

Evaluation des forces tractrices critiques de la charge caillouteuse: expériences en flume et observations en rivières naturelles

F. PETIT

Laboratoire de Géographie physique, Université de Liège, 7, Place du 20 Août, B-4000 Liège, Belgique

RESUME / Des expériences menées en flume avec des cailloux de taille différente montrent que le critère de Shields s'écarte de la valeur généralement admise, du fait de l'imbrication des particules d'une part, de la saillie relative des plus gros éléments d'autre part. Par ailleurs, les forces tractrices ont été évaluées en rivières naturelles en suivant une méthodologie préalablement testée en flume. Il s'est avéré que les forces tractrices calculées à partir des vitesses de frottement - mais avec un paramètre de rugosité redéfini en fonction de la granulométrie du lit - apparaissent comme le meilleur indicateur des phénomènes d'érosion et de transport de la charge de fond. L'analyse du déplacement des particules dans ces rivières, a permis de mettre en évidence une diminution du critère de Shields lorsque la taille des particules augmente. Ceci est partiellement lié aux caractéristiques des sites : phénomènes de dallage, spécifiques aux seuils, assurant une meilleure résistance à l'érosion, tandis que dans les mouilles, il y a érosion de matériel relativement grossier pour des forces tractrices proportionnellement plus faibles.

NOTATION

A, B, C,	Grand axe, axe intermédiaire et petit axe des particules
D	Diamètre des particules
D ₅₀	Diamètre médian
k	Constante de von Karman
Re*	Nombre de Reynolds étoilé (= $u^* D/\nu$)
u	Vitesse du courant mesurée à une hauteur y au-dessus du lit
u*	Vitesse de frottement
Y ₀	Hauteur de rugosité intervenant dans l'évaluation des vitesses de frottement
θ_c	Critère adimensionnel de Shields
ρ	Masse volumique du fluide

v	Viscosité cinématique
τ	Force tractrice évaluée à partir du rayon hydraulique et de la pente de la ligne d'énergie
τ_c	Force tractrice critique
τ'	Force tractrice due à la résistance des grains
τ_*	Force tractrice calculée à partir des vitesses de frottement

INTRODUCTION

Il devient de plus en plus apparent que la force tractrice doit être considérée comme le critère prépondérant pour l'évaluation du transport de la charge de fond et, d'une façon plus générale, pour l'explication du façonnement des lits fluviaux en milieu naturel. L'application de cette notion au milieu naturel pose cependant un certain nombre de problèmes spécialement lorsqu'il s'agit de charge caillouteuse. Tout d'abord, parce que les valeurs des forces tractrices critiques ne sont pas toujours adaptées étant donné qu'il existe des phénomènes propres au matériel caillouteux (phénomène d'imbrication, de saillie relative, de résistance due à la forme des éléments). Par ailleurs, il existe des problèmes quant à l'évaluation de la force tractrice due à la résistance des grains (la seule qui doit être prise en considération pour le transport des sédiments), en rivières naturelles, spécialement lorsque les formes du lit y sont développées ainsi que la méandration.

Différentes expériences ont été menées en flume afin de préciser les forces tractrices critiques propres à la charge caillouteuse d'une part, afin de tester les méthodes d'évaluation des forces tractrices d'autre part. Ces expériences sont menées en complément aux recherches effectuées depuis quinze ans dans différentes rivières à charge caillouteuse de Moyenne et de Haute Belgique.

EXPERIENCES EN FLUME

Le flume aimablement mis à notre disposition par l'Université d'Uppsala (Suède) est un flume rectiligne dont la longueur de travail est de 6 m et la largeur de 0,5 m. Sa pente longitudinale est réglable et peut atteindre 0.035 m.m^{-1} . Des cailloux ont été collés sur le fond du flume; ils forment une couche continue, sans modification sensible des formes du lit, le diamètre médian de ce matériel étant légèrement inférieur à 20 mm. Un lit constitué de matériel caillouteux plus fin ($D_{50} = 13 \text{ mm}$) a également été utilisé occasionnellement dans certaines expériences.

Une première série d'expériences a tout d'abord porté sur l'évaluation de la force tractrice totale (τ) à partir de la pente de la ligne d'énergie et du rayon hydraulique,

tenant compte de la correction due à l'effet de paroi latérale telle que recommandée par Vanoni (1975) et ensuite sur la détermination de la force tractrice due à la résistance des grains (τ') en appliquant les différentes méthodes testées préalablement par Singhal *et al.* (1980), dans un flume à fond sableux. Il s'est vérifié qu'en l'absence de variations sensibles des formes du fond du lit, τ' représentant bien la totalité de la force tractrice (τ) (Petit, 1989a). D'autre part, les forces tractrices ont été évaluées à partir des vitesses de frottement $\tau_* = u_*^2 \rho$ avec $\frac{u}{u_*} = \frac{1}{k} \ln \frac{y}{y_0}$.

La relation qui lie le paramètre de rugosité y_0 avec le diamètre du matériel du fond a été reconsidérée à partir de l'analyse des gradients de vitesse à proximité du fond (à moins de 0,2 la profondeur totale), ceci pour différentes conditions de pente et de débit. Une valeur moyenne $y_0 = 1.8$ mm a été ainsi mise en évidence, valeur proche de celles déduite de la relation proposée notamment par Kamphuis (1974). Il s'est avéré que la relation entre les forces tractrices dues à la résistance des grains (τ') et celles évaluées par les vitesses de frottement était fiable et proche de la ligne d'égalité, de telle sorte qu'il était possible d'utiliser cette dernière méthode pour cerner les forces tractrices critiques.

Une deuxième série d'expériences a ainsi été menée avec des cailloux marqués, dont le diamètre était compris entre 10 et 50 mm. Deux populations différentes de cailloux ont été utilisées : l'une comprenant des cailloux dont la forme arrondie est comparable à celle des cailloux constituant le fond du flume ($C/B > 0,6$ et $B/A > 0,7$ dans la classification de Zingg), l'autre étant composée de cailloux présentant un aplatissement important ($C/B < 0,35$), ceci afin de quantifier la résistance à l'érosion provoquée par la seule forme des éléments.

Les forces tractrices calculées par les vitesses de frottement ont été mesurées à chaque endroit où se situaient des cailloux marqués quand il y avait mise en mouvement de ces derniers mais également lorsque les forces tractrices étaient insuffisantes pour provoquer la mise en mouvement de ces particules (fig. 1). De telle sorte que dans les relations entre force tractrice et diamètre des particules, il s'est individualisé deux droites plus ou moins parallèles, l'une représentant la limite des forces tractrices au-dessus desquelles il était certain d'avoir une mise en mouvement du matériel, la seconde représentant la limite en dessous de laquelle aucune mise en mouvement ne se présente. Il s'individualise donc une zone intermédiaire où il faut envisager une probabilité de mise en mouvement des particules. Trois types de situation se présentent :

(a) Les forces tractrices nécessaires à la mise en mouvement des particules ayant un diamètre identique à celui du matériel constituant le lit, sont très proches de celles déduites de la relation $\tau_c = D$, ce qui correspond à un critère de Shields (θ_c) égal à 0,06.

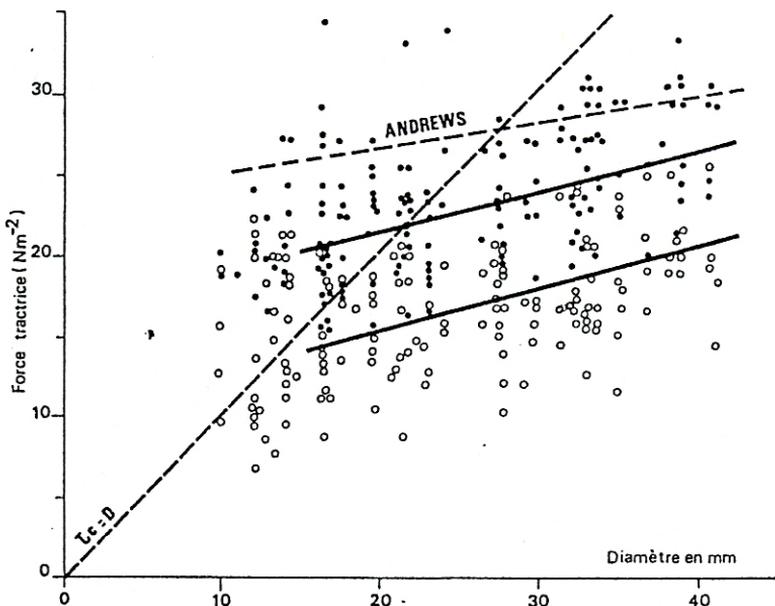


FIG. 1 Valeurs des forces tractrices d'après les expériences en flume (D_{50} du lit = 20 mm) pour les éléments arrondis. Les points noirs figurent la mise en mouvement, les points blancs l'absence de mise en mouvement.

(b) Pour les éléments plus grossiers, cette relation n'est plus applicable. Ainsi, par exemple, des forces tractrices de l'ordre de 25 N m^{-2} peuvent provoquer systématiquement la mise en mouvement de particules de 40 mm de diamètre, ce qui correspond à une valeur de $\theta_c = 0,04$.

(c) En revanche, les éléments dont le diamètre est plus petit que celui du matériel formant le lit, présentent une résistance plus grande, les forces tractrices critiques devant être systématiquement plus importantes que celles déduites de l'équation $\tau_c = D$ ($\theta_c = 0,09$).

Un effet d'imbrication des plus petites particules tel que décrit notamment par Reid & Frostick (1984), est responsable de ce retard de la mise en mouvement. Au contraire, l'effet de saillie relative mis en évidence par Fenton & Abott (1977) permet aux particules plus grossières d'être mises en mouvement par des forces tractrices relativement faibles.

La combinaison de ces deux effets amène finalement des résultats proches de ceux d'Andrews (1983) suivant lesquels des particules qui ont une taille comprise entre 0,3 et 4,2 fois celle du matériel qui constitue le lit peuvent être mises en mouvement par des forces tractrices quasi simi-

res, ceci étant formulé de la façon suivante :

$\theta_c = 0,083 (D/D_{50})^{-0,872}$. Toutefois, les forces tractrices critiques présentées à la fig. 1, sont plus faibles que celles déduites de la relation d'Andrews, ceci résultant du fait que les éléments marqués utilisés dans les expériences sont isolés sur le lit et que, comme démontré par Naden (1987), la possibilité qu'ils soient érodés est alors plus importante.

C'est ainsi que dans une autre série d'expériences, les cailloux marqués ont été disposés avec d'autres cailloux de même taille, de façon à former une couche continue reposant sur la couche sous-jacente du lit. Les résultats présentés à la fig. 2, où chaque point représente en moyenne une vingtaine d'observations, montrent une bonne concordance avec la relation proposée par Andrews.

Les forces tractrices critiques ont également été mesurées pour les cailloux marqués aplatis en vue d'établir une relation similaire à celles proposées ci-dessus. Les droites obtenues sont relativement parallèles montrant que, à des degrés divers, les effets d'imbrication et de saillie jouent aussi pour les éléments plats.

Toutefois, pour ces derniers, θ_c est en moyenne 1,5 fois plus important que pour les éléments arrondis de même diamètre. Ces valeurs ont été confirmées par des observations - composition et structure de dallage résistant

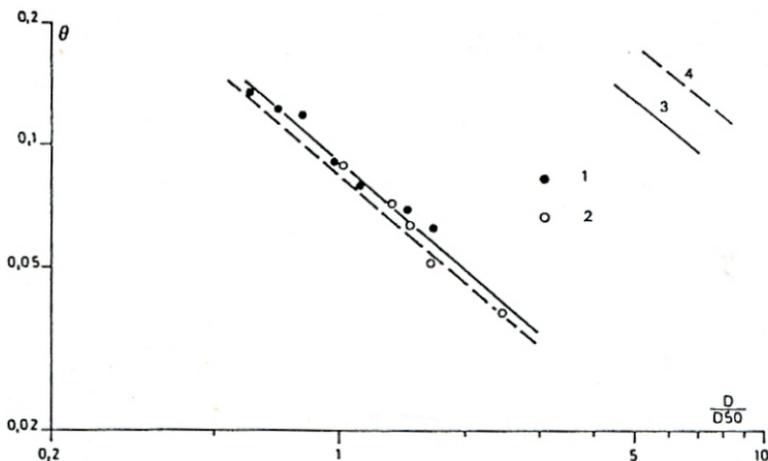


FIG. 2 Relation entre θ_c et le rapport du diamètre des éléments (D_i) et du diamètre médian du matériel constituant le lit (D_{50}); (1) lit composé de cailloux avec $D_{50} = 20$ mm; (2) lit composé de cailloux avec $D_{50} = 13$ mm; (3) droite trouvée par régression $\theta_c = 0,09 (D_i/D_{50})^{-0,90}$ ($r = 0,98$); (4) droite déduite de la relation d'Andrews.

à l'érosion - effectuées dans une rivière naturelle où se présentent conjointement des cailloux aplatis et des éléments arrondis (Petit, 1989b).

OBSERVATIONS EN RIVIERES NATURELLES

Les observations ont été principalement effectuées dans une rivière à charge caillouteuse du Sud de l'Ardenne (La Rulles). Cette rivière de dimension modeste (en moyenne 3 m de largeur au niveau du débit à pleins bords), à pente relativement forte ($0,012 \text{ m.m}^{-1}$), se caractérise par des systèmes seuil/mouille bien développés en relation avec une méandration marquée. Différents secteurs de rivière ont été équipés afin de pouvoir suivre les modifications géomorphologiques et y mesurer de façon précise les paramètres qui permettent d'évaluer les forces tractrices par les deux approches classiques (Petit, 1984, 1986). Des expériences ont été réalisées avec une gamme de cailloux marqués en place dans différents sites (seuils - mouilles). Par ailleurs, un piège à sédiments a été installé juste en aval des secteurs d'études.

Des relevés complémentaires ont été effectués en suivant une méthodologie identique, dans deux autres rivières, dont l'une se caractérise par une charge sablo-graveleuse (la Rouge Eau). Enfin, des traitements ont été réalisés à partir des mesures faites par Mercenier (1973) dans une petite rivière subrectiligne à forte pente du haut plateau ardennais.

L'évaluation des forces tractrices par les vitesses de frottement a tout d'abord nécessité de redéfinir la relation entre le paramètre de rugosité y_0 et le diamètre du matériel qui constitue le fond du lit de ces rivières. Une analyse des gradients de vitesse à proximité du fond a ainsi été effectuée, principalement dans les différents sites de la Rulles, qui se caractérisent par des différences de taille du matériel (D_{50} de l'ordre de 15 mm sur les seuils, et de 50 mm dans les mouilles). La relation suivante a ainsi pu être mise en évidence : $y_0 = 0,39 D_{50}^{0.80}$. Ce qui donne des valeurs assez proches de celles déduites de la relation proposée par Hey (1979) pour des rivières graveleuses.

Les forces tractrices évaluées par les vitesses de frottement ont alors été mises en relation avec les forces tractrices totales calculées à partir de la pente de la ligne d'énergie et du rayon hydraulique. Ces dernières sont systématiquement plus importantes mais à des degrés divers, suivant les sites envisagés : le rapport τ^*/τ est proche de 0,5 pour un secteur graveleux sans méandration ni différenciation sensible des formes du lit (la Rouge Eau), il atteint 0,64 pour les seuils de la Rulles généralement situés au point d'inflexion des méandres, mais est inférieur à 0,30 dans les mouilles de cette même rivière, qui sont le plus souvent associées aux boucles des méandres (Petit, 1990).

Par ailleurs, les τ' évaluées dans ces mêmes sites par les méthodes préalablement testées en flume, ne représentent

en moyenne que 30 % de la force tractrice totale dans les seuils de la Rulles et le secteur graveleux de la Rouge Eau, et seulement 15 % dans les mouilles de la Rulles. Ces valeurs de τ' semblent donc être sous-estimées et ne pourraient expliquer que très peu de modifications morphologiques. Par contre, comme nous allons le voir ci-dessous, les forces tractrices évaluées par les vitesses de frottement justifient mieux les modifications observées (mise en mouvement des particules, transport, arrêt, absence de mise en mouvement). Ces résultats sont reportés en synthèse à la fig. 3 ainsi que la relation mise en évidence à partir de nos expériences en flume. L'application de cette dernière permet de justifier un certain nombre d'observations telles que l'absence de mise en mouvement sur les seuils, l'érosion dans certaines mouilles - mais non dans toutes - et la mise en mouvement des particules dans une rivière subrectiligne. Elle ne peut cependant pas expliquer le transport des particules tant sur les seuils que dans les mouilles. La disposition des points observés correspond beaucoup mieux avec la relation proposée par Carling (1983) en synthèse d'observations effectuées sur le transport des particules en rivière naturelle. De même, la relation qui prend en compte nos seules valeurs de transport des particules, assez proche de la relation proposée par Carling, justifie un plus grand nombre d'observations et notamment l'arrêt des particules dans les seuils et les mouilles.

A noter que l'absence de mouvement des cailloux qui constituent les seuils, en dépit de forces tractrices relativement élevées, résulte de phénomènes d'imbrication, ces cailloux se présentant sous forme d'un dallage homogène et continu. Par ailleurs, il subsiste un problème dans certaines mouilles où il y a effectivement mise en mouvement de particules assez grossières ($D = 50$ mm) en présence de forces tractrices relativement faibles ($\theta_c \approx 0.02$). On ne peut, dans de tels cas, faire appel à un effet de saillie relative car ce matériel est de même taille sinon plus petit que celui qui constitue le fond du lit.

Il n'est pas exclu que dans de tels sites, les fluctuations des vitesses instantanées du courant à proximité du fond soient plus importantes. En effet, de telles mesures ont été effectuées au moyen d'une sonde électromagnétique (temps de réponse 0,2 s), dans un flume où des différenciations de formes du fond avaient été créées (alternance de mouilles et de seuils).

Il ressort de ces expériences que les fluctuations des vitesses instantanées sont beaucoup plus importantes dans les mouilles que sur les seuils, avec des pointes de vitesse atteignant respectivement 1,6 et 1,2 fois la vitesse moyenne et des rapports entre maximums et minimums valant respectivement 3,5 et 1,4. Ainsi, l'importance de ces pointes de vitesse, leur succession dans le temps et leur variation différentielle en fonction de la profondeur pourraient favoriser une mise en mouvement préférentielle des particules.

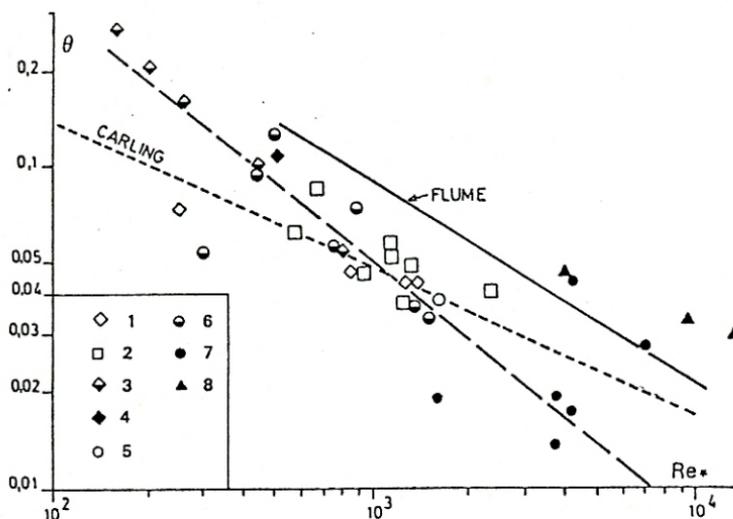


FIG. 3 Relation entre la fonction d'entraînement de Shields (θ) et Re_* ; (1) à (4) seuils de la Rulles et de la Burdinale : (1) arrêt du transport des particules, (2) absence de mise en mouvement, (3) transport, (4) érosion; (5) à (7) mouilles de la Rulles : (5) arrêt de transport, (6) transport, (7) érosion, (8) érosion dans une rivière subrectiligne (Mercenier).

REFERENCES

- Andrews, E.D. 1983. Entrainment of gravel from naturally sorted riverbed material. *Geol. Soc. Am. Bull.*, 94, 1225-1231.
- Carling, P.A. 1983. Threshold of coarse sediment transport in broad and narrow natural streams. *Earth Surf. Processes and Landforms*, 8, 1-18.
- Fenton, J.D. & Abott, J.E. 1977. Initial movement of grains on a stream bed : the effect of relative protrusion. *Proc. R. Soc. London, A* 352, 523-537.
- Hey, R.D., 1979. Flow resistance in gravel bed rivers. *Am. Soc. Civ. Eng. Hydr. Division*, 105, 365-379.
- Kamphuis, J.W. 1974. Determination of sand roughness for fixed beds. *J. Hydr. Res.*, 12(2), 193-263.
- Mercenier, J. 1973. Dynamique fluviale dans un petit bassin du rebord méridional du plateau des Tailles. Mém. de licence en Sc. Géog., inédit, conservé à l'Univ. de Liège, 148 p.
- Naden, P. 1987. An erosion criterion for gravel-bed rivers. *Earth Surf. Processes and Landforms*, 12, 83-93.
- Petit, F. 1984. Les processus contrôlant l'évolution du tracé d'une rivière ardennaise. *Zf. Géomorph. Suppl. Bd.*

49, 95-109.

- Petit, F. 1986. Channel development in two streams of contrasting bed-load and regime. in International Geomorphology 1986 Part 1, Gardiner V., Ed. Wiley J. & Sons Ltd, 611-622.
- Petit, F. 1989a. The evaluation of grain shear stress from experiments in a pebble - bedded flume. Earth Surf. Processes and Landforms, 14, 499-508.
- Petit, F. 1989b. L'influence de la forme des cailloux en tant que facteur de résistance à l'érosion. Revue de Géographie de Lyon, 64(4), 231-239.
- Petit, F. 1990. Evaluation of grain shear stresses required to initiate movement of particles in natural rivers. Earth Surf. Processes and Landforms, 15, (in press).
- Reid, J. & Frostick, L.E. 1984. Particle interaction and its effect on the thresholds of initial and final bedload motion in coarse alluvial channel in Koster E.M. and Steel, R.J. (Eds.), Sedimentology of gravel and Conglomerates, Canadian Society of Petroleum Geologists Memoir, 10, 61-68.
- Singhal, M.K., Mohan, J. & Agrawal, A.K. 1980. Role of grain shear stress in sediment transport, Irrigation and Power, 37, 105-108.
- Vanoni, V.A. 1975 (Ed.) Sedimentation engineering. Manuals and reports on Engineering practice, n° 54, Am. Soc. Civ. Eng., 745 p.