

Z. Geomorph. N. F.	32	3	299-310	Berlin · Stuttgart	September 1988
--------------------	----	---	---------	--------------------	----------------

## Phénomènes influençant la mise en mouvement et le transport des particules en rivières naturelles

par

FRANÇOIS PETIT, Liège

avec 1 figure et 1 tableau

**Zusammenfassung.** Fließgeschwindigkeiten wurden in unterschiedlichen Höhen über dem Boden an verschiedenen Stellen in kleinen Flüssen gemessen, und zwar gerade, als Bestandteile der Sohle sich zu bewegen begannen oder im Gegensatz dazu, wenn das Geschiebe sich nicht bewegen konnte, trotz bedeutender Fließgeschwindigkeiten. Die Geschwindigkeiten 10 cm über der Sohle wurden verwendet, um einen Vergleich mit den Kurven von SUNDBORG herzustellen. Unsere Beobachtungen stimmen überein mit SUNDBORGS für Sand und Schotter, aber nicht für Kies. Es war möglich, den Einfluß verschiedener Faktoren, die charakteristisch für die Umwelt sind, zu zeigen. So zeigt die dickste Krautschicht auf dem verfestigten Schluff des Überschwemmungsgebietes eine starke Resistenz gegenüber der Erosion; das Abschälen dieses Vegetationsteppichs braucht Geschwindigkeiten über 1,3 m/sec, während derselbe Schluff ohne Vegetation bei Geschwindigkeiten von etwa 70 cm/sec erodiert wird. Ebenso ist eine sandige Ablagerung mit aquatischer Vegetation fähig, hohen Geschwindigkeiten (75 cm/sec) zu widerstehen, während ohne diese Vegetation sie schon bei 55 cm/sec erodiert wird.

Die Dachziegelstruktur der Kiese erhöht die Resistenz gegenüber der Erosion ebenfalls: Kleine Kiese, ( $D_{90} = 1,39$  cm) fangen noch nicht einmal an, sich zu bewegen bei Geschwindigkeiten von 80 cm/sec.

Andererseits, wenn das Material heterogen ist, können die größten Kiese viel leichter erodiert werden als Konsequenz der Ausspülung der feinen Matrix (Kiese mit  $D_{90} = 2,32$  cm wurden erodiert bei Geschwindigkeiten von 70 cm/sec). Ein ähnlicher Prozeß erklärt die Bewegung von Kleinkiesen ( $D_{90} = 1,25$  cm) über kurze Distanzen bei Geschwindigkeiten von etwa 50 cm/sec.

**Summary.** Flow velocities have been measured at several levels above the bottom of the bed in different sites of small rivers, just as the particles of the bed were starting to move or, on the contrary, when the particles could not move in spite of important flow velocities. The velocities at 10 cm above the bottom are used as reference in order to allow comparison with the curves established by SUNDBORG. Our observations fit in with SUNDBORG's for sands and gravels but not for pebbles. However, it has been possible to show the influence of several factors characteristic of a natural environment. Thus, the thickest herbaceous vegetation growing on the consolidated silt of the flood plain offers a strong resistance to the erosion; the scalping of this vegetal carpet requires velocities higher than 1.3 m/sec whereas the same silt without vegetation is eroded by velocities of about 70 cm/sec. In the same way, a sandy accumulation with aquatic vegetation is able to support high velocities (75 cm/sec) while without this vegetation, it is eroded for 55 cm/sec.

0372-8854/88/0032-0299 \$ 3.00

© 1988 Gebrüder Borntraeger, D-1000 Berlin · D-7000 Stuttgart

The imbrication of pebbles increases the resistance to erosion too: small pebbles ( $D_{90} = 1.39$  cm) do not even start to move at velocities of 80 cm/sec.

On the other hand, when the material is heterogeneous the most coarse pebbles can be eroded more easily, in consequence of the erosion of the fine matrix (pebbles with  $D_{90} = 2.32$  cm eroded by velocities of 70 cm/sec). A similar process explains the motion of small pebbles ( $D_{90} = 1.25$  cm) over short distances for velocities of about 50 cm/sec.

**Résumé.** Les vitesses du courant ont été mesurées à plusieurs hauteurs au-dessus du fond du lit dans différents sites de rivières naturelles de dimension modeste, au moment où il y avait érosion des particules ou, au contraire, absence d'érosion malgré des vitesses élevées du courant. Les vitesses mesurées à 10 cm au-dessus du fond ont été retenues comme référence afin de pouvoir effectuer des comparaisons avec les courbes établies par SUNDBORG. En ce qui concerne les fractions sableuses et graveleuses, il existe une bonne correspondance avec ces relations, mais non pour les fractions caillouteuses. Toutefois, il a été possible de mettre en évidence l'influence de certains phénomènes propres au milieu naturel. Ainsi une végétation herbacée dense qui colonise la plaine alluviale oppose une très bonne résistance à l'érosion; le scalping du tapis végétal nécessite en effet des vitesses supérieures à 1,3 m/sec alors qu'en absence de végétation, le limon alluvial compacté se fait éroder pour des vitesses de l'ordre de 70 cm/sec. De même, un dépôt sableux colonisé par une végétation aquatique est capable de résister à des vitesses de 75 cm/sec alors qu'en absence de végétation, un dépôt de même granulométrie se fait déjà éroder pour des vitesses de 55 cm/sec.

Les phénomènes d'imbrication de cailloux permettent eux aussi une meilleure résistance à l'érosion: des petits cailloux ( $D_{90} = 1,39$  cm) résistent en effet à des vitesses de 80 cm/sec. Par contre, en présence d'un matériel hétérogène, des éléments relativement grossiers peuvent être érodés plus facilement par départ de la matrice fine (cailloux dont le  $D_{90} = 2,32$  cm érodés pour des vitesses de 70 cm/sec). Un processus analogue a permis la mise en mouvement sur de courtes distances de petits cailloux ( $D_{90} = 1,25$  cm) pour des vitesses de l'ordre de 50 cm/sec.

### *Introduction*

Parmi les critères visant à préciser le début de l'entraînement des particules par charriage, la vitesse du courant apparaît comme l'un des plus faciles à mesurer et à appliquer. Différentes relations ont été proposées, généralement sur base d'expériences, notamment par HJULSTRÖM (1935), VELIKANOV (1955 in: LARRAS 1972), VEN TE CHOW (1959), SUNDBORG (1956, 1967). Une discussion concernant ces différentes relations a été effectuée plus récemment par NOVAK (1973). Certaines d'entre elles lient la vitesse moyenne à la taille des particules, d'autres envisagent les vitesses mesurées à une certaine distance du fond du lit. Il existe également des facteurs de pondération en fonction de la hauteur d'eau totale (LARRAS 1972).

Par ailleurs, KELLER (1971) a étudié les vitesses à proximité du fond dans un système seuil-mouille et a suivi leur évolution respective en fonction des débits. Toutefois, plusieurs études effectuées en rivière naturelle transportant aussi bien une charge sableuse (LISLE 1979; DIETRICH, SMITH & DUNNE 1979; BRIDGE & JARVIS 1982) qu'une charge caillouteuse (PETIT 1986, 1987) ont montré que la force tractrice apparaissait comme un critère plus fiable pour déterminer l'érosion et le transport de la charge de fond. Il subsiste pourtant des problèmes quant à la détermination en milieu naturel des valeurs des forces tractrices critiques c'est-à-dire celles qui sont nécessaires pour que soit mis en mouvement un élément d'un diamètre donné. Les courbes types de Shields décrivent bien les limites de début de mouvement sur des



lits plats avec des grains bien classés. Mais des différences sensibles par rapport à ces courbes on été mises en évidence par BAKER & RITTER (1975) pour des charges caillouteuses transportées en rivière. REID & FROSTICK (1984) ont montré que les forces tractrices nécessaires à la mise en mouvement des particules étaient nettement plus importantes que celles qui ne font qu'assurer l'entretien du mouvement – parfois plus du double – du fait de l'imbrication des cailloux qui opposent ainsi une meilleure résistance à l'érosion.

La mobilité des particules sur un lit de granulométrie déterminée augmente avec la taille des particules étant donné que ces dernières forment des protubérances plus importantes au-dessus du lit et qu'une fois mise en mouvement la probabilité d'être arrêtée, notamment du fait des irrégularités du lit, diminue (MELAND & NORRMAN 1966, 1969; LARONNE & CARSON 1976). A partir d'expériences menées en flume, IKEDA (1984) a également mis en évidence une plus grande mobilité des particules graveleuses lorsque le mélange avec du matériel sableux est plus important, car ce dernier en colmatant les interstices du lit, tend à le rendre beaucoup plus lisse et favorise ainsi les conditions de transport.

Par ailleurs, une particule qui se trouve sur un lit constitué de particules de même dimension, a moins de chance d'être érodée si elle se trouve sur le lit avec d'autres particules de même taille que si elle est isolée sur le lit; la probabilité que cette particule soit érodée diminue encore, lorsqu'elle se trouve parmi les particules qui forment la couche du lit (NADEN 1987).

D'autre part, JOHANSON (1976) a mis en évidence l'influence de la forme des cailloux. De façon générale, les cailloux plats résistent nettement plus à l'érosion que les éléments sphériques mais dans des conditions d'écoulement plus rigoureuses, ils peuvent néanmoins subir des déplacements plus importants du fait qu'ils sont alors susceptibles d'être entraînés dans un mouvement de glissement.

Ces différentes études mettent en évidence l'influence des caractéristiques du fond du lit sur l'importance de l'érosion et du transport.

Afin de cerner l'influence de certains de ces phénomènes – tels que hétérogénéité du matériel, effet d'imbrication, rôle de la végétation aquatique – nous avons mesuré les vitesses du courant en rivière naturelle, dans des sites où il y avait au moment de la mesure, érosion du matériel constituant le fond du lit, mais également dans des sites où il n'y avait ni érosion ni transport alors que les vitesses du courant y étaient particulièrement élevées. Les valeurs effectivement observées seront comparées aux vitesses critiques d'érosion, définies notamment par VELIKANOV et SUNDBORG (1956), car les sites de mesures présentent des caractères assez proches au point de vue épaisseur des lames d'eau surincombantes et modifications longitudinales des sections. Ceci n'est cependant qu'une première étape car nous comptons utiliser par la suite les forces tractrices déterminées par les vitesses de frottement, dans l'espoir d'affiner les valeurs des forces tractrices critiques en milieu naturel. Mais dans cette estimation, il subsiste le problème mis en évidence dans d'autres études (MELAND & NORRMAN 1966; BRIDGE & DOMINIC 1984), quant à la détermination du paramètre de rugosité et quant à son équivalence avec le diamètre des particules qui constituent le fond. Des traitements sont actuellement en cours qui, comme ceux effectués notamment par AXELSSON (1966), visent à déterminer à partir des forces tractrices calculées grâce à la pente d'énergie et au rayon hydraulique, les valeurs des paramètres de rugosité qui interviendraient dans la détermination des vitesses de frottement.

## 1 *Caractéristiques des rivières étudiées*

Les mesures ont été effectuées dans deux rivières de Haute Belgique, de dimension modeste, la Rulles et la Rouge Eau, leurs bassins hydrographiques s'étendant respectivement sur 16 km<sup>2</sup> et 10 km<sup>2</sup>. Ne sont présentés ci-dessous que les traits généraux de ces rivières et les principales caractéristiques qui permettront de mieux définir les sites où les mesures de vitesses ont été effectuées.

La première de ces rivières, la Rulles s'étend sur la retombée méridionale de l'Ardenne, sur les quartzophyllades et les quartzites du Dévonien inférieur. Cette rivière dont la charge est principalement caillouteuse entaille une plaine alluviale constituée de limon fluvial compacté. Le régime des débits est contrasté et la fréquence des débordements élevée (débit à pleins bords atteint ou dépassé 2,5 fois par an). Ces débordements favorisent des phénomènes de scalping du tapis végétal qui protège la plaine alluviale. Ce processus est à l'origine du creusement de chenaux dans le pédoncule des méandres, ce qui accélère le processus de recouplement par déversement et qui, par ailleurs, peut aboutir à l'individualisation d'îlots au sein du lit mineur (PETIT 1984).

Le tracé de la rivière s'organise en méandres auxquels sont associés mouilles et seuils. Ces derniers sont constitués d'accumulations caillouteuses qui en surface s'organisent en dallage homogène. Il existe d'autres haut-fonds dans le lit mineur. Il s'agit en quelque sorte de seuils d'érosion dont la présence résulte de l'affleurement au pied des berges et dans une partie du lit, d'anciennes lentilles caillouteuses initialement incluses dans les dépôts de la plaine alluviale mais dégagées par érosion latérale. Ce matériel présente généralement une bonne résistance à l'érosion du fait d'une cimentation liée à la précipitation d'oxydes de fer et de manganèse, excepté lorsque la matrice fine est trop abondante.

Des dépôts sablo-graveleux s'édifient au pied de la rive convexe des méandres où la végétation aquatique, principalement *phalaris arundinacea*, contribue à les stabiliser (PETIT & SCHUMACKER 1985). De tels dépôts se mettent également en place, mais le plus souvent de façon transitoire, dans des zones d'abri occupées par de petites cellules de contre-courant au pied de certaines rives concaves.

La seconde rivière, la Rouge Eau, coule sur le revers de la première cuesta de Lorraine belge constituée des grès calcaireux du Jurassique. Vu la grande perméabilité du substrat déterminant une alimentation constante de la rivière, le régime des débits est très peu contrasté. La charge de fond est principalement sableuse et quel que soit le débit, on y observe un flux quasi continu des éléments. De petits affluents à forte pente amènent à la rivière une charge caillouteuse qui dépasse la compétence de la rivière, modifiant de ce fait la morphologie et l'évolution de son lit mineur (PETIT 1986).

## 2 *Méthode*

L'érosion – et l'absence d'érosion – ont été déterminées de trois façons différentes suivant la nature du matériel mais aussi suivant l'importance des débits pour lesquels elles se présentaient.

a) De façon générale, les modifications morphologiques affectant le lit mineur et la zone avoisinante ont été suivies grâce à des profils topographiques levés régulière-



ment à partir d'un canevas de repères installés sur le terrain. Cette technique a notamment permis de suivre l'érosion du limon alluvial dans des chenaux de recouplement et de déterminer l'importance du débit pour lequel elle se produisait. L'incision des seuils constitués par du matériel hétérogène déposé antérieurement dans la plaine alluviale a été suivie selon cette méthode.

b) En ce qui concerne le matériel sableux et graveleux, il a été en outre possible de déterminer leur mise en mouvement au moment et à l'endroit précis où elle se produisait par observation directe sur le terrain. Il en a été de même en ce qui concerne l'absence d'érosion dans des dallages caillouteux.

c) L'érosion et le transport de la charge caillouteuse, difficiles à observer directement car se produisant en période de forts débits, ont néanmoins pu être suivis de façon détaillée grâce à l'étude du déplacement de cailloux marqués de diamètre connu. Certains d'entre eux ont franchi lors d'une crue déterminée, des sites où les vitesses avaient été mesurées à cette occasion, et, au contraire, d'autres n'ont pas été érodés ou ont été arrêtés dans de tels sites.

D'autre part, afin de bien définir la taille du matériel, des échantillons ont été prélevés au moment de l'observation de façon à effectuer leur analyse granulométrique et à déterminer ainsi les indices de classement, le diamètre médian et, comme conseillé par REID & FROSTICK (1984), l'indice D<sub>90</sub> (90% du sédiment étant sur la courbe cumulative inférieur à ce diamètre). Pour les cailloux marqués, c'est la taille de chacun des éléments mesurés selon les trois dimensions, ramenée ensuite au diamètre équivalent qui a été prise en considération.

Les vitesses ont été mesurées grâce à un micromoulinet OTT-C2 dont les hélices ont un diamètre de 3 cm et de 5 cm. Les mesures ont été effectuées à 1,5 cm ou 2,5 cm du fond, 5 cm et 10 cm et, plus haut, régulièrement à un intervalle de 10 cm. Enfin une station limnigraphique couplée avec une lame déversante rectangulaire à mince paroi, a été installée sur chacune de ces rivières, de façon à suivre les fluctuations des débits.

### 3 Résultats

Les valeurs des vitesses du courant et les caractéristiques du matériel sont reprises au tableau 1, et les points reportés à la fig. 1. Les sites de mesures sont caractérisés brièvement ci-dessous, la numérotation se rapportant à celle de la fig. 1.

#### *Rivière à charge caillouteuse*

1. Mesure lors d'une crue nettement supérieure au débit à pleins bords, au point de fuite d'une rive concave d'un méandre. On observe pour des vitesses de 1,3 m/sec à 10 cm du fond, un scalping du tapis végétal que supporte la plaine alluviale et une érosion du limon compacté qui forme la plaine alluviale. Ceci a abouti à la création d'une ébauche de chenal de recouplement qui lors des crues suivantes a pu s'approfondir en présence de vitesses plus faibles.
2. Érosion du limon constituant la plaine alluviale dans un autre chenal de recouplement déjà individualisé lors des mesures. En bordure du chenal, les vitesses de 60 cm/sec à 10 cm du fond n'ont pas suffi pour attaquer le tapis végétal encore présent.

3. Erosion du limon alluvial formant un haut-fond dans le lit mineur pour des vitesses de 70 cm/sec à 10 cm du fond, alors que pour un peu moins de 50 cm/sec on n'observe pas cette érosion.
4. Erosion du matériel hétérogène de la plaine alluviale formant un seuil dans le lit mineur (cailloux les plus grossiers dépassant 2 cm de diamètre dans une matrice limono-sableuse).
5. Absence d'érosion dans des dépôts sableux édifiés en rive convexe, protégés par une végétation aquatique.
6. Erosion d'un dépôt sableux édifié en rive convexe, non protégé par une végétation aquatique.
7. Absence d'érosion dans un dépôt sableux édifié en rive convexe, non protégé par une végétation aquatique.
8. Remise en mouvement épisodique d'un dépôt sableux édifié à la limite d'une cellule de contre-courant. Grande variabilité des vitesses du fait de la présence de petits mouvements tourbillonnaires résultant de la friction entre courant et contre-courant.
9. Absence d'érosion d'un dallage caillouteux bien classé constituant un seuil construit.
10. Plus gros cailloux marqués ayant franchi des sites (la plupart des seuils construits) lors de crues voisines du débit à pleins bords alors que les vitesses y ont été mesurées lors de crues équivalentes ou légèrement supérieures. Ceci constituant une évaluation des vitesses par excès, les cailloux ayant été effectivement transportés pour des vitesses (plus que probablement) légèrement inférieures.
11. Plus petits cailloux marqués retrouvés en place ou stoppés dans des sites (généralement des seuils construits) après des crues importantes. Les vitesses ayant été mesurées pour des crues équivalentes ou légèrement inférieures (évaluation des vitesses par défaut, les cailloux ayant effectivement résisté à des vitesses plus importantes).

#### *Rivière à fond principalement sableux*

12. Entretien du mouvement de grains de sable dans un secteur subrectiligne à fond plat, sans différenciation significative des profondeurs.
13. Absence de remaniement d'un cailloutis apporté par un affluent à forte pente. Le cailloutis s'organise en dallage homogène dans un secteur à faible méandration sans différenciation de profondeurs. Toutefois, des cailloux marqués ont été retrouvés quelques mètres en aval, probablement du fait de mises en mouvement répétées liées à l'érosion du matériel plus fin sous-jacent (PETIT 1986).

#### 4 *Commentaires*

Dans les cas envisagés, les vitesses critiques d'érosion – ainsi que les vitesses élevées qui ne provoquent pas l'érosion – correspondent relativement bien à celles proposées par SUNDBORG (1956) et d'autres auteurs (in: LARRAS 1972), ceci plus spécialement pour les fractions sableuses et graveleuses tandis qu'elles s'en écartent pour les éléments caillouteux.





Il convient néanmoins de considérer ces résultats selon deux aspects, le premier concernant le matériel et les paramètres qui peuvent l'influencer (disposition des éléments, hétérogénéité du matériel, présence de végétation), le second portant sur les conditions dynamiques de l'écoulement.

Les mesures effectuées mettent tout d'abord en évidence le rôle de la végétation aquatique quant à la stabilisation des dépôts. Ainsi un dépôt sableux colonisé par des baldingères (*phalaris arundinacea*) résiste à des vitesses de 75 cm/sec alors que des vitesses de 55 cm/sec provoquent l'érosion d'un dépôt de même granulométrie édifié sous une même hauteur d'eau mais dépourvu de couverture végétale.

Ces mesures apportent également des précisions quant aux vitesses requises pour éroder le limon compacté (70 cm/sec, probablement un peu moins mais plus de 50 cm/sec). Elles soulignent par ailleurs le rôle protecteur du tapis herbacé qui colonise la plaine alluviale. Des vitesses égales ou supérieures à 1,3 m/sec sont en effet nécessaires pour qu'il y ait scalping du tapis végétal, condition indispensable pour qu'il puisse y avoir érosion du limon ainsi dégagé. Toutefois, il ne faut pas perdre de vue l'influence d'agents qui effectuent tout un travail préparatoire, accélérant ainsi ce processus et permettant son action pour des conditions moins sévères. C'est notamment le cas des animaux fouisseurs dont la portée de l'action est difficilement quantifiable.

Des cailloux de plus de 2 cm ( $D_{90} = 2,32$  cm au point 4) ont pu être érodés en présence de vitesse de 70 cm/sec, mais ceci uniquement par départ de la matrice plus fine. Le trajet que ces cailloux ont effectué à la suite de leur déstabilisation est d'ailleurs très court puisqu'ils ont été à l'origine d'une accumulation qui s'est constituée à moins de trois mètres en aval (PETIT 1984). C'est probablement un phénomène analogue qui a permis la mise en mouvement – épisodique et sur de courtes distances – de petits cailloux ( $D_{90} = 1,25$  cm au point 13) pour des vitesses de l'ordre de 50 cm/sec. En effet, le départ du matériel plus fin sur lequel ces cailloux reposaient partiellement, permettrait une déstabilisation de ces derniers et leur mise en mouvement sur quelques décimètres. La répétition de ce phénomène expliquerait ainsi le cheminement observé des cailloux marqués.

Ces constatations correspondent aux observations effectuées par MERCENIER (1973) dans une petite rivière du plateau des Tailles (Ardenne). Cet auteur a en effet observé l'érosion de cailloux marqués atteignant 8 cm de diamètre ceci en présence de vitesses atteignant un peu moins de 1 m/sec à 10 cm du fond. Ces cailloux dont l'applatissage était pourtant élevé, reposaient sur un fond hétérogène. Dans ces mêmes conditions, cet auteur a également observé l'érosion de cailloux de 3,5 cm de diamètre pour des vitesses de 85 cm/sec.

Par contre, nous avons observé que lorsque le cailloutis se présente sous forme d'un dallage qui présente toujours une certaine homogénéité, des cailloux de plus petite dimension ( $D_{90} = 1,39$  cm au point 9) peuvent résister à des vitesses de 80 cm/sec. Toutefois, il semble qu'un phénomène d'imbrication tel que décrit par REID & FROSTICK (1984) puisse ici aussi jouer un rôle quant à la résistance à l'érosion.

En ce qui concerne les conditions dynamiques, nous sommes conscients du fait que l'utilisation d'un moulinet ne permet qu'une intégration des vitesses sur un certain laps de temps et non pas la mesure des vitesses maximales qui peuvent à certains moments provoquer l'érosion. C'est évidemment ce qui ressort du point 8, dans des conditions assez exceptionnelles d'un site soumis à une forte turbulence.



Tableau 1 Taille du matériel et vitesse du courant à différentes hauteurs à partir du fond.

N°	Taille		Vitesse en m/sec				Observations
	D <sub>50</sub>	D <sub>90</sub>	Distance à partir du fond				
			1.5 cm	2.5 cm	5 cm	10 cm	
1	30 µ	—	0.67	0.96	1.23	1.30	scalping
	30 µ	—	0.59	0.72	0.96	1.60	scalping
2	30 µ	—	0.66	—	0.70	0.77	érosion
	30 µ	—	0.59	—	0.68	0.82	érosion
	30 µ	—	0.23	—	0.39	0.63	pas de scalping
3	35 µ	—	—	—	0.59	0.72	érosion
	35 µ	—	—	—	0.39	0.48	pas d'érosion
4	7.38 mm	23.2 mm	—	0.71	0.71	0.70	érosion
5	585 µ	1.46 mm	—	—	0.50	0.74	pas d'érosion
	1.5 mm	4.43 mm	—	—	0.43	0.53	(protection par la végétation)
6	640 µ	1.87 mm	0.28	—	0.44	0.56	érosion
7	668 µ	1.33 mm	—	—	0.34	0.30	pas d'érosion
8	1,56 mm	10.8 mm	—	0.24	0.25	0.27	érosion
9	8.47 mm	13.9 mm	—	0.67	0.75	0.81	pas d'érosion
10	2.2 mm	}	—	0.59	0.62	0.74	entretien du mouvement
	2.9 mm						
	3.7 mm						
11	13.5 mm	}	—	0.54	0.57	0.62	pas d'érosion et/ou arrêt des éléments
	14.2 mm						
	16.3 mm						
	17.0 mm						
12	170 µ	265 µ	0.25	0.28	0.29	0.40	érosion et entretien du mouvement
13	5.76 mm	9.03 mm	—	0.47	0.54	0.54	mise en mouvement sur de courtes distances
	7.74 mm	12.45 mm	—	0.37	0.41	0.47	
	10.9 mm	16.6 mm	—	0.58	0.67	0.73	

Toutefois, de telles oscillations du courant existent également en dehors des zones de contre-courant. C'est ainsi que KALINKSE (in GRAF 1971) a estimé qu'à proximité du fond du lit, la vitesse maximale pouvait représenter jusqu'à 1,75 fois la vitesse moyenne mesurée en ce même endroit. L'application de cette relation à nos observations permettrait une meilleure concordance avec les vitesses critiques d'érosion généralement admises, sans pour cela être suffisantes (cf points observés par MERCENIER). Il faut cependant tenir compte que les vitesses critiques proposées dans les différentes relations sont elles aussi des vitesses intégrées sur un certain temps et non des vitesses instantanées et qu'il est donc nécessaire de rester dans des conditions d'application semblable.

Par ailleurs, l'utilisation de la relation proposée par KALINKSE ajouterait encore à l'inadéquation des vitesses critiques d'érosion dans les sites où aucune érosion n'a été observée malgré des vitesses moyennes à proximité du fond pourtant déjà fort importantes.

Des mesures de vitesses instantanées effectuées avec une sonde électromagnétique, ont montré que les écarts maxima par rapport à la vitesse moyenne étaient de  $\pm 30\%$  et que les valeurs les plus fréquentes étaient de  $\pm 15\%$  (PETIT 1987). Toutefois, il est clair que la précision de ces mesures dépend de l'inertie de la sonde et c'est pourquoi des mesures complémentaires sont prévues.

Il se pose également le problème de la représentativité des vitesses d'érosion déterminées à partir d'une mesure effectuée à une seule profondeur. Toutefois, la distribution des vitesses à proximité du fond suit généralement bien une répartition logarithmique et les gradients de vitesses présentent le plus souvent une allure comparable dans les différents sites étudiés. Seules les mesures faites sur un fond constitué de limon compacté présentent des gradients de vitesses à proximité du fond nettement différents.

Par ailleurs, comme il ressort notamment des études effectuées par NEILL (1967), les valeurs des vitesses critiques d'érosion sont également fonction de l'épaisseur des lames d'eau surincombantes. Les mesures présentées ci-dessus ont été effectuées dans des sites où les hauteurs d'eau étaient de façon générale comprises entre 15 et 30 cm et où les différenciations de profondeurs étaient peu sensibles, excepté pour les mesures reprises aux points 10 et 11 qui ont été effectuées sur des seuils où la profondeur dépasse 60 cm en période de crue. A cet égard, nous avons observé qu'en période de forts débits il y avait dans les mouilles, où la profondeur dépassait alors 1,2 m, érosion et transport de cailloux plus grossiers que sur les seuils alors que les vitesses du courant à proximité du fond y étaient voisines ou même inférieures à celles mesurées sur les seuils (PETIT 1987). Dans de tels cas, l'utilisation des forces tractrices calculées à partir des pentes de la ligne d'énergie et du rayon hydraulique est alors apparue comme un critère plus fiable concernant le début du charriage.

## 5 Conclusions

Les valeurs des vitesses ayant permis l'érosion de fond sableux et graveleux, spécialement dans les sites à faible différenciation de profondeurs, concordent relativement bien avec les relations proposées notamment par HJULSTRÖM et précisées par SUNDBORG (1956). Par ailleurs, il se confirme bien que la végétation aquatique joue un rôle important dans la stabilisation des dépôts; le rôle protecteur de la strate herbacée vis-à-vis du limon de la plaine alluviale est encore plus évident.

En ce qui concerne les observations faites sur matériel caillouteux, on constate certaines différences avec les vitesses critiques d'érosion. Elles résultent tout d'abord de l'hétérogénéité du matériel qui favorise la mise en mouvement du matériel plus grossier pour des vitesses plus faibles. Au contraire, l'imbrication du matériel a lui-même une tendance à retarder la mise en mouvement. A noter que ces deux problèmes – qui apparaissent comme étant plus spécifiques au matériel caillouteux, comme d'ailleurs la forme des éléments comme facteur de résistance à l'érosion – se posent de la même façon pour la détermination des forces tractrices critiques.



Par contre, comme démontré par ailleurs, il subsiste un certain nombre d'imprécisions quant à la détermination des vitesses critiques d'érosion pour expliquer l'érosion et le transport du matériel caillouteux dans des systèmes seuil-mouille.

### Remerciements

Nous tenons à exprimer nos plus vifs remerciements au Professeur J. ALEXANDRE et au Professeur A. PISSART qui ont bien voulu relire cet article et nous faire part de leurs remarques.

### Bibliographie

- AXELSSON, V. (1967): The Laitaure Delta – A study of deltaic morphology and processes. – *Geogr. Ann.* **49 A**: 1–127.
- BAKER, V. R. & D. F. RITTER (1975): Competence of rivers to transport coarse bed-load material. – *Geol. Soc. America Bull.* **86**: 975–978.
- BRIDGE, J. S. & J. JARVIS (1982): The dynamic of a river bend: a study in flow and sedimentary processes. – *Sedimentology* **29** (2): 499–541.
- BRIDGE, J. S. & D. F. DOMINIC (1984): Bed-load grain velocities and sediment transport rates. – *Water Resources Res.* **20** (4): 476–490.
- DIETRICH, W. E., J. D. SMITH & T. DUNNE (1979): Flow and sediment transport in a sand bedded meander. – *J. Geol.* **87**: 305–315.
- GRAF, W. H. (1971): Hydraulic of sediment transport. – Mc Graw Hill Cie, New York, 513 p.
- HJULSTROM, F. (1935): Studies of the morphological activity of rivers as illustrated by the River Fyris. – *Bull. Geol. Inst. Uppsala* **25**: 221–527.
- IKEDA, H. (1984): Flume experiments on the causes of superior mobility of sediment mixtures. – *Ann. Rep. Inst. Geosci. Univ. Tsukuba* **10**: 53–56.
- JOHANSSON, C. E. (1976): Structural studies of frictional sediments. – *Geogr. Ann.* **58A**: 201–302.
- KELLER, E. A. (1971): Areal sorting of bed-load material: The hypothesis of velocity reversal. – *Geol. Soc. America Bull.* **82**: 753–756.
- LARONNE, J. B. & M. A. CARSON (1976): Interrelationships between bed morphology and bed-material transport for a small, gravel-bed channel. – *Sedimentology* **23**: 67–85.
- LARRAS, J. (1972): *Hydraulique et granulats Eyrolles, Paris*, 254 p.
- LISLE, T. (1979): A sorting mechanism for a riffle-pool sequence. – *Geol. Soc. America Bull. Part II*, **90**: 1142–1157.
- MELAND, N. & J. O. NORRMAN (1966): Transport velocities of single particles in bed-load motion. – *Geogr. Ann.* **48 A**: 165–182.
- (1969): Transport velocities of individual size fractions in heterogeneous bed-load. – *Geogr. Ann.* **51A**: 127–144.
- MERCENIER, J. (1973): Dynamique fluviale dans un petit bassin du rebord méridional du plateau des Tailles. – *Mém. licence en Sc. Géog. Univ. de Liège*, inédit, 148 p.
- NADEN, P. (1987): An erosion criterion for gravel – bed rivers. – *Earth Surf. Proc. and Landforms* **12**: 83–93.
- NEILL, C. R. (1967): Mean-velocity criterion for scour of coarse uniform bed material. – *Internat. Assoc. Hydraulic Res. Congr.*, 12th Proc. **13**: 46–54.
- NOVAK, I. D. (1973): Predicting coarse sediment transport. The Hjulström curve revisited. [In:] MORISAWA (Ed.): *Fluvial geomorphology*. Burghamton New York State Univ. Pubs. in *Geomorph.*: 13–25.
- PETIT, F. (1984): Les processus contrôlant l'évolution du tracé d'une rivière ardennaise. – *Z. Geomorph. N. F.*, Suppl. **49**: 95–109.
- (1986): Channel development in two streams of contrasting bed-load and regime. – *B.G.R.G. Conf. Proceed. Vol. International Geomorphology* [In:] GARDINER (Ed.): *River channel Dynamic*: 611–622.
- (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. & R. SCHUMACKER (1985): L'utilisation des plantes aquatiques comme indicateur du type d'activité géomorphologique d'une rivière adriennaise. Colloques phytosociologiques: végétation et géomorphologie. - *Gehu. Ed. Lille XIII*: 691-710.
- REID, J. & L. E. FROSTICK (1984): Particle interaction and its effect on the thresholds of initial and final bed-load motion in coarse alluvial channels. [In:] KOSTER & STEEL (Eds.): *Sedimentology of gravels and Conglomerates*. *Canad. Soc. Petrol. Geol. Mem.* 10: 61-68.
- RICHARDS, K. (1982): *Rivers. Form and process in alluvial channels*. - Methuen London, 358 p.
- SUNDBORG, A. (1956): The river Klarälven. A study of fluvial processes. - *Geogr. Ann.* 2-3: 127-316.
- (1967): Some aspects on fluvial sediments and fluvial morphology. General views and graphic methods. - *Geogr. Ann.* 49A: 333-343.
- VEN TE CHOW (1959): *Open-Channel hydraulics*. - Mc Graw Hill, New York, 680 p.

Adresse de l'auteur: Dr. FRANÇOIS PETIT, Laboratoire de géographie physique, Laboratoire de géomorphologie et de géologie du quaternaire, Université de Liège, Place du Vingt Août, 7, B-4000 Liège, Belgique.