

Article

« Évaluation de la vitesse de déplacement de la charge de fond caillouteuse dans le lit de rivières ardennaises au cours des trois derniers siècles, à partir de l'étude des scories métallurgiques »

Pascal Sluse et François Petit

Géographie physique et Quaternaire, vol. 52, n° 3, 1998, p. 373-380.

Pour citer la version numérique de cet article, utiliser l'adresse suivante :

<http://id.erudit.org/iderudit/004869ar>

Note : les règles d'écriture des références bibliographiques peuvent varier selon les différents domaines du savoir.

Ce document est protégé par la loi sur le droit d'auteur. L'utilisation des services d'Érudit (y compris la reproduction) est assujettie à sa politique d'utilisation que vous pouvez consulter à l'URI <http://www.erudit.org/documentation/eruditPolitiqueUtilisation.pdf>

Érudit est un consortium interuniversitaire sans but lucratif composé de l'Université de Montréal, l'Université Laval et l'Université du Québec à Montréal. Il a pour mission la promotion et la valorisation de la recherche. Érudit offre des services d'édition numérique de documents scientifiques depuis 1998.

Pour communiquer avec les responsables d'Érudit : erudit@umontreal.ca

ÉVALUATION DE LA VITESSE DE DÉPLACEMENT DE LA CHARGE DE FOND CAILLOUTEUSE DANS LE LIT DE RIVIÈRES ARDENNAISES AU COURS DES TROIS DERNIERS SIÈCLES, À PARTIR DE L'ÉTUDE DES SCORIES MÉTALLURGIQUES

Pascal SLUSE, Département de Géographie physique, Université de Liège, allée du 6 Août, 2, Bâtiment B11 Sart Tilman, B 4000, Liège, Belgique.

François PETIT, Département de Géographie physique, Université de Liège, allée du 6 Août, 2, Bâtiment B11 Sart Tilman, B 4000, Liège, Belgique, Francois.Petit@ulg.ac.be.

Manuscrit reçu le 21 octobre 1997 ; manuscrit révisé et accepté le 30 janvier 1998

RÉSUMÉ La vitesse de déplacement de la charge de fond de trois rivières ardennaises a pu être estimée de façon indirecte grâce à la présence de macrosories, résidus de l'ancienne industrie métallurgique qui s'est établie au début du XVII^e siècle dans les vallées du sud de l'Ardenne. Des éléments ont été retrouvés 12 km en aval de la forge la plus proche, ce qui donne une vitesse de progression de la charge de fond d'un peu plus de 3 km par siècle. Une relation a été établie entre la taille des éléments et la distance qui les sépare des forges où elles ont été rejetées ; cette relation de type exponentiel montre tout d'abord une diminution rapide de la taille des éléments qui passent de près de 80 mm à 20-30 mm en moins de cinq km, suivie d'une absence de décroissance de la taille du matériel. Il s'opère donc un tri hydraulique dans les premiers kilomètres suivant le lieu d'injection. D'autre part, la taille des éléments, qui en aval reste constante quelle que soit la distance, donne une indication quant à la compétence réelle de cette rivière ; la taille de ce matériel (9-12 mm en terme de diamètre équivalent de densité 2,65) apparaît faible mais se justifie par le fait que la rivière développe des puissances spécifiques peu importantes (25-30 W.m⁻²).

ABSTRACT *Estimation of the bedload progression in Ardenne riverbeds during the three last centuries based on the study of ironwork.* Bedload progression has been evaluated in three Ardennes rivers using slags coming from old ironworks settled in the south Ardennes valleys at the early XVIth century. Several slags have been found 12 km downstream the closer iron factory, which produces a bedload wave progression of about 3 km per century. A relationship is drawn between the slag size and the distance from the ironworks where these slags have been thrown down in the river. This exponential curve shows first a rough decrease of particles size which fall from 80 mm to 20-30 mm in diameter in less than 5 km; afterwards the slag size only decreases slowly. Thus an hydraulic sorting occurs in the few kilometres following the throwing down site. Downstream, the slags size which remains almost constant regardless of the distance, gives an indication about the true competence of the river. The particle size (9-12 mm with regards to equivalent diameters using a density of 2.65) appears small but is explained by the low values of the unit stream power (25-30 W.m⁻²).

ZUSAMMENFASSUNG *Berechnung der Geschwindigkeit der Geröllgeschiebelast in Flussbetten der Ardennen im Laufe der letzten drei Jahrhunderte durch Studium der Hütten-Schlacke.* Die Transportgeschwindigkeit der Geschiebelast von drei Flüssen in den Ardennen konnte indirekt berechnet werden, dank des Vorkommens von Makroschlacken. Diese sind Überreste der ehemaligen Hüttenindustrie, die am Anfang des 17. Jahrhunderts in den Tälern der Südardennen begann. Man hat 12 km unterhalb der nahegelegensten Schmiede Schlacken gefunden, was einen Transport der Geschiebelast von etwas über 3 km pro Jahrhundert ergibt. Man hat eine Beziehung zwischen der Größe der Schlacken und ihrer Entfernung von den Schmieden, wo sie in den Fluss geworfen wurden, hergestellt; diese Exponentialbeziehung zeigt zuerst eine rasche Abnahme der Größe der Schlacken, die von fast 80 mm auf 20-30 mm in weniger als 5 km sinkt; danach findet man keine Abnahme der Größe des Materials mehr. Es findet also eine hydraulische Sortierung in den ersten Kilometern nach dem Platz des Auswurfs statt. Andererseits gibt die Größe der Schlacken, welche weiter flussabwärts konstant bleibt, wie weit auch immer die Entfernung sein mag, einen Hinweis auf die tatsächliche Schleppkraft des Flusses; die Größe dieses Materials (9-12 mm Durchmesser entsprechend einer Dichte von 2,65) scheint gering, erklärt sich aber dadurch, dass der Fluss niedrige spezifische Kapazitäten entwickelt (25-30 W.m⁻²).

INTRODUCTION

La multiplication de campagnes de marquages *in situ* réalisées par différents chercheurs et les progrès concernant les techniques de marquage des éléments caillouteux, que ce soit des marquages magnétiques (Ergenzinger et Custer, 1983 ; Hassan *et al.*, 1984) ou des marquages au moyen d'émetteurs radio utilisés notamment par Ergenzinger *et al.* (1989), Gintz *et al.* (1996), ont permis de mieux cerner les critères de mise en mouvement de la charge de fond et de se faire une opinion concernant la distance parcourue par cette dernière. Il s'agit cependant dans ces études, de distances parcourues par des éléments isolés et on ne peut l'extrapoler au déplacement de l'ensemble de la charge de fond qui est difficile à mesurer et pour lequel peu d'informations sont disponibles. La vitesse de transit de l'ensemble de la charge de fond a cependant été appréhendée de façon indirecte : d'une part Tricart et Vogt (1967) ainsi que Duchesne et Pissart (1985) ont utilisé des méthodes sédimentologiques, respectivement sur l'Hérault et l'Ourthe ; d'autre part Salvador (1991) a suivi la propagation du front de la « vague sédimentaire » de l'Isère en réponse à la péjoration climatique du Petit Âge glaciaire. C'est également de façon indirecte que nous analyserons le transit de la charge de fond dans cette étude, en suivant la dispersion longitudinale de macroscories, résidus de l'industrie métallurgique ancienne qui s'est installée au XVII^e siècle dans des vallées du sud de l'Ardenne. En effet, connaissant les lieux d'origine des rejets d'une part, et le moment où ces rejets ont commencé d'autre part, on peut déduire de la présence des scories dans le lit des rivières, des informations sur la vitesse de progression de la charge de fond. Bien que ce soit le cheminement de particules individuelles qui est observé, il s'agit en quelque sorte ici aussi de la propagation d'une « vague sédimentaire » ; en effet, vu le nombre considérable de scories présentes dans la rivière, on intègre le fait, tout comme pour les particules naturelles, que certaines d'entre elles ont pu être entreposées dans des bancs de convexité, par exemple (ou le sont encore à l'heure actuelle), et être remaniées (ou non) par érosion latérale. Par ailleurs, ces observations donnent également des indications sur la compétence des rivières et sur un éventuel tri longitudinal du matériel.

SITES D'ÉTUDES ET MÉTHODOLOGIE

Dans la partie amont de son cours, la Rulles entaille la retombée méridionale de l'Ardenne puis, changeant de direction en aval de Habay-la-Neuve, elle suit la limite entre le Paléozoïque et le Jurassique, collectant une série d'affluents qui descendent de l'Ardenne, et se jette finalement dans la Semois après un parcours de 40 km (fig. 1). Les principales caractéristiques de ces rivières se trouvent au tableau I.

Quelques précisions doivent être apportées sur la manière dont les données du tableau I ont été obtenues.

— Le débit à pleins bords a été identifié aux stations limnigraphiques existantes ; pour les ruisseaux de Landeau et du Fourneau ainsi que pour la Mandebrs, il n'existe cependant pas de stations de mesure des débits et nous avons alors appliqué la relation mise en évidence pour les rivières ardennaises (Petit et Pauquet, 1997) :

$Q_b = 0,087 A^{1,044}$ avec Q_b le débit à pleins bords exprimé en $m^3 \cdot s^{-1}$ et A la superficie du bassin versant exprimée en km^2 .

— La pente longitudinale a été calculée à partir de relevés du fond du lit effectués à une interdistançe moyenne de 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 stations de mesure des débits.

— La largeur du lit mineur représente une moyenne de quinze à vingt valeurs mesurées sur le terrain, entre les berges, au niveau du pleins bords.

— La puissance spécifique (exprimée en $W \cdot m^{-2}$) se définit de la manière suivante :

$$\omega = \rho g Q_b S / w$$

où ρ représente la masse volumique du fluide, g l'accélération de la pesanteur, Q_b le débit à pleins bords, S la pente de la rivière et w la largeur du lit mineur au niveau du pleins bords.

TABLEAU I

Caractéristiques des rivières étudiées

| | Superficie du bassin versant (en km^2) | Débit à pleins bords (en $m^3 \cdot s^{-1}$) | Pente (en $m \cdot m^{-1}$) | Largeur (en m) | Puissance spécifique (en $W \cdot m^{-2}$) |
|-------------|--|--|---------------------------------|-------------------|--|
| Rulles (A) | 48 | 4,8 | 0,0032 | 6,2 | 25 |
| Rulles (B) | 96 | 11 | 0,0023 | 9,10 | 27 |
| Rulles (C) | 220 | 24 | 0,0014 | 12,32 | 27 |
| Semois (D) | 378 | 50 | 0,0010 | 18,55 | 27 |
| R. Landeau | 4,1 | 0,34 | 0,0132 | 2,42 | 19 |
| R. Fourneau | 9,1 | 0,88 | 0,0092 | 2,88 | 28 |
| Mandebbras | 23,3 | 2,12 | 0,0058 | 4,26 | 29 |
| Mellier (E) | 63 | 9,9 | 0,0029 | 8,05 | 36 |

(A) Rulles à la station limnimétrique de Habay-la-Neuve (localisation à la fig. 1), (B) Rulles à la station limnigraphique d'Habay-la-Vieille, (C) Rulles à la station limnigraphique d'Ansart, (D) Semois à la station limnigraphie de Tintigny, (E) Mellier à la station de Marbehan.

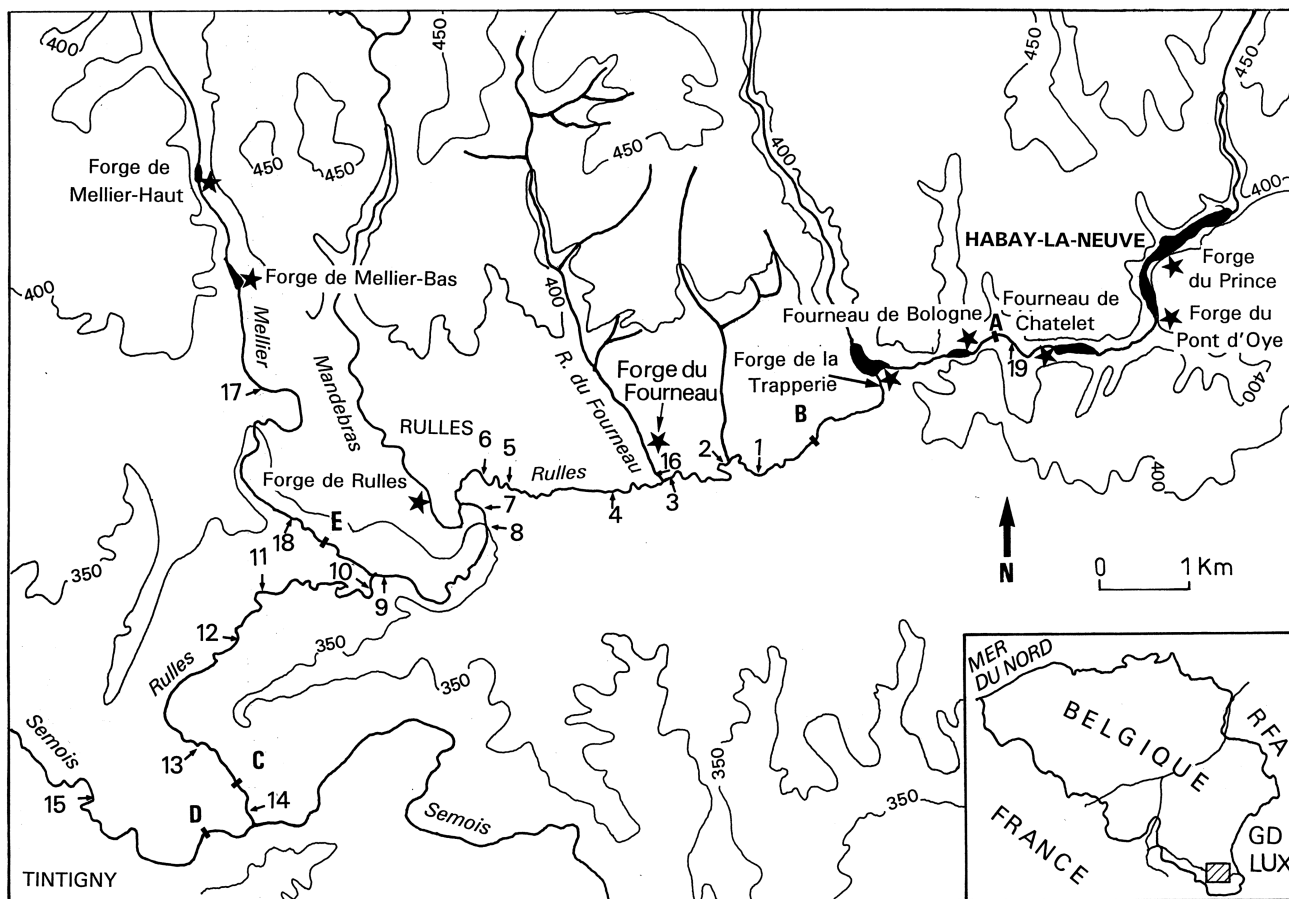


FIGURE 1. Carte de localisation des sites de prélèvements (chiffres de 1 à 19) ; des stations de mesures des débits (lettre de A à E) et des anciennes forges (identifiées par des étoiles).

Location map of sampling sites (number 1 to 19), of gauging discharge stations (letters a to e) and of old ironworks (presented using stars symbol).

Dès le milieu du XVI^e siècle, mais surtout au XVII^e siècle, des industries de transformation du minerai de fer se sont installées le long de ces rivières. Plusieurs études (Évrard, 1956 ; Doucet, 1969 ; Feltz et Incourt, 1995) ont permis de localiser les anciennes forges (dont il reste parfois encore des témoins sur le terrain), et de connaître les périodes pendant lesquelles elles ont fonctionné. Pendant ces périodes d'activité, les résidus macroscopiques provenant de la transformation du minerai de fer furent rejetés directement dans les rivières et emportés par celles-ci. Ils sont toujours transportés à l'heure actuelle même si ces industries ont cessé de fonctionner. Ils sont facilement reconnaissables et peuvent être classés en deux types, sur la base de leur aspect extérieur. (i) Les mâchefers ont une couleur qui va du vert clair au bleu turquoise et leur aspect extérieur est assez lisse. Ils présentent souvent des cassures conchoïdales. Leur densité apparente varie généralement entre 2,2 et 2,5 en raison de la présence de vacuoles. (ii) Les scories, quant à elles, sont d'un aspect terne. Leur couleur est souvent noire ou grise et elles présentent de nombreuses vacuoles gazeuses qui leur donnent souvent un aspect ruiforme. Leur densité est inférieure à celle des mâchefers (1,8 et 2,2). Que ce soit les mâchefers ou les

scories, ces éléments sont émoussés et ne présentent pas de signes de fractures récentes, ce qui aura toute son importance dans l'interprétation des résultats.

Des scories et des mâchefers ont été prélevés dans dix-neuf sites de la Rulles, de la Mellier et de la Semois (fig. 1). Pour comparer nos prélèvements, nous avons choisi de récolter les cinquante plus gros éléments sur différents seuils de ces rivières. Les prélèvements ont été effectués par collecte des plus grosses scories visibles dans la couche de surface. Les éléments ont été pesés individuellement et leur axe intermédiaire mesuré. Par ailleurs, le volume des particules a également été mesuré de façon à pouvoir déterminer leur densité. Comme il a été signalé précédemment, la densité des éléments récoltés est inférieure à la densité de la silice ou du calcaire et varie en fonction du type d'échantillon récolté (scorie ou mâchefer), mais globalement la densité moyenne est de 2,1. Par ailleurs, afin de ramener la taille des scories à celle des éléments naturels qui constituent la charge de fond de ces rivières, nous avons transformé le poids des particules en un volume de sphère (en considérant une densité de 2,65), ceci afin d'obtenir le diamètre équivalent (voir tabl. II).

TABLEAU II

Taille des particules en fonction de la distance des forges et de la distance cumulée de la forge de la Trapperie

| N° | Rivière | Forge | Distance forge (en km) | distance cumulée Trapperie | D ₁ (mm) | D ₅ (mm) | D ₁₀ (mm) | D ₁₀ * (mm) |
|----|------------|-----------|---------------------------|-------------------------------|------------------------|------------------------|-------------------------|---------------------------|
| 1 | Rulles | Trapperie | 2,25 | 2,25 | 47,2 | 33,1 | 28,0 | 24,4 |
| 2 | Rulles | Trapperie | 2,79 | 2,79 | 31,4 | 27,6 | 25,9 | 22,2 |
| 3 | Rulles | Trapperie | 3,81 | 3,81 | 39,3 | 27,6 | 21,8 | 18,4 |
| 4 | Rulles | Fourneau | 0,78 | 4,67 | 86,2 | 73,9 | 61,9 | 56,7 |
| 5 | Rulles | Fourneau | 1,86 | 5,75 | 23,6 | 17,1 | 14,8 | 11,7 |
| 6 | Rulles | Fourneau | 2,56 | 6,45 | 23,7 | 18,6 | 15,6 | 13,2 |
| 7 | Rulles | Rulles | 0,75 | 7,55 | 82,7 | 75,4 | 68,6 | 58,7 |
| 8 | Rulles | Rulles | 0,90 | 7,70 | 74,0 | 65,5 | 57,6 | 52,2 |
| 9 | Rulles | Rulles | 2,90 | 9,70 | 27,5 | 24,6 | 22,0 | 19,0 |
| 10 | Rulles | Rulles | 3,30 | 10,10 | 36,7 | 28,5 | 23,1 | 18,4 |
| 11 | Rulles | Rulles | 5,15 | 11,95 | 21,6 | 16,6 | 13,4 | 11,8 |
| 12 | Rulles | Rulles | 6,05 | 12,85 | 26,3 | 17,9 | 14,1 | 11,7 |
| 13 | Rulles | Rulles | 7,75 | 14,55 | 26,6 | 15,5 | 13,1 | 10,4 |
| 14 | Rulles | Rulles | 9,45 | 16,25 | 31,1 | 29,3 | 22,6 | 18,9 |
| 15 | Semois | Rulles | 12,5 | 19,30 | 12,5 | 11,7 | 10,4 | 9,0 |
| 16 | R Fourneau | Fourneau | 0,2 | | 89,2 | 80,5 | 71,9 | 60,1 |
| 17 | Mellier | Mellier | 1,35 | | 89,3 | 78,1 | 74,6 | 63,3 |
| 18 | Mellier | Mellier | 5,2 | | 24,7 | 19,3 | 16,0 | 13,5 |
| 19 | Rulles | Châtelet | 0,66 | | 82,8 | 70,7 | 64,9 | 53,7 |

Dans l'analyse des résultats, il ne faudra cependant pas perdre de vue qu'à masse égale, les scories étant moins denses que les éléments naturels, elles auront une taille supérieure ; de ce fait, au sein d'un lit composé de particules de même masse, elles risquent alors de se présenter en saillie, avec un angle de repos plus faible, ce qui est susceptible de faciliter leur mise en mouvement par rapport aux particules ambiantes plus fines et plus lourdes (Wiberg et Smith, 1987). Il faut donc être conscient que le diamètre des scories échantillonnées, même exprimé en diamètre équivalent, surestime plus que probablement la compétence de la rivière et, de ce fait, que la vitesse de propagation de la charge de fond est elle aussi légèrement surestimée.

La volonté de prélever systématiquement sur des seuils a été guidée par la théorie de la réversibilité des forces tractrices en fonction des débits, dans les systèmes seuils / mouilles. Les seuils agissent, en effet, tels des filtres dans la progression de la charge de fond, si bien que la taille du matériel sur les seuils permet une estimation de la taille du matériel charrié par la rivière et donne donc une estimation de la compétence effective de la rivière (Bravard et Petit, 1997). Tous les seuils n'ont pas pu être échantillonnés ; nous avons choisi les sites se trouvant juste en amont et juste en aval d'une confluence avec un affluent sur lequel se trouvait une forge, et, en fonction de la localisation de ces sites de prélèvements, dans des sites intermédiaires retenus de façon à avoir une distance relativement constante entre les lieux de prélèvements (fig. 1).

RÉSULTATS

Dans le tableau II, on peut retrouver pour chacun des sites, la largeur de la plus grande particule (D₁), la largeur moyenne des cinq (D₅) et des dix plus gros éléments (D₁₀), le diamètre équivalent moyen des dix plus grosses scories (D₁₀*), la distance depuis la forge la plus proche du lieu de prélèvement et la distance cumulée à partir de la forge de la Trapperie (considérée comme point de départ à la fig. 2). Le choix de ces classes a été guidé par les éléments suivants. Tout d'abord, Carling (1983) a utilisé le diamètre moyen des cinq plus grosses particules (D₅), car il considère qu'il représente approximativement le D₉₆ % ; il justifie ce choix en considérant qu'il permet ainsi une comparaison raisonnable avec les données présentées par Baker et Ritter (1973) qui utilisent le D₉₀ %. Par ailleurs, ces auteurs indiquent que la plupart des études considèrent la taille moyenne du et des plus gros éléments, comme représentative de la compétence des rivières. Notons enfin que plusieurs études ont montré que la déstabilisation des lits graveleux était commandée par la destruction des *pebble clusters* dont le meilleur descripteur est le D₉₀ (Reid et Frostick, 1984 ; Brayshaw, 1985). Toutefois, plus récemment, Wilcock (1992) a démontré que les diamètres extrêmes ne représentent pas toujours les descripteurs les plus adéquats de la compétence des rivières et que le D₅₀ pris dans le contexte d'une distribution entière semble être une mesure plus précise. Toutefois, si nous avons adopté un tel mode opératoire, la quantité de scories à prélever pour obtenir une courbe granulométrique fiable, aurait dû dépasser 500 kg dans certains sites, étant donné qu'on considère généralement que la particule la plus large doit

représenter moins de 0,1 % du poids de l'échantillon (Church *et al.*, 1987 ; Dunkerley, 1994). Or, dans certains sites de notre étude, il aurait été impossible d'obtenir une telle masse en restant dans la même unité morphologique ou alors il aurait fallu prélever dans la sous-couche, ce qui aurait impliqué des conditions différentes.

Nous avons reporté à la figure 2, l'évolution de la taille des 10 plus grosses particules (D_{10} du tabl. II), en suivant le cours de la Rulles, ce dernier étant représenté en distance cumulée à partir de la forge de la Trapperie. Quelques précisions doivent être apportées concernant certains sites de prélèvement.

i. Cinq ateliers de transformation du minerai de fer étaient échelonnés tout le long de la Rulles, en amont du site 1 (fig. 1). Nous avons considéré que les échantillons prélevés au site 1 et plus en aval avaient comme origine la forge située la plus en aval des cinq ; ceci se justifie par le fait que des étangs avec des barrages ont été aménagés à la même période que les forges et qu'ils ont stoppé le transit de la charge de fond provenant de l'amont

ii. Dans les source historiques, il n'est fait mention nulle part de la présence de forges sur le ruisseau du Fourneau. Toutefois dans les quelques centaines de mètres de son cours juste avant sa confluence avec la Rulles, de nombreuses scories de grosse dimension (site 16) tapissent le fond du lit, attestant la présence d'une ancienne forge juste à proximité. Cette dernière a pu être localisée de façon précise, car nous avons effectué des prélèvements plus en amont dans lesquels nous n'avons pas trouvé de scories. L'injection de scories par le ruisseau du Fourneau explique la réaugmentation de la taille des scories dans la Rulles (site 4).

iii. Pour les sites de prélèvement 7 à 15, nous avons considéré que les éléments provenaient de la forge de Rulles située sur la Mandebbras. En effet, comme il ressort de la figure 2, la taille des éléments trouvés au site 7 est nettement supérieure à celle des sites 5 et 6, ce qui traduit bien

une nouvelle injection de matériel.

iv. Des échantillons ont été prélevés en amont et en aval de la confluence de la Mellier (sites 9 et 10) car nous savions que deux ateliers de transformation du minerai de fer étaient jadis établis sur cette rivière. Dans ce cas, on constate cependant que la taille des éléments de la Rulles n'a pas été modifiée par l'apport de ceux qui proviennent de la Mellier, certainement en raison de l'éloignement des forges installées sur cette rivière (de l'ordre de 7 km, voir le point suivant).

v. Pour les lieux de prélèvement sur la Mellier (sites 17 et 18), nous avons considéré, tout comme au point (i) ci-dessus, que tous les échantillons provenaient de la forge située la plus en aval sur cette rivière, à savoir celle de Mellier-bas.

vi. Nous avons trouvé des scories dans la Semois (site 15), mais 4 km en aval de ce dernier site, nous n'en n'avons plus trouvé.

Un graphique a été réalisé où la taille des particules a été mise en relation avec la distance par rapport aux forges où ces particules ont été injectées dans la rivière, tous sites confondus (fig. 3). L'ajustement donne un coefficient de corrélation de 0,86. Ce graphique appelle les commentaires suivants. Tout d'abord, d'un point de vue méthodologique, notons que la relation de la figure 3 est établie à partir d'une transformation logarithmique, et l'équation (après transformation inverse) donne la réponse médiane et non la réponse moyenne. Dans certains cas, cette façon de procéder peut mener à des sous-estimations notoires, comme cela a été établi par différents auteurs (Miller, 1984 ; Janson, 1985 ; Ferguson, 1987). Toutefois, dans le cas présenté, le résultat semble assez correct étant donné la répartition des points dans les gammes de valeurs faibles et élevées. De toute manière, indépendamment de ces considérations et de la valeur intrinsèque de l'équation, on constate qu'il y a une décroissance très rapide de la taille du matériel pour des distances inférieures à 4 km, passant globalement de 60-70

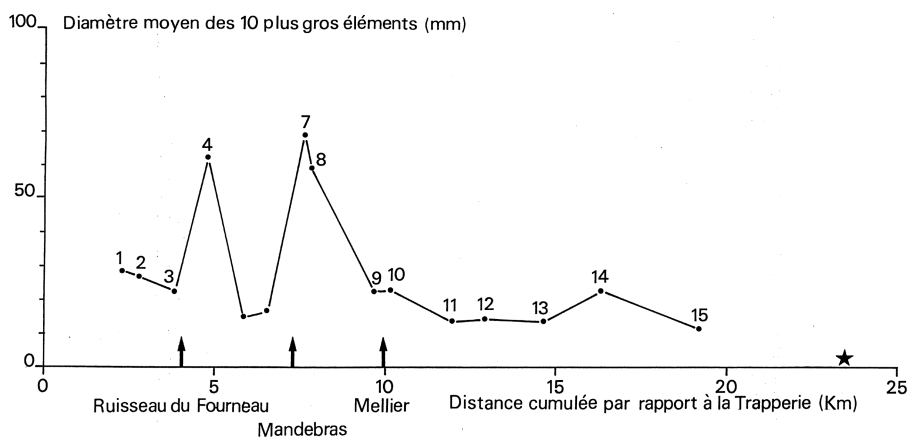


FIGURE 2. Évolution du diamètre moyen des dix plus grosses scories mesurées selon l'axe intermédiaire, suivant le cours de la Rulles et de la Semois en prenant une distance cumulée à partir de la forge de la Trapperie ; les numéros renvoient au tableau II ; localisation des sites à la figure 1. Les flèches disposées en abscisse localisent la confluence des affluents sur lesquels des forges étaient situées et qui amènent des scories dans la Rulles. L'étoile reprise en abscisse localise le site le plus en amont où aucune scorie n'a été retrouvée.

Evolution of the mean diameter of the 10 biggest slags measured by the b-axis, along the River Rulles and the River Semois, using a cumulative distance from the Trapperie iron factory. The numbers refer to the Table II. The sites are located in the figure 1. The arrows on the x-axis locate the junctions of tributaries where ironworks were settled, bringing slags into the River Rulles. The star symbol in the x-axis locates the more upstream site where no slag has been found.

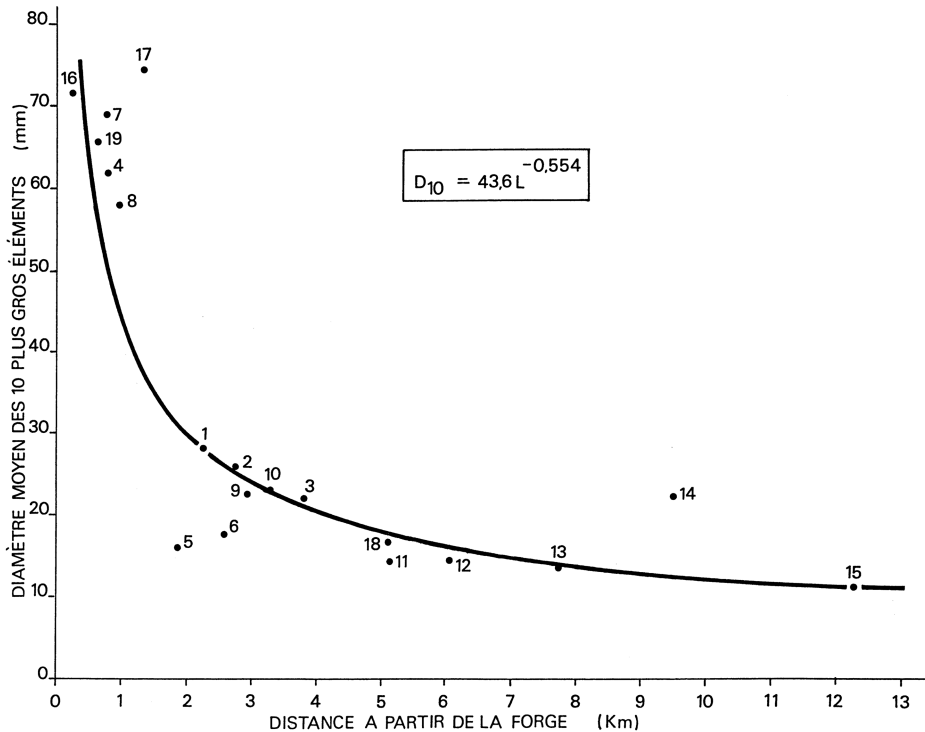


FIGURE 3. Évolution du diamètre moyen (mesuré selon l'axe intermédiaire) des dix plus grosses scories, en fonction de la distance de la forge la plus proche, tous sites confondus.

Evolution of the mean diameter of the ten biggest slags measured by the b axis in relation with the distance from the closer iron factory, all sites together.

mm à 20-30 mm. En revanche, pour des distances supérieures à 5 km, la diminution de la taille des particules devient insensible. Ainsi, la coupure mise en évidence à la figure 3, à une distance de 4 à 5 km en aval des forges, indiquerait la fin de la zone où un triage hydraulique intervient dans la réduction de la taille des éléments.

L'ensemble des particules de 10-14 mm (représentant 9-12 mm, en considérant le diamètre équivalent avec une densité égale à 2,65) a parcouru depuis le début du XVII^e siècle (date d'installation des forges qui interviennent dans cette étude) un minimum de 12 km, soit plus de 3,3 km/siècle. D'autre part, l'absence de scories dans les dépôts de la Semois, situés plus en aval, montre que cette charge a progressé de moins de 17 km, soit 4,4 km/siècle. Cette fourchette de valeurs peut être mise en relation avec les résultats présentés dans d'autres études. Ainsi, Tricart et Vogt (1967) observant les modifications du spectre pétrographique des alluvions par suite de l'édification d'un barrage sur l'Hérault, ont montré que le déplacement de l'ensemble de la charge était d'environ 20 km/siècle. Cette valeur est à considérer comme un optimum 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 observée 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 Salvador (1991), elle aurait été de 10 km par siècle sur l'Isère. En revanche, Duchesne et Pissart (1985) ont montré que dans certains secteurs de l'Ourthe, les cailloux de cal-

caire étaient dissous après 5 km. En comparant cette dissolution avec la vitesse de dissolution des pierres calcaires constituant les barrages de cette même rivière et en admettant que la dissolution atteint seulement la face des cailloux exposée au flux, les auteurs arrivent à la conclusion que les plus gros cailloux de calcaire (25 cm) sont dissous en environ 10 siècles en ayant parcouru 5 km au maximum, ce qui donne une vitesse de déplacement des cailloux de 500 m/siècle. Cette dernière valeur est sensiblement plus faible, mais se justifie par le fait que l'Ourthe est une rivière à plus faible énergie que les rivières mentionnées dans les deux premières études.

La tendance à l'affinement des scories au cours des premiers kilomètres qui suivent les forges ne semble pas résulter de modifications des caractéristiques de la rivière ni d'une diminution sensible de sa compétence puisque les puissances spécifiques restent presque identiques le long de son cours (tabl. I). Toutefois des phénomènes d'abrasion interviennent, puisque les éléments sont bien émoussés ; il est cependant difficile d'avoir une estimation de l'importance de ce processus, mais son effet global est une sous-estimation de la vitesse de déplacement des particules, étant donné que leur taille était initialement plus importante. Par ailleurs, comme il a été évoqué ci-dessus, on n'observe généralement pas de traces de cassures sur les scories si bien que dans le processus d'affinement de ces dernières, on peut exclure les phénomènes de cassures. De même, comme les scories et mâchefers sont constitués d'une masse vitreuse, on peut également exclure la désintégration granulaire qui affecte les particules qui arrivent à une dimension inférieure à 16 mm, comme l'a montré Petitjohn (1957),

phénomène bien connu dans des roches telles que les granites (Cailleux et Tricart, 1959). Enfin, le phénomène de gélifraction semble être aussi très peu efficace, non seulement en fonction de la nature des éléments, mais encore parce que la rivière est caractérisée par un régime pluvial océanique, avec un maximum des débits en hiver, de telle sorte que les seuils ne sont généralement pas émergés en période de gel. Il arrive certes que la rivière soit prise par la glace mais la fréquence de tels événements est rare (plus de 5 ans). Tous ces éléments donnent à penser que la réduction draconienne de la taille du matériel dans les quelques premiers kilomètres en aval des forges, résulte d'une mise en mouvement et d'un transport sélectif des particules.

La taille du matériel retrouvé au delà de 5 km — qui est presque constante — représente en quelque sorte la compétence effective de la rivière, c'est-à-dire la dimension du matériel qui peut se déplacer rapidement sur des distances appréciables et être effectivement évacué hors du bassin versant. D'après nos observations, elle représente 12 mm maximum (en diamètre équivalent), ce qui est relativement faible, mais se justifie par le fait que les puissances ne sont pas très élevées ($25-30 \text{ W.m}^{-2}$). On est donc assez loin de la relation proposée par Costa (1983) : $\omega = 0,030 d_i^{1,686}$ (avec d_i exprimé en mm) mais pour des particules supérieures à 50 mm, il est vrai. En revanche, l'adéquation entre puissance et taille du matériel érodé et transporté, correspond assez bien avec les observations de Reid et Frostick (1986) qui trouvent une puissance de l'ordre de 35 à 40 W.m^{-2} pour la déstabilisation d'un pavage dont le D_{50} du matériel de surface représente 22 mm, tandis que le matériel transporté (connu grâce à un piège à sédiments) présente un D_{50} égal à 11 mm et un D_{90} à 34 mm.

D'autre part, il ressort de la figure 3 qu'il existe probablement une compétence plus importante qui permettrait le tri hydraulique, mais elle ne s'exercerait que localement et lors d'événements exceptionnellement intenses. Ces valeurs de compétence rejoignent celles mises en évidence dans une autre étude (Petit, 1987), portant sur la partie de la Rulles située en amont des forges, où des cailloux marqués et des pièges à sédiments ont été utilisés.

CONCLUSION

La présence de scories, résidus de l'ancienne industrie métallurgique qui s'est installée au début du XVII^e dans des vallées du sud de l'Ardenne, permet de se faire une opinion quant à la progression généralisée de la charge de fond de ces rivières. Elle atteint un peu plus de 3 km par siècle, ce qui représente une valeur nettement inférieure à celles mises en évidence dans des rivières de montagne à plus forte énergie. Par ailleurs, la décroissance marquée de la taille des éléments, dans les quelques kilomètres qui suivent l'injection du matériel, permet de voir qu'il y a un triage des éléments. Plus en aval, la taille des scories ne diminue plus avec les distances et on peut alors parler d'une compétence effective de la rivière. Enfin, la compétence de la rivière,

quant à la taille du matériel (12 mm), apparaît relativement faible, mais se justifie par le fait que la rivière présente des puissances spécifiques peu élevées.

REMERCIEMENTS

Les auteurs remercient les professeurs J.-P. Bravard et A. Pissart pour leurs remarques et suggestions apportées lors de la rédaction de cet article ainsi que M. Church et M. Lapointe pour leurs commentaires apportés lors de la lecture critique du manuscrit. Un nombre appréciable de données hydrologiques et de documents topographiques ont été aimablement mis à notre disposition par le Service des Cours d'eau non navigables (siège de Marche et de Namur) et par le MET-SETHY (Service Hydrologique du Ministère de l'Équipement et des Transports). Les analyses de laboratoire ont été effectuées par J. L. Génicot (technicien sous contrat P.R.I.M.E accordé par la Région wallonne au Centre national de Recherches géomorphologiques) et les dessins ont été réalisés par R. Ancion que nous remercions vivement.

RÉFÉRENCES

- Baker, V. R. et Ritter, D. F., 1975. Competence of rivers to transport coarse bedload material. *Geological Society of America Bulletin*, 86 : 975-978.
- Bravard, J.-P. et Petit, F., 1997. Les cours d'eau, dynamique du système fluvial. A. Colin Paris, 222 p.
- Brayshaw, A. C. 1985. Bed microtopography and entrainment thresholds in gravel-bed rivers. *Geological Society of America Bulletin*, 96 : 218-223.
- Cailleux, A. et Tricart, J., 1959. Initiation à l'étude des sables et des galets. CDU, Paris, 376 p.
- Carling, P. A., 1983. Threshold of coarse sediment transport in broad and narrow natural streams. *Earth Surface Processes and Landforms*, 8 : 1-18.
- Church, M. A., McLean, D. G. et Wolcott, J. F., 1987. River bed gravels : sampling and analysis, p. 43-79. *In* C. R. Thorne, J. C. Bathurst et R. D. Hey, édit., *Sediment transport in gravel-bed rivers*, Wiley.
- Costa, J. E., 1983. Palaeohydraulic reconstruction of flash-flood peaks from boulder deposits in the Colorado Front range. *Geological Society of America Bulletin*, 94 : 986-1004.
- Doucet, F., 1969. Rulles, Marbehan et les alentours au cours du temps. Éditions du musée Gaumais Virton.
- Duchesne, F. et Pissart, A., 1985. Valeur stratigraphique des comptages des cailloux de différentes lithologies. *Bulletin de la Société géographique de Liège*, 21 : 13-23.
- Dunkerley, D. L., 1994. Discussion : Bulk sampling of coarse clastic sediments for particle-size analysis. *Earth Surface Processes and Landforms*, 19 : 255-261.
- Ergenzinger, P. et Custer, S. G., 1983. Determination of bedload transport using naturally magnetic tracers : First experiences at Squaw Creek, Gallatin County, Montana. *Water Resources Research*, 19(1) : 187-193.
- Ergenzinger, P., Schmidt, K. D. et Busskamp, R., 1989. The pebble transmitter system (PETS) : First results of a technique for studying coarse material erosion, transport and deposition. *Zeitschrift für Geomorphologie NF*, 33 : 503-508.
- Évrard, R., 1956. Forges anciennes. Solédi, Liège, 22 p.
- Feltz, C. et Incourt, A.-F., 1995. Itinéraire de la sidérurgie du XVI^e au XX^e siècle en Sud Ardenne et en Gaume. *Société royale belge de Géographie*, 26, 56 p.
- Ferguson, R. I., 1987. Accuracy and precision of methods for estimating river loads. *Earth Surface Processes and Landforms*, 12 : 95-104.
- Gintz, D., Hassan, M. A. et Schmidt K. H., 1996. Frequency and magnitude of bedload transport in a mountain river. *Earth Surface Processes and Landforms*, 21 : 433-455.

- Hassan, M. A., Schick, A. P. et Laronne J. B., 1984. The recovery of flood dispersed coarse sediment particles — a three dimensional magnetic tracing method. *In* A.P. Schick, édit., Channel processes : Water Sediment Catchment control. Catena, Suppl. Bd : 153-162.
- Henrottay, J., 1973. La sédimentation de quelques rivières belges au cours des sept derniers siècles, *Bulletin de la Société géographique de Liège*, 9 : 101-115.
- Jansson, M., 1985. A comparison of detransformed logarithmic regressions and power function regressions. *Geografiska Annaler*, 67 : 61-70.
- Miller, D. M., 1984. Reducing transformation bias in curve fitting. *The American Statistician*, 38(2) : 124- 126.
- Petit, F., 1987. The relationship between shear stress and the shaping of the bed of a pebble-loaded river (La Rulles-Ardenne). *Catena*, 14(5) : 453-468.
- Petit, F. et Pauquet, A., 1997. Bankfull discharge recurrence interval in gravel-bed rivers. *Earth Surface Processes and Landforms*, 22 : 685-693.
- Petitjohn, F. J., 1957. *Sedimentary rocks*, Harper & Brothers, New York, 718 p.
- Reid, I. et Frostick, L. E., 1984. Dynamics of bedload transport in Turkey Brook, a coarse-grained alluvial channel. *Earth Surface Processes and Landforms*, 1 : 143-155.
- Salvador, P.-G., 1991. Le thème de la métamorphose fluviale dans les plaines alluviales du Rhône et de l'Isère — Bassin de Malville et ombilic de Moirans (Isère, France). Thèse Géographie et Aménagement, Lyon III, 498 p.
- Sluse, P., 1996. Évolution de la Rulles, de la Semois et de la Mellier au cours des cinq derniers siècles grâce aux résidus métallurgiques de l'industrie du fer et par l'étude des cartes anciennes. Mémoire de licence en Sciences géographiques, Université de Liège, 206 p.
- Tricart, J. et Vogt, H., 1967. Quelques aspects du transport des alluvions grossières et du façonnement des lits fluviaux. *Geografiska Annaler*, 49 : 350-366.
- Wiberg, P. L. et Smith, J. D., 1987. Calculations of the critical shear stress for motion of uniform and heterogeneous sediments. *Water Resources Research*, 23(8) : 1471-1480.
- Wilcock, P. E., 1992. Flow competence : A criticism of a classic concept. *Earth Surface Processes and Landforms*, 17 : 289-298.