

## **Etude de la dynamique sédimentaire des affluents de la haute Marne depuis quatre siècles grâce aux scories de la métallurgie ancienne**

Vincent Tamisier<sup>1</sup>, Frédéric Gob<sup>1\*</sup>, Geoffrey Houbrechts<sup>2</sup>, Alès Bartos<sup>1</sup>, Audrey Farall<sup>1</sup>,  
Emmanuèle Gautier<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Université Panthéon-Sorbonne (Paris 1), Laboratoire de Géographie Physique, CNRS UMR8591, 1 Place Aristide Briand, FR-92195 Meudon cedex, France.

<sup>2</sup> Université de Liège, Département de Géographie, Laboratoire d'Hydrographie et Géomorphologie Fluviale, B4000 Sart Tilman, Liège

\* frederic.gob@univ-paris1.fr

### **Résumé**

*La mise en place des réglementations européennes et françaises impose le rétablissement de la libre circulation des espèces et le bon déroulement du transport des sédiments dans les rivières. A ce titre, un nombre croissant de projets de restauration ont été réalisés via le désaménagement total ou partiel d'ouvrages en travers. La plupart des ouvrages visés concernent des petits cours d'eau de faible à moyenne énergie. Cependant, la dynamique sédimentaire de ce type de cours d'eau ainsi que l'impact des petits ouvrages en travers sur la continuité sédimentaire reste mal connu.*

*Dans cette étude nous apportons des éléments de connaissance concernant la dynamique sédimentaire sur le temps long de plusieurs rivières à charge caillouteuse de faible à moyenne énergie de la partie amont du bassin de la Marne (Rognon, Blaise et Blaiseron). Nous avons pu estimer les compétences effectives de ces cours d'eau grâce à la présence de nombreuses macroscories dans leur charge de fond. En effet, les scories de la métallurgie ancienne (XIV<sup>ème</sup> à la fin du XIX<sup>ème</sup> siècle) ont été rejetées en grande quantité par les usiniers dans ces rivières, et soumis à de nombreuses crues mobilisatrices. De ce fait, elles font partie de la charge de fond au même titre que les particules naturelles. Elles peuvent donc être considérées comme un marqueur représentatif de la compétence effective de ces rivières. Une relation entre la compétence effective et la puissance spécifique calculée pour le débit à plein bord dans les secteurs de prélèvement a également été établie. La bonne corrélation entre ces deux variables montre que le débit à plein bord est un débit morphogène efficace qui permet la progression de la vague sédimentaire. Finalement, les vitesses de progression de la charge de fond ont également été calculées. Les valeurs obtenues sont comprises entre 1,3 et 2,7 km par siècle pour la charge grossière.*

### **Points clefs**

- ✓ *La compétence effective des affluents de la haute marne est de comprise entre 11,5 et 45 mm.*
- ✓ *Les vitesses de progressions de la charge de fond sur 4 à 5 siècles sont de l'ordre de 1,5 à 2,7 km/siècle.*
- ✓ *Le rôle des seuils en rivière reste à préciser mais semble minime sur le temps long.*

## Introduction

La continuité écologique est considérée comme un des éléments structurant le bon état écologique des cours d'eau. A ce titre, les réglementations européennes et françaises imposent le rétablissement de la libre circulation des espèces et le bon déroulement du transport des sédiments. Elle est ainsi au centre d'un nombre croissant de projets de restauration via le désaménagement total ou partiel d'ouvrages en travers. Depuis le début des années 2000, ce sont ainsi des dizaines de barrages, seuils de moulin et obstacles à l'écoulement de plus petite taille (gués bétonnés, buses, etc.) qui ont été retirés des cours d'eau.

A l'échelle du bassin de la Seine, l'état des lieux de 2013 réalisé par l'Agence de l'eau Seine-Normandie dans le cadre de l'Application de la DCE signale la présence de plus de 10000 ouvrages transversaux susceptibles d'altérer la continuité (AESN, 2014). Cela correspond en moyenne à un ouvrage tous les 5 km et, dans certaines régions du bassin, à un ouvrage tous les 500 m. Devant de tels chiffres, il est bien entendu illusoire d'imaginer supprimer la totalité de ces ouvrages et une meilleure connaissance de leur origine et de leurs impacts sur le milieu est essentiel pour prioriser les actions. Le rôle des grands barrages sur l'interruption du transit sédimentaire est de mieux en mieux connu, mais l'impact des petits ouvrages en travers, type seuil de moulin, reste en effet à préciser. Si la taille de ces derniers peut laisser croire qu'ils laissent passer une partie substantielle de la charge de fond, la fermeture des lits par pavage, armage ou colmatage, a souvent été décrite dans les rivières à faible énergie tendant ainsi à prouver le contraire. Si un nombre croissant d'études montrent que ces rivières ont une dynamique sédimentaire altérée par des siècles d'anthropisation de leur cours et de leur régime hydrologique (pour la navigation, l'industrie, l'agriculture et par les extractions de sédiment et la modification de leur tracé), aucune étude n'a pu quantifier précisément l'impact des ouvrages transversaux sur le transport sédimentaire de ces systèmes relativement peu dynamiques.

Les éléments présentés dans ce rapport s'inscrivent dans un projet de recherche plus large qui a pour objectifs d'apporter des éléments de connaissance concernant la dynamique sédimentaire des cours d'eau de faible à moyenne énergie du bassin de la Seine et d'évaluer l'impact des petits ouvrages transversaux sur le transport des sédiments afin de proposer un cadre référentiel aux opérations de restaurations de la continuité sédimentaire. Ce travail se décline en deux volets correspondant à deux approches spatiales et temporelles distinctes : (i) l'évaluation de la dynamique sédimentaire sur des tronçons de cours d'eau de plusieurs dizaines de kilomètres à l'échelle de plusieurs siècles. Cette analyse est rendu possible grâce à un marqueur anthropique que sont les scories de la métallurgie ancienne. Ces résidus de la production de fonte sont présents en quantité importante dans la charge de fond de certaines rivières du bassin de la Seine, depuis leur rejet à proximité des cours d'eau. Si les lieux d'injections sont précisément localisés et les périodes de fonctionnement des hauts-fourneaux datées, les scories peuvent constituer un bon marqueur de la charge de fond (Houbrechts et Petit, 2003 ; Houbrechts *et al.*, 2011) ; et (ii) l'évaluation de la dynamique sédimentaire actuelle et de l'impact des petits ouvrages sur des tronçons de quelques kilomètres de long à l'échelle de 2 ou 3 saisons hydrologiques. Ceci à partir de la mise en place et du suivi de sédiments équipés de puces RFID, de sondes de mesures de hauteur d'eau et de mesures topo-bathymétriques autour de plusieurs barrages.

Dans le cadre de ce rapport nous présentons une partie des résultats du premier volet concernant l'évaluation de la dynamique sédimentaire sur le temps long de plusieurs sous bassins de la Marne à partir des scories de hauts-fourneaux collectés lors de campagnes de terrains menées en 2017 et 2018 sur le Rognon, la Blaise et le Blaiseron. Ce travail fait suite à un premier rapport présenté en 2016 (Gob *et al.*, 2016) dans lequel l'histoire de la métallurgie du fer de haute Marne ainsi que le principe de la méthode ont été largement présentés.

### 1. Sites d'études

La Haute-Marne et ses affluents constituent un secteur privilégié pour cette étude du fait de la mise en place précoce de hauts-fourneaux. Le département de Haute-Marne est en effet un des berceaux de la sidérurgie en France, les premiers hauts-fourneaux ont été installés dès le 15<sup>ème</sup> siècle, et au 19<sup>ème</sup> siècle ce département occupait la première place de la sidérurgie française avec 90 hauts-fourneaux et plus de 15% de la production nationale de fonte (Robert-Dehault, 2010 ; Gob *et al.*, 2016)). La métallurgie haut-marnaise a prospéré grâce

à un minerai de relativement bonne qualité, à l'abondance du bois et à l'énergie des cours d'eau largement aménagés à cet effet (Beguinot 1979, Alvès *et al.*, 1997).

Les rivières considérées dans cette étude sont le Rognon, la Blaise et, son principal affluent, le Blaiseron. Sur ces cours d'eau, on recense de nombreux hauts-fourneaux qui constituent les points d'entrée (points d'injection) des scories dans la rivière pour certains depuis le 15<sup>ème</sup> siècle. On compte ainsi 18 hauts-fourneaux sur la Blaise entre la source et la confluence avec la Marne, 2 sur le Blaiseron et 21 sur le Rognon. Nous présentons dans ce rapport les résultats obtenus sur 4 tronçons situés principalement dans les parties amont de ces rivières, sur lesquels les implantations de hauts-fourneaux sont assez espacées pour pouvoir observer la dispersion des scories dans la rivière sur des distances suffisamment longues. Il s'agit de la Blaise en amont de sa confluence avec le Blaiseron, du Blaiseron dans sa partie aval, du Rognon dans sa partie amont et intermédiaire (Figure 1). Ces tronçons de rivière qui drainent des bassins versant de 60 à plus de 200 km<sup>2</sup> ont des pentes comprises entre 4.7 et 2.2 ‰ et des largeurs à plein bords allant de 6 à 14 mètres. Ils présentent une charge de fond caillouteuse fine (Tableau 1), contenant une grande quantité de scories.

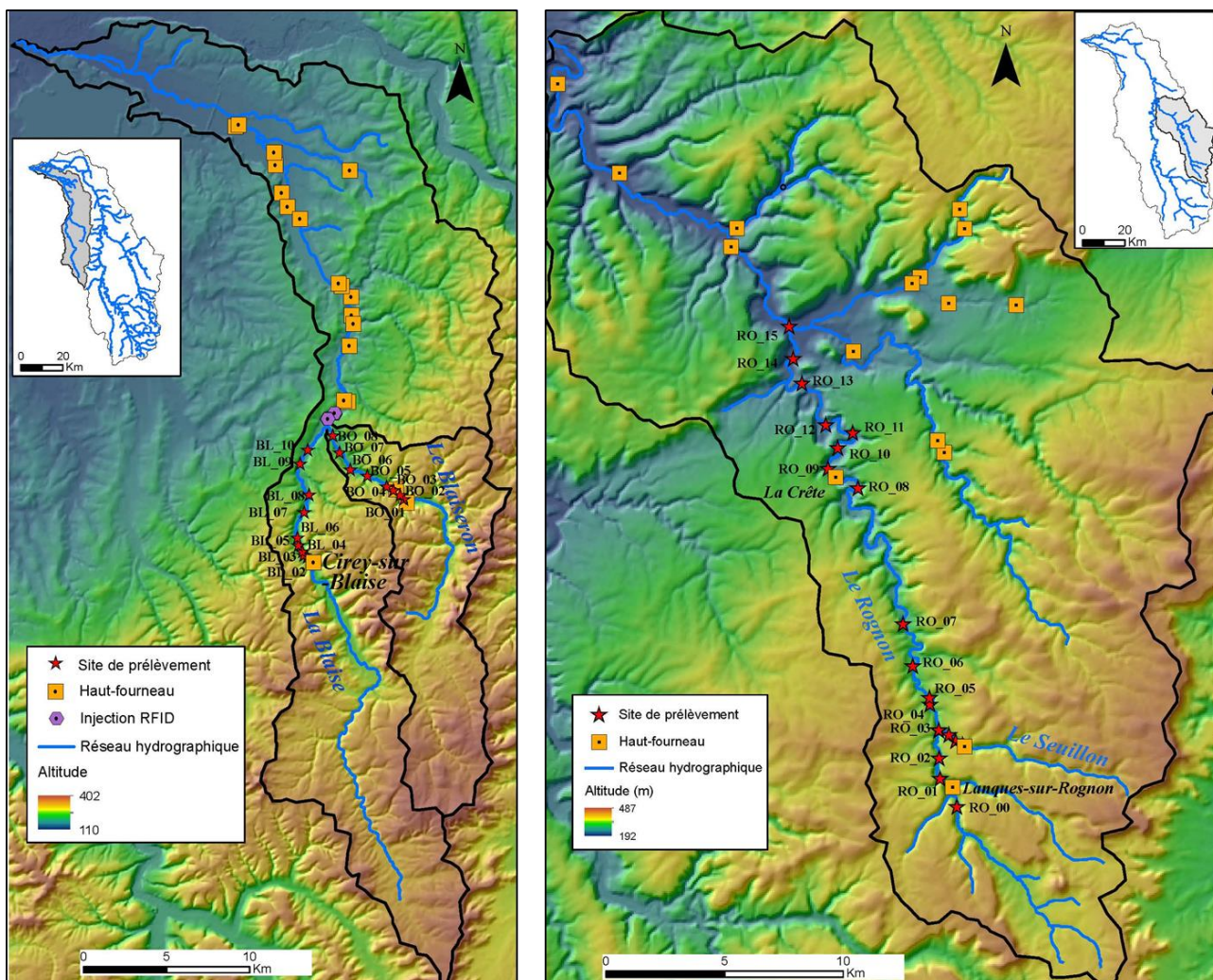


Figure 1. Cartes de localisation des tronçons étudiés. A gauche, les bassins versants de la Blaise et du Blaiseron. A droite le bassin versant du Rognon. Sur chacune des cartes, ces bassins versants sont situés au sein du bassin de la Marne amont.

Tableau 1. Caractéristiques morphologiques, hydrologiques et sédimentologiques des tronçons dans lesquels les scories ont été utilisées. Les limites amont et aval des tronçons sont définis par la superficie du bassin versant.

Rivières	Superficie du bassin versant (km <sup>2</sup> )	D <sub>50</sub> (mm)	D <sub>90</sub> (mm)	Pente (‰)	Largeur à pleins bords (m)	ω <sub>b</sub> (W/m <sup>2</sup> )
<b>Blaise</b>	149,9 – 198,3	17,5 - 24,5	33,5 - 45	2,23 – 2,27	11,2 – 13,8	33 - 44
<b>Blaiseron</b>	109,5 – 130,1	16 - 20	28 - 30	3,61 – 4,68	6,2 – 8,4	-
<b>Rognon amont</b>	64,6 – 106,5	12,25 - 18	27 - 49	2,4 – 3,2	8,3 – 9,9	25 - 34
<b>Rognon intermédiaire</b>	170,4 – 205,2	18 - 27	31,5 - 42	2,35 – 2,87	10,3 – 12,7	43 - 54

Les caractéristiques morphologiques et hydrologiques de ces tronçons de rivières mesurées et calculées nous ont permis de déterminer les puissances spécifiques à plein bords. La puissance spécifique ( $\omega$  exprimée en W/m<sup>2</sup>) se présente sous la forme suivante :

$$\omega = (g \rho Q S) / w$$

avec Q le débit (en m<sup>3</sup>.s<sup>-1</sup>), w la largeur du lit (en m), S la pente longitudinale (en m.m<sup>-1</sup>),  $\rho$  la masse volumique du fluide (en kg.m<sup>-3</sup>) et g l'accélération de la pesanteur (en m.s<sup>-2</sup>). Afin de permettre les comparaisons entre rivières différentes, on retient généralement comme débit le débit à plein bord. Par conséquent, w est la largeur prise entre les berges au niveau du débordement. Les pentes longitudinales ont été calculées dans un logiciel S.I.G. à partir des cartes topographiques (1:25 000, équidistance de 5m) et de la BD Carthage de l'IGN. Les bassins versant sont extraits du MNT de la BD Alti (IGN) au pas de 25 m et calés sur le Réseau Hydrographique Théorique français (RHT ; Pella *et al.*, 2012). La méthode utilisée pour la délimitation des bassins est celle du D8 (O'Callaghan et Mark, 1984), en forçant les écoulements le long du réseau RHT. Cette méthode se base sur les altitudes pour déterminer la direction de l'écoulement puis l'accumulation de ces écoulements au niveau de chaque cellule du MNT. Les largeurs à plein bords ont été mesurées directement sur le terrain, 10 mesures ont été effectuées puis moyennées afin de minimiser les variations locales du aux type de forme fluviale rencontrée. Les débits à plein bords des différents tronçons ont été calculés en ajustant des fonctions puissance du type :

$$Q = a A^b$$

où A représente la superficie du bassin versant (en km<sup>2</sup>), à partir des débits à plein bord évalués aux différentes stations de mesures hydrométriques présentes sur la Blaise et la Rognon. Les coefficients b obtenus pour la Blaise et le Rognon, respectivement 0,98 et 0,95 sont cohérent avec les résultats obtenus par d'autres auteurs (Bravard et Petit, 2000 ; Petit *et al.*, 2005).

## 2. Matériels et Méthodes

L'idée d'utiliser les scories de la métallurgie ancienne comme marqueur du fonctionnement sédimentaire des cours d'eau a été proposée par plusieurs chercheurs de l'Université de Liège. D'abord pour étudier la sédimentation en plaine alluviale (Hanrottait, 1972 ; 1973) puis pour évaluer la vitesse de déplacement de la charge de fond des rivières caillouteuses ardennaises (Sluse et Petit, 1998 ; Houbrechts et Petit, 2003 ; Houbrechts, 2005 ; Houbrechts *et al.*, 2011) et l'épaisseur de leur couche active de charriage (Houbrechts *et al.*, 2012). Pour l'étude de la charge de fond, la méthode repose sur un le postulat que les scories, une fois introduites dans les cours d'eau, progressent à la même vitesse que la charge de fond naturelle de la rivière. Si l'on connaît le site d'injection et sa période de fonctionnement, en prélevant d'amont vers l'aval les plus grosses scories présentes dans le lit, on peut évaluer la compétence de la rivière et la vitesse de progression de la charge de fond. Ce postulat peut être posé car la densité des scories est très proche de celle des matériaux naturels (2,2-2,5 g/cm<sup>3</sup> pour 2,6 g/cm<sup>3</sup>). De plus, même si les scories sont des particules individuelles, la quantité de scories présente dans la rivière est telle, qu'il est permis de considérer qu'il s'agit en quelque sorte de la propagation d'une « vague sédimentaire ». Les scories sont soumises aux mêmes conditions hydrologiques et de piégeage que les particules composant la charge de fond et ont pu être piégées dans des bancs de convexité ou être remaniées par érosion latérale (Sluse et Petit, 1998). Par rapport aux techniques traditionnelles, l'utilisation des scories permet de considérer ces questions liées au transport de la charge fond sur le temps long (plusieurs siècles) permettant ainsi d'intégrer l'évolution historique des lits et de pleinement intégrer le caractère très discontinu du transport (difficilement considéré lorsqu'on travaille avec le marquage de particules individuelles) (Houbrechts et Petit, 2003 ; Houbrechts *et al.*, 2011).

Le prélèvement des scories est préférentiellement réalisé sur les seuils. En effet, dans les systèmes seuils-mouilles, selon la théorie de réversibilité des forces tractrices en fonction des débits, les seuils agissent comme des filtres dans la progression de la charge de fond. Aussi, la taille du matériel sur ces faciès permet d'avoir une estimation de la taille des particules charriées par la rivière et donc une estimation de la compétence effective de celle-ci (Bravard et Petit, 2000). La procédure pour prélever ces scories consiste à récolter l'ensemble des plus grosses scories (axe  $b > 5\text{mm}$ ) présentes sur les seuils prospectés et d'en mesurer l'axe  $b$  à l'aide d'un pied à coulisse. Le transport de la charge grossière est considéré en calculant la moyenne des axes  $b$  des 10 plus grosses scories (M10). Houbrechts *et al.* (2011) ont montré que, d'une part, l'utilisation de cette moyenne permet de réduire le risque de considérer une scorie isolée (qui n'aurait pas été apportée sur le site de prélèvement par la rivière) et, d'autre part, que cette moyenne est proche du  $D_{95}$  de la rivière, un excellent indicateur de sa compétence effective.

La granulométrie de surface des seuils a été déterminée sur les différents tronçons étudiés en prélevant et mesurant 100 particules sur chaque site, suivant la méthodologie décrites par Wolman (1954). Le  $D_{50}$  et le  $D_{90}$  ont été calculés pour pouvoir comparer la taille des scories à celle des éléments naturels présents dans la charge de fond, ceci afin d'identifier des effets potentiels de masquage ou de saillie.

### 3. Résultats

#### 3.1. Evolution longitudinale de la taille des scories

Pour chaque tronçon rivière étudié, nous avons construit un graphique représentant l'évolution longitudinale de la taille moyenne des 10 plus grosses scories présentes sur les différents seuils prospectés (M10) (Figure 2). Deux autres courbes sont également représentées sur ce graphique, elles correspondent à deux indicateurs de la taille ( $D_{50}$  et  $D_{90}$ ) des sédiments présents sur les seuils naturels rencontrés sur les cours d'eau étudiés. Sur ces graphiques on distingue clairement les sites d'injection par des scories de grande dimension comparativement aux autres sites. A l'aval de ces sites d'injection, on remarque des secteurs de tri, dans lesquels la taille des scories décroît très rapidement sur une distance comprise entre quelques centaines de mètres à un peu plus d'un kilomètre selon les tronçons. Plus en aval on observe systématiquement un secteur de palier caractérisé par une relative stabilisation de la taille des scories. La proximité des sites d'injection ne nous a permis de localiser qu'un seul front de progression sur le tronçon amont du Rognon entre RO\_06 et RO\_07 (Figure 2A).

Les sites d'injections se caractérisent par des M10 proches de 80 mm, mis à part celui du Seuillon où le M10 est de 64 mm (Figure 2A). Les scories prélevées sur les sites d'injections n'ont jamais été mobilisées, et nous renseignent sur la tailles maximale des éléments transportés depuis le début de l'activité du haut-fourneau, et donc sur la compétence maximale de la rivière sur le tronçon considéré. L'apport en scories du Seuillon dans le Rognon ne se marque pas sur la courbe du M10 du Rognon (Figure 2A). Ces scories, d'une taille légèrement supérieure à celle du Rognon à la confluence, sont dans la gamme de taille de la compétence du Rognon sur ce tronçon et sont donc soumises à une mobilisation généralisée. Les prospections de terrains nous ont permis, à travers la localisation de 6 sites d'injections sur les tronçons étudiés, de déterminer avec précision l'emplacement des anciens hauts-fourneaux.

On peut observer en aval de toutes les injections une diminution rapide de la taille moyenne des 10 plus grosses scories. Cette décroissance n'est pas liée à une modification des conditions hydrodynamiques de la rivière, puisque les puissances spécifiques sont relativement constantes et parfois tendent à augmenter. Cet affinement est plutôt le résultat d'un tri hydraulique qui consiste en une décroissance granulométrique vers l'aval, due à une mobilisation moins fréquente des éléments de taille importante. Ce secteur de tri nous renseigne sur la vitesse de progression des éléments les plus grossiers de la charge de fond. La vitesse de progression des éléments d'une classe granulométrique déterminée peut être estimée en mesurant la distance maximale parcourue par les scories de cette taille et en divisant cette distance par la période qui s'est écoulée depuis le début du rejet de scories dans la rivière. La distance sur laquelle ce tri a lieu varie d'un tronçon à l'autre mais reste dans une gamme comprise entre quelques centaines de mètres pour la Blaise et le Blaiseron à un peu moins de 2 kilomètres pour le Rognon et le Seuillon.

Nous pouvons observer systématiquement une stabilisation de la taille des scories à l'aval des tris hydrauliques. Ces secteurs de palier témoignent des compétences effectives des tronçons considérés, et peuvent se prolonger sur plusieurs kilomètres. Malgré ces distances, on peut constater que la taille moyenne des scories varie relativement peu entre les sites, même si il est possible d'y observer parfois une légère décroissance qui résulte probablement de l'abrasion que peuvent subir les scories lors du transport. Sur le Rognon, les paliers se caractérisent par des scories dont la taille (M10) est comprise entre 11,4 et 21,8 mm pour le tronçon amont et entre 25,5 et 45,5 mm pour le tronçon intermédiaire (Figure 2A et 2B). La variation de 2 cm constatée dans ce secteur de palier pourrait être liée à l'existence de pertes karstiques importantes situées entre les points de prélèvements RO\_12 et RO\_14, qui enregistrent les plus petites tailles de scories. Du fait de ces pertes karstiques le lit est complètement asséché durant les périodes d'étiage, toutefois nous ignorons leurs influences pour les débits proches du débit à plein bord durant lesquels la charge de fond est mobilisée. Dans la Blaise le secteur de palier est caractérisé par des tailles moyennes de scories comprises entre 30 et 45 mm (Figure 2C), et sur le Blaiseron le M10 correspond globalement à 20 mm (Figure 2D).

Nous avons pu avoir accès aux données concernant une étude qui s'est intéressé au suivi de la charge de fond de la Blaise (ISL, 2015). Dans ce cadre, 120 particules naturelles ont été équipées de puce RFID, injectées dans la Blaise 1.2 km en aval du tronçon que nous étudions et suivi pendant 1 an et demi. Durant la période de suivi 5 crues ont été enregistrées dont deux proches de la crue biennale. La taille de la plus grosse particule mobilisée est de l'ordre de 75 mm, cette valeur est proche de la compétence maximale de la rivière estimée à partir des scories qui est de 78.1 mm sur le site d'injection BL\_02 (Figure 1 et 2C) au droit du haut-fourneau de Cirey-sur-Blaise. Les particules marquées ont parcourues une distance moyenne de 38 m durant la période de suivi. La taille moyenne des 10 particules ayant parcouru les plus grande distance est de 37.4mm. La taille moyenne des plus grosses scories dans le tronçon de la Blaise positionné à quelques kilomètres en amont est de 36.1 mm, ce qui correspond avec la compétence observée avec les particules marquées de puce RFID pour ce cycle hydrologique. Cependant, le tronçon équipé de particules marquées se situe en aval de la confluence avec le Blaiseron qui est le principal affluent de la Blaise et qui contribue de manière significative au débit de la Blaise puisque son bassin versant est de l'ordre de 130 km<sup>2</sup> à la confluence, et de 188 km<sup>2</sup> pour la Blaise au même point. Par ailleurs, les crues les plus importantes enregistrées pendant la période de suivi représentent 0,6 fois le débit à plein bord qui est considéré comme le débit qui représente le maximum d'efficacité pour la mise en mouvement de la charge de fond et le transport des sédiments (Bravard et Petit, 2000). Il est donc probable que la compétence évaluée à partir des particules marquées pendant la période de suivi, soit inférieure à la compétence effective de la Blaise sur ce tronçon.

En comparant la taille moyenne des scories dans les secteurs de paliers on peut constater que pour le Rognon amont et la Blaiseron le M10 est proche du D<sub>50</sub> ou compris entre le D<sub>50</sub> et le D<sub>90</sub> des seuils, alors que pour la Blaise et certains sites du Rognon intermédiaires le M10 est proche du D<sub>90</sub> et/ou au-dessus. Ces différences peuvent induire des effets de masquage ou de saillie et influencer les conditions de transport des scories.



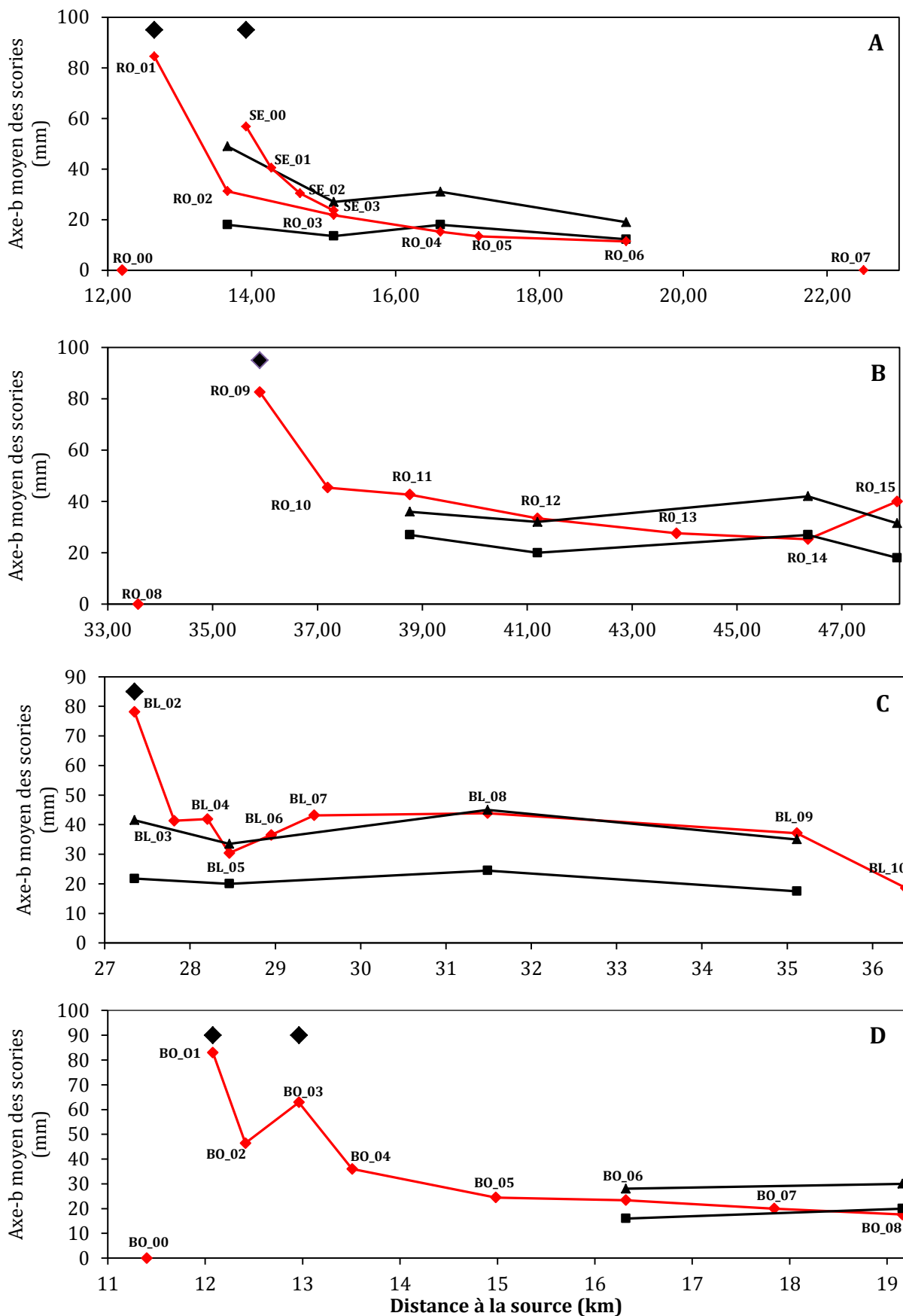


Figure 2. Evolution longitudinale des 10 plus grosses scories (M10). A:Rognon amont (RO) et son affluent, le Seuillon (SE) ; B:Rognon intermédiaire (RO); C:Blaise (BL); D:Blaiseron (BO). Les losanges noirs signalent les sites d'injection. Les losanges rouges font référence aux M10 des seuils prospectés. Les valeurs de D50 et D90 obtenues sont représentés respectivement par des carrés et des triangles noirs.

### 3.2. Comparaison entre la taille des scories des secteurs de palier (M10) et la puissance spécifique à plein bord.

Des relations entre la taille des 10 plus grosses scories situées dans des secteurs de palier et la puissance spécifique à plein bord ont déjà été proposées pour plusieurs rivières des Ardennes (Belgique) (Houbrechts et Petit, 2003 ; Houbrechts *et al.*, 2011). Ces relations ont permis de confirmer que les différences de taille des scories observées dans différents tronçons de rivières étaient bien dues à des variations de la compétence de ces tronçons. Sur la base des travaux de Ferguson (2005) qui montrent que la puissance spécifique critique de mise en mouvement d'un élément de taille donnée dépend de la taille des éléments environnant, Houbrechts *et al.* (2011) ont ajusté deux relations distinctes entre la puissance spécifique et le M10, une pour les scories en position de saillie (plus grosses que les particules du lit) et une pour celle en position de masquage ((plus petites que les particules du lit). Ayant constaté que les M10 des secteurs de palier présentaient des valeurs proche du  $D_{50}$  pour certains tronçons de cours d'eau et plutôt similaires voir supérieur au  $D_{90}$  pour les autres, nous avons voulu vérifier si les effets de masquage ou de saillie étaient avérés. Pour ce faire, nous avons calculé le rapport entre le M10 des secteurs de palier et la  $D_{50}$  des seuils. Les sites ont été séparés en deux catégories :

- (i) M10 relativement proche du  $D_{50}$  ( $M10/D_{50}$  entre 0,8 et 1,2)
- (ii) M10 clairement supérieur au  $D_{50}$  ( $M10/D_{50} > 1,2$ )

Nous avons établi une relation pour chacune de ces deux catégories (Figure 3). Les coefficients de détermination sont assez élevés avec 0,72 pour la relation impliquant le rapport  $M10/D_{50} > 1,2$  et de 0,94 pour celle impliquant les rapports  $M10/D_{50}$  compris entre 0,8 et 1,2. Lorsque l'on compare ces relations avec celles obtenues par Houbrechts et al. (2011) on constate que les coefficients des équations sont assez proches et que les droites s'alignent bien deux à deux. Ces résultats mettent en évidence l'effet de la position relative des scories par rapport au fond du lit sur les conditions de mise en mouvement et de transport. Il apparaît que les puissances spécifiques à plein bord doivent être plus importante dans des conditions de masquages, pour mobilise les éléments d'une taille donnée que dans des conditions d'effet de saillie.

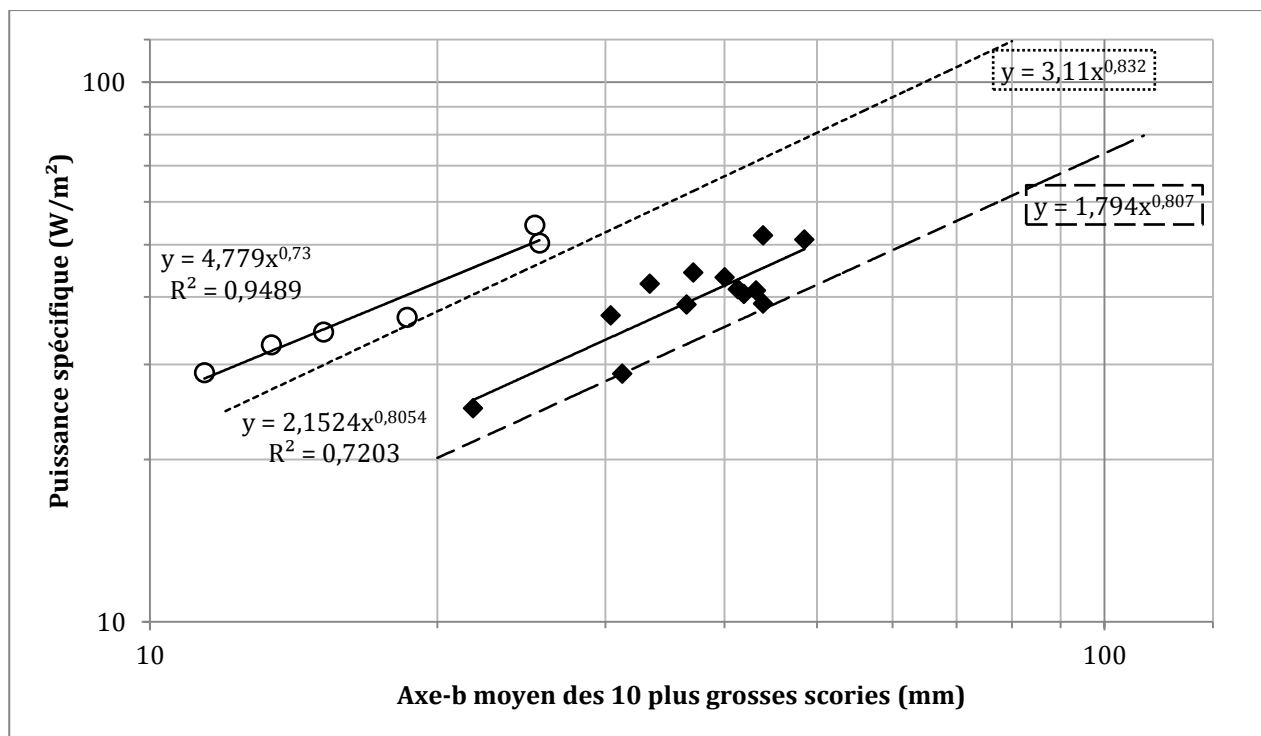


Figure 3. Relations entre la taille moyenne des 10 plus grosses scories (M10) situées dans des secteurs de palier des tronçons de rivières étudiés et la puissance spécifique à plein bord. Les cercles blancs correspondent aux valeurs de  $M10/D_{50}$  comprise entre 0,8 et 1,2 et les losanges noirs correspondent aux valeurs de  $M10/D_{50} > 1,2$ . Les droites en pointillé et en tiret correspondent aux relations établies par Houbrechts et al. (2011) avec respectivement celle établie pour les  $M10/D_{50} < 0,8$  et celle établie pour les  $M10/D_{50} > 1,2$ .



### **3.3. Estimations des vitesses de la charge de fond.**

Concernant la Blaise, le Blaiseron et le Rognon intermédiaire nous n'avons pas pu localiser de front de progression des scories du fait de la proximité des sites d'injections, soit des hauts-fourneaux installés sur les rives du cours d'eau soit de l'apport d'affluent en scories. Néanmoins, nous connaissons les distances minimales parcourues par les scories et nous avons pu dater le début de fonctionnement des hauts fourneaux constituant les points d'injection. Nous pouvons donc proposer pour ces tronçons de cours d'eau des vitesses de progression minimales de la charge de fond. Ces vitesses sont supérieures à 1,7 km par siècle pour le Blaiseron, supérieures à 2,5 km par siècle pour la Blaise et supérieures à 2,7 km par siècle pour le Rognon intermédiaire.

Sur le Rognon amont nous avons pu suivre la propagation des scories depuis leur rejet dans la rivière au haut-fourneau de Lanques-sur-Rognon jusqu'au front de progression. Les études historiques (Beguinet, 1979 ; Alvès *et al.*, 1997) nous ont permis de dater le début du fonctionnement du haut-fourneau de Lanques-sur-Rognon aux alentours de 1539. Considérant que la distance parcourue est comprise entre 6,5 et 9 km, nous pouvons proposer une vitesse de progression comprise entre 1,4 et 2 km par siècle.

L'ordre de grandeur des vitesses obtenues est tout à fait comparable à ce qui a été observé sur les rivières normandes (de 0,9 à 2,2 km/siècle) étudiées par Leprêtre (2015) et sur les rivières ardennaises (1,4 et 3,1 km/siècle) par Houbrechts et Petit (2003) et Houbrechts et al. (2011).

## **4. Conclusion et perspectives**

Les résultats présentés dans ce rapport apportent des éléments de connaissance concernant la dynamique sédimentaire de plusieurs sous bassins de la Marne à l'échelle de plusieurs siècles. L'utilisation des scories comme marqueur du transport de la charge de fond appliqué à ces cours d'eau s'avère être une technique fiable pour étudier le transport de la charge de fond ayant été soumises aux mêmes conditions que les éléments naturels. Les scories prélevées proche des hauts fourneaux nous donnent des indications de la compétence maximale de la rivière. Les compétences effectives des tronçons étudiés ont pu être déterminées à partir des scories prélevées dans les secteurs de palier. L'influence de la taille des matériaux qui compose le lit de la rivière sur la compétence de la rivière par des effets de masquage et de saillie a pu être mis en évidence. La localisation d'un front de progression sur le Rognon amont nous a permis d'estimer la vitesse de progression de la charge de fond comprise entre 1,3 et 2 km par siècle.

Le deuxième volet de notre projet de recherche a pour objectif d'étudier les dynamiques sédimentaires actuelles autour des obstacles transversaux et à leurs impacts sur le fonctionnement hydro-sédimentaire. Pour ce faire, nous avons sélectionné un barrage sur le Rognon, représentatif de ceux que l'on rencontre dans le bassin de la Marne amont, autour duquel nous avons effectué des prélèvements sédimentaires et des mesures topo-bathymétrique pour pouvoir en évaluer l'impact morphologique et sédimentaire. Nous avons également prélevé 600 particules que nous avons équipées de puce RFID et réinjectées en amont, dans la retenue et en aval de l'ouvrage. A partir du suivi de ces particules, nous pourrions évaluer la franchissabilité de ces ouvrages et évaluer son impact sur la dynamique sédimentaire.

## Bibliographie

AESN, 2014. Etat des lieux 2013 du bassin de la Seine et des cours d'eau côtiers normands. Agence de l'eau Seine Normandie, 330 p.

Alvès, G., Andrés, L., Bertrand, P., Chevillot, C., Isnard, I., Perchet D., Philippe, M., Robert-Dehault, E., Verna C., (1997). La métallurgie de la Haute-Marne du Moyen Age au XXème siècle. Cahier du patrimoine, 305 p.

Beguilot, P., (1979). Une industrie haut-marnaise disparue : la fabrication de la fonte et du fer. 293 p.

Bulard, M., (1904). L'industrie du fer dans la Haute-Marne. Premier article. Annales de Géographie, 13 (69), 223-242.

Bravard, J-P. et Petit, F., (2000). Les cours d'eau. Dynamique du système fluvial. Armand Colin, Paris, 221 p.

Ferguson, R.I., (2005). Estimating critical stream power for bedload transport calculations in gravel-bed rivers. *Geomorphology* 70 (1–2), 33–41.

Gob, F., Tamisier, V., Houbrechts, G., Gautier, E., Leprêtre C., (2016). Rôle des petits obstacles transversaux sur la continuité sédimentaire des rivières à charges caillouteuses dans le bassin de la Seine (méthodologies et premiers résultats). Rapport PIREN, PIREN Phase VII. 19 p.

Hanrottait, J., (1972). Etude de la sédimentation récente de quelques rivières au cours des sept derniers siècles par l'observation de résidus de l'industrie du fer ancienne. Mémoire de Licence en Sciences géographiques, Université de Liège, inédit, 103 p.

Hanrottait, J., (1973). La sédimentation de quelques rivières belges au cours des sept derniers siècles. *Bulletin de la Société Géographique de Liège*, 9, 101-115.

Houbrechts, G., (2005). Utilisation des macroscories et des microscories en dynamique fluviale: application aux rivières du massif ardennais. Thèse de doctorat, Université de Liège, Belgium, 328 pp.

Houbrechts, G. et Petit, F., (2003). Utilisation des scories métallurgiques en dynamique fluviale : détermination de la compétence effective des rivières et estimation des vitesses de progression de leur charge de fond. *Géomorphologie : relief, processus, environnement*, 1, 3-12.

Houbrechts, G. et Petit, F., (2004). Evolution des techniques sidérurgiques pré-industrielles et aperçu des critères de localisation de la métallurgie en « Terre de Durbuy ». *Terre de Durbuy*, 89, 3-29.

Houbrechts, G. et Weber, J-P., (2007). La sidérurgie proto-industrielle dans le bassin de la Lienne. *De la Meuse à l'Ardenne*, 39, 34-63.

Houbrechts, G., Levecq, Y., Vanderheyden, V., Petit, F., (2011). Long-term bedload mobility in gravel-bed rivers using iron slag as a tracer. *Geomorphology*, 126, 233-244.

Houbrechts, G., Van Campenhout, J., Levecq Y., Hallot, E., Peeters, A. et 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.

ISL Ingénierie, (2015). Suivi des travaux réalisés sur la Blaise et la Pisancelle, rapport d'avancement. 130p.

Leprêtre, C., (2014). Etude de l'activité sidérurgique dans la vallée de la Risle. Utilisation des scories comme traceur de la propagation des sédiments de la Risle. Mémoire de Master 1 Géographie, Université Panthéon-Sorbonne, 80 p.

Leprêtre, C., (2015). Utilisation des scories de la métallurgie ancienne pour la dynamique morpho-

sédimentaire de plusieurs rivières de Haute-Normandie. Mémoire de Master 2, Dynamiques des milieux et Risques (DYNARISK), Université Panthéon-Sorbonne, 118 p.

Robert-Dehault, E., (2010). Dommartin-Le-Franc. Un haut-fourneau, un lieu, des hommes. Fontes, 64-65, 1-48.

Sluse, P. et Petit, F., (1998). Evaluation de la vitesse de déplacement de la charge de fond caillouteuse dans le lit des rivières ardennaises au cours des trois derniers siècles, à partir de l'étude des scories métallurgiques. Géographie physique et Quaternaire, 52, 373–380.