

# DYNAMIQUE DE LA CHARGE DE FOND DE L'ARGENT DOUBLE (AFFLUENT DE RIVE GAUCHE DE L'AUDE, FRANCE DU SUD) : APPROCHE CROISÉE « TECHNOLOGIE RFID / MODÉLISATION NUMÉRIQUE DU TRANSPORT SOLIDE »

Luc MICHLER, Guillaume BROUSSE,  
Gilles ARNAUD-FASSETTA, Jean-Michel CAROZZA

## Résumé

L'étude propose un suivi de la mobilité de la charge de fond grossière ( $D_{50} = 63$  mm) de l'Argent Double, affluent de rive gauche de l'Aude, en utilisant la technologie RFID (*Radio Frequency Identification*), qui permet de détecter les *PIT tags* (*Passive Integrated Transponders*) insérés dans les particules du lit, couplée à la modélisation numérique. Sur l'ensemble des 38 km du tracé du cours d'eau, les 240 traceurs déployés sur six sites d'étude (40 *PIT tags* par site) présentent des taux de retour suffisants (entre 37,5 % et 100 % pour les traceurs mobiles) pour être représentatifs de la mobilité de la charge de fond. Les dix-sept mois (octobre 2012 – mars 2014) de suivi des traceurs, au cours desquels les débits sont restés modérés (deux crues inférieures à la crue biennale), n'ont suffi à récolter des données de distances de transport (quelques mètres à 622 m) exploitables dans les équations de calcul des volumes charriés que pour l'un des six sites (S1). Les résultats obtenus en S1 viennent appuyer la modélisation hydrosédimentaire en tant que données de calage. Ils ont permis d'affiner le paramétrage des modèles de transport solide, notamment dans le choix des formules, dont les résultats en sortie peuvent varier de plusieurs ordres de grandeur.

## Mots-clés

géomorphologie fluviale, traçage sédimentaire, modélisation hydro-sédimentaire, Argent Double, Montagne Noire, France méditerranéenne

## Abstract

*This study aims to monitor bed-load mobility of the gravel-bed Argent Double River ( $D_{50} = 63$  mm), a left-bank tributary of the Aude River located in the Mediterranean basin, coupling the use of Radio Frequency Identification (RFID) technology to detect Passive Integrated Transponders (PIT) tags that have been placed in bed particles, and the use of numerical modelling. For this purpose, 240 tracers have been equally deployed between six study sites (40 PIT tags on each site), spread along the 38 km long stream. Tracer recovery rate are satisfying enough (ranging from 37.5% to 100% for mobile tracers) to be considered as representative of bed-load mobility. Transport distances are ranging from a few meters to 622 m for the frontrunner. Flows were moderate over the seventeen months of tracer monitoring (October 2012 – March 2014), with only two small floods below the 2-year flood. The transport distance derived from these hydrological conditions have been integrated to the bedload transport volume formulas used in one study site (S1). Results acquired in S1 underpin hydraulic and sediment modelling as calibration data. They allow refining bed-load transport models, especially in choosing between formulas, those results may vary by many orders of magnitude.*

## Keywords

*fluvial geomorphology, sedimentary tracking, hydraulic-sediment modelling, Argent Double River, Montagne Noire, Mediterranean France*

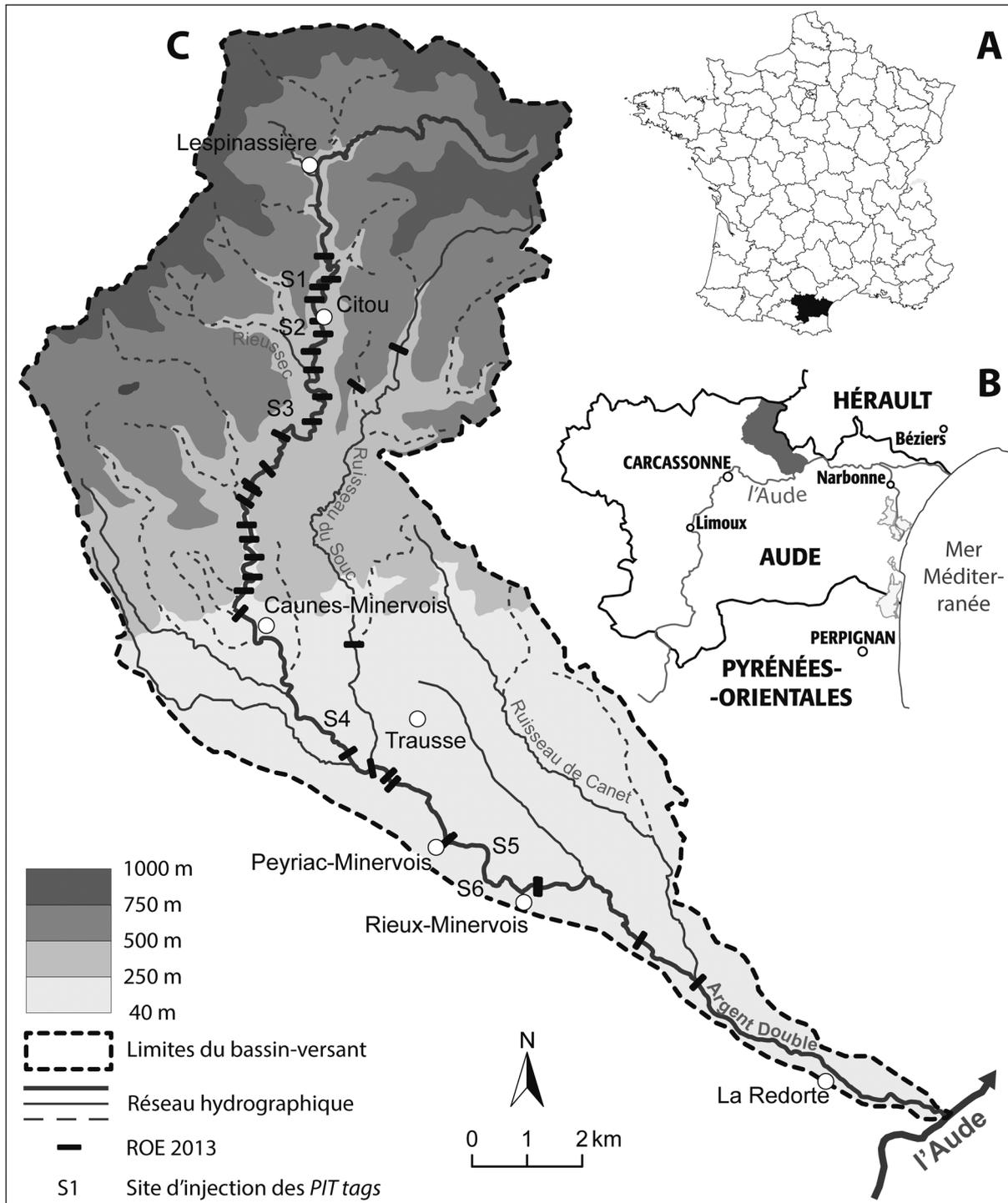
## I. INTRODUCTION

Depuis 2011, l'Université Paris-Diderot (UMR 8586 PRODIG) et Suez Consulting ont créé un groupe de travail « hydromorphologie » associant enseignants-chercheurs de l'Université, experts en hydraulique fluviale, ingénieurs géomorphologues et étudiants du master DYNARISK (Dynamique des milieux et risques). Faisant état d'une grande incertitude dans l'utilisation des outils de modé-

lisation hydro-sédimentaire, en raison de la large gamme de formules de transport solide proposées par les logiciels, de la variabilité de leurs conditions d'application et de l'établissement de ces formules à partir d'études en canal expérimental dans des conditions ne reproduisant pas les conditions naturelles (Tanguy, 2009 ; Ginocchio, 2012), l'objectif de ce groupe de travail est de faire progresser la modélisation hydro-sédimentaire en rivière et ce, dans différents contextes morphoclimatiques.

Dans ce cadre, une étude a été réalisée dans le bassin versant de l'Argent Double, une rivière méditerranéenne à caractère torrentiel s'écoulant sur les contreforts méridionaux de la Montagne Noire dans le département de l'Aude (Figure 1). Affluent de rive gauche du fleuve Aude, l'Argent Double (longueur : 38 km) draine un bassin versant de 112 km<sup>2</sup>

dominés par les roches métamorphiques (schistes ordoviciens) en amont, les nappes de charriage à dominante calcaire dans la partie médiane et des terrains sédimentaires (molasses éocènes, reposant en discordance sur le socle hercynien ou les nappes de charriage ou les alluvions quaternaires) en aval. La forme du bassin versant permet de dégager une



**Figure 1.** Localisation du site d'étude. A : Le département de l'Aude en France ; B : Le bassin versant de l'Argent Double dans le département de l'Aude ; C : Hypsométrie du bassin versant de l'Argent Double et localisation des lieux cités dans le texte

tendance à la concentration des écoulements de crue nettement supérieure dans la partie amont du cours d'eau [indice de compacité de Gravelius ( $G = 1,4$ ) que dans sa partie aval ( $G = 2,3$ ). L'Argent Double est une rivière méandrique à rectiligne et son indice de sinuosité ( $IS$ ) est plus prononcé dans la partie montagneuse ( $IS = 1,39$  en amont de Caunes-Minervois) que sur le piémont ( $IS = 1,16$ ), où le chenal fluvial est relativement rectiligne. Déjà considérables ( $\sim 20\%$ ) sur l'ensemble du bassin versant, les pentes moyennes des versants atteignent  $35\%$  dans la partie montagneuse, avec des valeurs approchant  $100\%$ , tandis que les pentes moyennes ( $\sim 13\%$ ) sont plus modestes dans la partie aval. Cette énergie du relief amont tend à augmenter l'ampleur des processus dépendants de la gravité dans le bassin versant, tant d'un point de vue hydrologique que sédimentaire.

Le bassin de l'Argent Double a été choisi car ses caractéristiques hydromorphologiques (fortes pentes et concentration des écoulements) sont propices à la formation de crues éclairs (e.g., novembre 1999 ; Fort *et al.*, 2001). Ce type de fonctionnement est commun à de nombreux hydrosystèmes méditerranéens à forte énergie. Ces prédispositions physiques sont aggravées par les interventions anthropiques sur le linéaire du cours d'eau (digues, gabions, enrochements, seuils hydrauliques...) et par les modifications des modes d'occupation du sol (imperméabilisation urbaine, viticulture), favorisant les mécanismes de ruissellement (Arnaud-Fassetta *et al.*, 2002). Le régime hydrologique est très contrasté, avec des périodes d'étiage sévères et durables alternant avec des crues très subites et violentes, liées à des orages ou des systèmes perturbés méditerranéens de type cévenol. Du fait de ces deux éléments, la dynamique fluviale de cet hydrosystème est très active (Arnaud-Fassetta et Fort, 2009). Le tressage devient le style fluvial caractéristique lorsque la morphologie de la vallée tend vers l'élargissement de la plaine alluviale. La bande active est très mobile, ce qui engendre un risque d'érosion des berges et fragilise les infrastructures riveraines. Erskine et Warner (1988) ont proposé de qualifier de « déséquilibre cyclique » le comportement hydromorphologique à court terme de ce type de cours d'eau qui s'ajuste continuellement au jeu des variables de contrôle. Ces ajustements se manifestent par un transport sédimentaire dominé par le roulement-charriage. Contrairement aux rivières torrentielles des Préalpes qui ont connu

une contraction considérable de leur bande active depuis le XIX<sup>ème</sup> siècle (Liébault et Piégay, 2002 ; Hooke, 2006), le lit de l'Argent Double reste particulièrement mobile et subordonné aux crues éclairs morphogènes, pouvant se transformer dans la zone montagneuse en écoulements hyperconcentrés voire en laves torrentielles en fonction de la disponibilité sédimentaire (Arnaud-Fassetta et Fort, 2011). La crue de 1999 illustre parfaitement ce fonctionnement du lit réagissant aux contrecoups des crues. Cette crue a eu pour effet d'accroître les sections mouillées en érodant la plaine d'inondation (élargissement de 10 à 20 m et incision de 40 à 80 cm), voire de créer de nouveaux chenaux par défluviation (Arnaud-Fassetta et Fort, 2011).

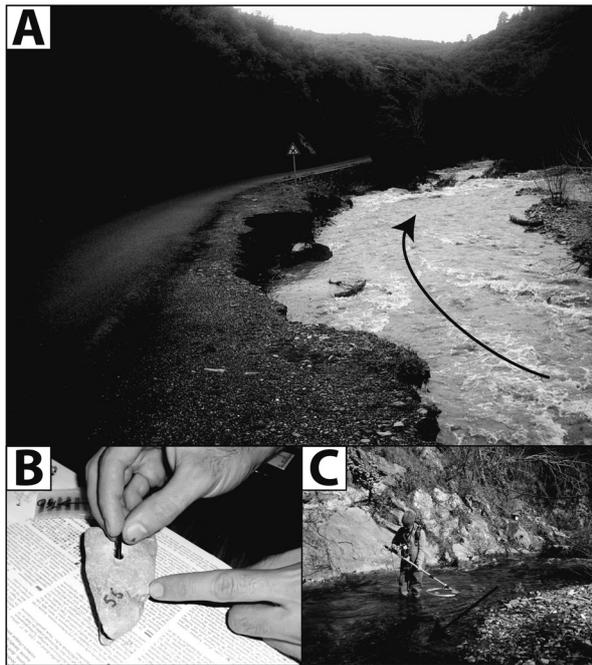
Les enjeux de cette étude sont principalement une meilleure connaissance des mécanismes de la mobilité de la charge de fond de l'Argent Double, qui est un facteur de contrôle majeur de la mobilité latérale des chenaux (Schumm, 1977 ; Bravard et Petit, 1997). En effet, dans une rivière torrentielle à lit mobile, la connaissance des tendances à l'accumulation ou à l'érosion et de la localisation de ces phénomènes permet de donner des éléments de prise de décision pour une meilleure gestion du transport sédimentaire, qui se révèle être indispensable dans la mesure où les dégâts engendrés par les sapements de berge et les affouillements des structures sont considérables (Figure 2A).

Dans un premier temps, l'étude propose de quantifier le transport solide et les ajustements morphologiques verticaux postérieurs au passage des crues ordinaires mais morphogènes survenues dans l'Argent Double au cours des dix-sept mois de suivi (octobre 2012-mars 2014). Dans un deuxième temps, il s'agit de modéliser les effets d'une suppression de seuils hydrauliques sur la morphologie de la rivière. Pour cela, deux méthodes complémentaires ont été utilisées : la première est basée sur une approche naturaliste de terrain et utilise une technique de traçage sédimentaire ; la seconde est portée sur une approche plus modélisatrice et se base sur l'utilisation d'un modèle de transport.

## II. TRAÇAGE SÉDIMENTAIRE

### A. Matériel et méthodes

La technologie RFID (*Radio Frequency Identification*) de traçage sédimentaire consiste à équiper



**Figure 2.** Dynamique fluviale et suivi de la charge de fond de l'Argent Double. A : Dégâts sur la voirie occasionnés par l'érosion latérale de l'Argent Double (cliché : mairie de Citou, mars 2011) ; B : Insertion d'un transpondeur passif dans un galet (cliché : L. Michler) ; C : Sondage du lit et identification des transpondeurs par radiofréquence avec l'antenne de détection (cliché : L. Michler)

de transpondeurs passifs (*PIT tags*) les galets ( $D_{50} > 40$  mm) du lit alluvial. Peu onéreux (2 à 3 €/pièce), ces transpondeurs passifs se présentent sous la forme de capsules de verre (23 mm de long, 4 mm de diamètre ; Figure 2 B) qui peuvent être programmées avec un identifiant propre sous forme de radiofréquence. Le traçage RFID est une technique très largement utilisée pour le suivi des alluvions graveleuses (Hassan, 1988 *in* Lekach et Schick, 1995 ; Kondolf et Piégay, 2003 ; Lenzi, 2004 ; Rollet, 2007 ; Rollet *et al.*, 2008 ; Chapuis, 2012 ; Liébault *et al.*, 2012).

Cette technique présente de nombreux avantages en regard de méthodes alternatives de suivi de la charge de fond. L'utilisation de *PIT tags* se révèle très performante pour cinq raisons : i) avec des taux de retour très satisfaisants pouvant dépasser 90 % (Hassan, 1988 *in* Lekach et Schick, 1995), elle améliore nettement le suivi des particules *in situ* ; ii) le traçage RFID, contrairement au traçage visuel, permet la détection des particules enfouies sous la couche de surface (Liébault et Laronne, 2008 ; Rollet *et al.*, 2008) ; iii) les *PIT tags* insérés

dans les galets émettant chacun un code propre, leur identification ne dépend pas de la capacité de l'opérateur à les récupérer physiquement ; iv) de ce fait, elle évite le prélèvement d'un traceur au sein du lit, qui serait une action destructive dans le sens où la structure sédimentaire est désorganisée (Rollet *et al.*, 2008 ; Johnson, 2010) ; v) enfin, elle permet un suivi individuel des particules, chacune d'elle étant identifiée. Il est ainsi possible de mettre en relation facilement ses propriétés de taille, de forme et de masse avec son déplacement. L'inconvénient majeur de cette technique de traçage est le caractère chronophage des prospections sur de longs linéaires et la subordination de leur réalisation au retour à des conditions d'étiage pour les petites rivières non navigables.

Sur l'Argent Double, le traçage sédimentaire avec la technologie RFID a été mis en œuvre en cinq étapes : i) échantillonnage granulométrique aléatoire par comptage des particules suivant la méthode de Wolman (1954) ; ii) sous-échantillonnage des particules à équiper suivant la distribution granulométrique des sédiments du lit ; iii) insertion des *PIT tags* par perforation ou rainurage pour les galets les plus petits (Figure 2B), puis rebouchage par résine chimique (perte de masse < 2 %) ; iv) réinjection des galets pucés à la surface du lit en respectant l'imbrication naturelle des particules afin de limiter les effets de surexposition ; v) exploration du lit à l'aide d'une antenne de détection mobile qui permet d'identifier les galets mobilisés dont la position est relevée au GPS (Figure 2C). Le linéaire prospecté varie pour chacun des six sites en fonction de la dispersion des traceurs. Il a été délimité sur la base de la distance au dernier traceur détecté, fixée à 200 m. Dans le but d'identifier un éventuel biais méthodologique, l'exploration du lit a été poursuivie sur 1 km supplémentaire en S1, s'ajoutant aux 800 m déjà prospectés suivant le protocole. Aucun traceur n'a été découvert, témoignant d'un transport encore plus important ou rejoignant les observations de Liébault *et al.* (2012) selon lesquelles la probabilité d'enfouissement d'un traceur augmente avec la distance de transport.

Le suivi de la mobilité de la charge de fond de l'Argent Double s'est étendu sur une période de dix-sept mois (25/10/2012 – 17/03/2014) et s'est organisé en deux campagnes de relevés (mars 2013 et mars 2014). Les volumes charriés ( $V_b$ ) ont été estimés à partir des distances de transport selon la

formule proposée par Liébault et Laronne (2008), qui adapte la formule établie par Haschenburger et Church (1998) :  $V_b = d_b w_b L_b (1 - \rho)$ , où ( $L_b$ ) est la distance moyenne de transport obtenue par le biais des *PIT tags*, ( $w_b$ ) la largeur active du lit, ( $d_b$ ) l'épaisseur de la couche active généralement mesurée par analyse diachronique de la topographie du lit et ( $\rho$ ) la porosité du lit. Ce paramètre a été estimé sur le terrain suivant la méthode proposée par Liébault et Laronne (2008) : un volume connu de sédiments du lit est extrait puis pesé de telle sorte que :  $\rho = [(m_{exc}/\rho_s) - V_{tot}]/V_{tot}$ , avec ( $\rho_s$ ) la densité volumique des sédiments (en kg/dm<sup>3</sup>), ( $V_{tot}$ ) le volume total (en dm<sup>3</sup>) et ( $m_{exc}$ ) la masse des sédiments excavés (en kg). Les dimensions de la couche active ( $w_b$  et  $d_b$ ) n'ont pas pu être estimées à partir des mesures *in situ*. Une analyse diachronique a été entreprise avec l'établissement au télémètre laser (précision : 10 cm) de deux profils topographiques par section en travers, l'un en octobre 2012, l'autre en mars 2014. L'ampleur des changements morphologiques sur la période ne dépassant pas l'imprécision induite par le matériel de mesure, l'épaisseur de la couche active ( $d_b$ ) a été évaluée à l'aide de la formule proposée par Sharfi (1986 ; *in* Koulinski, 1994), pour qui  $d_b = \beta \cdot D_{90}$  avec  $1 < \beta < 3$ . Les galets équipés ont été disposés sur les placettes délimitées pour l'échantillonnage granulométrique (3 m x 3 m). Les galets équipés n'ayant pas été déployés sur toute la largeur du lit, la largeur de la couche active n'a pas pu être délimitée par des mesures *in situ*. La largeur active du lit ( $w_b$ ) est donc considérée comme équivalente à la largeur du chenal en eau.

## B. RÉSULTATS DU TRAÇAGE DES ALLUVIONS

### 1. Distribution granulométrique des matériaux du lit et représentativité des traceurs

L'échantillonnage granulométrique par comptage des particules (100 par site) réalisé selon la méthode standardisée de Wolman (1954) a permis la mesure d'une gamme suffisante de taille, rendant ainsi possible le calcul des paramètres de distribution des tailles et l'intégration des données dans des modèles hydrauliques. Le diamètre médian ( $D_{50}$ ) moyen de l'ensemble des six sites est de 63 mm, plaçant ainsi l'Argent Double à l'interface entre une rivière à charge graveleuse (2 – 64 mm) et une rivière à galets (64 – 256 mm), selon la classification de Bunte et Abt (2001). Le  $D_{50}$  varie considérablement entre les sites, avec sur l'Argent Double un minimum de 43

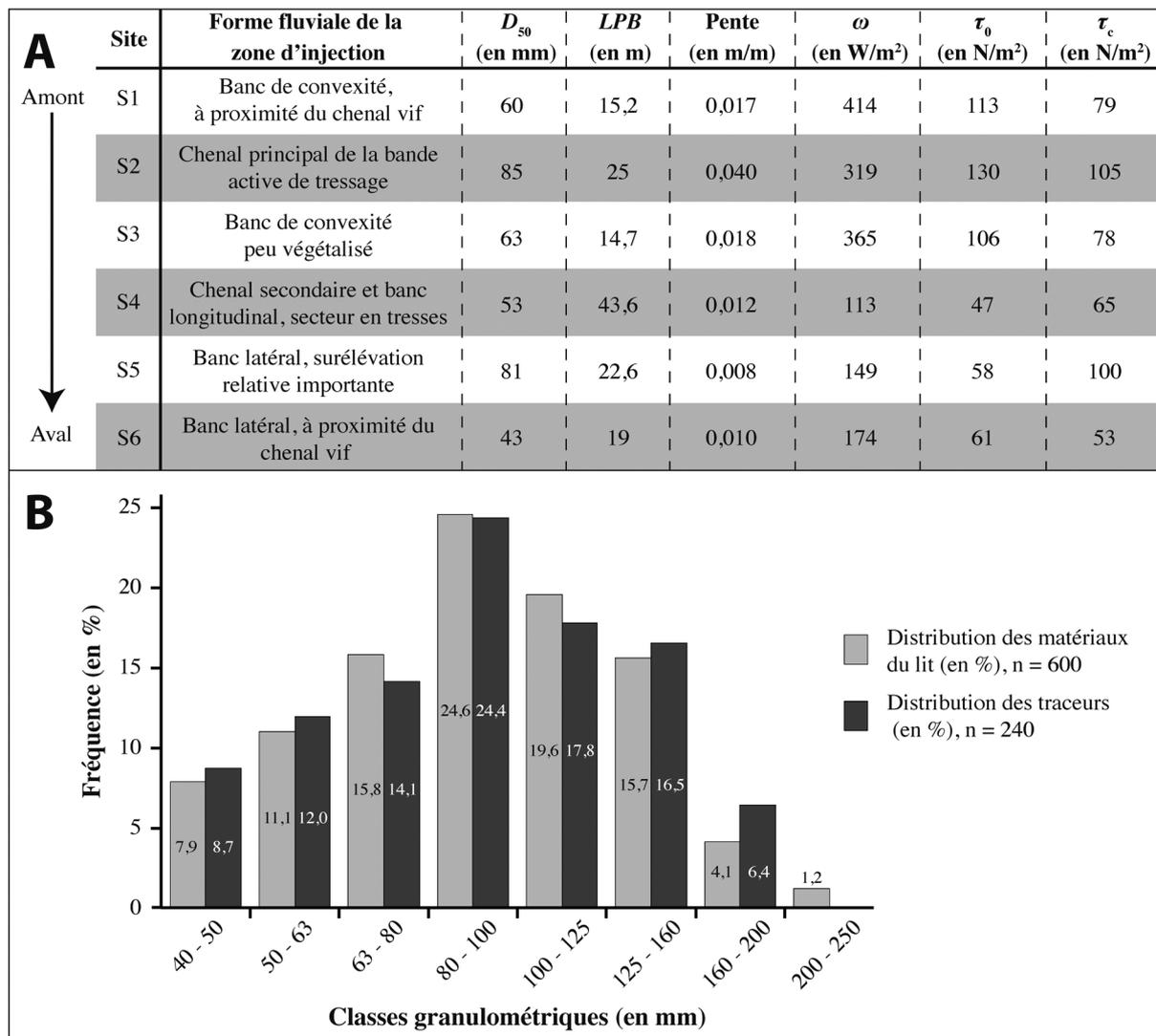
mm en S6 et un maximum de 81 mm en S5. Une valeur de 85 mm est relevée en S2 dans le Rieussec, affluent de l'Argent Double (Figure 3A). Cependant, il n'apparaît pas de logique de diminution de la taille des particules vers l'aval. Cette absence d'affinement granulométrique est probablement liée à la diversité des formes fluviales sur lesquelles ont été réalisées les échantillonnages et les injections de *PIT tags* (Figure 3A).

Afin d'obtenir une représentativité optimale des phénomènes de transport dans le cours d'eau, les 240 particules équipées ont été sélectionnées de manière à respecter la distribution granulométrique des matériaux du lit. La perte de masse liée aux opérations de perforation ou de rainurage pour l'insertion des *PIT tags* est négligeable (~ 1,6 %). La distribution granulométrique des traceurs reproduit correctement la distribution granulométrique de la charge de fond, avec une différence moyenne des distributions par classe de 11,5 %, tous sites confondus (Figure 3B). Les traceurs de la classe 160 – 200 mm surreprésentent de 36 % la distribution granulométrique de la charge de fond, ce qui pourrait entraîner une sous-estimation des distances moyennes de transport car les traceurs les plus grossiers sont transportés sur de plus faibles distances (cf. I.B.2.). Cette classe ne représente qu'une faible part de la charge de fond (4,1 %). Le biais introduit est donc minime.

### 2. Mobilité et distances de transport des traceurs

Le principal événement hydrologique durant la période de suivi n'a pas dépassé la crue biennale de référence ( $QJ_2 = 17$  m<sup>3</sup>/s), avec un débit de pointe de 12,1 m<sup>3</sup>/s à la station limnimétrique des Salices (Figure 4A), située à hauteur de la commune de La Redorte à proximité de l'exutoire du bassin (Figure 1). Aucun événement exceptionnel n'a eu lieu sur la période. Ainsi, les résultats obtenus permettent de discuter des valeurs de déplacement ordinaire de la charge de fond.

Les taux de retour des particules entre les deux années de relevés sont sensiblement identiques et relativement importants (82,5 % en 2014 et 82,1 % en 2013 ; Figure 4C). Toutefois, les valeurs dans le secteur aval sont plus faibles (~ 64 % en 2014 pour les traceurs mobiles) et s'expliquent par un déplacement vers l'aval au-delà de la zone prospectée, notamment à Rieux (S6) où 80 % des traceurs ont été mobiles (Figure 4B).



**Figure 3.** Caractéristiques hydrauliques et sédimentaires de l'Argent Double. A : Caractéristiques morphologiques, sédimentaires et hydrauliques des sites d'injection des *PIT tags*. Les puissances spécifiques ( $\omega$ ) et les contraintes tractrices au fond ( $\tau_0$ ) sont des valeurs moyennes sur la section en travers, calculées à partir de cinq profils en travers par site pour la crue du 06/03/2014, mesurée à 12,1 m<sup>3</sup>/s à la station des Salices (QTVAR). La contrainte tractrice critique ( $\tau_c$ ) est calculée en réalisant la moyenne de trois formules (Shields, 1936 ; Meyer-Peter et Müller, 1948 ; Komar, 1987), basées sur la taille des sédiments ; B : Distributions granulométriques en fréquence par masse des matériaux du lit de l'Argent Double et des traceurs (tous sites confondus)

En 2013, la distance de transport moyenne des traceurs sur l'ensemble des zones de déploiement est de 78 m, contre 73 m en 2014 (Figure 4C). La baisse de la valeur moyenne de distance de transport entre les deux années s'explique par l'augmentation du nombre d'individus pris en compte dans les calculs entre 2013 (63 traceurs) et 2014 (83 traceurs) et les plus faibles déplacements dont ces traceurs mobiles ont fait l'objet entre 2013 et 2014. Le bilan des distances de transport entre les deux campagnes de relevé (mars 2013 et mars 2014) témoigne de déplacements plus faibles sur la période mars 2013 – mars 2014 que sur la période octobre

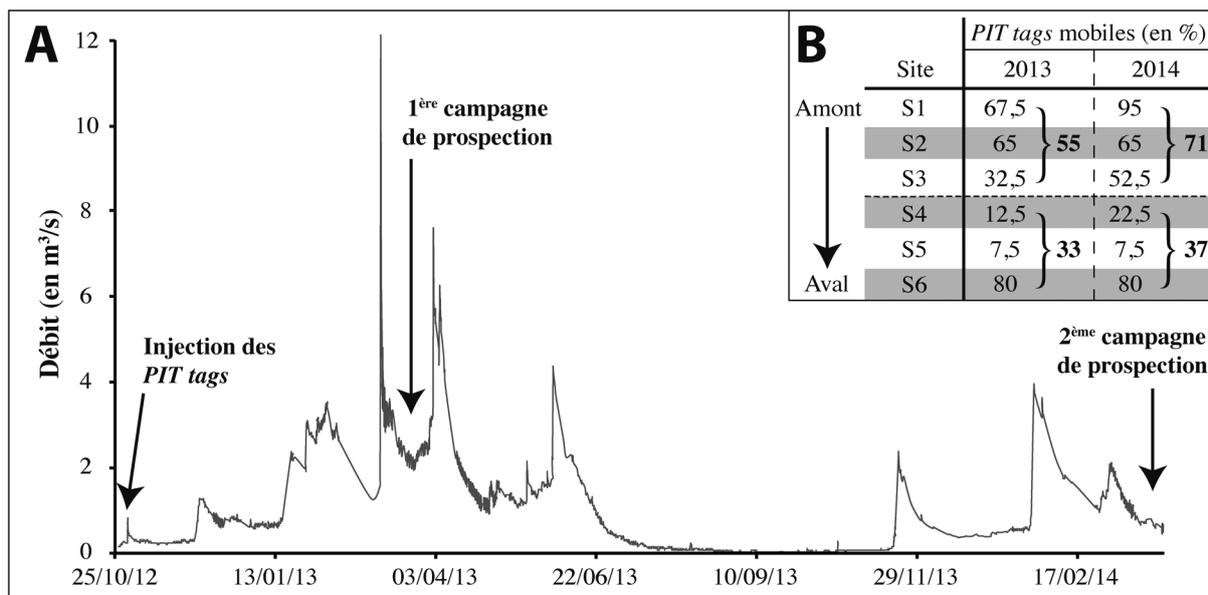
2012 – mars 2013, coïncidant avec des débits de pointe moins élevés. En 2013, la mobilité est plus marquée dans la partie amont que sur le piémont (55 % et 33 %, respectivement ; Figure 4B). En 2014, cette tendance s'accroît et la mobilité des traceurs au niveau de leur zone de déploiement augmente nettement dans la partie montagneuse et peu ou pas ailleurs (71 % et 37 % respectivement). Cette opposition amont / aval s'explique par les valeurs des puissances spécifiques ( $\omega$ ), qui caractérisent des potentialités dynamiques du chenal largement supérieures dans la partie montagneuse que sur le piémont (Figure 3A). Sur les trois sites amont

(S1, S2 et S3), les contraintes tractrices appliquées au fond ( $\tau_0$ ) au cours de la crue du 06/03/2013 dépassent les contraintes tractrices critiques ( $\tau_c$ ) calculées à partir du  $D_{50}$  (Figure 3A), ce qui n'est pas le cas pour les sites du piémont (S4 et S5), à l'exception de S6. Sur ce dernier, un faible excédent de contrainte tractrice se traduit par une mobilité importante des traceurs. Cependant, les puissances spécifiques et les contraintes tractrices au fond sont des valeurs moyennes calculées sur la section en eau et ne sont pas les uniques facteurs explicatifs des différences de mobilité entre les sites. Les caractéristiques locales des sites d'injection, notamment les formes fluviales, sont déterminantes pour la mise en mouvement de la charge de fond puisqu'elles conditionnent les forces localement appliquées aux particules. En effet, bien que similaires entre les trois sites du piémont, les conditions hydrauliques n'aboutissent pas à une mobilité analogue. Elle est très faible en S4 en raison d'une position distale par rapport au chenal vif et en S5 en raison d'une surélévation relative du banc sur lequel ont été disposés les traceurs, tandis que la mobilité est très importante en S6 (80 %) en raison de la proximité de la zone d'injection avec le chenal vif.

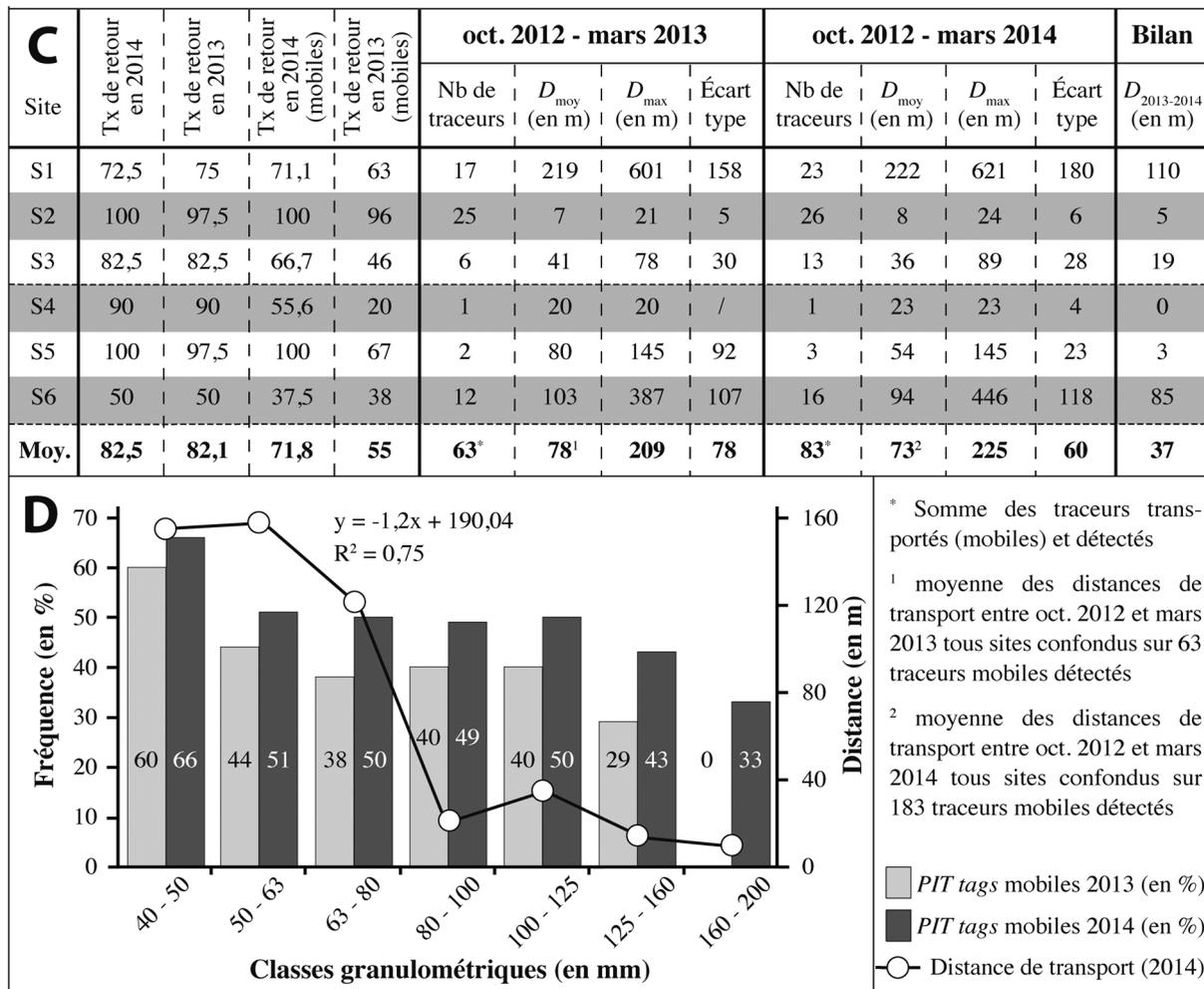
Entre 2013 et 2014, la mobilité des galets a globalement augmenté sur les zones de déploiement, parti-

culièrement à Citou (S1), où elle passe de 67,5 % à 95 %, indiquant que les conditions hydrologiques postérieures à la première campagne de relevés ont entraîné une mise en mouvement des particules (Figure 4B). On met ainsi en évidence un gradient de mobilité amont-aval croissant. Ce constat est valable pour les deux dates. Cependant, les taux de mobilité augmentent en 2014, avec une mise en mouvement de 54 % des traceurs par rapport à leur position initiale, contre 44 % en 2013 (Figure 4B).

La mobilité des traceurs est maximale pour la gamme granulométrique la plus fine (40 – 50 mm) et décroît progressivement mais de manière peu marquée avec l'augmentation de la taille (Figure 3D). Cette tendance est plus nette lorsque l'on s'intéresse aux distances de transport, qui diminuent nettement avec l'augmentation de la taille des particules. La relation entre taille et distance est relativement forte ( $R^2 = 0,75$ ), traduisant un transport sélectif qui s'opère généralement au cours des événements hydrologiques de faible magnitude (Lenzi, 2004). La dispersion des traceurs est très variable selon les sites. En effet, les distances moyennes parcourues par les galets pucés depuis leur déploiement s'échelonnent de 222 m en S1 à 8 m en S2 (Figure 3C). La dispersion autour de la moyenne est importante (distance de transport maximale et écart-type), tra-



**Figure 4.** Hydrologie et mobilisation de la charge solide grossière. A : Hydrogramme des débits variables (QT-VAR) de l'Argent Double entre octobre 2012 et mars 2014 à la station de mesures des Salices (données issues de la Banque Hydro) ; B : Évolution de la mobilité des traceurs par site d'injection (en %) entre 2013 et 2014. Un traceur est considéré comme mobile si 1) un déplacement a été détecté par le biais de l'antenne, ou si 2) il n'a pas été détecté, ni dans le chenal lors de la prospection, ni sur la zone d'injection des PIT tags. Les valeurs à droite de l'accolade représentent des moyennes



**Figure 4.** Hydrologie et mobilisation de la charge solide grossière. C : Taux de retour par site des traceurs (en %) dans l'Argent Double, caractéristiques des distances de transport par site en 2013 et en 2014 en fonction du nombre de traceurs mobiles détectés dans l'Argent Double et bilan de transport entre les deux campagnes de relevés. Le taux de retour des traceurs mobiles correspond au rapport entre le nombre de traceurs mobiles identifiés et le nombre total de traceurs mobiles du site (traceurs absents du site d'injection). ( $D_{moy}$ ) correspond à la distance moyenne de transport des galets équipés du site et ( $D_{max}$ ) correspond à la distance parcourue par le galet le plus mobile de chaque site. ( $D_{2013-2014}$ ) correspond à la distance moyenne de transport par site des traceurs mobiles sur la période 2013-2014 ; D : Évolution de la mobilité des traceurs (en %) en fonction de la granularité des alluvions entre 2013 et 2014 et distances de transport des traceurs entre l'injection et mars 2014 (en m) en fonction de la granularité des alluvions

duisant également une variabilité des déplacements au sein de chaque zone d'étude.

À partir de la formule de Liébault et Laronne (2008), cette mesure de la distance de transport a permis d'estimer les volumes de sédiments que la crue du 06/03/2013 a pu charrier à Citou (S1). En tenant compte des marges d'erreur pour chacun des paramètres, les volumes de sédiments charriés par la crue varient entre 164 m<sup>3</sup> (estimation basse ;  $\beta = 1$  ;  $d_b = 0,13$  m ;  $w_b = 8$  m ;  $\rho = 0,28$ ) et 768 m<sup>3</sup> (estimation haute ;  $\beta = 3$  ;  $d_b = 0,39$  m ;  $w_b = 12$  m ;  $\rho = 0,25$ ). La valeur moyenne est estimée à 418 m<sup>3</sup> ( $\beta = 2$  ;  $d_b = 0,26$  m ;  $w_b = 10$  m ;  $\rho = 0,265$ ).

Néanmoins, la formule de transport de Liébault et Laronne (2008) n'est pas applicable à tous les sites d'étude.

Des distances de transport trop faibles, des taux de retour des capteurs mobilisés insuffisants et/ou des capteurs mobilisés trop peu nombreux rendent peu significatif le calcul des volumes charriés à partir des distances de déplacement. En termes de données acquises, le site d'étude S1 a été le seul à remplir les conditions nécessaires à l'emploi de la formule de transport, c'est pourquoi il a été le seul à faire l'objet d'une estimation des volumes charriés au cours de la crue.

### III. MODÉLISATION DU TRANSPORT SOLIDE

#### A. Préalables et protocoles concernant la modélisation

Le recours à la modélisation numérique pour quantifier le transport sédimentaire permet de :

- i) pallier le caractère ponctuel des mesures directes,
- ii) spatialiser les processus de transport et
- iii) se baser, à l'image des modèles hydrauliques, sur une démarche rétrospective de reconstitution d'événements passés, permettant *in fine* d'ajuster ou, selon le langage du modélisateur, de « caler » le modèle. Lorsque le calage du modèle est assuré, une démarche prospective de prévision est possible selon une multitude de scénarios. Les résultats que nous avons obtenus *via* la modélisation hydraulique monodimensionnelle (une seule direction d'écoulement et une valeur moyenne par section pour les variables hydrauliques) et du transit de la charge alluviale sur fonds mobiles (*i.e.*, mode morphologique du module NST du logiciel MIKE-11 ; DHI, 2011) sont : i) un bilan de transport pour chaque bief du modèle, basé sur la différence entre les volumes de sédiments en transit en entrée et en sortie de bief, et ii) les variations de la cote du fond dans le temps en fonction des résultats du bilan de transport.

Le tronçon sur lequel a porté la modélisation numérique est celui localisé au niveau du village de Citou (S1 ; Figure 5B). En ce point, le bassin versant de l'Argent Double couvre une surface de 20 km<sup>2</sup>. Les caractéristiques morphologiques du cours d'eau changent brutalement dans ce secteur en raison de son aptitude à dissiper l'énergie hydraulique. D'un chenal à forte pente (3,5 %), sinueux et confiné entre des versants raides en amont, l'Argent Double adopte un tracé rectiligne sur le site, sa pente s'adoucit nettement (1,7 %) et le lit majeur s'élargit considérablement, passant de quelques mètres à plus de 100 m. Sur ce linéaire d'environ 700 m, le tronçon fluvial est entrecoupé par trois ouvrages transversaux qui segmentent le cours d'eau en une série de biefs (Figure 5A, B et C).

Les raisons qui ont motivé le choix du site sont multiples. Parmi les six sites de suivi sédimentaire, le secteur S1 est celui qui présente les résultats les plus intéressants en termes de mobilité des alluvions – 95 % des galets pucés ont été mobilisés entre l'injection et la deuxième campagne de terrain

(Figure 4B) – et de distance de transport (distance moyenne : 222 m ; distance maximale : 621 m ; Figure 4C). Ces résultats permettent d'optimiser l'exploitation des données en termes d'analyse des distances de transport et des volumes charriés. C'est également un secteur à enjeux économiques (cultures) et à fort risque de débordement (chenal sous-dimensionné et structures hydrauliques latérales dégradées). Enfin, la morphologie du lit a été modifiée suite à l'implantation de plusieurs seuils hydrauliques, dont l'objectif est de ralentir les écoulements, auxquels s'ajoutent des renforcements de berge (gabions et merlons de curage) destinés à priver le chenal de toute mobilité latérale ainsi qu'à limiter ses débordements. Il nous a donc paru intéressant de comparer le transport solide avec et sans les seuils hydrauliques dans un contexte où les gestionnaires du territoire cherchent à restaurer l'Argent Double.

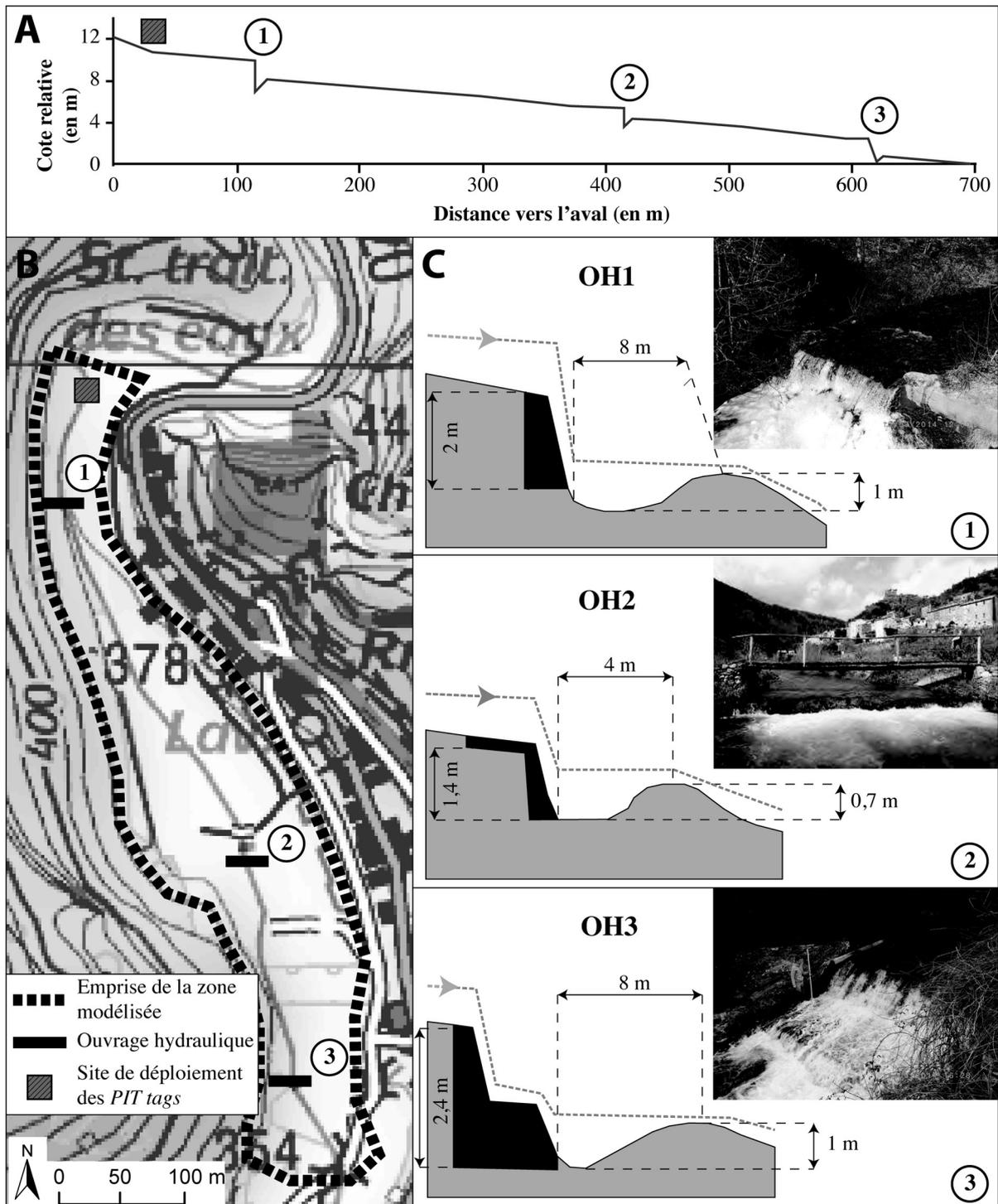
Afin de pouvoir modéliser le transport sédimentaire, il a été nécessaire de concevoir au préalable un modèle hydraulique basé sur des données topographiques, bathymétriques, des relevés d'ouvrage et une chronique hydrologique. Les données nécessaires n'existant pas, l'hydrologie du tronçon modélisé a été reconstituée (*cf. infra*) et des mesures de terrain (levé topographique au télémètre laser ; précision : 10 cm) ont été réalisées afin de concevoir le modèle hydraulique.

Compte tenu des contraintes techniques que représentait l'acquisition de ces données, la stratégie de modélisation s'est orientée vers la mise en œuvre d'un modèle 1-D qui ne nécessite que des profils topographiques. Au final, dix-sept profils en travers ont été levés sur un tronçon d'environ 700 m. Le choix quant au degré de précision du modèle 1-D n'a pas été de nature à altérer la qualité de la modélisation (Rathburn et Wohl, 2001 *in* Cheng, 2005). En effet, toutes les singularités morphologiques du lit ont été relevées, ce qui a permis de représenter fidèlement les ruptures de pente et les modifications de la largeur à pleins bords, qui sont les éléments essentiels du modèle hydraulique.

À partir des débits à pas de temps variable, disponibles sur la Banque Hydro, de la station de mesure des Salices, située 30 km en aval du tronçon modélisé (Figure 4A), les données hydrologiques de la crue du 06/03/2013 ( $Q_{\max} = 12,1 \text{ m}^3/\text{s}$ ) ont été recalculées au niveau de Citou (S1) en considérant

le régime influencé par les orages lors des crues. Le débit à Citou (S1) a été reconstitué à partir de la hauteur d'eau, elle-même évaluée lors de la pointe de crue à partir d'une photographie prise le 06/03/2013 à pleins bords depuis un pont situé en limite aval du tronçon modélisé et de la loi hauteur-débit donnée par le logiciel de modélisation. La hauteur

estimée pendant le pic de la crue du 06/03/2013 correspond à un débit d'environ 20 m<sup>3</sup>/s. Le reste de l'hydrogramme de la crue à la station des Salices a été transposé en faisant le rapport entre le débit de pointe mesuré aux Salices et le débit de pointe évalué à Citou (S1) selon la loi hauteur-débit du modèle hydraulique.



**Figure 5.** Caractéristiques du tronçon de la modélisation hydro-sédimentaire de l'Argent Double. A : Profil en long du site modélisé ; B : Emprise de la zone modélisée ; C : Dimensions des ouvrages hydrauliques (OH) du tronçon

Le débit de l'Argent Double estimé dans la partie montagneuse ( $\sim 20 \text{ m}^3/\text{s}$  à Citou) à partir du modèle hydraulique est donc supérieur au débit mesuré à l'exutoire du bassin ( $12,1 \text{ m}^3/\text{s}$  à la Redorte). Cette caractéristique est commune à l'Argent Double et aux autres cours d'eau du Minervois, qui s'écoulent au travers de modelés karstiques et sont donc susceptibles de perdre une partie de leur débit par infiltration dans les cavités souterraines (Gadelle, 1986).

## B. Paramétrage du modèle et apports des investigations de terrain

Le module de transport solide (NST) intégré au logiciel MIKE-11 propose un large choix de formules et de paramètres d'ordre sédimentaire, hydrodynamique et hydraulique. Selon le paramétrage, les résultats obtenus varient de plusieurs ordres de grandeur si l'on considère les valeurs extrêmes (Raufaste, 2013 ; Michler, 2014). Ici repose donc tout l'intérêt du calage à partir des volumes mesurés par l'approche de terrain. Le choix des formules de transport adaptées et le paramétrage du module NST s'est fait par le biais de tests de sensibilité des différents paramètres. Les résultats en termes de volume en sortie du modèle ont été confrontés aux mesures de terrain. Cette étape a permis de sélectionner les trois formules (Sato *et al.*, 1958 ; Engelund et Hansen, 1972 ; Engelund et Fredsoe, 1976) les mieux adaptées au contexte hydrodynamique de la zone modélisée parmi les quatorze proposées par le logiciel.

## C. Résultats de la modélisation

### 1. Capacité de transport

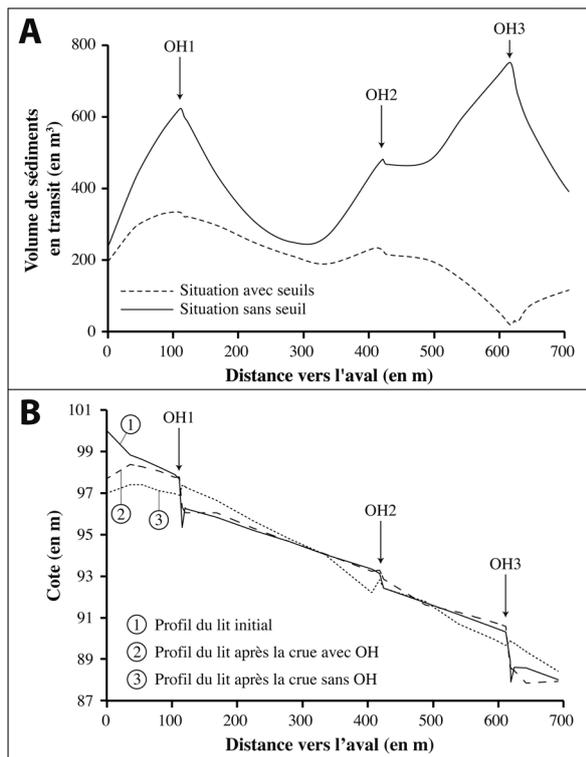
À Citou, les volumes accumulés au cours de la crue du 06/03/2013 sont de  $282 \text{ m}^3$ ,  $278 \text{ m}^3$  et  $308 \text{ m}^3$  au droit de la zone de déploiement des galets pucés, suivant les trois formules sélectionnées. Ces valeurs sont comprises dans l'intervalle des volumes charriés estimés selon la méthode des distances (cf. I.B.2.). Les conditions naturelles de transport sont donc relativement bien retranscrites par le modèle hydraulique. Lors de cette crue, les débits supérieurs à  $6 \text{ m}^3/\text{s}$ , mobilisateurs de la charge de fond (cf. débit critique II.C.3) se sont produits sur une durée d'environ 24 h, développant une capacité de transport moyenne de  $12 \text{ m}^3/\text{h}$ . Réduisant la pente du lit, les seuils hydrauliques ont entraîné une dimi-

nution progressive des volumes transportés (Figure 6A). Ces résultats sont en accord avec la dispersion des traceurs. En effet, un seul galet équipé a été retrouvé en aval de OH3, tandis qu'une grande partie d'entre eux a été immobilisée en aval de OH1. La même simulation a été exécutée pour un scénario « sans seuil », correspondant au même profil en long initial, dans lequel l'effet « point dur » imposé par les ouvrages en travers est supprimé. Pour ce scénario, les volumes de sédiments en transit sont marqués par des pics coïncidant avec les positions des seuils hydrauliques supprimés.

Ces pics atteignent  $800 \text{ m}^3$  et les volumes sont globalement doublés jusqu'à OH2 mais passent d'une valeur quasiment nulle à une valeur considérable au droit de OH3, confirmant ainsi l'impact de ce dernier sur le transit sédimentaire. Grâce au fort potentiel morphodynamique de l'Argent Double, une crue de  $20 \text{ m}^3/\text{s}$ , inférieure à la crue de récurrence biennale et également inférieure au débit à pleins bords, permettrait donc d'évacuer une quantité significative de sédiments libérés par la suppression des ouvrages transversaux.

### 2. Évolution morphologique verticale du lit

En conditions réelles, les impacts de la crue du 06/03/2013 (pic de crue =  $12,1 \text{ m}^3/\text{s}$  aux Salices, recalculé à  $20 \text{ m}^3/\text{s}$  à Citou) sur le profil en long du lit sont faibles. Les variations du niveau du lit (incision ou exhaussement) atteignent au maximum 20 à 30 cm (Figure 6B) et correspondent à l'épaisseur moyenne de la couche active estimée lors des calculs de volumes (cf. I.B.) à 26 cm (pour  $\beta = 2$  et  $D_{90} = 113 \text{ mm}$ ). Cependant, le scénario « sans seuil » présente des ajustements morphologiques bien visibles (Figure 6B). Ces derniers sont conséquents au droit des seuils hydrauliques supprimés et tendent à favoriser un retour au profil d'équilibre théorique. D'un phénomène de sédimentation en présence du seuil, on passe à un phénomène d'érosion (de l'ordre d'un mètre) des alluvions situées au niveau de la crête du seuil supprimé, et leur dépôt immédiatement en aval, comblant ainsi la fosse d'affouillement. L'ajustement du lit consécutif à l'effacement aurait donc un impact spatial se limitant à une centaine de mètres en amont et en aval (distance totale :  $\sim 200 \text{ m}$ ) de chacun des ouvrages. Ces observations corroborent les résultats obtenus en termes de volume et de distance de transport (cf. I.B.2.).



**Figure 6.** Résultats de la modélisation hydro-sédimentaire. A : Variations longitudinales des volumes transportés avec et sans seuils (OH) lors d'une crue de  $20 \text{ m}^3/\text{s}$  sur l'Argent Double. La formule utilisée dans cette simulation est celle de Sato *et al.* (1958), la plus représentative des effets de seuil ; B : Évolution du profil en long avec et sans seuils (OH) lors d'une crue de  $20 \text{ m}^3/\text{s}$  sur l'Argent Double

### 3. Contrainte tractrice critique

Le modèle hydraulique effectue un calcul actualisé dans le temps de la contrainte tractrice appliquée au fond ( $\tau_0$  en  $\text{N}/\text{m}^2$ ), qui varie pour partie selon les ajustements morphologiques mais surtout selon les conditions hydrauliques des écoulements. Dans le cas d'un modèle unidimensionnel, la contrainte tractrice donnée en sortie de modèle hydraulique est une valeur moyenne pour chaque section en travers. Durant la crue du 06/03/2013, la valeur de contrainte tractrice au-delà de laquelle la charge de fond a été mise en mouvement (contrainte tractrice critique  $\tau_c$ ) correspond également à celle observée lors de son immobilisation. Elle s'élève à  $50 \text{ N}/\text{m}^2$ .

La connaissance du seuil critique de mise en mouvement a permis alors de déterminer la fréquence du transport alluvial. La valeur seuil de contrainte tractrice est obtenue pour un débit d'environ  $6 \text{ m}^3/\text{s}$ , qui constitue ainsi le débit critique de mise en

mouvement. Ce dernier est atteint deux fois tous les 100 jours selon les débits classés à la station hydrologique des Salices, fournis par la Banque Hydro depuis 1969. Sa récurrence est donc assez forte.

## IV. DISCUSSION

La technique de traçage sédimentaire par RFID a permis d'opérer un suivi individuel des particules équipées de transpondeurs passifs. Elle est parfaitement adaptée aux caractéristiques physiques de l'Argent Double en termes de taille des éléments constituant la charge de fond et de dimensions du lit, en témoignent les taux de retours élevés. Cependant, la qualité et la quantité des résultats obtenus sont dépendantes des conditions hydrologiques présentes au cours du suivi. Cette contrainte peut être limitante pour les cours d'eau méditerranéens à régime hydrologique très contrasté, influencé par les orages, mais qui peuvent aussi connaître de longues périodes sans crue (voire sans eau). C'est le cas de l'Argent Double, pour lequel une seule crue (06/03/2013) réellement mobilisatrice de la charge de fond a eu lieu sur dix-sept mois de suivi. Malgré les 240 traceurs disposés sur six placettes (40 traceurs par site) réparties sur les 38 km du tracé de l'Argent Double, les données récoltées à la suite de deux sondages du lit sont insuffisantes sur cinq d'entre-elles pour être intégrées aux formules d'estimation des volumes charriés, qui se basent sur les distances de transport des traceurs (Liébault et Laronne, 2008). Ceci présente une contrainte opérationnelle importante si des résultats rapides sont escomptés, réduisant ainsi la mise en œuvre de cette technologie notamment dans le cadre d'études privées. Il est possible de partiellement s'affranchir de ce facteur limitant en augmentant le nombre de galets équipés, ce qui est rendu envisageable par le faible coût des *PIT tags*.

Malgré les résultats inadaptés à l'estimation de volumes pour la majorité des sites, le traçage RFID a permis de dégager des informations sur les modalités du transport par charriage de l'Argent Double. D'une manière générale, la mobilité (traceurs mis en mouvement) est plus importante dans la partie montagneuse que sur le piémont (Figure 4B). Cette observation coïncide avec les conditions hydrauliques, caractérisées par un chenal à forte énergie dans la partie montagneuse, contraint latéralement par des vallées encaissées marquées

par de nombreux passages en gorges, et un chenal plus large avec une pente plus douce, permettant la dissipation partielle de l'énergie sur le piémont (Figure 3A). Ce gradient amont-aval est beaucoup moins marqué lorsque l'on s'intéresse aux distances de transport (Figure 4C), qui semblent plus influencées par la position des placettes d'injection au sein du lit mineur, et donc par l'aptitude des traceurs à rejoindre le chenal vif. En fait, les distances de transport dépendent de la taille des particules (Figure 4D), signifiant que les petites particules sont plus susceptibles de rejoindre le chenal vif et ainsi d'être transportées sur de grandes distances (e.g.,  $D_{\text{moy}} [40 - 50 \text{ mm}] = 152 \text{ m}$  ;  $D_{\text{moy}} [50 - 63 \text{ mm}] = 153 \text{ m}$ ), tandis que les traceurs plus grossiers, malgré une mobilité importante ( $\sim 50 \%$ ), parcourent des distances beaucoup moins importantes (e.g.,  $D_{\text{moy}} [80 - 100 \text{ mm}] = 24 \text{ m}$  ;  $D_{\text{moy}} [100 - 125 \text{ mm}] = 36 \text{ m}$  ;  $D_{\text{moy}} [125 - 160 \text{ mm}] = 14 \text{ m}$ ). Ces distances de transport ne sont généralement pas suffisantes pour que les galets pucés quittent la forme fluviale de la placette d'injection et soient soumis aux forces d'entraînement (dépendantes de la hauteur d'eau) localement appliquées dans le chenal vif.

La valeur de la contrainte tractrice critique ( $\sim 50 \text{ N/m}^2$ ) de l'Argent Double à Citou (S1) déterminée à partir du modèle est modeste mais reste supérieure à celles mesurées dans les cours d'eau alpins à charge graveleuse comme l'Esconavette ( $10 - 20 \text{ N/m}^2$ ), le Bèoux ( $15 - 40 \text{ N/m}^2$ ) et la Barnavette ( $20 - 40 \text{ N/m}^2$  ; Liébault et Clément, 2007). Cette valeur de contrainte tractrice critique plus élevée sur l'Argent Double incite à s'interroger sur l'adéquation entre la taille des sédiments et les conditions hydrauliques à Citou (S1), où la charge de fond est composée majoritairement de plaquettes de schistes prédécoupées par l'orientation de la schistosité, conférant ainsi un aplatissage important pouvant faciliter (*i.e.*, augmentation de la portance) la mobilisation et le transport des débris. Cette hypothèse est confirmée par la valeur théorique de la contrainte tractrice critique calculée en réalisant la moyenne des résultats issus de trois formules (Shields, 1936 ; Meyer-Peter et Müller, 1948 ; Komar, 1987) et basée sur la taille des sédiments. La valeur de  $79 \text{ N/m}^2$  (Figure 3A) est sensiblement supérieure à celle déterminée à partir du modèle ( $\sim 50 \text{ N/m}^2$ ), prouvant ainsi que la mise en mouvement s'opère pour une contrainte tractrice inférieure à la contrainte tractrice critique théorique. En témoignent les volumes de sédiments charriés

au cours de la crue du 06/03/2013, de l'ordre de  $300 \text{ m}^3$  au droit du site d'injection des galets pucés et de  $200 \text{ m}^3$  en moyenne sur l'ensemble des sections du tronçon modélisé (Figure 6A). La spatialisation de la quantification du transport sur l'ensemble du tronçon est rendue possible par l'utilisation d'un modèle hydro-sédimentaire. Il permet de pallier le caractère ponctuel des données fournies par le traçage sédimentaire et de s'affranchir en théorie de la complexité de l'étude du charriage en conditions naturelles. L'autre avantage que présentent les modèles numériques pour la quantification du transport solide est la possibilité de développer une analyse prospective multipliant les scénarios grâce aux puissances de calcul offertes par les capacités informatiques. Dans la pratique, les logiciels de modélisation du transport solide offrent une large gamme de formules de transport, dont les conditions d'application sont complexes à appréhender. D'une formule à l'autre, d'un paramétrage à un autre, les résultats peuvent fortement fluctuer et l'utilisation des modules de transport solide *via* ces logiciels de modélisation reste limitée, en grande partie en raison de ces divergences.

L'estimation des volumes par le biais des distances de transport issues du traçage des alluvions grossières a permis d'affiner le paramétrage du modèle numérique et de sélectionner les formules de transport adaptées au contexte morphodynamique et sédimentaire. L'importante marge d'erreur (entre  $164$  et  $768 \text{ m}^3$ ) a pu être contrainte en admettant que la largeur active du lit ( $w_b$ ) est souvent surestimée pour les événements de faible ampleur, en raison de l'hétérogénéité du lit fluvial (Liébault et Laronne, 2008). Même de faible ampleur, la variabilité des formes fluviales et des alluvions qui les constituent modifient considérablement les seuils de mise en mouvement à l'échelle du chenal. À une échelle encore plus locale, c'est l'agencement des particules qui conditionne ces seuils de mise en mouvement (Petit, 1994 ; Recking *et al.*, 2010). L'armurage du lit est généralement plus marqué dans le chenal d'étiage que sur les bancs avoisinants (Kouliniski, 1994). Cette surface armurée entraîne une surestimation du transport solide calculé (à partir de relations basées sur l'hydraulique) par rapport au transport solide réel (Hassan *et al.*, 2008). Ainsi, le calcul des volumes s'effectue à partir de la moyenne des distances de transport des traceurs. Or, cette dernière est fortement influencée par la dispersion des petites particules, ajoutant un facteur de sures-

timation supplémentaire. Il est donc préférable de considérer une gamme de volumes d'alluvions charriées comprise entre la valeur de l'estimation basse (164 m<sup>3</sup>) et la valeur de l'estimation moyenne (418 m<sup>3</sup>). Bien que la marge d'erreur de l'estimation des volumes charriés par la crue du 06/03/2013 reste importante (entre 164 et 418 m<sup>3</sup>), les résultats obtenus sont suffisants pour augmenter la précision de l'outil numérique. Ils mériteraient d'être améliorés en mesurant sur le terrain les valeurs de largeur et de profondeur de la couche active ( $w_b$  et  $d_b$ , respectivement). Ces actions ont été entreprises (Brousse, thèse en cours) avec l'ajout de 200 traceurs répartis sur trois nouveaux sites de suivi sur l'Argent Double et disposés le long de transects sur la section en travers du cours d'eau plutôt qu'agglomérés sur des placettes, de manière à recouper les différentes unités sédimentaires et déterminer les largeurs actives ( $w_b$ ) par des mesures *in situ*.

Les volumes charriés par la crue du 06/03/2013 sont importants au regard de la faible ampleur de l'événement hydrologique (200 m<sup>3</sup> en moyenne sur le tronçon modélisé), mais auraient été nettement supérieurs en l'absence des trois ouvrages hydrauliques qui segmentent ce tronçon de rivière (S1), de l'ordre de 400 m<sup>3</sup> en moyenne sur le tronçon modélisé et de 500 à 900 m<sup>3</sup> au droit des ouvrages supprimés. Ceci met en lumière l'effet des seuils hydrauliques sur la diminution de l'énergie du cours d'eau, dont le bilan hydro-sédimentaire est actuellement déséquilibré (*i.e.*, diminution de la pente et maintien de la fourniture sédimentaire). Ce déséquilibre favorise le dépôt des alluvions en amont des seuils et modifie le profil en long, ce qui se traduit par un étagement progressif (*i.e.*, amont-aval) du cours d'eau. La restauration du lit de l'Argent Double pourrait permettre le rééquilibrage hydro-sédimentaire du chenal, mais pourrait aussi affecter l'équilibre actuellement en place entre le chenal corseté (longitudinalement) et cloisonné (transversalement) et sa plaine alluviale.

Les résultats de la modélisation hydro-sédimentaire mettent en évidence l'augmentation de la pente et de la charge alluviale en cas de suppression des seuils hydrauliques. En théorie, la libre divagation du cours d'eau dans une bande active non contrainte (suppression des gabions) devrait diminuer les vitesses d'écoulement. L'un dans l'autre, la puissance spécifique fluviale ne change pas de manière significative (> 10 %) en raison de l'augmentation

de la pente et de la largeur conjointes. La restauration du cours d'eau (suppression des seuils et libre divagation) est donc susceptible d'entraîner un changement local de style fluvial (*i.e.*, passage d'un style rectiligne à chenal unique « forcé » par les aménagements hydrauliques à un style en tresses) puisque le déclouonnement favorisera une plus forte pente et un espace de divagation plus large, dans un contexte d'irrégularité hydrologique marqué par l'occurrence de crues éclairs et d'une abondante charge sédimentaire. La genèse de cette métamorphose fluviale a déjà pu être observée à deux reprises ces dernières décennies au cours des crues de 1999 et de 2011 (supérieures à crue cinquantennale), pour lesquelles des brèches se sont formées dans les merlons, entraînant l'apparition de nouveaux chenaux et un dépôt d'alluvions grossières consécutif à ces crues dans le lit majeur actuel (Arnaud-Fassetta *et al.*, 2002). Il est admis que le style en tresses apparaît dès lors qu'un cours d'eau développe une puissance spécifique comprise entre 50 W/m<sup>2</sup> et 300 W/m<sup>2</sup> (Van den Berg, 1995). Dans le cas de l'Argent Double à Citou, la puissance spécifique de la crue biennale a été estimée à 220 W/m<sup>2</sup>. Ces valeurs sont communes aux rivières en tresses françaises et permettent d'envisager l'adoption d'un style en tresses en cas de restauration des conditions d'écoulement naturelles dans le chenal (Bravard et Petit, 1997).

## V. CONCLUSIONS

Les ajustements morphologiques d'une rivière torrentielle à lit mobile sont en grande partie une conséquence des mécanismes de transport de la charge de fond et de leurs effets hydro-morpho-sédimentaires. Dans le présent article, cet aspect a été abordé à la fois par le traçage sédimentaire par RFID et par la modélisation numérique du transport solide. L'utilisation des *PIT tags* pour le suivi individuel des particules se révèle efficace dans le cas d'une rivière de taille moyenne à charge de fond grossière ( $D_{50} = 63$  mm) telle que l'Argent Double. Les taux de retour sont très satisfaisants (supérieurs à 80 % en moyenne sur les deux années de suivi) mais n'autorisent pas systématiquement l'exploitation des données de distance de transport pour l'estimation des volumes charriés. Les distances de transport et/ou les taux de traceurs mobiles sont trop faibles sur cinq des six sites de suivi pour intégrer ces données aux formules de

transport sédimentaire. La mise en place de la technique de suivi du transport sédimentaire par traçage a tout de même permis de mieux appréhender les mécanismes de charriage à l'échelle de la particule. Les résultats ont mis en évidence un transport de fond important et de récurrence pluriannuelle, mais fortement dépendant des conditions locales d'écoulement. La modélisation du transport alluvial à partir du logiciel MIKE-11 a permis de compléter les informations ponctuelles sur les distances de transport et les volumes charriés fournies par les galets pucés. Ces derniers sont utilisés pour calibrer cet outil numérique. Les volumes de sédiments en transit ainsi que les ajustements morphologiques du profil en long témoignent de l'influence des seuils hydrauliques sur la continuité hydro-sédimentaire. Le débit critique de mise en mouvement calculé par le biais du modèle est relativement faible ( $6 \text{ m}^3/\text{s}$ ) et son occurrence témoigne d'une haute fréquence de transport (deux fois tous les 100 jours). Cette valeur est confirmée par la mobilité des traceurs entre les deux campagnes de relevés des *PIT tags* malgré des conditions hydrologiques très modérées.

Au final, l'apport principal de cette étude est véritablement le couplage entre les données mesurées sur le terrain et la modélisation numérique. Les traçages RFID permettent d'estimer (avec une marge d'erreur) les volumes de sédiments charriés dans la mesure où les données disponibles sont satisfaisantes (*i.e.*, bons taux de retour et distances de transport suffisantes). La modélisation numérique donne des perspectives d'étude pour des projets de restauration (rétablissement de la continuité écologique) à des échelles spatio-temporelles beaucoup plus larges (du court terme au moyen terme), en termes d'évaluation des volumes de sédiments potentiellement remobilisés suite à la suppression d'un ouvrage, d'évolution du profil en long, ou bien encore d'identification des tronçons fluviaux exposés à l'incision ou favorables au dépôt.

## REMERCIEMENTS

Nous tenons à remercier les coéditeurs (Frédéric Gob, Éric Hallot, Geoffrey Houbrechts) de nous avoir fait l'honneur de participer à ce numéro « spécial », qui rend hommage à la brillante carrière du Professeur François Petit. Nous tenons également à exprimer notre grande gratitude à Mathieu Dupuis et Mathilde Poullat (techniciens de rivière),

Andrée et Damien Baudouy (Domaine Pautard) et Annie Boisselier (ADREUC) pour leur soutien logistique sur le terrain, ainsi qu'à Didier Dagherne (directeur de l'agence hydraulique fluviale de Suez Consulting) pour son engagement à la coopération entre l'Université Paris-Diderot et Suez Consulting et son soutien financier à l'acquisition d'une partie des traceurs RFID. Les commentaires des deux relecteurs anonymes ont grandement contribué à l'amélioration de ce manuscrit.

## AVEC LA COLLABORATION DE

Paris-Diderot Team : Monique Fort, Clélia Bilodeau, Aneta Bienczak, Estebano Cárcamo Vildos, Nicolas Garel, Stéphanie Villeret, Marine Bêlorgey, Gaëlle Benoit, Claire Blondel, Kevin Bourrand, Romain Courault, Rémi De Matos-Machado, Nora Derras, Gaye Gandega, Manon Garandeau, Lucile Geray, Régis Goma, Laurence Jézéquel, Soline Laguel, Mélanie Lestréhan, Axel Lor Pierre, Sandrine Margirier, Aurélien Morganti, Josselin Reposeur, Marion Vernon, Stefano Zanini, Alexis Colin, Adrien Tassel.

## BIBLIOGRAPHIE

- Arnaud-Fassetta, G., Beltrando, G., Fort, M., Plet, A., André, G., Clément, D., Dagan, M., Méring, C., Quisserne, D. & Rycx, Y. (2002). La catastrophe hydrologique de novembre 1999 dans le bassin versant de l'Argent Double (Aude, France) : de l'aléa pluviométrique à la gestion des risques pluviaux et fluviaux. *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, 1, 17-34.
- Arnaud-Fassetta, G. & Fort, M. (2009). *The integration of space of good functioning in fluvial geomorphology, as a tool for mitigating flood risk. Application to the left-bank tributaries of the Aude River, Mediterranean France*. In (Gumiero B., Rinaldi M., Fokkens B. Eds.) IVth ECRR International Conference on River Restoration 2008. Centro Italiano per la Riqualficazione Fluviale, 313-322.
- Arnaud-Fassetta, G. & Fort, M. (2011). *Dix ans de recherches hydrogéomorphologiques dans le département de l'Aude et une question : comment parvenir à réduire le risque de crue en domaine méditerranéen ?* In (Fort M., Ogé F. Eds.) Actes du colloque international « Risques naturels en Méditerranée occidentale », 16-21 novembre 2009, Carcassonne, France. Reproduction Héliographique Audoise, Carcassonne, 33-52.
- Bravard, J.-P. & Petit, F. (1997). Les cours d'eau. Dynamique du système fluvial. Armand Colin, Paris, 222 p.

- Bunte, K. & Abt, S. (2001). Sampling surface and sub-surface particle-size distributions in wadable gravel- and cobble-bed streams for analyses in sediment transport, hydraulics and streambed monitoring. General Technical Report n° RMRS- GTR-74, U.S. Dept. Agri., Forest service, Rocky Mountain Research Station, Fort Collins, Colorado, 428 p.
- Chapuis, M. (2012). Mobilité des sédiments fluviaux grossiers dans les systèmes fortement anthropisés : éléments pour la gestion de la basse vallée de la Durance. Thèse de géographie, Aix-Marseille Université, 243 p.
- Cheng, F. (2005). Sediment transport and channel adjustments associated with dam removal. MS Dissertation, Ohio State University, 98 p.
- DHI (2011). MIKE 11: A Modelling System for Rivers and Channels Reference Manual. DHI Software 2011, 536 p.
- Engelund, F. & Hansen, E. (1972). A monograph on sediment transport in alluvial streams. Copenhagen Technical Press, Copenhagen, 62 p.
- Engelund, F. & Fredsoe, J. (1976). A sediment transport model for straight alluvial channels. *Nordic Hydrology*, 7, 294-298.
- Erskine, W.D. & Warner, R.F. (1988). Geomorphic effects of alternating flood- and drought-dominated regimes on NSW coastal rivers. *Fluvial Geomorphology of Australia*, Academic Press, Sidney, 223-244.
- Fort, M., Arnaud-Fassetta, G., Beltrando, G., Plet, A., André, G. & Mering, C. (2001). *Impacts hydro-morphologiques des fortes précipitations des 12-13 novembre 1999 sur la retombée méridionale de la Montagne Noire : l'exemple de l'Argent Double (Aude)*. In (Médi-Terra Ed.) Au chevet d'une catastrophe. Les inondations des 12 et 13 novembre 1999 dans le Sud de la France. Actes du colloque de Perpignan, 26-28 juin 2000, Presses Universitaires de Perpignan, Perpignan, 41-52.
- Gadelle, F. (1986). Les régimes hydrologiques, naturels ou influencés, dans l'extrême sud du Massif Central. *Revue de Géographie Alpine*, 74(1-2), 99-109.
- Ginocchio, R. (2012). L'énergie hydraulique. Paris Tec et Doc, 1, 34-37.
- Johnson, M.F. (2010). The use of Passive Integrated Transponder (PIT) systems for tracing particles and organisms in rivers. *British Society for Geomorphology, Geomorphological Techniques*, Chap. 3, Sec 3.9, 6 p.
- Haschenburger J.K., Church M. (1998) Bed material transport estimated from the virtual velocity of sediment. *Earth Surface Processes and Landforms*, 23, 791-808.
- Hassan, M.A., Smith, B.J., Hogan, D.L., Luzi, D.S., Zimmermann, A.E. & Eaton, B.C. (2008). *Sediment storage and transport in coarse bed streams: scale considerations*. In (Habersack H., Piégay H., Rinaldi M. Eds.) *Gravel-Bed Rivers VI: From Process Understanding to River Restoration*. Elsevier, Amsterdam, 473-496.
- Hooke, J.M. (2006). Human impacts on fluvial systems in the Mediterranean region. *Geomorphology*, 79(3-4), 311-355.
- Komar, P.D. (1987). Selective grain entrainment by a current from a bed of mixed sizes: A reanalysis. *Journal of Sedimentary Research*, 57, 203-211.
- Kondolf, G.M. & Piégay, H. (2003) *Tools in fluvial geomorphology*. Wiley, Chichester, 688 p.
- Koulinski, V. (1994). Étude de la formation d'un lit torrentiel. Études du CEMAGREF, Série Équipements pour l'eau et l'environnement n° 15, Grenoble, 538 p.
- Lekach, J. & Schick, A.P. (1995). Trajectories of bed load particles within the active layer of an ephemeral stream. *Application of Tracers in Arid Zone Hydrology (Proceedings of the Vienna Symposium, August 1994)*, IAHS Publications, 232, 443-452.
- Lenzi, M.A. (2004). Displacement and transport of marked pebbles, cobbles and boulders during floods in a steep mountain stream. *Hydrological processes*, 18(10), 1899-1914.
- Liébault, F., Bellot, H., Chapuis, M., Klotz, S. & Deschatres, M. (2012). Bedload tracing in a high-sediment-load mountain stream. *Earth Surface Processes and Landforms*, 37, 385-399.
- Liébault, F. & Clément, P. (2007). La mobilité de la charge de fond des rivières torrentielles méditerranéennes. *Géographie physique et Quaternaire*, 61(1), 7-20.
- 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. & Piégay, H. (2002). Causes of 20th Century channel narrowing in mountain and piedmont rivers of southeastern France. *Earth Surface Processes and Landforms*, 27, 425-444.
- Meyer-Peter, E. & Müller, R. (1948). Formulas for bed load transport. *Proceedings of the second Meeting IAHR*, Stockholm, 39-64.
- Michler, L. (2014). Étude de la mobilité de la charge de fond de l'Argent Double – Croisement de la technologie RFID et de la modélisation numérique. Mémoire du Master 2 « Dynamique des Milieux et Risques », université Paris-Diderot (Paris 7), SAFE-GE, 99 p.
- Petit, F. (1994). Dimensionless critical shear stress evaluation from flume experiments using different gravel beds. *Earth Surface Processes and Landforms*, 19, 565-576.
- Raufaste, S. (2013). Mise en œuvre de la modélisation numérique pour l'étude de la morpho-dynamique fluviale. Mémoire du Master 2 « Dynamique des Milieux et Risques », université Paris-Diderot (Paris 7), SAFE-GE, 174 p.
- Recking, A., Liébault, F., Peteuil, C. & Jolimet, T. (2010) Évaluation des formules de transport solide en ri-

vière avec prise en compte de l'échelle temporelle.  
CEMAGREF, Grenoble, 39 p.

Rollet, A.-J., Macvicar, B., Piégay, H. & Roy, A. (2008).  
L'utilisation de transpondeurs passifs pour l'esti-  
mation du transport sédimentaire : premiers retours  
d'expérience. *La Houille Blanche*, 4, 110-116.

Rollet, A.-J. (2007). Étude et gestion de la dynamique  
sédimentaire d'un tronçon fluvial à l'aval d'un  
barrage : le vas de la basse vallée de l'Ain. Thèse  
de géographie et d'aménagement, université Jean  
Moulin (Lyon 3), 305 p.

Sato, S., Kikkawa, H. & Ashida, K. (1958). Study on the  
bed-load transportation. Reports for PWRI 98, 13-30.

Schumm, S.A. (1977). The fluvial system. Wiley, Chich-  
ester, 338 p.

Shields, A. (1936). Application of similarity principles  
and turbulence research to bed-load movement.  
*California Institute of Technology*, 26, 5-24.

Tanguy, J.M. (2009). Modèles mathématiques en hy-  
draulique maritime et modèles de transport. Traité  
d'hydraulique environnementale : de la goutte de  
pluie jusqu'à la mer, 2, 4, 353 p.

Van den Berg, J.H. (1995). Prediction of alluvial channel  
pattern of perennial rivers. *Geomorphology*, 12(4),  
259-279.

Wolman, G. (1954). A method of sampling coarse riv-  
er-bed material. *Transactions, American Geophysical  
Union*, 35(6), 951-956.

*Coordonnées des auteurs :*

Luc MICHLER  
Université Paris-Diderot (Paris 7)  
UMR 8586 (PRODIG)  
luc.michler@etu.univ-paris-diderot.fr

Guillaume BROUSSE  
Université Paris-Diderot (Paris 7)  
UMR 8586 (PRODIG)  
Suez Consulting  
guillaume.brousse@etu.univ-paris-diderot.fr

Gilles ARNAUD-FASSETTA  
Université Paris-Diderot (Paris 7)  
UMR 8586 (PRODIG)  
gilles.arnaud-fassetta@univ-paris-diderot.fr

Jean-Michel CAROZZA  
Université de La Rochelle  
UMR 7266 (LIENSS)  
jean-michel.carozza@univ-lr.fr

