,2 km parcourus sur 5233 m<sup>2</sup>, soit 1 m/m<sup>2</sup>), une émission des tags de 1,1 secondes, et la même vitesse de l'opérateur, l'erreur de position moyenne est alors de 0,76 m, le temps consacré à la détection des tags actifs est dans ce cas de 90 minutes, ce qui est 12 à 18 fois plus rapide que les campagnes de prospection des PIT tags conduites sur le Cher (Dépret, 2014).

Les distances de détection des traceurs même profondément enfouis, ainsi que le poids et la taille du système RFID actif (antenne et lecteur), offrent de nouvelles perspectives de développement de matériel et de méthode d'échantillonnage. En effet, le système de lecture pourrait être embarqué sur un drone qui survolerait la surface à prospecter à une altitude de 1-2 mètres. Cette méthode de recherche pourrait permettre de localiser les tags avec une précision de positionnement fonction de la



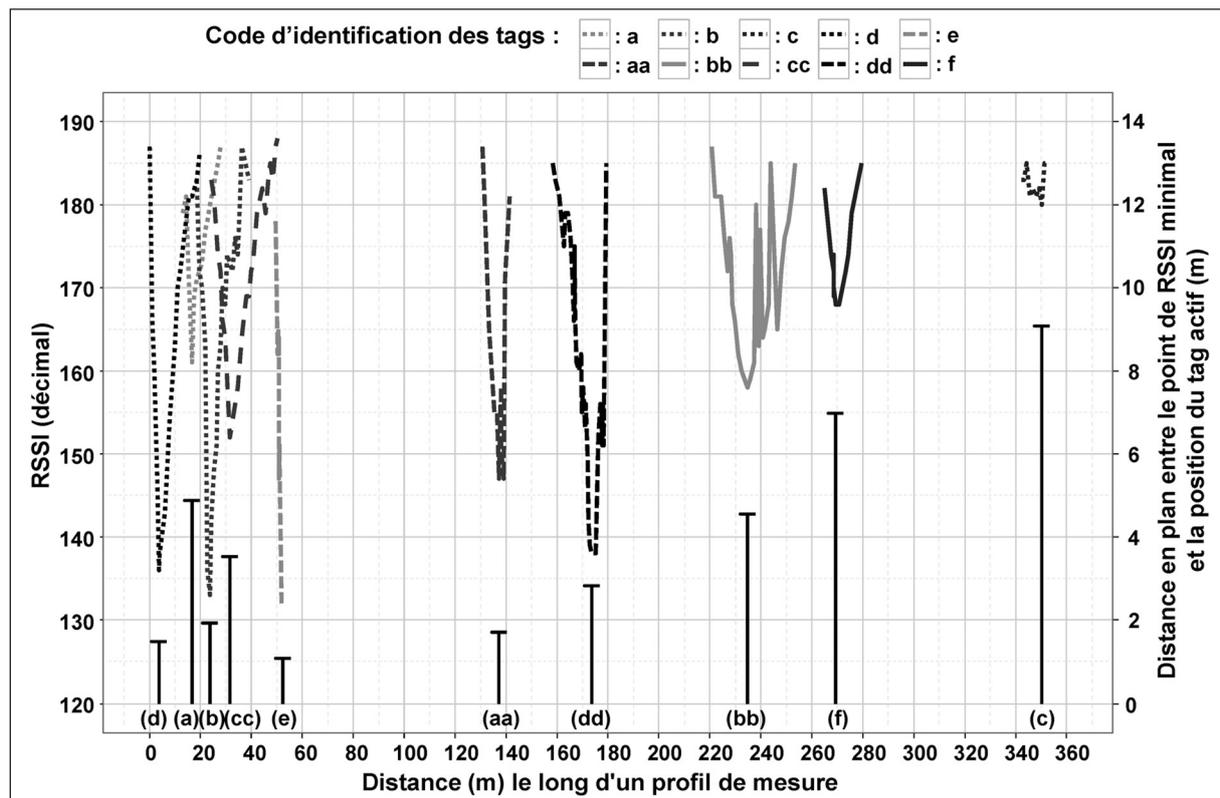
**Figure 11.** Valeurs RSSI en fonction de la profondeur d'enfouissement. A noter que les valeurs RSSI sont inversement proportionnelles à la puissance du signal et augmentent donc en fonction de la profondeur

hauteur de vol du drone, qui conditionne la surface de la zone de détection de l'antenne semi-directionnelle. La méthode pourrait, a minima, fournir une cartographie des zones de plus forte intensité du signal d'un ou plusieurs tags, qui serait ensuite échantillonnée plus précisément par un opérateur au sol. Des scénarios de vol prenant en compte la masse et la charge au vent du système de lecture RFID seraient requis pour définir l'autonomie de vol du drone.

## V. CONCLUSIONS

L'utilisation des traceurs RFID pour le suivi du transport solide en rivière est en plein développement. Les techniques évoluent rapidement.

Les traceurs passifs basse fréquence sont aujourd'hui largement répandus et la communauté d'utilisateurs en connaît bien les avantages et les limites. La question du temps de prospection exige encore un effort de connaissance afin de pouvoir *a priori* définir l'effort nécessaire pour atteindre un certain taux de retour. Dans ce cadre, la mutualisation des données des différents utilisateurs est un enjeu important, ainsi que la mesure de l'effort engagé en termes de temps-opérateur, de surface couverte, etc. Le choix de métriques de déplacement pertinentes est aussi un champ de recherche exploratoire nécessitant de disposer de plusieurs suivis sur un site donné en lien avec une large gamme de conditions hydrologiques. Cet effort au long cours est nécessaire pour tirer pleinement parti des potentialités indicatrices de ces techniques



**Figure 12.** Évolution des valeurs RSSI de 10 particules détectées au cours du cheminement d'un opérateur le long d'un profil longitudinal. Chaque trame représente les valeurs RSSI d'un tag détecté (les valeurs se lisent sur les ordonnées de gauche). Les barres verticales noires représentent la distance en plan entre la position réelle du tag et la position à laquelle l'opérateur enregistre, lors de son parcours, la plus forte intensité du signal du tag (les valeurs se lisent sur l'axe des ordonnées de droite). A noter que cette distance est relativement bien liée à la valeur RSSI minimale enregistrée

pour caractériser le transport solide et définir des modèles prédictifs.

Les traceurs RFID actifs se révèlent très prometteurs pour le suivi sédimentaire compte-tenu du moindre effort *in situ* à consentir par rapport aux traceurs passifs. Des perspectives s'ouvrent également pour mesurer l'épaisseur et l'extension spatiale de la couche active et *in fine* le transport solide proprement dit, et non plus la seule distance de mobilité. Ainsi les tags actifs UHF pourraient peut-être remplacer prochainement les PIT tags, si populaires dans notre champ de recherche, si les promesses se confirment.

## REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient vivement les personnes qui ont été impliquées dans ces travaux, sur le terrain et dans le cadre de nombreuses réunions (D. Béal, G. Fantino, L. Bultingaire, B. MacVicar, J.R. Malavoi, A. Roy), ainsi que M. Chapuis et J. Van

Campenhout pour leurs relectures et leurs suggestions constructives.

Les auteurs remercient également les partenaires financiers et techniques qui ont soutenu ces recherches (EDF, l'Union Européenne, la Région Alsace, les Agences de l'Eau Rhin-Meuse et Rhône Méditerranée Corse).

## BIBLIOGRAPHIE

- Armstrong, J.D., Braithwaite, V.A. & Rycroft, P. (1996). A flat-bed passive integrated transponder array for monitoring behaviors of Atlantic salmon parr and other fish. *Journal of Fish Biology*, 48, 539-541.
- Arnaud, F. (2012). Approches géomorphologiques historique et expérimentale pour la restauration de la dynamique sédimentaire d'un tronçon fluvial aménagé : le cas du Vieux Rhin entre Kembs et Breisach (France, Allemagne). Thèse de doctorat, Université Lyon 2.

- 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.
- Arnaud, F., Piégay, H., Béal, D., Collery, P. & Rollet, A.J. (soumis). Monitoring gravel augmentation in a large regulated river and implications for process-based restoration. *Earth Surface Processes and Landforms*.
- Benelli, G., Bertoni, D. & Sarti, G. (2011). An analysis on the use of LF RFID for the tracking of different typologies of pebbles on beaches. Proc. IEEE Int. Conf. RFID- Technologies and Applications (RFID-TA 2011). IEEE, Sitges, pp. 426-431.
- Bradley, N.D. & Tucker, G.E. (2012). Measuring gravel transport and dispersion in a mountain river using passive radio tracers. *Earth Surface Processes and Landforms*, 37(10), 1034-1045.
- Bunte, K., Abt, S.R., Potyondy, J.P. & Swingle, K.W. (2008). A comparison of coarse bedload transport measured with bedload traps and Helley-Smith samplers. *Geodinamica Acta*, 21(1-2), 53-66.
- Busskamp, R. (1994). The influence of channel steps on coarse bed load transport in mountain torrents: case study using the radio tracer technique "PET-SY". In: Ergenzinger, P., Schmidt, K.H. (Eds.), Dynamics and geomorphology of mountain rivers. Springer, Berlin, pp. 129-139.
- Camenen, B., Coz, J. Le, Paquier, A., Lagouy, M. & An, M.L. (2010). An estimation of gravel mobility over an alpine river gravel bar (Arc en Maurienne, France) using PIT tag tracers. In: Dittrich, A., Koll, K., Aberle, J., Geisenhainer, P. (Eds.), Proc. 5<sup>th</sup> Int. Conf. Fluvial Hydraulics (River Flow 2010). Bundesanstalt für Wasserbau, Braunschweig, pp. 953-960.
- Cassel, M., Piégay, H. & Lavé, J. (soumis). Effects of transport and insertion of radio frequency identification (RFID) transponders on resistance and shape of natural and synthetic pebbles : applications for riverine bedload tracking.
- Chapuis, M., Bright, C.J., 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.
- Chapuis, M., Dufour, S., Provansal, M., Couvert, B. & de Linares, M. (2015). Coupling channel evolution monitoring and RFID tracking in a large, wandering, gravel-bed river: Insights into sediment routing on geomorphic continuity through a riffle-pool sequence. *Geomorphology*, 231, 258-269.
- Church, M., Hassan, M.A. (1992). Size and distance of travel of unconstrained clasts on a streambed. *Water Resources Research*, 28, 299-303.
- Dépret, T. (2014). Fonctionnement morphodynamique actuel et historique des méandres du Cher. Thèse de doctorat, Université Paris 1.
- Gaeuman, D. (2013). Monitoring the effectiveness of gravel augmentations for Salmonid habitat improvement downstream from dams. US Bureau of Reclamation Science and Technology Project Completion Report, 30 p.
- Garcia, C., Laronne, J.B. & Sala, M. (2000). Continuous monitoring of bedload flux in a mountain gravel-bed river. *Geomorphology*, 34(1), 23-31.
- Gomez, B. & Church, M. (1989). An assessment of bed load sediment transport formulae for gravel bed rivers. *Water Resources Research*, 25(6), 1161-86.
- Hassan, M. & Roy, A.G. (2016). Coarse particle tracing in fluvial geomorphology. In: Kondolf, G.M., Piégay, H. (Eds.), Tools in Fluvial Geomorphology. 2<sup>nd</sup> edition. John Wiley and Sons, Chichester, pp. 306-323.
- Houbrechts, G., Van Campenhout, J., Levecq, Y., Hallot, E., Peeters, A. & Petit, F. (2012). Comparison of methods for quantifying active layer dynamics and bedload discharge in armoured gravel-bed rivers. *Earth Surface Processes and Landforms*, 37(14), 1501-1517.
- Houbrechts, G., Levecq, Y., Peeters, A., Hallot, E., Van Campenhout, J., Denis, A.C. & Petit, F. (2015). Evaluation of long-term bedload virtual velocity in gravel-bed rivers (Ardennes, Belgium). *Geomorphology*, 251, 6-19.
- Koll, K., Koll, K. & Dittrich, A. (2010). Sediment transport over static armour layers and its impact on bed stability. In: Dittrich, A., Koll, K., Aberle, J., Geisenhainer, P. (Eds.), Proc. 5<sup>th</sup> Int. Conf. Fluvial Hydraulics (River Flow 2010). Bundesanstalt für Wasserbau, Braunschweig, pp. 929-936.
- Lamarre, H., MacVicar, B. & Roy, A.G. (2005). Using Passive Integrated Transponder (PIT) Tags to Investigate Sediment Transport in Gravel-Bed Rivers. *Journal of Sedimentary Research*, 75(4), 736-741.
- Lamarre, H. & Roy, A.G. (2008). The role of morphology on the displacement of particles in a step-pool river system. *Geomorphology*, 99(1-4), 270-279.
- Liébault, F. & Laronne, J.B. (2008). Evaluation of bedload yield in gravel-bed rivers using scour chains and painted tracers: the case of the Esconavette Torrent (Southern French Prealps). *Geodinamica Acta*, 21(1-2), 23-34.
- Liébault, F., Bellot, H., Chapuis, M., Klotz, S. & Deschâtres, M. (2012). Bedload tracing in a high-sediment-load mountain stream. *Earth Surface Processes and Landforms*, 37(4), 385-399.
- McNamara, J.P. & Borden, C. (2004). Observations on the movement of coarse gravel using implanted motion-sensing radio transmitters. *Hydrological Processes*, 18, 1871-1884.

- MacVicar, B., Chapuis, M., Buckrell, E. & Roy, A.G. (2015). Assessing the Performance of In-Stream Restoration Projects Using Radio Frequency Identification (RFID) Transponders. *Water*, 7, 5566-5591.
- May, C.L. & Pryor, B.S. (2014). Initial motion and bedload transport distance determined by particle tracking in a large regulated river. *River Research and Applications*, 30, 508-520.
- Nelson, J.M., McDonald, R.R., Shimizu, Y., Kimura, I., Nabi, M. & Asahi, K. (2016). Modelling flow, sediment transport and morphodynamics in rivers. In: Kondolf, G.M., Piégay, H. (Eds.), *Tools in Fluvial Geomorphology*. 2<sup>nd</sup> edition. John Wiley and Sons, Chichester, pp. 412-441.
- Olinde, L. & Johnson, J.P.L. (2015). Using RFID and accelerometer-embedded tracers to measure probabilities of bed load transport, step lengths, and rest times in a mountain stream. *Water Resources Research*, 51, doi: 10.1002/2014WR016120.
- Petit, F., Houbrechts, G., Peeters, A., Hallot, E., Van Campenhout, J. & Denis, A.C. (2015). Dimensionless critical shear stress in gravel-bed rivers. *Geomorphology*, 250, 308-320.
- Phillips, C.B., Martin, R.L. & Jerolmack, D. J. (2013). Impulse framework for unsteady flows reveals superdiffusive bed load transport. *Geophysical Research Letters*, 40(7), 1328-1333.
- Piégay, H., Arnaud, F., Naudet, G., Capra, H., Spitoni, M., Wawrzyniak, V., Gaur, S., Lejot, J., Allemand, P., Bultingaire, L., Camenen, B., Graillot, D., Grandjean, P., Lamouroux, N., Le Coz, J., Michel, K., Paquier, A., Pella, H. & Vaudor, L. (2016). Caractérisation physique et thermique des habitats aquatiques de l'Ain. Rapport final, EDF, Agence de l'eau, 61 pages.
- Recking, A. (2010). A comparison between flume and field bed load transport data and consequences for surface-based bed load transport prediction. *Water Resources Research*, 46, W03518, doi: 10.1029/2009WR008007.
- Recking, A., Liébault, F., Peteuil, C. & Jolimet, T. (2012). Testing bedload transport equations with consideration of time scales. *Earth Surface Processes and Landforms*, 37(7), 774-789.
- Rickenmann, D., Turowski, J.M., Fritschi, B., Wyss, C., Laronne, J., Barzilai, R., Reid, I., *et al.*, (2014). Bedload transport measurements with impact plate geophones: comparison of sensor calibration in different gravel-bed streams. *Earth Surface Processes and Landforms*, 39(7), 928-942.
- Rollet, A. J. (2007). Étude et gestion de la dynamique sédimentaire d'un tronçon fluvial à l'aval d'un barrage : le cas de la basse vallée de l'Ain. Thèse de doctorat, Université Lyon 3.
- Rollet, A.J., Piégay, H., Dufour, S., Bornette, G. & Persat, H. (2013). Assessment of consequences of sediment deficit on a gravel river bed downstream of dams in restoration perspectives : application of a multicriteria, hierarchical and spatially explicit diagnosis. *River Research and Applications*, doi: 10.1002/rra.2689.
- Schneider, J., Hegglin, R., Meier, S., Turowski, J.M., Nitsche, M. & Rickenmann, D. (2010). Studying sediment transport in mountain rivers by mobile and stationary RFID antennas. In: Dittrich, A., Koll, K., Aberle, J., Geisenhainer, P. (Eds.), *Proc. 5<sup>th</sup> Int. Conf. Fluvial Hydraulics (River Flow 2010)*. Bundesanstalt für Wasserbau, Braunschweig, pp. 1723-1730.
- Schneider, J., Turowski, J.M., Rickenmann, D., Hegglin, R., Arrigo, S., Mao, L. & Kirchner, J.W. (2014). Scaling relationships between bed load volumes, transport distances, and stream power in steep mountain channels. *Journal of Geophysical Research*, 119, 533-549.
- Schumm, S.A. (1977). *The Fluvial System*. John Wiley and Sons, Chichester, 338 p.
- Sear, D.A., Lee, M.W.E., Oakey, R.J., Carling, P.A. & Collins, M.B. (2000). Coarse Sediment Tracing Technology in Littoral and Fluvial Environments. In: Foster, I.D.L. (Ed.), *Tracers in Geomorphology*. John Wiley and Sons, Chichester, pp. 21-55.
- Tedjini, S., Ghesquier, N., Martin, T. & Nespoulous, A. (2015). Système RFID UHF de surveillance du charriage de cours d'eau. Rapport Esisar INP Grenoble, EDF.
- Wilcock, P.R. (1997). Entrainment, displacement and transport of tracer gravels. *Earth Surface Processes and Landforms*, 22.

*Coordonnées des auteurs :*

Hervé PIÉGAY  
Université de Lyon  
ENS de Lyon, CNRS, UMR 5600  
EVS, 15 Parvis R. Descartes  
F-69362 Lyon, France  
herve.piegay@ens-lyon.fr

Fanny ARNAUD  
Université de Lyon  
ENS de Lyon, CNRS, UMR 5600  
EVS, 15 Parvis R. Descartes  
F-69362 Lyon, France  
fanny.arnaud@ens-lyon.fr

Mathieu CASSEL  
Université de Lyon  
ENS de Lyon, CNRS, UMR 5600  
EVS, 15 Parvis R. Descartes  
F-69362 Lyon, France  
mathieu.cassel@ens-lyon.fr

Thomas DÉPRET  
Université de Lyon  
ENS de Lyon, CNRS, UMR 5600  
EVS, 15 Parvis R. Descartes  
F-69362 Lyon, France  
thomas.depret@ens-lyon.fr

Adrien ALBER  
DREAL Centre  
5, avenue Buffon - CS 96407  
F-45064 Orléans - CEDEX 2  
France  
adrien.alber@developpement-durable.gouv.fr

Kristell MICHEL  
Université de Lyon  
ENS de Lyon, CNRS, UMR 5600  
EVS, 15 Parvis R. Descartes  
F-69362 Lyon, France  
kristell.michel@ens-lyon.fr

Anne-Julia ROLLET  
Université de Caen Normandie  
Laboratoire LETG Caen GEOPHEN  
UMR 6554 CNRS  
F-14032 Caen, France  
anne-julia.rollet@unicaen.fr

Lise VAUDOR  
Université de Lyon  
ENS de Lyon, CNRS, UMR 5600  
EVS, 15 Parvis R. Descartes  
F-69362 Lyon, France  
lise.vaudor@ens-lyon.fr

