

# Fréquence et importance du charriage dans des rivières à charge de fond caillouteuse

F. PETIT \*, A. PAUQUET \* et A. PISSART \*

## Résumé

Des observations et des expériences menées avec des cailloux marqués ont été effectuées dans différentes rivières ardennaises à charge de fond caillouteuse, de dimension différente (taille du bassin hydrographique variant de 1,5 km<sup>2</sup> à 2 700 km<sup>2</sup>). Les forces tractrices ont été évaluées par différentes approches, notamment lors de la mise en mouvement des particules, ce qui a permis d'affiner les valeurs des forces tractrices critiques et du critère adimensionnel de Shields. Ce dernier avec des valeurs oscillant entre 0,015 et 0,040 est inférieur à la valeur traditionnellement retenue. De la même façon, il a été possible d'avancer certaines valeurs de puissance spécifique de mise en mouvement. Ces observations ont également permis de mettre en évidence le débit à partir duquel débute le charriage. Pour des rivières importantes, on observe une mise en mouvement de la charge de fond pour des débits nettement inférieurs au débit à pleins bords (0,4 à 0,5 Q<sub>b</sub>), débits qui se présentent en moyenne 10 à 20 jours par an. Dans les rivières de dimension modeste, l'occurrence du charriage coïncide mieux avec celle du débit à pleins bords, mais la récurrence de ce débit est nettement inférieure à un an, de telle sorte que le charriage y est aussi fréquent. Le transport solide par charriage a été évalué à l'aide de pièges à sédiments dans les rivières de dimension modeste ; il est relativement peu important dans les bassins forestiers (de l'ordre de 0,5 t.km<sup>2</sup>.an<sup>-1</sup>), notamment en raison de la multiplication des embâcles végétaux qui accroissent la rugosité et provoquent une forte dissipation d'énergie. Dans les rivières plus importantes, le transport solide, estimé grâce à l'analyse systématique des quantités draguées successivement dans le temps aux mêmes sites en relation avec des profils de contrôle, varie entre 0,4 et 2 t.km<sup>2</sup>.an<sup>-1</sup>.

## Abstract

Observations and experiments with marked pebbles were conducted in Upland Belgium in nine gravel bedded rivers of different size (watersheds 1,5 km<sup>2</sup> to 2 700 km<sup>2</sup>). Shear stresses evaluated by using different approaches, especially during initial particle motion, make it possible to specify critical shear stresses and dimensionless Shields criterium. The latter has smaller values than usually accepted,  $\theta_c$  varying from 0.015 to 0.040. Unit stream power values required for initial particle movement were produced as well. These observations also made it possible to determine critical entrainment discharges. Bedload movement in larger rivers is initiated for discharges lower than bankfull (0.4 - 0.5 Q<sub>b</sub>) and occurs about fifteen days a year on average. In small catchments, bedload movement and bankfull discharge frequencies coincide but bankfull discharges are more frequent than in large rivers (the recurrence interval is about 0.5 year; on the partial duration series). In small rivers flowing in forested catchments bedload discharge evaluated using bedload traps is only 0.5 t.km<sup>2</sup>.yr<sup>-1</sup>, especially because of log-jams proliferation which increases the roughness and causes energy dissipation. In more important rivers where the ratio between the grain shear stress and the total shear stress is high, bedload discharge (estimated fairly well by analysing the amount of material successively dredged at the same sites, in relation to control profiles) varies from 0.4 t.km<sup>2</sup>.yr<sup>-1</sup> to 2 t.km<sup>2</sup>.yr<sup>-1</sup>.

## INTRODUCTION

Des campagnes de marquage de la charge de fond ont été effectuées dans des rivières ardennaises de taille différente et ont été complétées par des traitements réalisés à partir d'observations effectuées précédemment dans différentes rivières de Haute-Belgique. Les plus petites de ces rivières ont un bassin-versant de quelques km<sup>2</sup>, la plus grande atteint près de 3 000 km<sup>2</sup>. Ces observations ont été mises en relation avec

\* Département de Géographie Physique, Université de Liège. Place du XX Août, 7, B. 4000 Liège (Belgique)

des paramètres dynamiques, selon une méthodologie comparable mais qui a cependant nécessité certaines adaptations, notamment en fonction de la dimension des rivières.

Le but de cette étude était tout d'abord d'identifier les débits de mise en mouvement de la charge de fond et, en fonction d'une analyse hydrologique basée notamment sur la courbe des débits classés, de définir le nombre moyen de jours où le charriage agissait. Connaissant les débits de mise en mouvement d'une part, ayant estimé certains paramètres dynamiques pour ces débits d'autre part, il a ainsi été possible de mieux définir et de quantifier les critères de mise en mouvement de la charge de fond. Accessoirement, ces marquages nous ont permis de mieux connaître la distance parcourue par la charge de fond. Enfin, nous avons pu estimer les quantités de matériel transportées par charriage.

#### CARACTÉRISTIQUES DES RIVIÈRES ÉTUDIÉES

Les rivières étudiées, situées pour la plupart en Ardenne, ont toutes une charge de fond caillouteuse et une pente relativement forte, variant de plus de 30 pour mille en tête de bassin à moins de 1 pour mille pour les organismes les plus importants. Le régime des débits est contrasté car ces rivières sont développées sur un substrat imperméable (phyllades, quartzophyllades et quartzites du Dévonien inférieur) ; seuls le Ruisseau du fond de Wavelinse et la Berwinne ont un régime partiellement tamponné dans la mesure où une partie de leur bassin hydrographique s'étend sur des calcaires. Les puissances spécifiques (au niveau du débit à pleins bords) varient de 40 à 80 W.m<sup>-2</sup> (Petit, 1994a). Ce sont des rivières à chenal unique avec une méandration relativement bien développée.

#### MÉTHODOLOGIE

Le débit à pleins bords de chaque rivière a été identifié et sa récurrence déterminée par ajustement des crues maximales annuelles dans la distribution de Gumbel et par utilisation de la série partielle des débits (Petit *et al.*, 1994). Le débit à pleins bords a servi de valeur repère pour les débits de mise en mouvement. Pour les rivières à charge caillouteuse développée sur un substrat imperméable et dont le bassin-versant dépasse 500 km<sup>2</sup>, la récurrence du débit à pleins bords oscille entre 0,9 et 1,5 ans mais pour des rivières de dimension plus modeste (bassin-versant inférieur à 250 km<sup>2</sup>), cette récurrence est généralement de l'ordre de 0,5 ans. Ce schéma a été vérifié par une analyse systématique des débits à pleins bords effectuée sur une quarantaine de rivières de moyenne et haute Belgique.

#### Marquage

Les marquages, essentiellement colorimétriques, ont été effectués *in situ* afin de ne pas perturber l'agencement du matériel constituant le lit. Les caractéristiques du matériel (D<sub>50</sub> et D<sub>90</sub>) ont été estimées par la méthode de la grille, méthode proposée par Kellerhals et Bray (1971) et appliquée avec succès dans le Canal de Miribel notamment (Poinsart, 1992). Des repérages topographiques ont été réalisés afin de s'assurer qu'il y avait bien eu mise en mouvement et non enfouissement du matériel marqué.

## Paramètres dynamiques

Les paramètres suivants ont été estimés pour différentes gammes de débits.

Tout d'abord la force tractrice totale ( $\tau$ ), a été évaluée à partir du produit de la pente ( $s$ ) et du rayon hydraulique ( $R$ ) :

$$\tau = p g R s \quad (1)$$

(avec  $g$  = l'accélération due à la pesanteur et  $p$  la masse volumique du fluide) ;

La *grain shear stress* ( $\tau'$ ), la composante de la force tractrice totale qui intervient seule dans le transport et la mise en mouvement de la charge de fond, a été estimée en utilisant une méthode préconisée notamment par Richards (1982). Elle est basée sur la comparaison des coefficients de rugosité totale dans l'équation de Manning ( $n_1$ ) et le coefficient de rugosité dû à la résistance des particules qui constituent le fond du lit ( $n_0$ ), estimé par l'équation de Strickler :

$$\tau' = (n_0 / n_1)^{3/2} \cdot \tau \quad (2)$$

$$\text{avec } n_0 = 0,0151 D_{50}^{1/6} \quad (2b)$$

où  $D_{50}$  représente le diamètre médian des particules (en mm).

La force tractrice a également été estimée à partir des vitesses de cisaillement ( $u^*$ ) :

$$\tau = u^{*2} \cdot p \quad (3)$$

$$\text{avec } u/u^* = 2,5 \ln (y / y_0) \quad (3b)$$

où ( $u$ ) est la vitesse mesurée à une profondeur ( $y$ ) du fond du lit et  $y_0$  représente la hauteur de rugosité dépendant des caractéristiques du matériel constituant le fond du lit et dont le descripteur le plus souvent utilisé est le  $D_{50}$ . Différentes relations ont été proposées pour les rivières à fond caillouteux (Hey, 1979 ; Petit, 1994), mais la plupart d'entre elles oscillent dans la fourchette suivante :

$$y_0 = 0,20 D_{50} \longrightarrow 0,25 D_{50} \quad (3c)$$

Pour les rivières de dimension modeste, il a été possible de mesurer les vitesses sur les sites mêmes de marquage, ce qui s'est révélé impossible pour les rivières plus importantes. Il a été néanmoins possible de se faire une opinion concernant la relation entre les forces tractrices totales (éq. 1) et les forces tractrices estimées par les vitesses de cisaillement (éq. 3), ceci grâce à des mesures de vitesses effectuées à différents profils (données communiquées par le SETHY - MET).

Lorsque la mise en mouvement d'un matériel de dimension donnée a été observée, la force tractrice calculée pour ce débit a été transformée en critère adimensionnel de Shields ( $\theta$ ), sur la base de la relation :

$$\theta = \tau / ((ps - pf).g.D) \quad (4)$$

avec  $ps$  la masse volumique du sédiment,  $pf$  la masse volumique du fluide et  $D$  le diamètre des particules du lit.

Les puissances spécifiques ( $\omega$ ) ont également été calculées pour différents débits (débit à pleins bords mais également débit de mise en mouvement) :

$$\omega = (Q.s.p.g) / w \quad (5)$$

avec  $Q$  le débit pris en considération et  $w$  la largeur du lit.

## Débit solide de la charge de fond

Pour les têtes de bassin et les rivières de dimension modeste, le débit solide de la charge de fond a été estimé en installant des pièges à sédiments. Pour les rivières plus importantes, l'importance du charriage a été estimé sur la base du relevé des quantités de

sédiments régulièrement retirées du lit, sachant que ces dragages sont systématiquement effectués aux mêmes endroits et que ces sites jouent finalement un rôle analogue à celui d'un piège à sédiments, sachant également que des profils de contrôle sont effectués à chaque dragage, afin de s'assurer que l'on revient aux cotes altimétriques initiales.

## RÉSULTATS

Dans le cas de l'Ourthe inférieure, la plus importante des rivières étudiées avec un débit à pleins bords égal à  $300 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$  (Pauquet et Petit, 1993), sept placettes ont été marquées dans trois sites qui se présentent comme de vastes seuils obliques. En fonction de l'occurrence des crues mobilisatrices, ces marquages ont pu être réalisés à cinq reprises. Nous avons en effet bénéficié d'une séquence de débits tout à fait favorable puisque quatre crues mobilisatrices d'importance progressive se sont succédé, pour culminer avec une crue dont la récurrence est de 35 ans. Une dernière crue mobilisatrice a encore été enregistrée par la suite.

Une synthèse de ces observations est présentée à la figure 1. On constate tout d'abord que pour un débit représentant seulement le sixième du débit à pleins bords, il y a eu une mise en mouvement dans deux placettes ( $D_{50}$  respectivement de 56 et 65 mm). Une centaine de cailloux ont été mis en mouvement et transportés sur des distances atteignant parfois plus d'une dizaine de mètres. Lors de la crue suivante (débit :  $93 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ), deux placettes ont été complètement érodées ( $D_{50}$  respectivement égaux à 73 mm et 90 mm). Une troisième n'a été que partiellement détruite, les cailloux marqués non mobilisés constituant en quelque sorte un nouvel échantillon dont on a fait la granulométrie par pesée ( $D_{50} = 110 \text{ mm}$ ). Dans les deux autres placettes du troisième site, quelques éléments ont été dérangés ou même mis en mouvement sur quelques décimètres, ce qui semble indiquer que les conditions limites de la mise en mouvement ont été approchées. Lors de la troisième crue ( $0,4 Q_b$ ), on observe une mise en mouvement généralisée sur tous les sites de marquage. Il en est évidemment de même pour la crue trentennale qui a mobilisé les éléments marqués de toutes les placettes, avec des diamètres médians variant entre 57 mm et 86 mm. Dans un des sites de marquage, la crue suivante s'est trouvée en présence d'un matériel nettement plus grossier mis en place à la suite de la crue trentennale. Bien qu'elle soit d'une plus faible importance ( $220 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ ), elle a cependant été capable d'éroder cinq placettes ( $D_{50}$  variant de 80 à 158 mm) mais la mise en mouvement a été loin d'être généralisée puisque on a retrouvé du matériel marqué en place dans cinq autres placettes ( $D_{50}$  variant de 86 mm à 127 mm, selon la localisation).

Ces observations ont été mises en relation avec les forces tractrices totales calculées pour les différents débits où il y a eu mobilisation du matériel. Elles atteignent à peine  $20 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$  pour les premières crues mobilisatrices et dépasse  $30 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$  pour la crue égale à  $0,4 Q_b$  qui peut être considérée comme la crue pour laquelle il y a une mobilisation globale de la charge de fond. Lors de la crue trentennale, les forces tractrices atteignent  $50$  à  $60 \text{ N} \cdot \text{m}^{-2}$  ce qui est une valeur somme toute modeste pour une crue de cette importance. Traduites en critère adimensionnel de Shields, ceci donne pour l'ensemble des observations un  $\theta_c$  variant de  $0,023$  à  $0,027$  pour les premières petites crues, variant de  $0,020$  à  $0,035$  pour la crue de  $120 \text{ m}^3 \cdot \text{s}^{-1}$ , avec une valeur moyenne globale de  $0,025$ . Toutefois, si on prend en compte la *grain shear stress* (éq. 2), le critère de Shields moyen est alors égal à  $0,016$ . Ajoutons que la puissance spécifique pour les débits de mise en mouvement oscille entre  $40$  et  $50 \text{ W} \cdot \text{m}^{-2}$ .

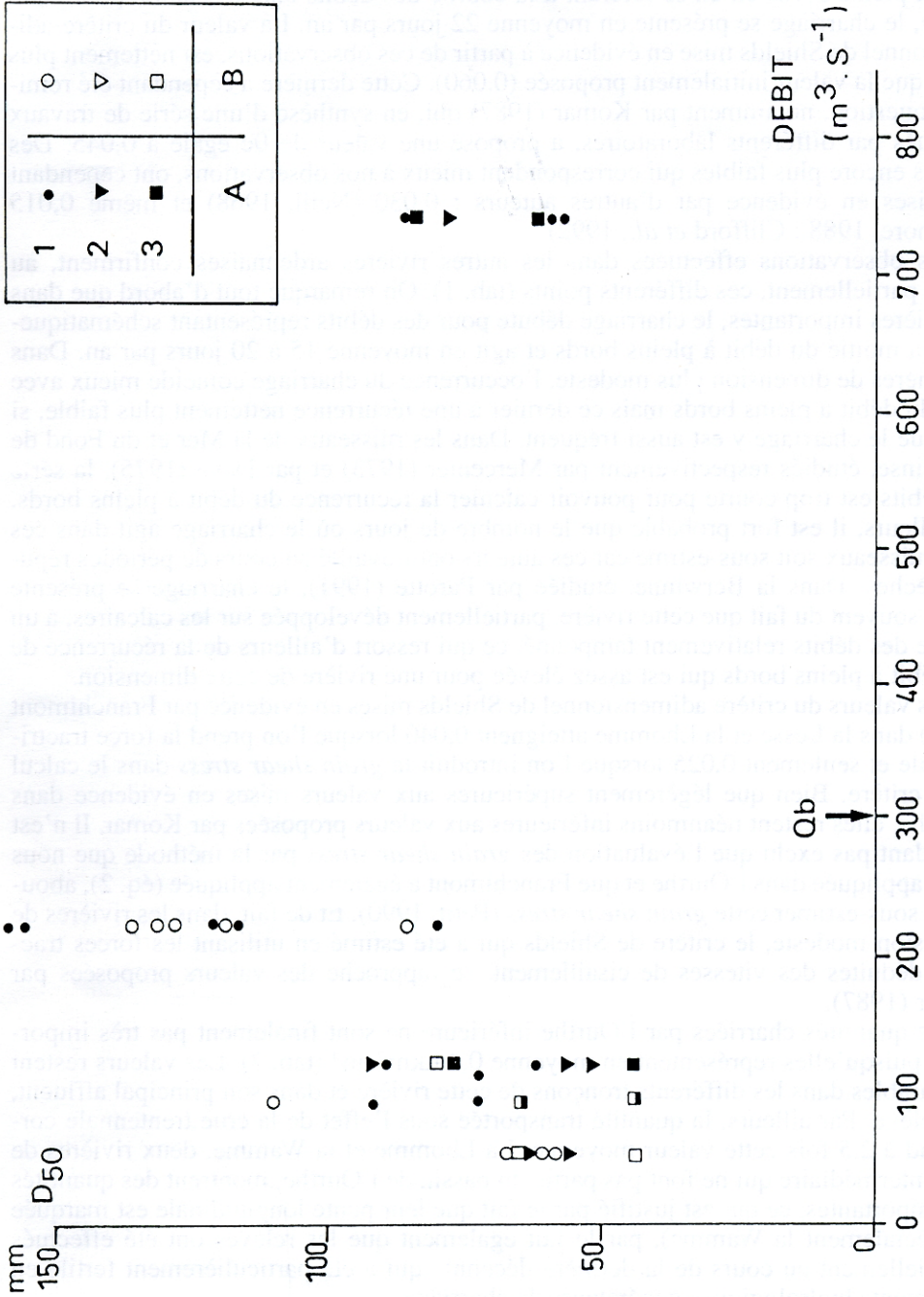


Fig. 1 - Débits de mise en mouvement des particules dans les trois sites de marquage  
A : Mise en mouvement ; B : Absence de mise en mouvement

Il apparaît donc que le charriage débute pour des débits nettement inférieurs au débit à pleins bords et, en se référant à la courbe des débits classés établie pour cette rivière, le charriage se présente en moyenne 22 jours par an. La valeur du critère adimensionnel de Shields mise en évidence à partir de ces observations, est nettement plus faible que la valeur initialement proposée (0,060). Cette dernière a cependant été remise en question, notamment par Komar (1987) qui, en synthèse d'une série de travaux effectués par différents laboratoires, a proposé une valeur de  $\theta_c$  égale à 0,045. Des valeurs encore plus faibles qui correspondent mieux à nos observations, ont cependant été mises en évidence par d'autres auteurs : 0,030 (Neill, 1968) et même 0,015 (Ashmore, 1988 ; Clifford *et al.*, 1992).

Les observations effectuées dans les autres rivières ardennaises confirment, au moins partiellement, ces différents points (tab. 1). On remarque tout d'abord que dans les rivières importantes, le charriage débute pour des débits représentant schématiquement la moitié du débit à pleins bords et agit en moyenne 15 à 20 jours par an. Dans les rivières de dimension plus modeste, l'occurrence du charriage coïncide mieux avec celle du débit à pleins bords mais ce dernier a une récurrence nettement plus faible, si bien que le charriage y est aussi fréquent. Dans les ruisseaux de la Mer et du Fond de Wavelinse, étudiés respectivement par Mercenier (1973) et par Dave (1975), la série des débits est trop courte pour pouvoir calculer la récurrence du débit à pleins bords. Par ailleurs, il est fort probable que le nombre de jours où le charriage agit dans ces deux ruisseaux soit sous-estimé car ces auteurs ont travaillé au cours de périodes réputées sèches. Dans la Berwinne, étudiée par Parotte (1991), le charriage se présente moins souvent du fait que cette rivière, partiellement développée sur les calcaires, a un régime des débits relativement tamponné, ce qui ressort d'ailleurs de la récurrence de son débit à pleins bords qui est assez élevée pour une rivière de cette dimension.

Les valeurs du critère adimensionnel de Shields mises en évidence par Franchimont (1993) dans la Lesse et la Lhomme atteignent 0,040 lorsque l'on prend la force tractrice totale et seulement 0,025 lorsque l'on introduit la *grain shear stress* dans le calcul de ce critère. Bien que légèrement supérieures aux valeurs mises en évidence dans l'Ourthe, elles restent néanmoins inférieures aux valeurs proposées par Komar. Il n'est cependant pas exclu que l'évaluation des *grain shear stress* par la méthode que nous avons appliquée dans l'Ourthe et que Franchimont a également appliquée (éq. 2), aboutisse à sous-estimer cette *grain shear stress* (Petit, 1990). Et de fait, dans les rivières de dimension modeste, le critère de Shields qui a été estimé en utilisant les forces tractrices déduites des vitesses de cisaillement, se rapproche des valeurs proposées par Komar (1987).

Les quantités charriées par l'Ourthe inférieure ne sont finalement pas très importantes puisqu'elles représentent en moyenne 0,4 t.km<sup>2</sup>.an<sup>-1</sup> (tab. 2). Les valeurs restent comparables dans les différents tronçons de cette rivière et dans son principal affluent, l'Amblève. Par ailleurs, la quantité transportée sous l'effet de la crue trentennale correspond à 2,5 fois cette valeur moyenne. La Lhomme et la Wamme, deux rivières de taille intermédiaire qui ne font pas partie du bassin de l'Ourthe, montrent des quantités plus importantes, ce qui est justifié par le fait que leur pente longitudinale est marquée (et spécialement la Wamme), par le fait également que les relevés ont été effectués essentiellement au cours de la dernière décennie qui a été particulièrement fertile en événements hydrologiques générateurs de charriage.

Rivière	superficie du bassin-versant (en km <sup>2</sup> )	Débit à pleins bords (Qb) (en m <sup>3</sup> .s <sup>-1</sup> )	Récurrance Qb (en année)	Débit de charriage /rapport au Qb	Charriage Nbre de jours/an	D <sub>90</sub> mobilisé (en mm)	Critère adimensionnel de Shields (oc)
R <sup>eu</sup> de la Mer	1,4	0,18	-	0,45Qb	14	20	0,040
R <sup>eu</sup> Wavelinse	4,3	0,2	-	0,75 Qb	11	10	-
Rulles	16,2	1,3	0,4	0,8 Qb	19	16	0,037
Berwinne	118	13	0,9	0,45 Qb	5	38	0,040
Ourthe or.	192	21	1,2	0,4 Qb	15	69	0,023
Lesse 1	419	36	1,9	< Qb ?	-	48	(0,047 - 0,022)
Lesse 2	1090	105	1,0	< Qb ?	-	66	(0,037 - 0,024)
Lhomme	474	52	0,9	0,7 Qb	12	58	0,038 - 0,024
Ourthe inf.	2660	300	1,2	0,4 Qb	22	70	0,025 - 0,016

Tableau 1 – Caractéristiques des rivières étudiées

Enfin, les quantités évacuées par charriage sont peu importantes dans les têtes de bassins pourtant fortement pentus. Mais ce sont des bassins forestiers et les embâcles végétaux qui font office de barrage jouent un rôle primordial dans la réduction du charriage, notamment du fait de l'accroissement de la rugosité et de la dissipation d'énergie dans les *plunge-pool* (Assani et Petit, 1995).

Rivière	Taille du bassin versant (en km <sup>2</sup> )	Quantité charriée (en t.km <sup>2</sup> .an <sup>-1</sup> )
Ruisseau de la Mer	1,36	0,56
Ruisseau Wavelinse	4,33	0,36
Wamme	139	2,21
Lhomme	276	1,11
Ourthe or.	192	(3,9 → Q <sub>10</sub> )
Ourthe (Famenne)	1285	0,38
Ourthe (amont confluence)	1597	0,45
Amblève	1044	0,43
Ourthe inf.	2660	0,44 (1,13 → Q <sub>34</sub> )

Tableau 2 – Transport solide de la charge de fond

## CONCLUSIONS

Le charriage débute pour des débits inférieurs au débit à pleins bords (0,4 à 0,5 Q<sub>b</sub> pour les rivières importantes) et il se présente en moyenne de 10 à 20 jours par an. Les valeurs du critère adimensionnel de Shields pour les débits de mise en mouvement sont inférieures à celles généralement retenues, ceci plus spécialement pour les rivières importantes puisque dans l'Ourthe par exemple, elles oscillent entre 0,016 et 0,025 selon que l'on prend en compte la *grain shear stress* ou la force tractrice totale. Les puissances spécifiques observées dans l'Ourthe lors du débit de mise en mouvement sont de l'ordre de 40 à 50 W.m<sup>-2</sup>, pour un D<sub>50</sub> mobilisable de 70 mm.

Les quantités évacuées par charriage sont peu importantes dans les têtes de bassins qui sont pourtant fortement pentus ; il faut y voir l'effet des embâcles végétaux. Pour les rivières plus importantes où ces effets d'embâcles ne jouent plus qu'un rôle négligeable, les quantités charriées restent néanmoins modestes, bien qu'il y ait encore une grande disponibilité en matériel caillouteux, dans la mesure où ces rivières coulent le plus souvent sur leurs propres alluvions héritées de la dernière période froide.

## Remerciements

*L'étude effectuée sur l'Ourthe inférieure a fait l'objet d'une Convention passée avec le MET (Ministère Wallon de l'Équipement et des Transport, Direction Générale des Voies Hydrauliques de Liège). Les données de débits ont été communiquées par le Service d'Études Hydrologique (SETHY – MET). Des données complémentaires ont également été communiquées par le Laboratoire de Recherches Hydrauliques du MET, et par le SCENN (Service des Cours d'Eau Non Navigables, Ministère de la Région Wallonne, Siège Central et Districts de Marche en Famenne, de Namur et de Liège). Nous tenons à remercier tous ces organismes pour leur collaboration.*



## Références

- Ashmore P.E. (1988)** – Bed load transport in braided gravel bed stream models. *Earth Surf. Proc. and Landforms*, 13, 677-695.
- Assani A.A. et Petit F.** – Log-jams effect on bed load mobility from experiments conducted in a small gravel-bed channel. *Catena* (sous presse).
- Clifford N.J., Richards K. et Robert A. (1992)** – The influence of microforms bed roughness elements on flow and sediment transport in gravel bed rivers : comment on a paper by Marwan A., Hassan et Reid I. *Earth Surf. Proc. and Landforms*, 17, 529-534.
- Dave C. (1975)** – *Etude de la dynamique fluviale d'un petit ruisseau de type torrentiel*. Mémoire de licence en Sciences Géogr., Univ. de Liège, inédit, 148 p.
- Franchimont C. (1993)** – *Dynamique fluviale de la Lesse : fréquence des inondations, morphométrie des méandres et sédimentologie du lit*. Mémoire de licence en Sciences Géogr., Univ. de Liège, inédit, 121 p.
- Hey R.D. (1979)** – Flow resistance in gravel bed rivers. *Am. Soc. Civ. Eng. Hydr. Div.*, 105, 365-379.
- Kellerhals R. et Bray D.I. (1971)** – Sampling procedures for coarse fluvial sediments. *Journal of the Hydraulics Division*, ASCE, 97, HY 8, 1165-1180.
- Komar P.D. (1987)** – Selective grain entrainment by a current from a bed mixed sizes : a reanalysis. *J. Sedim. Petrol.*, 57, 203-211.
- Mercenier J. (1973)** – *Dynamique fluviale dans un petit bassin du rebord méridional du Plateau des Tailles*. Mémoire de licence en Sciences Géogr., Univ. de Liège, inédit, 148 p.
- Neill C.R. (1968)** – *A re-examination of the beginning of movement for coarse granular bed material*. Walingford Hydraulics Research station, Report 68, 37 p.
- Parotte V. (1991)** – *Evolution géomorphologique actuelle d'une rivière en relation avec les modifications de son régime hydrologique, La Berwinne à proximité de Dalhem (Entre Vesdre et Meuse)*. Mémoire de licence en Sciences Géogr., Univ. de Liège, inédit, 84 p. + Annexes.
- Pauquet A. et Petit F. (1993)** – Evolution de la fréquence des inondations de l'Ourthe inférieure. *Bull. Soc. belge Études Géogr.*, 62(2), 361-375.
- Petit F. (1990)** – Evaluation of grain shear stress required to initiate movement of particles in natural rivers. *Earth Surf. Proc. and Landforms*, 15, 135-148.
- Petit F. (1994a)** – Dimensionless critical shear stress evaluation from flume experiments using different gravel beds. *Earth Surf. Proc. and Landforms*, 19, 565-576.
- Petit F. (1994b)** – Le contexte lit mineur lit majeur : approche géomorphologique et sédimentologique. *Les Ateliers de l'Eau* : " *La gestion des petits cours d'eau : le lit majeur* ", Actes des Conférences organisées à la Faculté des Sciences Agronomiques de Gembloux, Dautrebande S. et al. (éds), CEBEDOC, 403-421.
- Petit F., Pauquet A., Mabilie G. et Franchimont C. (1994)** – Variations de la récurrence du débit à pleins bords des rivières en relation avec la lithologie de leur bassin-versant et les caractéristiques de leur lit. *Dossier de la Revue de Géographie Alpine*, 12, 157-161.
- Petit F., Pauquet A. et Pissart A. (1994)** – *Aspects géomorphologiques et sédimentologiques des dragages dans l'Ourthe inférieure*, Rapport de Convention passée avec le Ministère Wallon de l'Équipement et des Transports, Direction des Voies Hydrauliques de Liège, 52 p. + annexes.
- Poinsart D. (1992)** – *Effets des aménagements fluviaux sur les débits liquides et solides. L'exemple du Rhône dans les plaines de Miribel-Jonage et de Donzère-Mondragon*, Thèse de géographie et Aménagement, Université Lyon 3, 501 p.
- Richards K. (1982)** – *Rivers, form and process in alluvial channels*, Methuen, 358 p.