

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

Utilisation of metallurgic slags for the study of fluvial dynamics: determination of the effective competency of rivers and estimation of the transit time of sedimentary waves

Geoffrey Houbrechts*, François Petit**

Résumé

Les compétences effectives de trois rivières du nord de l'Ardenne (Belgique) ont pu être estimées grâce à la présence de nombreuses macrosories dans leur charge de fond. En effet, ces scories, rejetées par les anciens fondeurs dans les rivières, ont été soumises, pendant plusieurs siècles, à de nombreuses crues mobilisatrices. Par conséquent, elles peuvent être considérées comme un marqueur représentatif de la compétence effective des rivières sur une très longue période et sur une grande distance. Ainsi, en comparant la taille des scories en amont et en aval d'un secteur de pertes karstiques (plusieurs kilomètres), nous avons montré que ces pertes n'entraînent pas de baisse sensible de la compétence de la rivière. Une relation entre la taille des scories prélevées et les puissances spécifiques développées dans les secteurs de prélèvement a également été établie. Cette relation montre que le maximum de puissance spécifique des rivières ardennaises se produit dans les rivières dont le bassin versant est voisin de 150 km². Finalement, des scories retrouvées dans l'Ourthe, environ 10 km en aval du site de production le plus proche, ont été utilisées pour évaluer la vitesse de progression de la "vague sédimentaire". En effet, ces scories sont soumises aux mêmes conditions hydrologiques et de piégeage que les éléments naturels de la charge de fond. Après avoir daté le début du fonctionnement du site de production le plus proche (1450), nous avons calculé la vitesse de progression des scories qui est comprise entre 1,8 et 2,3 km par siècle.

Mots clés : macrosories, métallurgie ancienne, rivières à charge caillouteuse, compétence, puissance spécifique, "vague sédimentaire", Ardenne.

Abstract

Iron slags present in the bedload of three rivers of the northern Ardenne region (Belgium) allowed effective stream competency to be estimated. Elements of slag which had been rejected from former iron furnaces have been subject to mobilisation by floods for centuries. As a result, they may be considered as representative markers of the effective competency of the river over a long period of time and a great distance. In this way, a comparison of the size of slag elements upstream and downstream of a karstic sector (several kilometres long) was used to show that, despite entering a limestone area, there had not been a significant decrease in river competency. A relationship between the size of slag elements sampled and the unit stream power of the sector from which samples had been taken was also established. This relationship shows that the maximal unit stream power of the Ardenne rivers occurs in streams that have a catchment area close to 150 km². Finally, slags found in the Ourthe River, 10 km downstream of the closest production site, have been used to evaluate the transit time of the "sedimentary wave". In fact, slags are subject to the same hydrological and trapping conditions as natural elements of the bedload. After having dated the start of production at the site to 1450, we calculated that elements of slag travelled at a speed of between 1.8 and 2.3 km/100 yr.

Key words: iron slags, old iron metallurgy, gravel-bed river, competency, unit stream power, "sedimentary wave", Ardenne.

Abridged English Version

The aim of this study is firstly to determine the effective stream competency of three rivers in the northern Ardenne region (Belgium) and secondly to evaluate bedload progression speed. Considering the difficulties in determining these parameters using traditional marking methods, we have used slags rejected from iron furnaces (Photo 1A and 1B). This method has previously been used successfully in three rivers of the southern Ardenne region (Sluse and Petit, 1998). These rivers were characterised by gentle slopes and weak specific stream powers. Moreover, metallurgic activity was established here relatively late (from the 17th century AD). Hence, it was interesting to apply this method to rivers of the northern Ardenne because metal working here appeared much earlier (from the 14th century AD) and the rivers present steeper slopes.

This study is limited to the rivers of the former "Terre de Durbuy" (fig. 1) which, between the 14th and the 17th centuries, made up one of the five great pre-industrial metallurgic basins of the Belgian territory (Hansotte, 1972). The rivers concerned are the Ourthe river, and two of its tributaries: the Aisne and the Lembree.

Large quantities of slag produced in primitive furnaces were piled onto the floodplain, often very close to the river channels (Tahon, 1909). Consequently, slag could be carried away either during floods or by lateral erosion. A significant quantity of slag was rejected into the rivers, and is still being carried by these rivers today. We can consider the displacement of this slag debris to represent a "sedimentary wave". The speed at which this "sedimentary wave" progresses can be estimated once the input site has been identified, the period during which slags were rejected has been determined, and the progression front has been located. In order to identify when the uptake of slag by the rivers first occurred, the periods of furnace activity was established. It was also necessary to determine all of the slag waste sites, so as not to overestimate the distances travelled. The progression speed can be extrapolated to the entire bedload because slag, like natural bedload clasts, may be trapped in river beds (Ferguson et al., 2002) or temporarily stored in meander bend deposits and then possibly reworked by lateral erosion (Sluse and Petit, 1998).

We calculated the progression speed of slag debris in the Ourthe river at between 1.8 and 2.3 km / 100 yr. Moreover, the size of slag particles mobilised over long distances yields important information relating to effective stream competence. We observed systematic hydraulic sorting and size stabilisation (for a given reach with constant gradient) downstream from input sites. Slags collected in the Aisne river (fig. 3A) show that the effective stream competence is between 3.6 and 6.3 cm.

The morphometric and hydrological characteristics of these rivers were measured both upstream and downstream of the main confluences in order to calculate specific stream power reach by reach. In table 1 we only present reaches where a constant gradient was observed (fig. 3A, 3B, 3C). Finally, we determined a relationship between the mean

b-axis of ten particles of slag collected in the constant level sectors and specific stream power (calculated for the bank-full discharge).

Introduction

Dans les études de dynamique fluviale, différentes techniques de marquage des éléments caillouteux qui constituent la charge de fond des rivières sont couramment utilisées (Sear et al., 2000 ; Bunte et Ergenzinger, 1989) : marquages colorimétriques (Billi, 1988 ; Schick et al., 1987), marquages magnétiques (Ergenzinger et Custer, 1983 ; Hassan et al., 1984) ou des marquages au moyen d'émetteurs radio (Ergenzinger et al., 1989 ; Gintz et al., 1996). Leur utilisation a permis de mieux cerner les critères de mise en mouvement de la charge de fond et d'estimer les distances parcourues (Schmidt et Ergenzinger, 1992). Toutefois, ces estimations sont basées sur des mobilisations d'éléments isolés et sur des pas de temps relativement courts. On peut donc difficilement extrapoler ces résultats au déplacement de l'ensemble de la charge de fond car il existe des sites de piégeage au sein même du lit mineur qui peuvent immobiliser la charge pendant des temps très longs. La vitesse de propagation de l'ensemble de la charge de fond a cependant été appréhendée de façon indirecte tout d'abord en utilisant des méthodes sédimentologiques (Tricart et Vogt, 1967 ; Duschesne et Pissart, 1985) et en suivant la propagation de la métamorphose du style fluvial de rivières alpines en réponse à la péjoration climatique du Petit Age Glaciaire (Salvador, 1991). Des valeurs de propagation de la vague sédimentaire ont également été proposées grâce à l'utilisation de macroscoories, résidus de l'ancienne métallurgie qui s'est installée dans les vallées ardennaises à la fin du Moyen Age (Sluse et Petit, 1998). Toutefois, ces résultats ne portent que sur des rivières du sud de l'Ardenne dont la pente est relativement faible ; par ailleurs, la sidérurgie s'est installée relativement tard (xvii^e siècle) dans cette partie de l'Ardenne. Il était donc intéressant d'appliquer cette méthode au nord de l'Ardenne car la métallurgie s'y est installée beaucoup plus tôt (xiv^e siècle), ce qui permet d'élargir le champ d'investigation, et parce que les rivières y présentent des pentes nettement plus marquées.

Site d'étude et caractéristiques des rivières

Cette étude s'est limitée aux rivières de l'ancienne "Terre de Durbuy" qui constitua, entre les xiv^e et xii^e siècles, un des cinq grands bassins métallurgiques préindustriels du territoire beige (Hansotte, 1972). L'activité métallurgique se concentra dans cette région car elle possédait de nombreux gisements de minerai de fer, de vastes surfaces boisées et des cours d'eau maîtrisables, indispensables au fonctionnement des roues hydrauliques qui permettaient d'actionner les soufflets des forges (Houbrechts et Petit, 2001). Les rivières concernées par cette étude sont l'Ourthe et deux de ses affluents, l'Aisne et la Lembree (fig. 1). Ces rivières possèdent toutes une charge de fond caillouteuse grossière

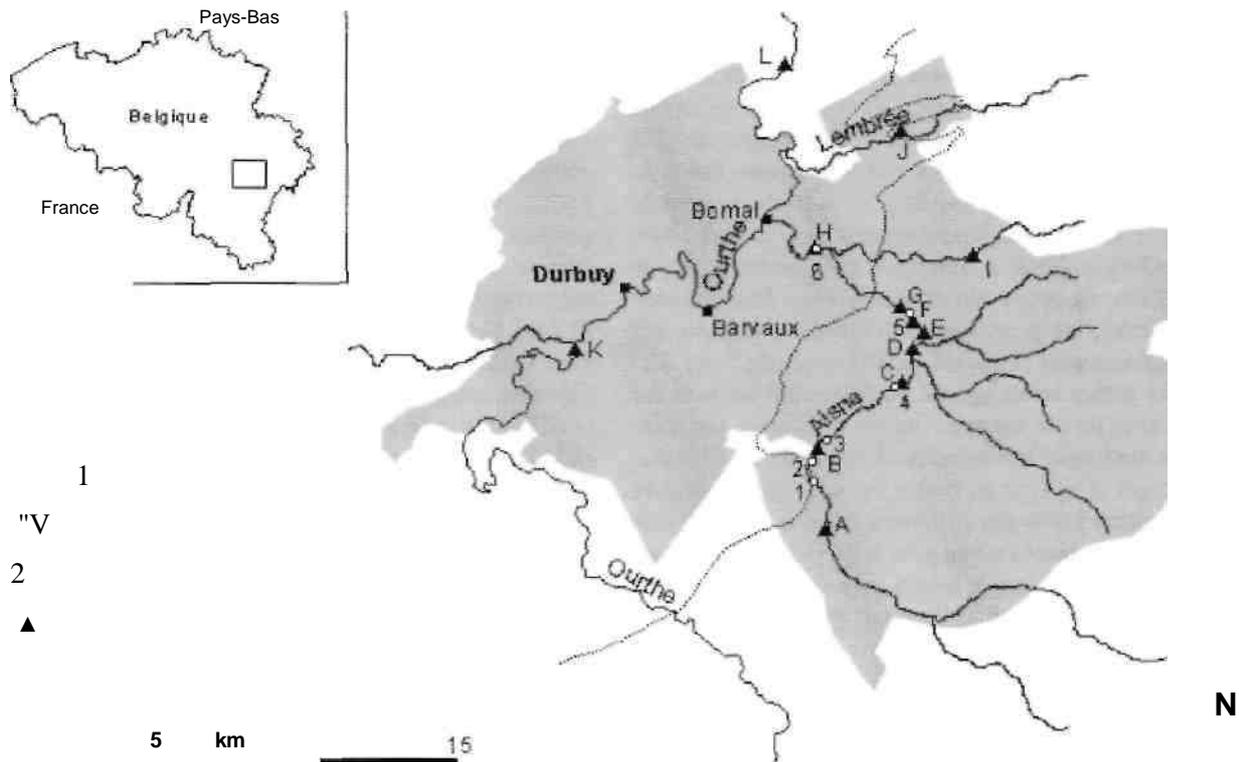


Fig. 1 - Carte de localisation du secteur d'étude. 1 : anciennes limites de la Terre de Durbuy (d'après Pirotte, 1966) ; 2 : limite septentrionale de l' Ardenne *sensu stricto* - contact avec la bande calcaire du Devonien moyen ; 3 : ancien fourneau localise grâce a la présence de scories dans la rivière (les lettres renvoient a la figure 3) ; 4 : site d'analyse granulométrique de la charge de fond (les numéros renvoient au tableau 2).

Fig. 1 - Location of the study area. 1: former boundaries of the "Terre de Durbuy" (according to Pirotte, 1966); 2: northern limit of the Ardennes, *i.e.*, contact with mid-Devonian limestone; 3: former furnace located thanks to the presence of slag in the rivers (see fig. 3); 4: study site of grain-size distribution (see table 2).

et présentent de fortes pentes. Elles prennent leur source en Ardenne et, après un parcours plus ou moins long, traversent une bande calcaire qui constitue la limite septentrionale de l' Ardenne.

Les caractéristiques morpho métriques et hydrologiques des rivières ont été mesurées et calculées en amont et en aval des principales confluences, afin de calculer les puissances spécifiques par tronçons de rivières. Toutefois, le tableau 1 présente uniquement les tronçons de rivières dans lesquels nous avons observe des secteurs de paliers (*cf.* ci-dessous).

La puissance spécifique (co , exprimée en $W.m^{-2}$) se définit de la manière suivante : $co = (p g Q S)/w$ ou p est la masse volumique du fluide, g l'accélération de la pesanteur, Q le débit mais on retient le

Rivers	Superficie du bassin versant (km ²)	Debit a pleins bords (m ³ /s)	Pente (m/m)	Largeur (m)	Puissance spécifique W/m ²
Aisne	70	7,3	0,009	7,5	86
Aisne	75	7,5	0,008	7,8	72
Aisne	160	19	0,007	11,5	115
Aisne	185	24	0,004	13,3	94
Ourthe	1200	120	0,002	33,5	71
Ourthe	1450	140	0,002	36	77
Ourthe	1550	145	0,002	38	78
R. du Vieux Fourneau	12	1,2	0,017	2,8	74
R. du Vieux Fourneau	21	2	0,019	4,5	83
Lembree	45	8,9	0,010	8,5	104

Tableau 1 - Caractéristiques morpho métriques et hydrologiques des tronçons de rivière étudiés.

Table 1 - Morphometric and hydrologic characteristics of the different sectors studied.

plus souvent le débit a pleins bords (Q_b) afin de pouvoir comparer des rivières entre elles, S la pente de la rivière et w la largeur du lit mineur au niveau du pleins bords.

Quelques précisions doivent être apportées sur la manière dont ces données ont été obtenues. Pour l'Aisne, les pentes longitudinales par secteur ont été calculées à partir de profils transversaux réalisés tous les 100 m (données tirées de l'Atlas des cours d'eau); il s'agit donc de la pente du fond du lit selon l'axe de la rivière, tenant compte de la méandration. La distance longitudinale de référence était généralement de l'ordre de 2 km, en amont des différents sites. Pour la Lembree et l'Ourthe, les pentes ont été calculées à partir des cartes topographiques (1:10000, équidistance de 5 m). Les largeurs aux pleins bords ont été mesurées directement sur le terrain ; plus de dix mesures ont été effectuées par tronçon afin de minimiser les variations locales dues à l'affectation des berges et au type de forme fluviale rencontrée. Les débits aux pleins bords des différents tronçons ont été calculés grâce à la formule établie pour les rivières ardennaises à charge caillouteuse dont le bassin versant est constitué de roches imperméables (Petit et Pauquet, 1997) :

$Q_b = 0,087 A^{1,2}$ où A représente la superficie du bassin versant exprimée en km^2 .

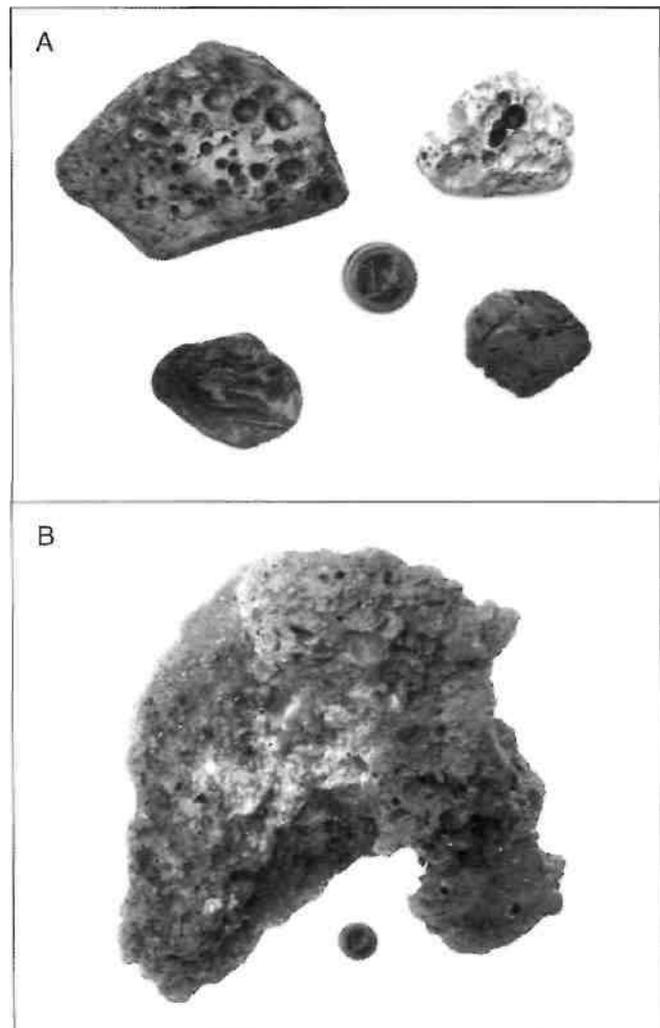
Méthodes et matériel

De grandes quantités de scories étaient entassées dans les anciens sites de production de fonte, soit dans la plaine alluviale, soit à proximité même des rivières (Tahon, 1909). Certaines d'entre elles ont pu être emportées lors de crues débordantes ou lors de l'érosion des crassiers, par déplacement latéral de la rivière. Les sources historiques nous apprennent également que des scories étaient quelquefois rejetées volontairement dans les rivières par les métallurgistes (Hansotte, 1955). Etant donné le nombre considérable de scories injectées dans les rivières, et qui s'y propagent encore à l'heure actuelle, on peut considérer que le déplacement effectué par ces scories représente en quelque sorte une "vague sédimentaire" dont la vitesse de progression peut être estimée à condition de préciser le site d'injection, de connaître la période de rejet et de localiser le front de progression. Pour connaître le début des rejets des scories dans la rivière, il est primordial de dater la période de fonctionnement des fourneaux. Toutefois, dans certains sites, il se peut que l'injection de scories dans la rivière soit postérieure à la période d'activité du fourneau et que la vitesse de progression calculée soit ainsi sous-évaluée. De plus, il est nécessaire de localiser tous les sites d'injection afin de ne pas surestimer les distances parcourues. Cette vitesse peut ensuite être transposée à la charge de fond, dans la mesure où certaines scories, tout comme les éléments naturels, ont pu être enfouies dans le lit de la rivière (Ferguson *et al*, 2002), ou être entreposées dans des bancs de convexité et être ensuite remaniées (ou non) par érosion latérale (Sluse et Petit, 1998). De plus, la taille des scories mobilisées sur de longues distances renseigne sur la compétence effective des rivières.

Il existe une grande diversité de scories qui s'explique par la variabilité des conditions de production et de température au sein du fourneau et par les matières premières utilisées. Toutefois, on peut dégager deux grandes familles de scories définies sur la base de leur aspect, de leur taille et de leur densité (Houbrechts, 2002). Les scories les plus fréquemment collectées dans les rivières étudiées présentent des couleurs variées (vert, gris, bleu ...) et sont généralement de dimension modeste (axe $b < 10$ cm). Elles possèdent des fils d'étirement formes lors des coulées ainsi qu'une vésiculaire relativement importante (photo 1A). La faible densité de ces scories (2,2 à 2,5) résulte de cette porosité qui apparaît lors du dégazage du laitier en fusion. Elles présentent généralement des cassures conchoïdales et ont été classées par J. Henrottay (1972) dans la famille des "scories vitreuses". D'autres scories, également appelées mâchefers (Henrottay, 1972), se distinguent des scories vitreuses par leur aspect terne, leur densité élevée (2,7 à 3,2), leur taille (axe b parfois supérieur à 15 cm) et l'absence de cassures conchoïdales (photo 1B).

Photo 1 - **A : scories vitreuses prélevées dans la Lembree ; B : mâchefer prélevé dans l'Aisne.**

Photo 1 - **A : slag collected in the Lembree; B : iron slag found in the Aisne.**



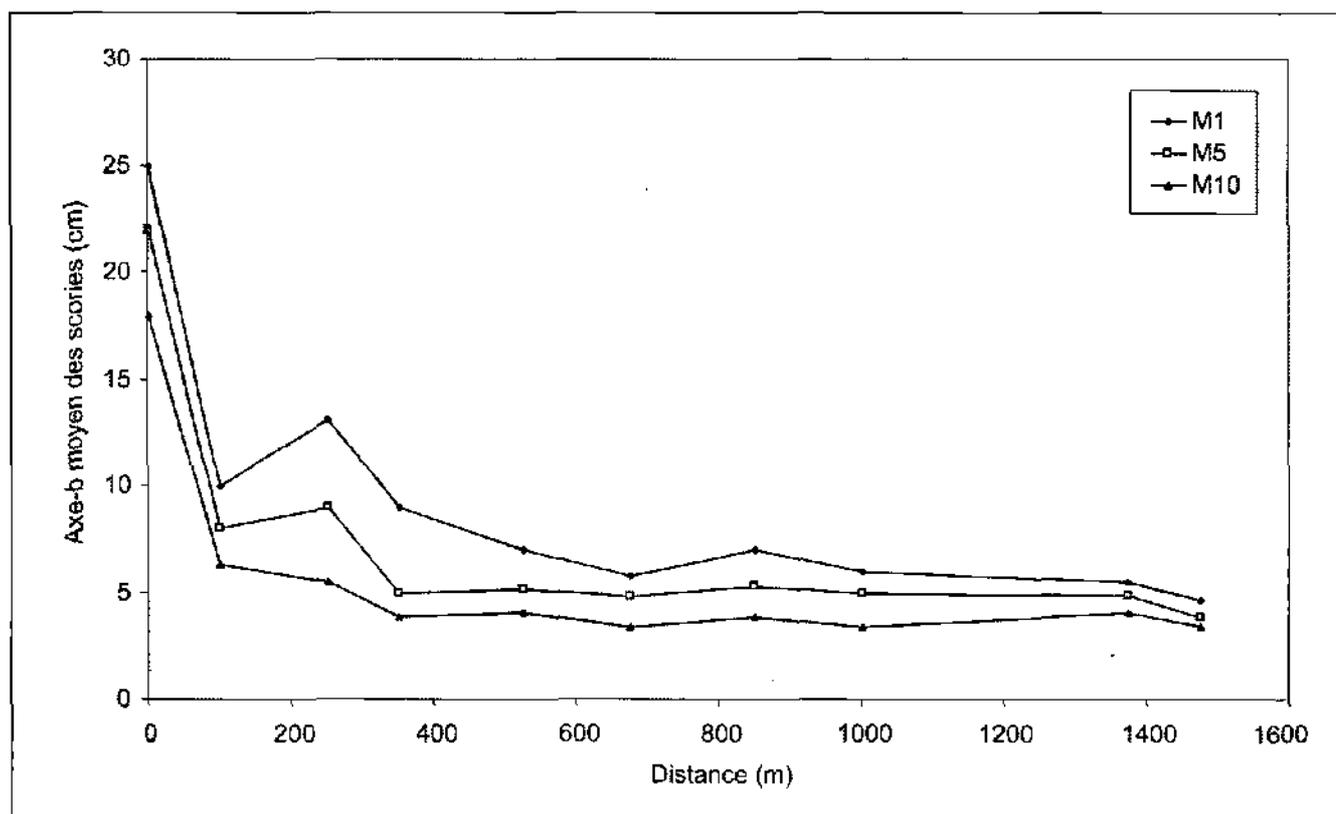


Fig. 2 - Evolution longitudinale de la taille des scories dans l'Aisne. Comparaison des différents indices granulométriques.

M₁ : axe b de la plus grosse scorie prélevée ; M₅ : axe b moyen des cinq plus grosses scories ; M₁₀ : axe b moyen des dix plus grosses scories.

Fig. 2 - Longitudinal evolution of slag size in the Aisne River. Comparison of different granulometric indices. M₁: b axis of the largest slag particle sampled; M₅: average b axis of the five largest slag particles; M₁₀: average b axis of the ten largest slag particles.

Grâce à leur aspect particulier, les scories sont facilement reconnaissables des autres éléments naturels de la charge de fond des rivières. Par conséquent, il est possible de prospecter le lit mineur en période d'étiage et de collecter, parmi les éléments naturels de la charge de fond, la majorité des scories présentes en surface.

Étant donné la réversibilité des forces tractrices en fonction du débit, c'est-à-dire l'augmentation des forces tractrices plus marquée dans les mouilles que dans les seuils (Bravard et Petit, 1997), ces derniers jouent un rôle de filtre dans la progression de la charge de fond et les plus gros éléments qui forment ces seuils témoignent donc de la compétence effective développée par la rivière. Dès lors, nous avons prospecté essentiellement sur les seuils et toutes les scories visibles de taille supérieure à 1,9 cm ont été prélevées, ce qui nous donnait généralement plus d'une centaine de scories par site. Le nombre de scories présentes sur les différents seuils dépend principalement des quantités injectées et de la proximité des sites d'injection. Il va de soi que les scories qui ont éventuellement pu échapper à notre vigilance sont les plus petites ; or, comme nous le verrons ci-dessous, nous avons travaillé essentiellement avec les dix plus grosses scories.

Nous avons mesuré, au pied à coulisse, l'axe b de toutes les scories collectées, puis nous avons déterminé leur poids et leur volume afin de calculer leur densité. Il était en effet indispensable de vérifier si la densité des scories ne différait pas trop de celle des éléments naturels. De plus, connaissant le poids des scories, nous pouvions calculer leur diamètre équivalent. Après avoir testé plusieurs indices granulométriques (fig. 2), nous avons décidé de travailler avec l'axe b moyen des dix plus grosses scories (M₁₀) prélevées dans chaque site. Ceci nous a permis de tracer des graphiques sur lesquels il est possible de suivre l'évolution longitudinale de la taille des scories dans les rivières.

En outre, il convient de comparer la taille des scories à celle des éléments de la charge de fond. En effet, dans l'hypothèse où la taille des scories serait nettement différente de celle du matériel environnant, les scories pourraient soit se retrouver piégées au sein d'éléments naturels plus grossiers (*hiding effect*), soit se présenter en position de saillie parmi un matériel plus petit (*protrusion effect*) ce qui, dans un cas comme dans l'autre, influencerait les conditions de mise en mouvement et donc la progression des scories. À cet effet, nous avons comparé la taille des scories prélevées dans l'Aisne à celle des éléments naturels, grâce à six granulométries. Les galets ont été triés suivant la taille de leur axe b, regroupés en classe granulométrique, pour être ensuite pesés (Cailleux et Tricart, 1959).

Enfin, pour s'assurer de la mobilité comparable des scories anthropiques et du matériel naturel, nous avons effectué quatre marquages colorimétriques ; ils ont été réalisés *in situ* sur des seuils émergés de l'Aisne. Des placettes de 1 m² ont été délimitées grâce à une grille dont les mailles carrées avaient 10 cm de côté. Nous les avons ensuite photographiées à la

verticale et nous avons peint les galets avec une bombe aérosol de couleur vive. La granulométrie a ainsi été établie, sans déranger le matériel, selon la procédure proposée par R. Kellerhals et D.I. Bray (1971). Ces marquages ont permis de voir qu'il y avait mobilisation partielle des éléments des quatre placettes pour une crue légèrement inférieure au débit à pleins bords et que presque tous les éléments d'une taille inférieure à 14 cm avaient été mobilisés. Il se dessine une ébauche de tri hydraulique en aval des placettes, sur une distance de 20 mètres, puis une stabilisation dans la décroissance de la taille des éléments mobilisés (autour de 6 cm). Ces valeurs pourront être comparées à la taille moyenne des scories prélevées dans le même secteur.

Résultats

Évolution longitudinale de la taille des scories

Après avoir calculé la taille moyenne des dix plus grosses scories récoltées sur les seuils des différentes rivières, nous avons réalisé, pour chacune d'elle, un graphique représentant l'évolution longitudinale de la taille des scories récoltées (fig. 3A, 3B, 3C). Les sites d'injection de scories se remarquent par une augmentation importante de la taille des scories d'amont en aval. En aval des sites d'injection, il s'opère systématiquement une décroissance, suivie d'une stabilisation de la taille moyenne des scories. L'analyse de ces courbes fournit ainsi un nombre utile d'informations relatives au transport de la charge de fond. Toutefois, étant donné la proximité des sites d'injection de scories, nous n'avons malheureusement pu localiser qu'un seul front de progression sur l'Ourthe, entre Barvaux et Bornai (fig. 3A).

Dans l'Aisne (fig. 3B), les sites d'injections sont caractérisés par des M_{10} variant de 15 à 18 cm, ce qui nous renseigne sur la compétence maximale de la rivière. Les sites d'injection, localisés par des M_{10} compris entre 8 et 10 cm, doivent probablement se situer quelques dizaines de mètres en aval d'anciens sites de rejet enfouis à l'heure actuelle sous la plaine alluviale, à la suite du déplacement latéral de la rivière.

Les apports de scories par les affluents peuvent également apparaître sur les graphiques. En effet, si la charge de fond de l'affluent comporte des scories, deux possibilités peuvent se présenter en aval de la confluence : soit ces scories dépassent la compétence de la rivière principale, ce qui se marquera par un tri hydraulique (par exemple, dans l'Ourthe en aval de la confluence avec la Lembrée, fig. 3A), soit ces scories sont de taille inférieure à la compétence de la rivière, ce qui se marquera par une mobilisation généralisée des scories de toutes tailles (par exemple, dans l'Aisne en aval de la confluence avec le Ruisseau du Vieux Fourneau, fig. 3B). Finalement, la collecte des scories dans les rivières a permis de localiser, de façon certaine et précise, huit sites d'injection dans l'Aisne, cinq dans l'Ourthe, et un dans la Lembrée.

En aval de toutes les injections, on observe une diminution de la taille moyenne des dix plus grosses scories. Cet affinement brutal ne résulte pas de modifications des conditions dynamiques de la rivière, étant donné que les puis-

sances spécifiques ne varient guère au sein d'un même tronçon de rivière, mais il est le résultat d'un tri hydraulique. Ce tri consiste en une décroissance granulométrique vers l'aval, due à une mobilisation moins fréquente des éléments de taille importante. Les scories transportées sur les plus longues distances sont donc les scories mobilisées le plus souvent lors des crues. La distance sur laquelle s'opèrent ces tris varie d'une injection à l'autre. Toutefois, lorsqu'un tri hydraulique n'est pas masqué par les grosses scories d'une injection proche, on peut considérer qu'il s'exerce sur une distance comprise entre 700 m (Wérichet) et 1400 m (Roche à Frêne) pour l'Aisne (fig. 3B), sur une distance de 500 m dans la Lembrée et de 400 à 700 m dans l'Ourthe (fig. 3A). Comme l'ont déjà montré R. Sluse et F. Petit (1998), nous observons une stabilisation de la taille des scories en aval des secteurs de tri hydraulique. Ces stabilisations témoignent des compétences effectives développées par les rivières dans les différents tronçons et donc des puissances qui s'y exercent. Dans l'Aisne, les différents paliers se caractérisent par des scories dont la taille (M_{10}) est comprise entre 3,6 et 6,3 cm, en fonction du tronçon considéré (fig. 3B). Dans l'Ourthe, entre Petit-Han et Hamoir, ces paliers se marquent par des scories dont le diamètre moyen se situe entre 4 et 5 cm (fig. 3A). Sur la Lembrée, caractérisée par de nombreuses pertes karstiques qui assèchent son lit en période d'étiage, ce diamètre correspond globalement à 6,5 cm sur une distance de 5 km (fig. 3C). Il est donc intéressant de constater que ces pertes n'entraînent pas de baisse sensible de la compétence. Ceci s'explique par le fait que celle-ci et donc la mobilisation de la charge de fond se font pour des débits proches du débit à pleins bords et qu'à de tels moments l'influence des pertes, en terme de débit, devient négligeable.

Relation entre la taille des scories et les puissances spécifiques

Il semblait intéressant de vérifier si les différentes tailles observées dans les "paliers" d'une même rivière étaient réellement dues à des variations de compétence de la rivière. Dès lors, nous avons mis en relation l'axe b moyen des dix plus grosses scories prélevées dans les secteurs de palier et les puissances spécifiques calculées pour le débit à pleins bords (tab. 1). Nous avons également repris les tailles de scories et les valeurs de puissance spécifique des rivières du sud de l'Ardenne, sachant que ces valeurs ont été estimées selon une méthodologie identique à celle adoptée dans l'étude présente (Sluse et Petit, 1998).

Comme nous pouvons le constater sur la figure 4, il existe une bonne corrélation entre les puissances spécifiques et la taille moyenne des dix plus grosses scories dans les secteurs de palier. Cette relation permet de tirer les conclusions qui suivent. Ce ne sont pas des rivières comme l'Ourthe, possédant un grand bassin versant (1500 km²), qui montrent les puissances spécifiques les plus importantes (de l'ordre de 75 W.nv²), mais bien des rivières de taille intermédiaire comme l'Aisne ou la Lembrée. Il est également intéressant de constater qu'au sein d'un même bassin versant (l'Aisne

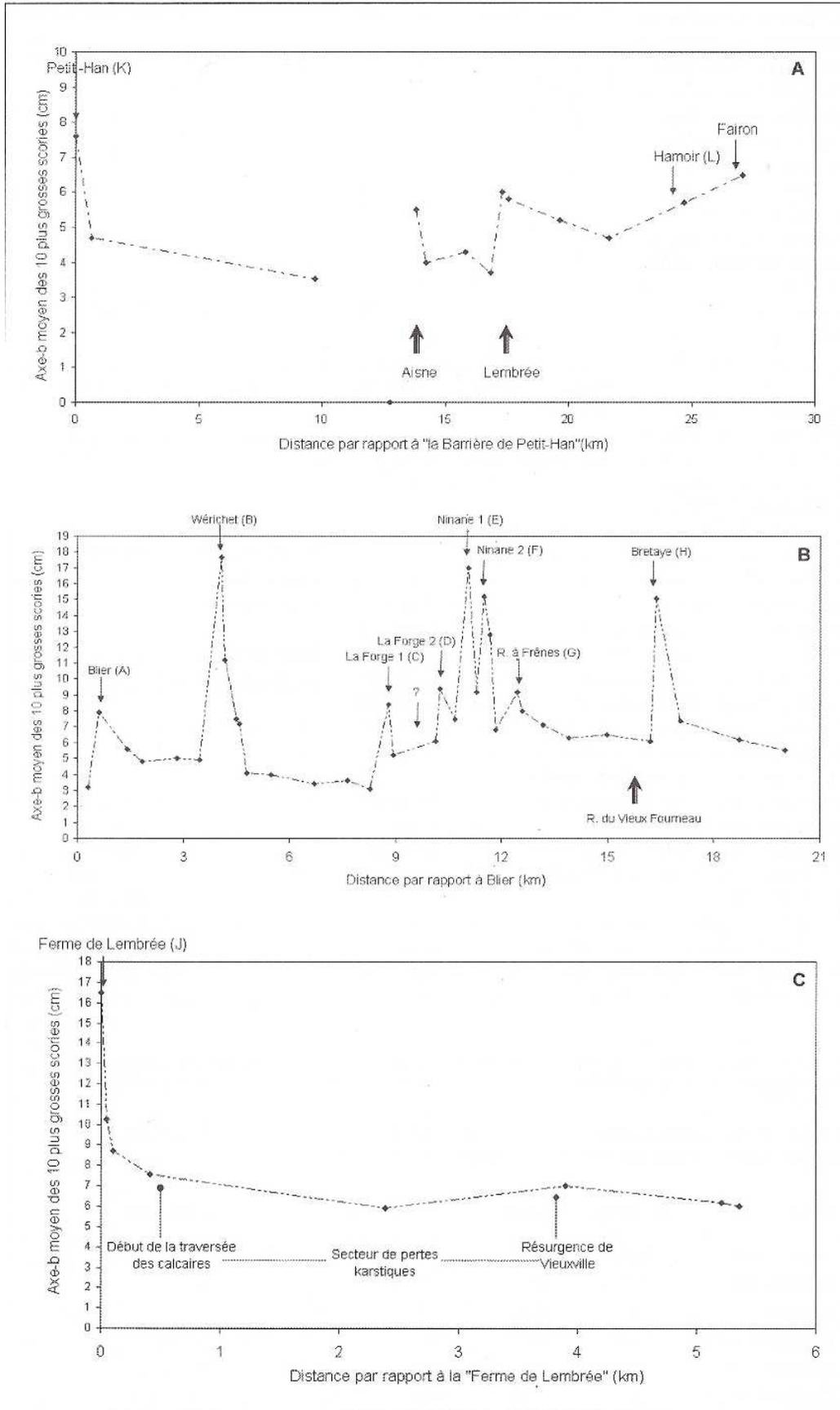


Fig. 3 - Évolution longitudinale de la taille des scories. A : dans l'Ourthe ; B : dans l'Aisne ; C : dans la Lembrée. Les flèches pointant vers le bas signalent les sites d'injection. Les lettres symbolisant les fourneaux renvoient à la figure 1. Les confluences sont renseignées par les flèches en gras pointant vers le haut.

Fig. 3 - Longitudinal evolution of slag size. A: in the Ourthe; B: in the Aisne; C: in the Lembrée. Downward arrows correspond to injection sites. Letters represent furnaces from figure 1. Confluences are indicated by thick arrows pointing upwards.

par exemple), il existe un maximum de puissance spécifique (120 W.m⁻²) lorsque son bassin couvre une superficie de 145 km². Plus en aval, les puissances spécifiques tendent à décroître, ce qui rejoint les observations effectuées sur d'autres rivières ardennaises (Petit, 2000). De même, une relation réalisée par

W.L. Graf (1982), pour des

rivières de régions semi-arides (Utah), montre que le maximum de puissance spécifique est observé dans des rivières dont le bassin versant est approximativement de 100 km².

Cette bonne corrélation entre la compétence effective (représentée par le M_m des scories) et la

puissance calculée pour le débit à pleins bords indique que ce dernier, dont la récurrence est de l'ordre de 0,5 an dans ce type de rivières ardennaises (Petit et Pauquet, 1997), est un débit morphogène efficace qui permet une progression de la "vague sédimentaire" : ce sont en effet les scories présentes dans les secteurs en palier qui ont parcouru les plus grandes distances. Quant aux scories plus volumineuses, prélevées dans les zones de tri hydraulique, les distances qu'elles ont parcourues résultent de crues mobilisatrices développant des puissances spécifiques plus importantes. On peut donc considérer que ces déplacements se produisent d'autant plus rarement que l'on prend en compte les scories les plus proches de l'injection, et donc les plus volumineuses.

Grâce à la relation proposée, il est possible d'avancer une valeur de puissance spécifique sur la base de la mesure des dix plus grosses scories d'un seuil. Toutefois, il faut s'assurer au préalable que le seuil se trouve bien dans un secteur

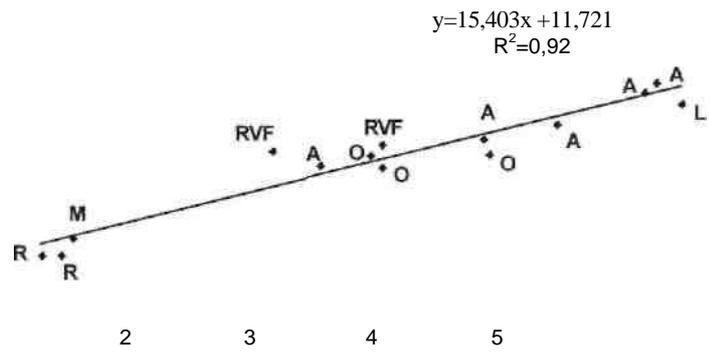


Fig. 4 - Relation entre le diamètre moyen des dix plus grosses scories (M₁₀) dans les secteurs de palier et les puissances spécifiques (calculées pour le débit à pleins bords). A : Aisne ; L : Lembrée ; M : Mellier ; O : Ourthe ; R : Rulles ; RVF : Ruisseau du Vieux Fourneau.

Fig. 4 - Relationship between the average diameter of the ten largest slag particles (M₁₀) in constant size sectors and the unit stream power (calculated for bankfull discharge). A : Aisne ; L : Lembrée ; M : Mellier ; O : Ourthe ; R : Rulles ; RVF : Ruisseau du Vieux Fourneau.

de palier, ce qui peut se faire aisément en vérifiant qu'il n'y a pas de fortes différences de tailles entre les scories de deux seuils consécutifs.

Comparaison de la taille des scories et des éléments de la charge de fond

Pour permettre la comparaison de la taille des éléments naturels de la charge de fond et des scories, nous avons réalisé des granulométries des alluvions de l'Aisne, sur des seuils où nous avons prélevé des scories. Les indices granulométriques de ces différents sites ont ensuite été confrontés aux axes b moyens des dix plus grosses scories récoltées dans ces sites (tab. 2). Comme nous pouvons le voir, les tailles moyennes des plus grosses scories ne correspondent pas à un indice granulométrique particulier de la charge de fond. Dans les lieux d'injection, les dix plus grosses scories ont une taille voisine du D₉₅ de la charge de fond. Dans les zones de tri, on passe progressivement à des tailles voisines

Tableau 2 - Comparaison de la taille moyenne des dix plus grosses scories et des indices granulométriques de la charge de fond. Voir la localisation des sites d'analyses granulométriques sur la figure 1.

Table 2 - Comparison between the ten largest slag particles and the grain-size indices of the bedload. Location of study site of grain-size distributions shown on figure 1.

Aisne	D ₉₅ (cm)	D ₉₀ (cm)	D ₈₄ (cm)	D ₅₀ (cm)	M ₁₀ scories (cm)
Granulométrie 1	12,3	10,5	9,5	5,2	4,8 (palier)
Granulométrie 2	16,5	14	12	6,5	4,9 (palier)
Granulométrie 3	15,5	13,6	11,7	6,9	7,2 (tri)
Granulométrie 4	14,9	14	13	7,6	3,1 (palier)
Granulométrie 5	20,7	14,7	13,3	7,5	6,8 (fin de tri)
Granulométrie 6	15	13,9	12,7	7,7	15,1 (injection)

du D₅₀. Dans les secteurs de paliers, la taille moyenne des dix plus grosses scories est systématiquement inférieure au D₅₀.

Étant donné la taille importante de la charge de fond de l'Aisne, il se peut que les scories progressent moins rapidement que les sédiments naturels de la rivière (effets de masquage et de piégeage). La diminution de la taille des scories par rapport au matériau avoisinant (et donc l'accroissement de l'effet de masquage) s'explique par le fait que le

calibre des scories tend à diminuer, au moins jusqu'au "palier", ce qui n'est pas le cas du matériau avoisinant car la rivière se recharge à tout moment par contact avec les versants. De plus des phénomènes d'abrasion, dont l'importance est difficile à estimer, interviennent plus que probablement puisque les scories sont émoussées. Néanmoins, la constance de la taille des scories dans les secteurs de paliers indique que l'abrasion des éléments est relativement faible sur de longues distances.

Estimation des vitesses de progression de la charge de fond

Sur l'Aisne et la Lembrée, il est impossible de localiser les fronts de progression de scories liés aux différentes injections, étant donné leur trop grande proximité. Toutefois, connaissant les distances minimales parcourues et la période du début des rejets, nous disposons de la vitesse de progression minimale de la charge de fond. Ces vitesses sont supérieures à 1,4 km par siècle pour l'Aisne, et supérieures à 1,6 km par siècle pour la Lembrée.

Dans l'Ourthe, nous avons suivi la propagation des scories rejetées par les anciens métallurgistes à Petit-Han, ainsi que les deux injections de scories situées au niveau des confluences de l'Aisne et de la Lembrée. Les études historiques (Pirotte, 1966 ; Tahon, 1909) ont permis de dater le début du fonctionnement de ce fourneau vers 1450. Étant donné que nous avons localisé le front de progression des scories rejetées à Petit-Han (fig. 3A), nous pouvons proposer une vitesse de progression comprise entre 1,8 et 2,3 km par siècle.

Ces chiffres appellent quelques commentaires et une comparaison avec d'autres études dont celle de F. Duchesne et A. Pissart (1985) portant sur les variations pétrographiques des sédiments de l'Ourthe. Ces auteurs ont constaté la diminution et la disparition des galets calcaires de 250 mm de diamètre après un parcours de 5 km. Sur la base de la vitesse de dissolution mesurée (28 mm/siècle), l'avancée de la charge de fond dans l'Ourthe inférieure a été estimée à 500 m par siècle. Toutefois, en reconsidérant les possibilités de mobilisation de cette rivière ainsi que les vitesses de dissolution des calcaires (Houbrechts, 2000), la progression de la charge atteindrait au moins 1,3 km par siècle ; ce qui correspond mieux à la vitesse proposée sur la base de l'étude des scories. De plus, la vitesse de progression de la vague sédimentaire de l'Ourthe moyenne est inférieure à celle mise en évidence, également sur la base des scories, dans la Semois, en aval de sa confluence avec la Rulles, où une valeur d'environ 3 km par siècle a été proposée (Sluse et Petit, 1998).

Ces valeurs peuvent également être comparées à celles qui ont été obtenues dans d'autres régions géomorphologiques. Ainsi, J. Tricart et H. Vogt (1967), observant les modifications du spectre pétrographique des alluvions suite à l'édification d'un barrage sur l'Hérault, ont montré que le déplacement de l'ensemble de la charge de fond était d'environ 20 km par siècle. Cette valeur est à considérer comme un maximum dans la mesure où l'Hérault est une rivière à forte pente, avec des secteurs en gorge où les crues sont violentes

et où le charriage des galets se produit régulièrement. Par ailleurs, la progression du tressage observé dans des rivières alpines en réponse à la péjoration climatique du Petit Âge Glaciaire permet également de se faire une opinion quant à la vitesse d'avancée de l'ensemble de la charge de fond ; selon les estimations de P.G. Salvador (1991), elle aurait été de 10 km par siècle sur l'Isère, à l'aval de Grenoble.

Conclusion

L'utilisation des scories en tant qu'indicatrices du transport de la charge de fond se révèle une technique fiable et facile d'application pour déterminer la compétence développée par les rivières. Ainsi, les compétences effectives des différents tronçons de l'Aisne ont pu être déterminées grâce à la taille moyenne des dix plus grosses scories collectées dans les secteurs de paliers. Celles-ci varient entre 3,6 à 6,3 cm. Dans la Lembrée, le diagramme de transport des plus grosses scories montre que les nombreuses pertes karstiques n'influencent pas significativement la compétence de la rivière en période de mobilisation. Les scories prélevées sur les seuils de l'Ourthe indiquent qu'il s'opère un tri hydraulique en aval des confluences de l'Aisne et de la Lembrée.

La localisation du front de progression des scories injectées dans l'Ourthe à partir de 1450 a permis d'estimer la vitesse de progression de la "vague sédimentaire" comprise entre 1,8 et 2,3 km par siècle. Dans les autres rivières, la trop faible distance entre les sites d'injection ne permet pas de localiser les fronts de progression et ne donne que des vitesses minimales de progression de la charge de fond.

Remerciements

Nous remercions le Service des Cours d'eau non navigables et le MET-SETHY (Service Hydrologique du Ministère de l'Équipement et des Transports) pour les nombreux documents cartographiques fournis ainsi que pour l'accès aux données hydrologiques.

Pour cette étude, G. Houbrechts bénéficie d'une bourse de doctorat octroyée par le F.R.I.A.

Références

- Billi F. (1988) - A note on cluster bedform behaviour in a gravel-bed river. *Catena*, 15, 473-481. Bravard J.-P., Petit F. (1997) - *Les cours d'eau : dynamique du système fluvial*, Armand Colin, Paris, 222 p. Bunte K., Ergenzinger P. (1989) - New tracer techniques for particles in gravel-bed rivers. *Bulletin de la Société Géographique de Liège*, 25, 85-90. **Cailleux A., Tricart J. (1959)** - *Initiation à l'étude des sables et des galets*. CDU, Paris, 376 p. Duchesne F., Pissart A. (1985) - Valeur statistique des comptages de cailloux de différentes lithologies. *Bulletin de la Société Géographique de Liège*, 21, 13-23. Ergenzinger P., Custer S.G. (1983) - Détermination of bedload transport using naturally magnetic tracers: first expériences at Squaw Creek, Gallatin Country, Montana. *Water Resources Research*, 19 (1), 187-193.

- Ergenzinger P., Schmidt K.-H., Busskamp R. (1989)** - The Pebble Transmitter System (PETS): first results of a technique for studying coarse material erosion, transport et deposition. *Zeitschrift fur Geomorphologie*, 33, 503-508.
- Ferguson R.I., Bloomer D.J., Hoey T.B., Werritty A. (2002)** - Mobility of river tracer pebbles over different timescales. *Water Resources Research*, 38, 3.1-3.9.
- Gintz D., Hassan M.A., Schmidt K.-H. (1996)** - Frequency and magnitude of bedload transport in a mountain river. *Earth Surface Processes and Landforms*, 21, 433-455.
- Graf W.L. (1982)** - Spatial variations of fluvial processes in semi-arid lands. In Thorn C.E. (Ed.): *Space and Time in Geomorphology*. George Allen and Unwin, London, 193-217.
- Hansotte G. (1955)** - L'industrie siderurgique dans la vallee de l'Ourthe liegeoise aux Temps Modernes. *Vie Wallonne*, 29, 116-220.
- Hansotte G. (1972)** - La metallurgie wallonne au XVIe et dans la premiere moitie du XVIIe siecle. Essai de synthese. *Bulletin de l'Institut Archeologique Liegeois*, 84, 21-42.
- Hassan M.A., Schick A.P., Laronne J.B. (1984)** - The recovery of flood-dispersed coarse sediment particles. A three-dimensional magnetic tracing method. *Catena Supplement*, 5, 153-162.
- Henrottay J. (1972)** - *Etude de la sedimentation recente de quelques rivieres au cours des sept derniers siecles par l'observation de residus de l'industrie du fer ancienne*. Memoire de Licence en Sciences geographiques, Universite de Liege, inedit, 103 p.
- Houbrechts G. (2000)** - *Utilisation des macroscoories comme indicateur du transport de la charge de fond des rivieres de la "Terre de Durbuy"*. Memoire de Licence en Sciences geographiques, Universite de Liege, inedit, 137 p.
- Houbrechts G. (2002)** - *Utilisation des macroscoories et des microscoories en dynamique fluviale*. Memoire de DEA en Sciences, Universite de Liege, inedit, 53 p.
- Houbrechts G., Petit F. (2001)** - La metallurgie ancienne en "Terre de Durbuy" : utilisation des scoories en dynamique fluviale. *Bulletin de la Societe Geographique de Liege*, 40, 67-79.
- Kellerhals R., Bray D.I. (1971)** - Sampling procedures for coarse fluvial sediments, *ASCE Journal, Hydraulics Division*, 97, HY 8, 1165-1180.
- Petit F., Pauquet A. (1997)** - Bankfull discharge recurrence interval in gravel-bed rivers. *Earth Surface Processes and Landforms*, 22, 685-693.
- Petit S. (2000)** - *Analyse quantitative du reseau hydrographique de la Meuse : exploitation d'un model numerique de terrain*. Memoire de Licence en Sciences geographiques, Universite de Liege, inedit, 83 p. + annexes.
- Pirotte F. (1966)** - L'industrie metallurgique de la Terre de Durbuy de 1480 a 1625. Ses rapports avec la metallurgie liegeoise. *Bulletin de l'Institut Archeologique Liegeois*, 79, 145-210.
- Salvador P.G. (1991)** - *Le theme de la metamorphose fluviale dans les plaines alluviales du Rhone et de l'Isere : bassin de Malville et ombilic de Moirans (here, France)*. These de Geographic et Amenagement, Universite Lyon III, 498 p.
- Sear D.A., Lee M.W.E., Oakey R.J., Carling P.A., Collins M.B. (2000)** - Coarse sediment tracing technology in littoral and fluvial environments: a Review. In Foster (Ed.): *Tracers in Geo-morphology*. John Wiley and Sons, Chichester, 21-55.
- Schick A.P., Lekach J., Hassan M.A. (1987)** - Bed load transport in desert floods: observations in the Negev. In Thome C, Bathurst J., Hey R. (Ed.): *Sediment Transport in Gravel-bed Rivers*, John Wiley and Sons, Chichester, 617-642.
- Schmidt K.-H., Ergenzinger P. (1992)** - Bedload entrainment, travel lengths, step lengths, rest periods - Studied with passive (iron, magnetic) and active (radio) tracer techniques. *Earth Surface Processes and Landforms*, 17, 147-165.
- Sluse P., Petit F. (1998)** - Evaluation de la vitesse de deplacement de la charge de fond caillouteuse dans le lit de rivieres arden-naises au cours des trois derniers siecles, a partir de l'etude des scoories metallurgiques. *Geographie physique et Quaternaire*, 52 (3), 373-380.
- Tahon V. (1909)** - La metallurgie du fer au Pays de Liege, au Luxembourg et dans l'Entre Sambre et Meuse. Période medie-vale. *Annales du XXI' congres de la Federation archeologique et historique de Belgique*, Liege, 2(1), 1-28.
- Tricart J., Vogt H. (1967)** - Quelques aspects du transport des alluvions grossieres et du faconnement des lits fluviaux. *Geo-grafiska Annaler*, 49 A., 351-366.

Article reçu le 29 novembre 2002, accepte le 3 février 2003