



HAL
open science

Morphologie des rivières à gravier pavées avec berges érodables. Partie 1 : valorisation d'expériences de laboratoire

P. Ramez, André Paquier

► **To cite this version:**

P. Ramez, André Paquier. Morphologie des rivières à gravier pavées avec berges érodables. Partie 1 : valorisation d'expériences de laboratoire. La Houille Blanche - Revue internationale de l'eau, 2004, 5, p. 101 - p. 106. 10.1051/lhb:200405013 . hal-00450841

HAL Id: hal-00450841

<https://hal.science/hal-00450841>

Submitted on 27 Jan 2010

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Morphologie des rivières à gravier pavées avec berges érodables Partie 1 : valorisation d'expériences de laboratoire

Morphology of gravel-bed rivers with erosive banks Part 1 : use of laboratory experiments

Philippe Ramez, André Paquier

Cemagref, U.R. Hydrologie-Hydraulique, Lyon

From the results of an experimental study on the distribution of the boundary shear stress across a rough trapezoidal channel (FLINTHAM and CARLING 1988), we establish an equation estimating the shape ratio L/H (top width/depth at bankfull discharge) in a paved gravel-bed river with erosive banks. We analyse the effect of the side-slope of the banks and the effect of the differences in roughness between bottom and banks. We deduce the hydraulic geometry (width, depth, slope) of this kind of rivers by an adapted regime theory. Then, we propose a generalization for rivers with vegetalized banks.

I ■ INTRODUCTION

L'étude du lit mineur des rivières à gravier nécessite la prise en compte de phénomènes complexes : mise en place et évolution d'un pavage au fond, développement d'une végétation rivulaire sur des berges plus ou moins cohésives, dynamique des fines éventuellement piégées sur les berges lors des transferts latéraux en crue débordante (Ramez, 2001).

Paradoxalement, les outils existant en dynamique fluviale sont très simplifiés. Basés sur la notion de stabilité des grains constituant le substrat en tout point de la section, avec éventuellement production d'un débit solide à l'équilibre uniquement par le fond (Vigilar, 1997), ils sont adaptés à des milieux granulaires homogènes plus proches des rivières à sable que des rivières à gravier.

Dans ces conditions et à une époque où les contraintes environnementales sont analysées dans une logique d'aménagement intégré à « l'espace de liberté des cours d'eau » (Malavoi *et al.*, 1998), il apparaît essentiel de construire de nouvelles méthodes sachant tenir compte des interactions entre la dynamique des lits, le transfert des sédiments (fins et grossiers) et les habitats aquatiques et rivulaires (flore et faune), ceci afin de reconstituer un « espace écologique » autour de nos rivières aménagées.

Dans cet article, basé sur une analyse physique des processus, nous cherchons à identifier des paramètres simples, accessibles par la mesure, mais significatifs pour expliquer

la morphogenèse complexe des rivières à gravier ayant des berges érodables, cohésives et végétalisées. Partant du résultat de mesures de contrainte sur les berges et le fond d'un canal trapézoïdal, nous en déduisons les expressions donnant les paramètres géométriques d'un lit de rivière en équilibre.

II ■ PARTICULARITÉS DES RIVIÈRES SELON LA NATURE DE LEUR SUBSTRAT

Les rivières à sable sont constituées de grains dont le diamètre médian est inférieur à 2 millimètres avec une granulométrie pratiquement uniforme, alors que le diamètre des grains constituant le fond des rivières à gravier peut dépasser plusieurs décimètres et leur étendue granulométrique est toujours élevée. Ces différences de substrat expliquent la distinction entre les deux typologies de cours d'eau, les autres différences observables dans leur géométrie ou dans leur morphogenèse n'en sont que des conséquences. Ainsi la pente du profil en long est plus faible pour les rivières sableuses, le tracé en plan plus rectiligne pour les rivières graveleuses, les sables des premières sont plutôt transportés en suspension, les graviers des secondes sont charriés. Mais c'est à l'échelle des mécanismes internes d'évolution des lits et plus précisément au niveau du « facteur limitant » du transport solide conduisant à un état d'équilibre, que les différences sont le plus remarquables.



Rivière sableuse (Pennard Pill River © Paul Saunders).



Rivière à gravier (© 2004 by Niwa).

Figure 1 : Exemple d'une rivière à sable et d'une rivière à gravier.

● II.1 Equilibre dynamique des rivières à sable

Dans le cas des rivières sableuses, l'équilibre est caractérisé par un débit d'éléments du lit (fond et berges confondus) d'autant plus élevé que les sables sont fins, la notion de seuil de mise en mouvement n'est pas significative. La morphodynamique de ces rivières est liée à l'évolution des grosses structures turbulentes (initiées par les bursts verticaux et horizontaux) en harmonie avec les ondulations de forme générées pendant le transport solide (dunes, bancs sableux). Les pertes d'énergie consommées dans le sillage des ces déformations sont le « facteur limitant » qui permet aux rivières à sable d'atteindre un équilibre dynamique (Ramez, 1996).

● II.2 Equilibre statique des rivières à gravier

Dans le cas des rivières à gravier, nous sommes amenés à distinguer le fond et les berges :

Au niveau du fond, l'équilibre est caractérisé par un débit solide d'éléments de la couche de surface pratiquement nul. La notion de seuil de mise en mouvement, liée aux mécanismes d'interaction entre les sédiments (pavage, armurage, colmatage), est alors essentielle et ce sont les phénomènes d'organisation granulométrique (tri, couche, mélange) qui deviennent le « facteur limitant » permettant aux rivières à gravier d'atteindre un équilibre statique. Dans certains cas, c'est la souplesse de l'armure qui contrôle l'équilibre : l'essentiel du substrat étant stocké en couches sous-jacentes, seuls quelques petits grains peuvent être libérés lorsque les gros graviers imbriqués en surface bougent légèrement, en même temps d'autres petits grains provenant de l'amont pénètrent en couches sous-jacentes (effet filtre de l'armure), si bien que le débit solide produit est très faible et n'entraîne aucune déformation du lit (Parker *et al.*, 1982). Dans

d'autres cas, au contraire, ce sont les fines plus ou moins cohésives, provenant directement du bassin versant suite au lessivage par les pluies (« wash-load ») qui contrôlent l'équilibre en imposant une certaine rigidité au fond par colmatage des gros graviers imbriqués. Mais dans tous les cas, la stabilité des grains assurant la structure du pavage n'est pas menacée tant que le débit liquide reste inférieur à une certaine valeur, supposée égale au débit de plein bord du lit mineur (Carling, 1988).

Au niveau des berges, l'équilibre entre forces érosives (induites par les courants latéraux secondaires en crue) et forces résistant à l'érosion (liées à la texture et à la cohésion des talus de rive) conduit à une forme optimale du lit. Les fines jouent un rôle important dans cette morphogenèse, d'une part en favorisant la végétation rivulaire et le développement des racines, et d'autre part en modifiant la texture et la teneur en particules cohésives des terres.

● II.3 Rivières mixte et choix d'une typologie

La distinction entre rivières à sable et rivières à gravier, relativement claire en théorie, est beaucoup plus floue sur le terrain où, le plus souvent, les deux typologies peuvent être identifiées dans un même système. Il est alors nécessaire de définir des rivières mixtes dont le comportement est intermédiaire entre les deux cas précédents.

Dans cet article, nous nous intéressons aux rivières à gravier et aux rivières mixtes à comportement graveleux. Nous allégerons la complexité des mécanismes décrits dans le paragraphe II.2 par une succession d'hypothèses simplifiées.

III ■ GÉOMÉTRIE DU LIT MINEUR D'UNE RIVIÈRE À GRAVIER

Nous nous plaçons dans le cas d'un lit statiquement stable : fond pavé, berges stabilisées. Nous supposons qu'un petit débit solide d'éléments fins peut néanmoins se produire via la couche de pavage (effet filtre) ou via les berges (processus lié à la dynamique des fines).

La théorie de la diffusion latérale turbulente permet de définir une forme stable pour un lit en équilibre en milieu granulaire homogène de granulométrie uniforme (Diplas, 1990, 1992) ou étalée (Cao et Knight, 1998).

Cette théorie n'est pas facilement utilisable dans le cas étudié puisque nous cherchons essentiellement à comprendre l'effet induit par la dynamique des fines sur la cohésion et la végétation des berges. Nous préférons reprendre des études expérimentales plus anciennes sur la répartition des contraintes dans une forme trapézoïdale qui permettent de mieux distinguer le fond (pavé granulaire) et les berges (cohésives végétalisées).

● III.1 Equation empirique donnant la contrainte sur les berges

Nous exploitons les mesures réalisées en laboratoire dans un canal trapézoïdal rugueux par Flinham et Carling (1988). Ces travaux, qui font suite aux travaux de Knight (1985) en canal rectangulaire lisse, montrent d'une part l'effet de l'inclinaison des berges et d'autre part l'effet des différences

de rugosité entre fond et berges sur la répartition des contraintes.

Considérons un trapèze défini par sa profondeur H (tirant d'eau à plein bord), son rapport de forme α et le fruit de ses berges noté f . Nous en déduisons les six grandeurs géométriques suivantes (à plein bord) : L largeur au miroir, S surface mouillée, R rayon hydraulique, P périmètre mouillé (décomposé en P_b sur les berges et P_f sur le fond).

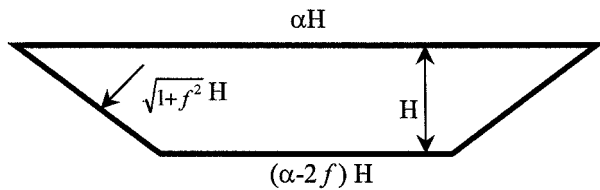


Figure 2: Trapèze (α, f, H).

$$L = \alpha H ; S = (\alpha - f) H^2$$

$$R = \frac{(\alpha - f)}{\alpha + 2 \sqrt{1 + f^2} - 2f} H$$

$$P = (\alpha + 2 \sqrt{1 + f^2} - 2f) H$$

$$P_b = 2 \sqrt{1 + f^2} H ; P_f = (\alpha - 2f) H$$

Nous supposons que la contrainte moyenne dans la section est égale à celle déduite du gradient d'énergie (notée τ_c). τ_c est reliée au rayon hydraulique R et à la pente de la ligne d'énergie (assimilée ici à la pente I du fond en régime uniforme) par la relation $\tau_c = \rho g I R$, avec ρ masse volumique de l'eau et g accélération de la pesanteur.

Notons τ_b la contrainte moyenne appliquée sur les berges.

Notons τ_f la contrainte moyenne appliquée sur le fond.

En notant $\%_{\text{berges}}$ le pourcentage de la force tractrice moyenne du lit qui s'exerce sur les berges et $\%_{\text{fond}}$ le pourcentage de la force tractrice moyenne du lit qui s'exerce sur le fond nous pouvons écrire :

$$\%_{\text{berges}} = 100 \frac{\tau_b P_b}{\tau_c P} \quad (1)$$

et

$$\%_{\text{fond}} = (100 - \%_{\text{berges}}) = 100 \frac{\tau_f P_f}{\tau_c P} \quad (2)$$

Où $(\tau_c P)$, $(\tau_b P_b)$ et $(\tau_f P_f)$ sont des forces tractrices par unité de longueur.

Les rugosités des parois du trapèze sont assimilées aux « diamètres de grain équivalents » au sens défini par Nikuradse (Yen, 1991), caractéristiques du frottement de peau du fond et des berges.

Nous noterons ξ le rapport de ces diamètres dans le sens fond/berges.

Les formulations empiriques proposées par Flinham et Carling (1988) suite à leurs mesures dans un canal trapézoïdal rigide aux parois rugueuses sont mises sous la forme :

$$\log(\%_{\text{berges}}) = -1,4 \log \left[\frac{1}{\xi} \frac{P_f}{P_b} + 1 \right] + 2$$

avec

$$\log(\text{tr}) = -0,2 \log(\xi) + 0,176$$

Ce qui donne, en exprimant P_f et P_b en fonction de α et f :

$$\%_{\text{berges}} = 176,4 \left[\frac{\alpha - 2f}{2 \sqrt{1 + f^2}} \xi^{0,2} + 1,5 \right]^{-1,4} \quad (3)$$

$\%_{\text{berges}}$ dépend des trois paramètres α, f et ξ de façon plus ou moins marquée mais significative dans tous les cas (voir fig. 3) :

- Le rapport de forme α est le paramètre le plus sensible. Si le lit est très étroit, les forces tractrices appuient plus sur les berges. Inversement la presque totalité des forces tractrices s'exerce sur le fond à partir d'une certaine valeur de α suffisamment grande.

- L'inclinaison des berges joue aussi un rôle important dans la répartition des forces tractrices qui sont relativement plus faibles sur les berges lorsque celles-ci deviennent verticales ($f=0$).

- Le rapport des rugosités entre le fond et les berges est un paramètre assez sensible qui traduit le fait que les forces tractrices s'intensifient sur la paroi la plus rugueuse. Dans le cas extrême de berges parfaitement lisses (verre par exemple), toute la contrainte s'exerce sur le fond quelque soient les valeurs de α et de f .

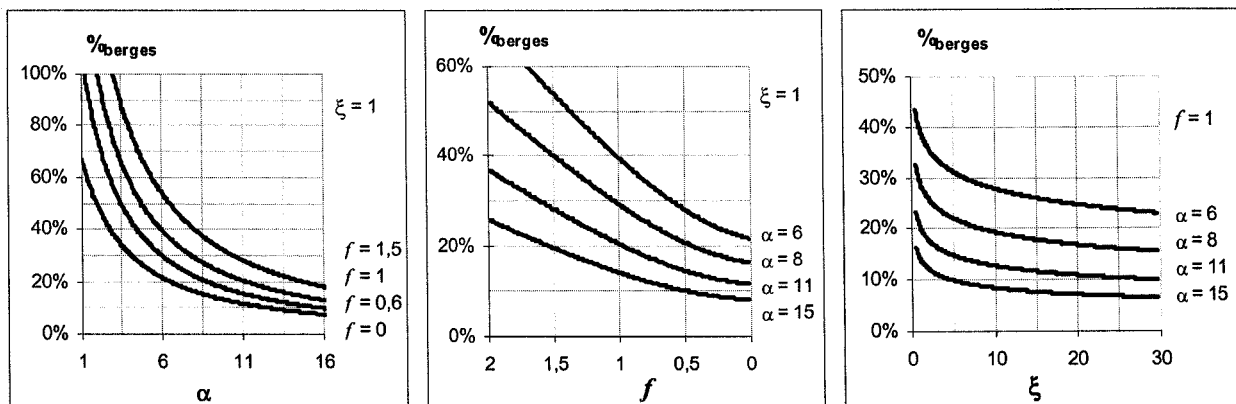


Figure 3 : Sensibilité de ($\%_{\text{berges}}$) à α, f et ξ

III.2 Forme du lit à l'équilibre

Dans un canal trapézoïdal rigide indéformable incliné (pente I) dont le fruit des berges f et la profondeur H sont fixés ainsi que la différence de rugosité entre les parois, nous considérons un écoulement en régime uniforme à plein bord.

Afin d'étudier la variation de la contrainte moyenne τ_b en fonction du seul paramètre α , nous exprimons $\tau_b(\alpha)$ à partir des équations (1) et (3) soit :

$$\tau_b(\alpha) = F_b(\alpha) \cdot \rho g I H$$

avec

$$F_b(\alpha) = 2,33 (1 + f^2)^{0,2} \xi^{-0,28} (\alpha - f) (\alpha - 2f + 3\sqrt{1 + f^2} \xi^{-0,2})^{-1,4}$$

La fonction $\tau_b(\alpha)$ présente un maximum assez marqué lorsque I , H , f et ξ sont fixés. La valeur de α correspondant à ce maximum est obtenue en posant $(\partial\tau_b/\partial\alpha) = 0$, ce qui donne :

$$\alpha = 7,5 \sqrt{1 + f^2} \xi^{-0,2} - 1,5 f \quad (4)$$

Dans une rivière naturelle, f et ξ sont reliés aux paramètres géotechniques du substrat : structure du fond, texture des berges, cohésion, végétation. Nous les considérons comme des caractéristiques de l'état du sol constituant le lit et donc fixés a priori. Si de plus il s'agit d'une rivière à gravier et tant que l'écoulement est inférieur au plein bord du lit mineur, nous pouvons admettre que le fond reste pavé indéformable et que la pente est imposée (égale à une valeur résultant de l'effet des fortes crues débordantes passées ayant effectivement modelé le lit). Nous raisonnons donc aussi à I et H fixés. Dans ces conditions, nous sommes ramenés au cas précédent avec pour différence essentielle le fait que les berges sont maintenant érodables.

III.2.1 Hypothèse pour déterminer la forme à l'équilibre

En milieu totalement rigide, la contrainte moyenne sur les berges τ_b croît lorsque α augmente jusqu'à atteindre un maximum pour une valeur déterminée par l'équation (4). En milieu érodable sur les berges, nous supposons que ce maximum correspond à un équilibre dont le rapport de forme L/H est défini par l'équation (4).

III.2.2 Calcul de la contrainte qui s'exerce sur le fond pour cet équilibre

Nous pouvons exprimer la contrainte moyenne $\tau_f(\alpha)$ à partir des équations (2) et (3) puis y remplacer α issu de l'équation (4) afin de connaître la valeur τ_f à l'équilibre. Nous obtenons :

$$\tau_f = F_f(f, \xi) \cdot \rho g I H$$

avec

$$F_f(f, \xi) = [1 - 4,66(1 + f^2)^{0,7} \xi^{-0,28} (10,5\sqrt{1 + f^2} \xi^{-0,2} - 3,5f)^{-1,4}]$$

$$\frac{7,5 \sqrt{1 + f^2} \xi^{-0,2} - 2,5 f}{7,5 \sqrt{1 + f^2} \xi^{-0,2} - 3,5 f}$$

Ce qui donne, en simplifiant la fonction $F_f(f, \xi)$ par une polynomiale du second degré en f :

$$\tau_f = 0,825 (1 + 0,039 \xi^{0,29} f - 0,0088 \xi^{0,24} f^2) \cdot \rho g I H \quad (5)$$

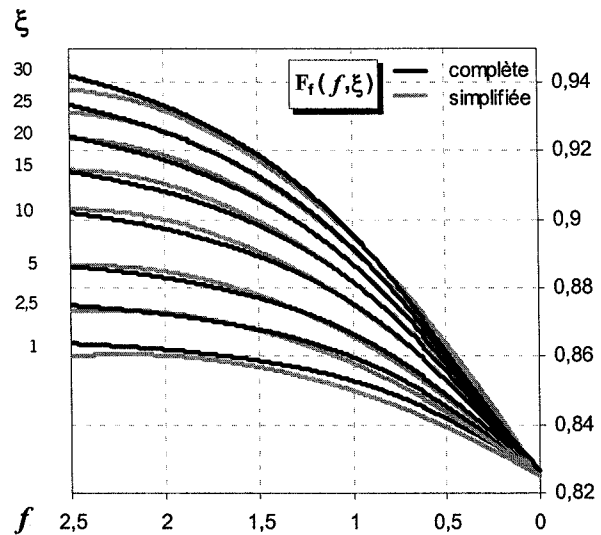


Figure 4 : Variation de la fonction $F_f(f, \xi)$.

L'erreur relative maximale induite sur $F_f(f, \xi)$ en remplaçant l'expression complète par l'expression simplifiée reste inférieure à 0,5 % pour f variant entre 0 et 2,5 et ξ variant entre 1 et 30 (voir fig. 4 ci-contre).

III.3 Forme du lit mineur d'une rivière à gravier dans le cas de berges érodables

III.3.1 Théorie du régime adaptée à ce type de rivière

Notons Q_m le débit à plein bord dans le lit mineur, K_m le coefficient de Strickler dans ce lit et D_{90} le diamètre des grains du fond tels que 90 % en poids des matériaux leur soit inférieure en taille. Nous admettons que ce diamètre est caractéristique de la stabilité du pavage et que la contrainte critique de déstructuration associée est égale à 0,047 (Ramez, 1995).

— La première équation est l'équation (4), qui donne le rapport de forme L/H à l'équilibre (hypothèse du § II.2.1) :

$$\alpha = [7,5 \sqrt{1 + f^2} \xi^{-0,2} - 1,5 f] = L/H$$

Pour déterminer les trois inconnues L , H et I , il faut trouver deux équations supplémentaires. Pour cela, nous exploitons les deux autres hypothèses principales.

— L'hypothèse « pavage sur fond indéformable jusqu'à plein bord » est traduite par l'égalité entre contrainte moyenne au fond et contrainte critique calculée à partir du D_{90} :

$$\tau_f = F_f(f, \xi) \cdot \rho g I H = 0,047 (\rho_s - \rho) g D_{90} \quad (6)$$

— L'hypothèse « régime uniforme à plein bord » s'écrit :

$$Q_m = K_m I^{1/2} S R^{2/3} \quad (7)$$

La résolution de ce système de trois équations donne :

$$L = [0,047(\rho_s/\rho - 1) D_{90}]^{-3/13} [Q_m/K_m]^{6/13} F_f(f, \xi)^{3/13}$$

$$\frac{[7,5 \sqrt{1+f^2} \xi^{-0,2} - 1,5 f] \cdot [(7,5 \xi^{-0,2} + 2) \sqrt{1+f^2} - 3,5 f]^{4/13}}{[7,5 \sqrt{1+f^2} \xi^{-0,2} - 2,5 f]^{10/13}}$$

$$H = [0,047(\rho_s/\rho - 1) D_{90}]^{-3/13} [Q_m/K_m]^{6/13} F_f(f, \xi)^{3/13}$$

$$[(7,5 \xi^{-0,2} + 2) \sqrt{1+f^2} - 3,5 f]^{4/13} [7,5 \sqrt{1+f^2} \xi^{-0,2} - 2,5 f]^{-10/13}$$

$$I = [0,047(\rho_s/\rho - 1) D_{90}]^{16/13} [Q_m/K_m]^{-6/13} F_f(f, \xi)^{-16/13}$$

$$(7,5 \xi^{-0,2} + 2) \sqrt{1+f^2} - 3,5 f]^{-4/13} [7,5 \sqrt{1+f^2} \xi^{-0,2} - 2,5 f]^{10/13}$$

En posant $(\rho_s/\rho - 1) = 1,6$ (fond granulaire) et après simplification des expressions en f et ξ , nous trouvons :

$$L = 5,4 [1 + 0,23 f^2 (1 - 0,2 f)] \xi^{-0,085} D_{90}^{-3/13} K_m^{-6/13} Q_m^{6/13}$$

$$H = 0,67 [1 + 0,01 f (1 - 3,13 f)] \xi^{0,19} D_{90}^{-3/13} K_m^{-6/13} Q_m^{6/13} \quad (8)$$

$$I = 0,136 [1 - 0,03 f \xi^{0,25}] \cdot [1 + 0,01 f (1 - 3,13 f)]^{-1}$$

$$\xi^{-0,19} D_{90}^{16/13} K_m^{6/13} Q_m^{-6/13}$$

L'erreur relative maximale induite par les simplifications d'écriture reste inférieure à 3 % sur L, inférieure à 5 % sur H et inférieure à 10 % sur I, pour f variant de 2,5 à 0 et ξ de 1 à 40.

III.3.2 Cas particulier

Dans le cas d'une rivière granulaire homogène sans cohésion ni effets dus à la végétation rivulaire, nous posons :

- $f = 2,5$ qui correspond à la pente de stabilité des berges pour un matériau granulaire dont l'angle de frottement interne est égal à 35° (Lane, 1955), cet angle étant lui-même associé à une contrainte critique de 0,047 (White, 1940),
- $\xi = 1$ qui signifie que la granulométrie est la même sur le fond et sur les berges,
- $K_m = 25$ qui est la valeur usuelle généralement admise pour le lit mineur d'une rivière à gravier modérément entretenue.

Dans ces conditions, nous trouvons des valeurs pour L, H et I proches de celles données dans la littérature pour les rivières à gravier (YALIN, 1992), soit ici :

$$L = 2,1 D_{90}^{-3/13} Q_m^{6/13} ; H = 0,13 D_{90}^{-3/13} Q_m^{6/13} ;$$

$$I = 0,67 D_{90}^{16/13} Q_m^{-6/13}$$

III.3.3 Interprétation des résultats mis sous forme graphique

Les équations (8) sont présentées sous forme graphique dans la figure 5 ci-après.

Lorsque f diminue (inclinaison des berges croissante) et lorsque ξ augmente (rugosité des berges décroissante), nous constatons que :

- d'une part, H augmente et I diminue, l'opérateur de contrôle de ces variations opposées étant le produit IH (équations (5) et (6)) qui reste à peu près constant lorsque f et ξ varient,
- d'autre part, L diminue et H augmente, l'opérateur de contrôle de ces variations opposées étant le rapport L/H (équation (4)) qui diminue de façon plus prononcée que L.

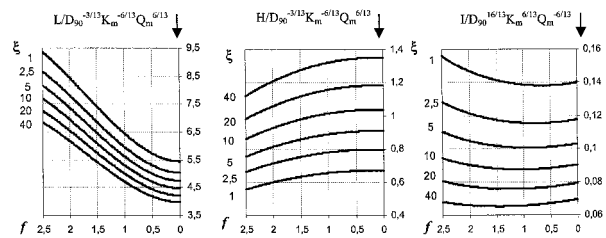


Figure 5 : Variation de L, H et I en fonction f et ξ pour D_{90} , K_m et Q_m donnés.

- la diminution de L est plutôt liée à la variation de f , alors que l'augmentation de H et la diminution de I sont surtout liées à la variation de ξ .

IV ■ GÉNÉRALISATION AUX RIVIÈRES À GRAVIER AVEC BERGES VÉGÉTALISÉES

Cette généralisation est basée sur une analyse simplifiée des processus résumée ci-dessous :

- La contrainte efficace en matière d'érosion et pour le façonnage du lit mineur est celle liée au frottement de peau et donc aux rugosités des parois que nous ramenons ici au diamètre des grains constituant le fond et les berges. Plus le rapport ξ entre ces diamètres (dans le sens fond/berges) est grand et plus les berges sont lisses, c'est-à-dire plus la contrainte efficace s'exerçant sur les berges est réduite. En conséquence, L/H est d'autant plus petit que ξ est grand.

- Le comportement des berges soumises aux forces érosives de l'écoulement dépend de la texture et de la cohésion des terres qui les composent ainsi que du rôle joué par les racines de la végétation rivulaire. Nous ramenons tous ces effets à une inclinaison plus ou moins forte des berges à l'équilibre. Cette inclinaison est d'autant plus forte, et donc L/H d'autant plus petit, que la cohésion est grande et que le système racinaire de la végétation est développé.

Nous constatons ainsi que le rôle de la végétation est multiple et toujours dans le sens d'une diminution du rapport de forme L/H. Ce rôle se fait soit directement, tenue des terres accrue par le développement racinaire, soit indirectement par un effet de piégeage des fines. Dans ce deuxième cas, nous pouvons distinguer à nouveau deux effets :

- une augmentation de la cohésion due à une modification de la texture des terres par les fines suite aux remaniements de berges en forte crue débordante,
- une réduction de la contrainte efficace sur berges due au lissage des rugosités par dépôts des fines lors des écoulements morphogènes à plein bord.

Dans tous les cas, il est important de raisonner en terme de contrainte efficace à partir de la seule perte de charge effectivement récupérable par les processus d'érosion, c'est-à-dire celle reliée au frottement de peau, le freinage induit sur l'écoulement par la partie aérienne des végétaux étant pris en compte globalement par l'intermédiaire du coefficient de Strickler K_m .

Par ailleurs, on notera que la végétation retient les fines sur les berges mais les fines agissent à leur tour sur la végétation. En effet, ces particules (appelées « wash-load » en anglais) proviennent essentiellement du lessivage des versants. Elles sont arables et favorisent le développement végétal.

V ■ CONCLUSION

Les équations proposées dans cet article permettent de prendre en compte explicitement l'angle d'inclinaison des berges ainsi qu'un paramètre de texture des matériaux de surface des berges. Cette amélioration par rapport aux équations fournies dans la littérature est utile à l'aménageur des cours d'eau pour le calcul de la forme des sections (gabarit, pente des berges), pour le choix des matériaux (béton, géotextile) ou pour l'utilisation de nouvelles technologies (bio-ingénierie) qui nécessitent une estimation de l'effet de la végétation rivulaire sur la stabilité du lit.

Ceci dit et pour une utilisation pratique de ces équations, il est indispensable de caler les paramètres f et ξ sur des données de terrain et d'en proposer une adaptation simplifiée. Ce problème est traité dans la seconde partie de cet article.

BIBLIOGRAPHIE

- CAO S. and KNIGHT D.W. (1998). — « Design for Hydraulic Geometry of Alluvial Channels ». *J. Hydr. Engrg*, ASCE, 124(5), 484-492.
- CARLING P. (1988). — « The concept of dominant discharge applied to two gravel-bed streams in relation to channel stability thresholds ». *Earth Surface and Landforms*. Vol. 13, pp. 355-367.
- DIPLAS P. (1990). « Characteristics of self-formed straight channels ». *J. Hydr. Engrg*, ASCE, 116(5), 707-728.
- DIPLAS P. and VIGILAR G. (1992). — « Hydraulic Geometry of Threshold Channels ». *J. Hydr. Engrg*, ASCE, 118(4), 597-614.
- FLINTHAM T.P. and CARLING P.A. (1988). — « The prediction of mean bed and wall boundary shear in uniform and compositely roughened channels ». *Int. conf. on river regime*, W.P. White, ed., John Wiley and Sons, Chichester, England, 267-287.
- KNIGHT D.W. and PATEL H.S. (1985). — « Boundary shear in smooth rectangular ducts ». *J. Hydr. Engrg*, ASCE, 111(1), 29-47.
- LANE E.W. (1955). — « The design of stable channels ». *Trans. ASCE*, 120, 1234-1279.
- MALAVOI J.R., BRAVARD J.P., PIEGAY H., HEROUIN E., RAMEZ P. (1998). — « Détermination de l'espace de liberté des cours d'eau ». Guide technique n° 2. Agence de l'eau Rhône Méditerranée Corse, Lyon, 39 p.
- PARKER G., KLINGEMAN P.C. and MCLEAN D.G. (1982). — « Bedload and size distribution in paved gravel-bed streams ». *J. Hydr. Div*, ASCE, 108(4), 544-571.
- RAMEZ P. (1995). — « Erosion et transport solide en rivière ». *Etudes du Cemagref*. Série Gestion des milieux aquatiques n° 8, France, pp. 29-54.
- RAMEZ P. (1996). « Turbulence et transport solide en rivières à sable ». *Colloque « Erosion, Transport de particules, Formation de dépôts »*. IMFT Toulouse, France
- RAMEZ P. (2001). — « Transport solide en rivière. Etat et avancée des connaissances ». *Note interne du Cemagref*, HHLY 01/2001, Lyon, 25 p.
- VIGILAR G. (1997). — « Determination of optimal stable channel profiles ». *Thesis of philosophy in Civil Engineering*. Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University, Blacksburg, Virginia, 88 p.
- WHITE C.M. (1940). — « Equilibrium of grains on the bed of a stream ». *Proc. Roy. Soc. Lon.*, (A)174, 322-338.
- YEN B.C. (1991). — Channel flow resistance : Centennial of Manning's Formula. Water Resources Publications. Colorado USA.
- YALIN M.S. (1992). — Regime Channels. In « *River Mechanics* », Pergamon Press Ltd, England, pp. 117-159.