



La géométrie en travers

En complément ou indépendamment de l'ajustement dans le plan vertical, tout cours d'eau possédant un minimum d'espace de mobilité (concept sur lequel nous reviendrons) et une puissance suffisante, peut ajuster plus ou moins rapidement sa géométrie en travers aux fluctuations naturelles ou artificielles des variables de contrôle (et aux interventions humaines directes qu'il peut subir).

De la même manière que pour le profil en long et les styles fluviaux (détaillés au chapitre suivant), on admet que les cours d'eau sont capables de développer **une géométrie en travers d'équilibre**, adaptée aux conditions moyennes d'apports liquides et solides qui ont prévalu jusqu'à ce jour ainsi qu'aux autres variables de contrôle (pente et largeur de la vallée, nature de ses alluvions, végétation rivulaire).

Notions de géométrie hydraulique

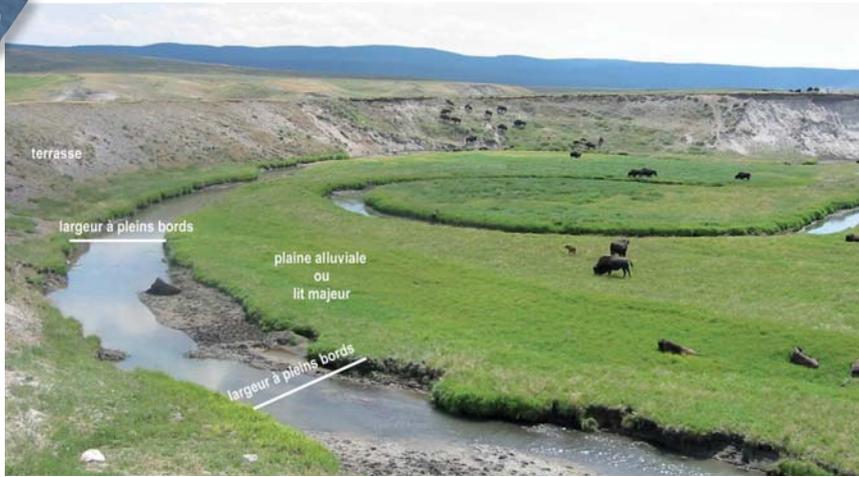
Les ingénieurs anglo-indiens ont cherché dès le XIX^e siècle à créer en Inde des canaux d'irrigation dont les formes en plan, en long et en travers pourraient rester stables dans le temps, afin de garantir les débits d'alimentation et réduire les coûts d'entretien (notamment liés aux problèmes de la sédimentation à l'aval des prises d'eau connectées à des cours d'eau à forte charge en suspension). Sur la base d'expérimentations nombreuses, ils ont mis au point la **théorie du « régime »** reliant débit, largeur, profondeur et pente.

Cette théorie a été reprise au cours du XX^e siècle pour expliquer puis prédire les caractéristiques géométriques des rivières naturelles. De nombreuses mesures ont été réalisées sur des cours d'eau naturels depuis les années 1950, tant en Grande-Bretagne qu'aux Etats-Unis. Elles ont abouti à une théorie du « régime » étendue, appelée **théorie de la « géométrie hydraulique »**. Les travaux pionniers sont ceux de Leopold et Maddock (1953) et Hey et Thorne (1986). Leurs observations ont permis de démontrer les fortes corrélations existant entre le débit entrant dans un cours d'eau (ou le substitut du débit qui est la surface de son bassin versant) et les caractéristiques géométriques de celui-ci en un point donné.

■ La géométrie à pleins bords

Les mesures de géométrie en travers qui ont la signification géomorphologique la plus importante sont celles qui correspondent aux **caractéristiques du lit moyen à pleins bords**, c'est-à-dire avant débordement dans la **plaine alluviale** ou **lit majeur**. Cette notion de pleins bords est par ailleurs utilisée par les juristes pour décrire l'emprise du domaine public fluvial sur les cours d'eau domaniaux. On parle alors de *plenissimum flumen*. La largeur et la profondeur sont donc mesurées dans ces conditions de pleins bords, illustrées par la photo ci-après.

Figure 50



© J.R. Malavoi

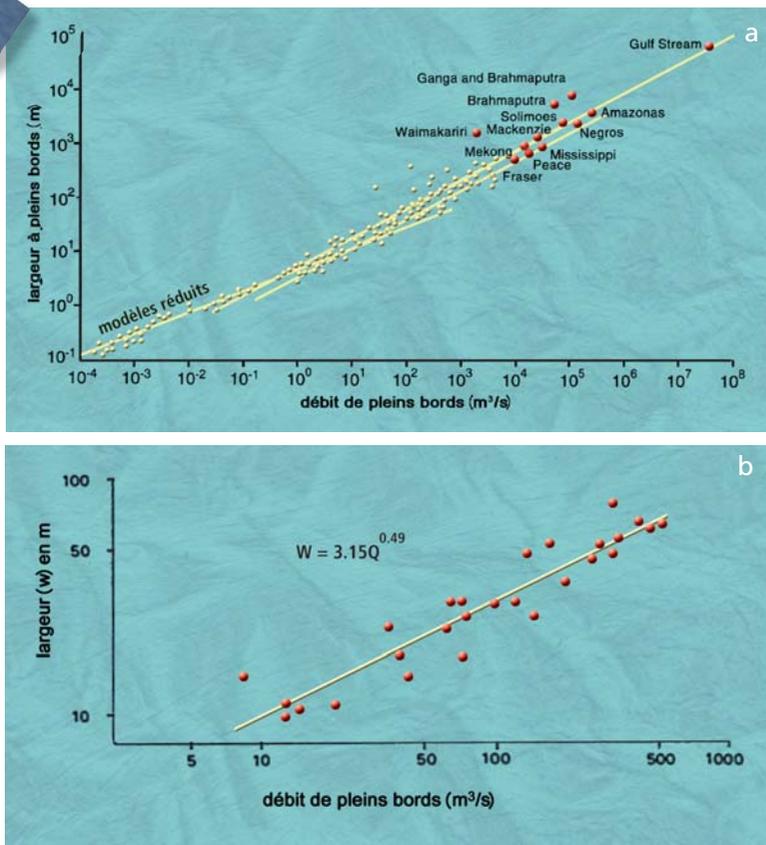
Exemple de mesure des caractéristiques d'un lit de « pleins bords » (petite rivière dans le parc de Yellowstone, USA).

■ Quelques chiffres

Les exemples ci-dessous présentent quelques résultats de mesures ayant permis de développer des équations de géométrie hydraulique. Notons que si les premières mesures et les équations dérivées étaient réalisées sans tenir compte des spécificités régionales (climat, géologie) ou locales (présence de végétation rivulaire, texture des berges) et montraient donc une forte dispersion, de plus en plus d'études sont régionalisées ou « thématiques » (végétation rivulaire, cours d'eau en BV urbains ou ruraux, etc.) et permettent d'augmenter la précision des modèles.

52

Figure 51

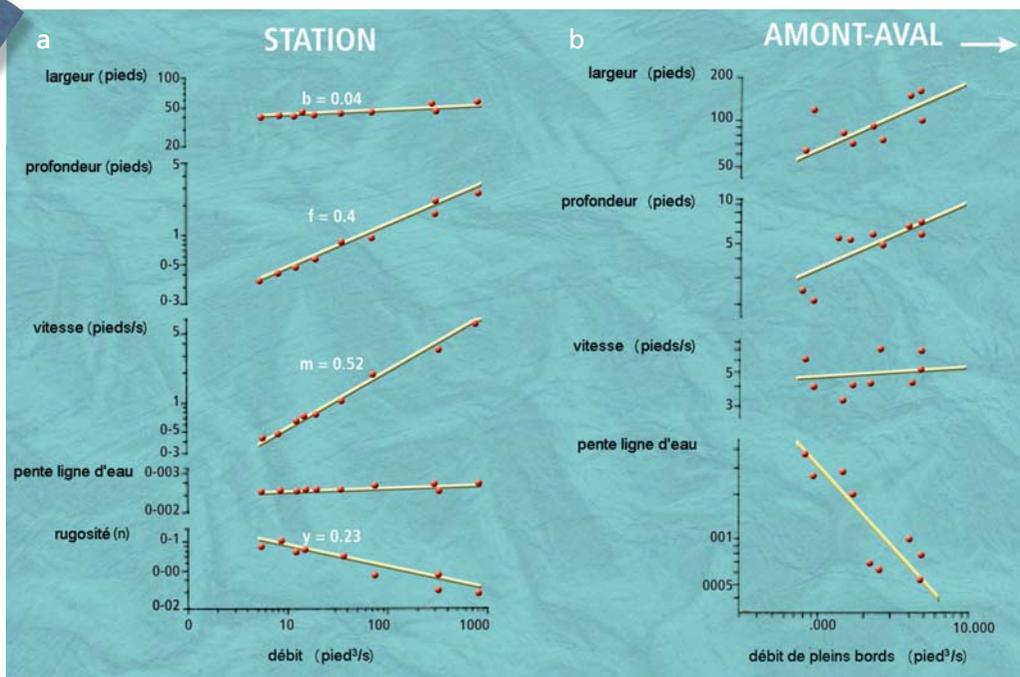


Exemples de relations entre le débit de pleins bords et la largeur du lit (Schumm, 1960).

- La plupart des chercheurs ont travaillé sur deux approches des relations de géométrie hydraulique :
- la **géométrie stationnelle** (*at-a-station hydraulic geometry*) qui permet de visualiser l'évolution des paramètres géométriques sur le site d'une station (à l'échelle par exemple d'un profil en travers), lorsque le débit augmente ;
 - la **géométrie amont-aval** (*downstream hydraulic geometry*) qui permet de visualiser l'évolution de ces mêmes paramètres sur un même cours d'eau mais en progressant de l'amont vers l'aval, cette évolution traduisant l'effet d'une augmentation du débit à pleins bords.



Figure 52



Exemples de relation de géométrie hydraulique a) à la station et b) de l'amont vers l'aval (Wolman, 1955).

Les **équations de géométrie hydraulique** sont basées sur les corrélations observées entre le débit et les caractéristiques géométriques du lit, généralement sous la forme suivante :

$$y = aQ^b$$

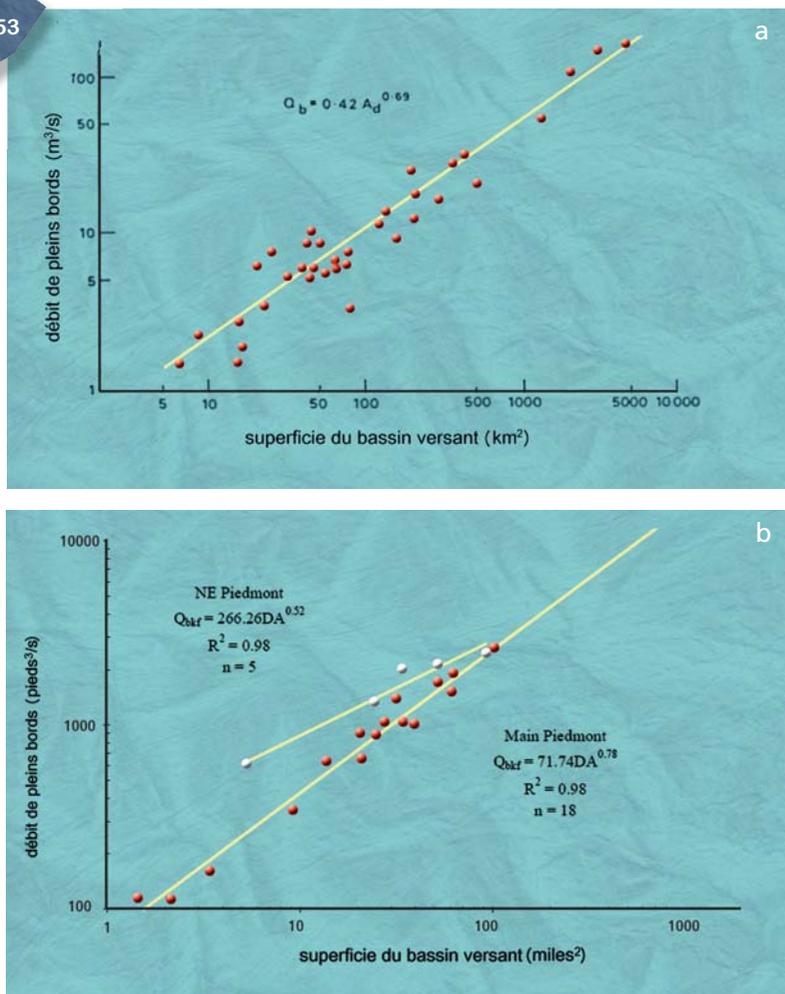
où y est une dimension du lit (largeur, profondeur), Q un débit de référence (le débit de pleins bords dans le cas de la géométrie amont-aval, de l'étiage à la crue de pleins bords dans le cas de la géométrie à la station) et a et b des constantes, souvent homogènes à l'échelle régionale, permettant d'ajuster la loi aux données de terrain.

Par ailleurs les relations entre un débit de référence et la superficie du bassin versant pouvant aussi être assez facilement identifiées et régionalisées (figure 53), un certain nombre d'équations de géométrie hydraulique sont proposées directement sous la forme suivante :

$$y = aSbv^b$$

où Sbv (superficie du bassin versant) remplace Q.

Figure 53



Exemples de relations entre la superficie du bassin versant et le débit de pleins bords. (a) Non régionalisées (Dunne et Leopold, 1978). (b) Régionalisées (McCandless et Everett, 2002).

Un exemple d'équations de géométrie hydraulique parmi les plus couramment utilisées est donné par Hey et Thorne 1986 (tableau ci-dessous). Les équations sont dérivées sur la base de mesures faites sur 62 rivières à graviers du Royaume-Uni. Notons que les auteurs font intervenir la végétation des berges comme paramètre de contrôle majeur.

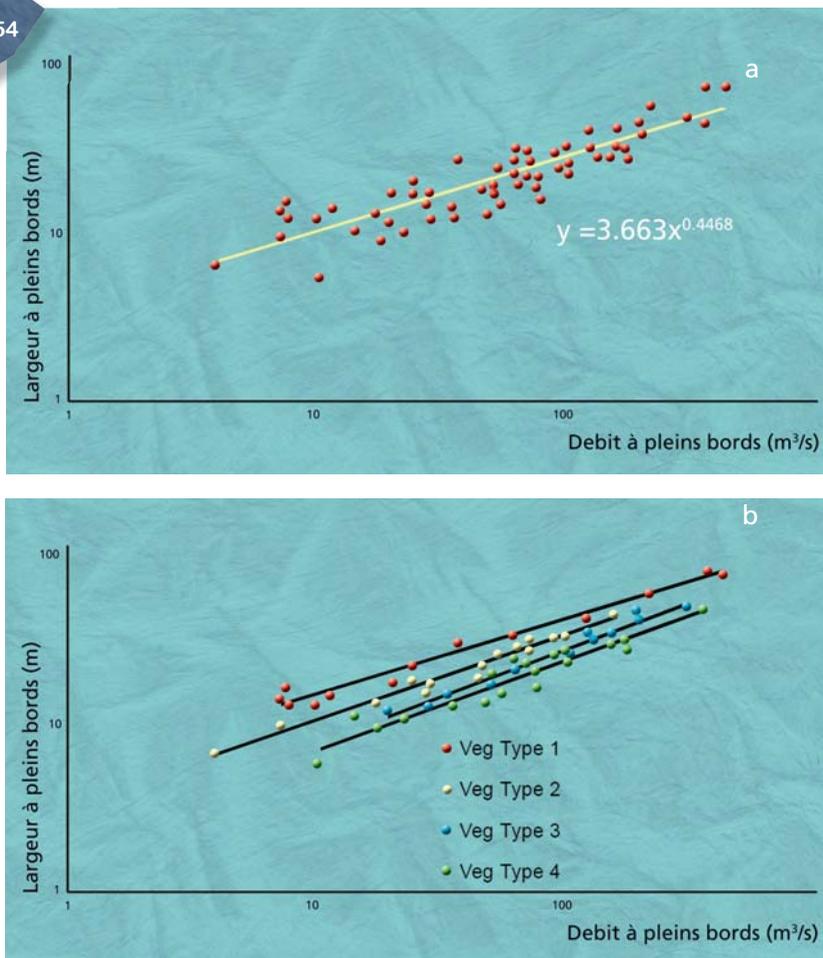
On voit ainsi que la largeur à pleins bords est quasiment divisée par 2 entre un tronçon de cours d'eau à berges non végétalisées (végétation type 1) et très végétalisées (végétation type IV).

Tableau 4

Les équations de Hey et Thorne et leur domaine d'application (1986).

Equations	Domaine d'application des équations (sur la base de l'échantillon étudié)
<p>Largeur à pleins bords (w)</p> <p>$W = 4.33 Q^{0.5}$ (m) végétation type 1</p> <p>$W = 3.33 Q^{0.5}$ (m) végétation type 2</p> <p>$W = 2.73 Q^{0.5}$ (m) végétation type 3</p> <p>$W = 2.34 Q^{0.5}$ (m) végétation type 4</p>	<p>Débit à pleins bords (Q) : 3.9 - 424 m³/s</p> <p>Débit solide à pleins bords (Qs) : 0.001 - 14.14 kg/s</p> <p>Diamètre médian des alluvions (D50) : 0.014 - 0.176 m</p> <p>Texture des berges : composites : gravier, sable fin, limon, argile</p> <p>Type de végétation rivulaire : 1 : 0 % d'arbres et arbustes, 2 : < 5 %, 3 : 5 - 50 %, 4 : > 50 %</p> <p>Pente de la vallée (Sv) : 0.00166 - 0.0219</p> <p>Tracé en plan : rectiligne à méandrique</p> <p>Faciès dominants : radiers/mouilles</p>
<p>Profondeur à pleins bords (d)</p> <p>$D = 0.22 Q^{0.37} D50^{-0.11}$ (m)</p>	
<p>Pente de la ligne d'eau à pleins bords</p> <p>$S = 0.087 Q^{-0.43} D50^{-0.09} D84^{0.84} Qs^{0.1}$</p>	

Figure 54



Les équations de géométrie hydraulique de Hey et Thorne (1986). (a) Présente le nuage de point sans séparer les types de végétation et (b) en les séparant. L'ajustement est bien meilleur.

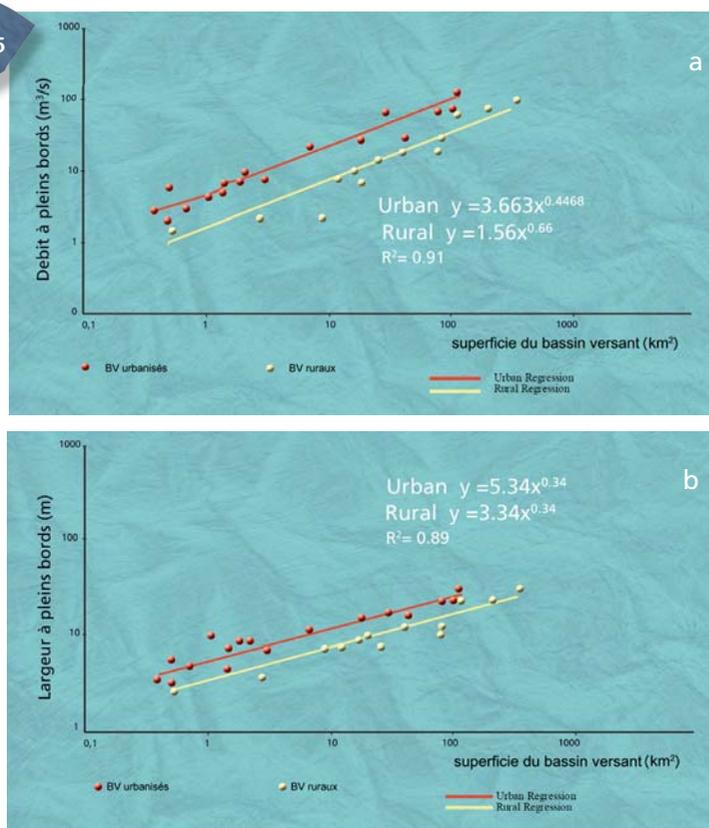
Ces équations peuvent présenter un grand intérêt en termes d'ingénierie hydromorphologique, notamment pour :

- évaluer l'impact d'aménagements hydrauliques (recalibrages, rectifications, etc.) ;
- déterminer les dimensions des lits à reconstruire dans le cadre d'opérations de restauration hydromorphologique.

Notons que des recherches sont toujours en cours pour améliorer les connaissances dans ce domaine.

Outre les aspects régionaux, les chercheurs intègrent par exemple aujourd'hui le niveau d'urbanisation du bassin versant (ci-dessous).

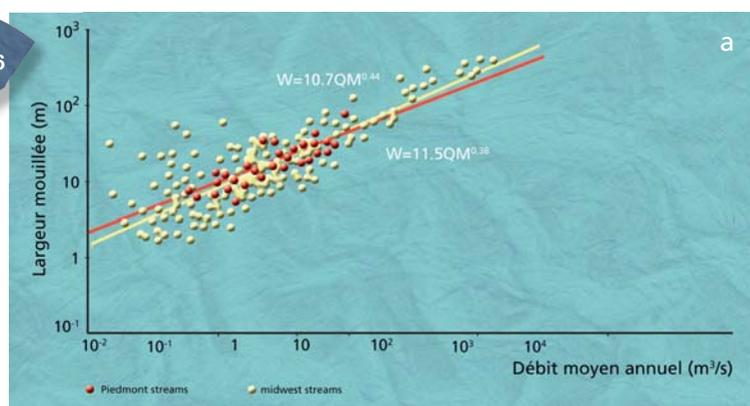
Figure 55



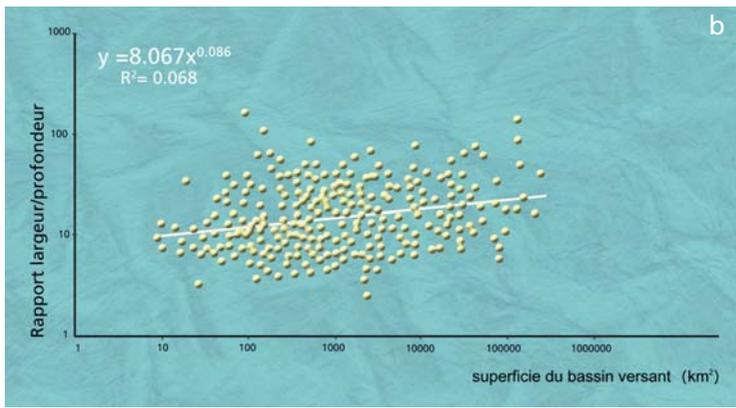
Exemples de relations de géométrie hydraulique intégrant le niveau d'urbanisation du bassin. On observe que, à superficie de bassin versant identique, les rivières à bassin versant urbanisé ont des débits plus importants et corrélativement des largeurs plus fortes que celles coulant en bassin rural (Harman et al., 1999).

Attention. La dispersion des données originales reste à parfois forte, même pour des données régionalisées (exemples ci-dessous). Il doit probablement manquer une discrimination sur d'autres variables de contrôle (végétation rivulaire, texture des berges, etc.). Il n'y a peut-être tout simplement aucune corrélation à trouver... (figure 56b).

Figure 56



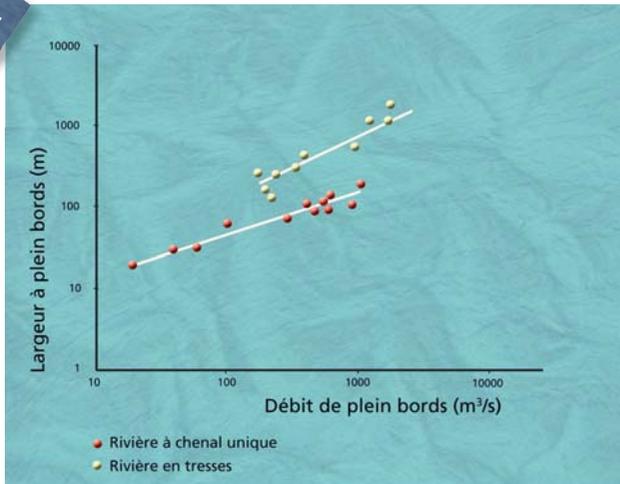
(a) Exemple de corrélations largeur mouillée/débit moyen régionalisées (Kolberg et Howard, 1995).



(b) Exemple de corrélation entre la surface du BV et le rapport largeur/profondeur (Tennakoon et Marsh, 2008, mesures régionalisées sur des rivières du Queensland australien). On observe régulièrement un facteur 10 d'écart entre les plus faibles et les plus fortes valeurs !

Notons aussi, mais nous y reviendrons, qu'à débit égal, les rivières en tresses sont généralement beaucoup plus larges (et beaucoup moins profondes) que les rivières à chenal unique. La figure ci-dessous indique un coefficient de l'ordre de 3 à 5 entre les deux types de fonctionnement.

Figure 57



Différence de largeur entre les rivières à chenal unique et les rivières en tresses, pour un débit équivalent (Ashmore, 1999).

Visualisons enfin, sur la figure suivante le résultat concret de la confluence de deux cours d'eau de même largeur, qui se traduit par un cours d'eau... deux fois plus large (c'est presque trop beau pour être vrai...).

Figure 58



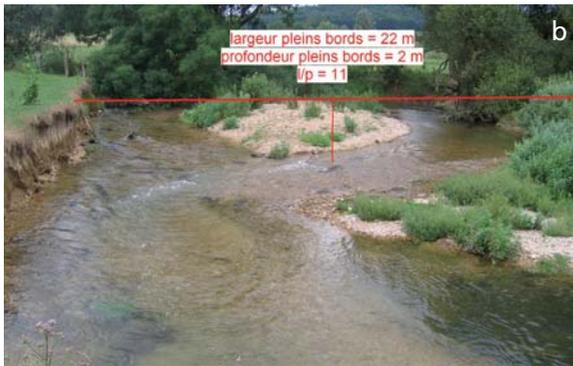
Une application des lois de géométrie hydraulique. $6 + 6 = 12$ (Parc de Yellowstone, USA).

Le rapport largeur/profondeur

Le rapport de la largeur sur la profondeur moyenne à pleins bords (noté l/p) est une caractéristique géométrique intéressante à plusieurs titres.

D'un point de vue hydromorphologique, c'est un paramètre typologique **indicateur de l'activité géodynamique d'un cours d'eau**. Ainsi, les cours d'eau à dynamique plutôt active, caractérisés par des processus érosifs latéraux importants et des apports solides assez élevés, ont des rapports l/p plutôt forts (20 ou plus). Les **rivières en tresses** ont souvent des rapports l/p proches de 100 ou supérieurs à 100.

Figure 59

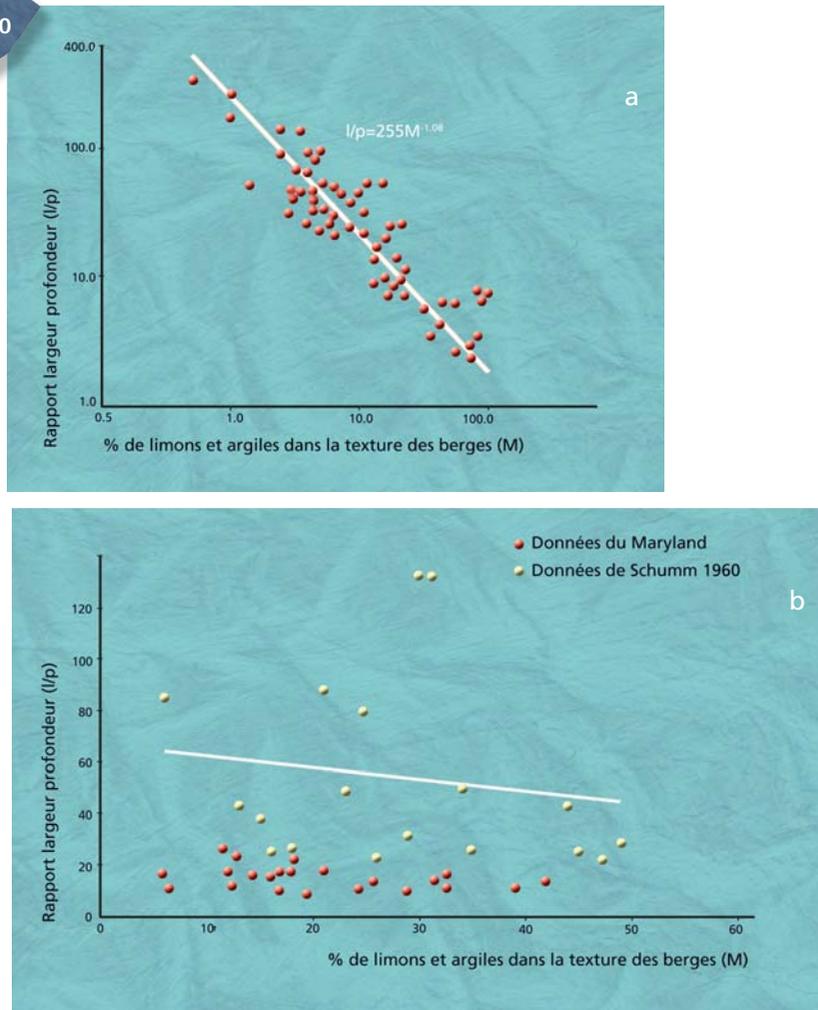


a- b- c- d- © J.R. Malavoi

Quelques exemples de valeurs de rapport largeur/profondeur. On visualise bien la corrélation avec l'intensité des processus géodynamiques (érosion latérale et transport solide).

Le rapport l/p donne aussi des indications sur la **cohésion des berges** : plus celles-ci sont cohésives, plus les cours d'eau sont étroits et profonds. Inversement, si les berges sont peu cohésives, les cours d'eau ont tendance à être plus larges et moins profonds (figure 60). On retrouve ici les mêmes tendances que celles liées à la présence de végétation rivulaire, les deux paramètres (végétalisation et cohésion) jouant dans le même sens en favorisant l'érosion verticale aux dépens de l'érosion latérale ou l'inverse. Attention, là encore la dispersion est forte (facteur 3 à 5 entre les fourchettes basses et hautes) mais les approches régionales récentes tendent à la réduire.

Figure 60



(a) Rapport l/p en fonction du pourcentage de limons et argiles dans les berges (d'après Schumm, 1960). (b) Une partie des données de Schumm confrontées à des données du Maryland, très en dessous (McCandless et Everett, 2002).

Attention. Malgré les incertitudes qui subsistent, on voit bien à travers ces exemples qu'un **faible rapport largeur/profondeur (c'est-à-dire caractérisant un cours d'eau étroit et profond) n'est pas forcément synonyme de dysfonctionnement** hydromorphologique, comme on peut parfois le penser. Ce sont des caractéristiques qui peuvent être tout à fait naturelles et liées notamment à la texture des berges (qui est l'une des variables de contrôle secondaires). C'est l'étude hydromorphologique qui doit déterminer si ces caractéristiques sont naturelles ou liées à des altérations d'origine anthropique.

Le débit à pleins bords

Parmi les apports les plus intéressants de ces cinquante années de recherche sur les relations de géométrie hydraulique, on trouve l'analyse de la récurrence des débits à pleins bords (pour les mesures de terrain, voir le chapitre outils).

Dès les années 50, les pionniers de la géomorphologie fluviale (Wolman, Leopold, etc.) ont pu montrer que le **débit remplissant le lit moyen d'un cours d'eau avant débordement dans la plaine alluviale était un débit de fréquence relativement forte** (en général la crue annuelle à biennale). Plusieurs décennies de recherche ont confirmé ces mesures initiales et il est aujourd'hui couramment admis que le débit à pleins bords d'un cours d'eau est **proche de la crue journalière de fréquence biennale**, même si de légères différences régionales existent (voir tableau 5), notamment en fonction de la texture des berges et des caractéristiques du bassin versant (on trouve des rivières débordant à Q1an et d'autre à Q3ans, mais extrêmement rarement, sauf après intervention humaine, à Q0,5ans ou Q10ans).

NB Cette loi géomorphologique n'est valable que pour des cours d'eau peu anthropisés et n'est pas clairement démontrée pour les rivières en tresses.

Les raisons de cette géométrie adaptée à un débit fréquent sont encore mal connues. De nombreux auteurs invoquent le concept de débit dominant (*dominant discharge*), débit fréquent capable de modeler la section la plus efficace pour transporter régulièrement vers l'aval la quantité de sédiments fournie par le bassin versant. Ce débit dominant correspondrait au débit à pleins bords.

Tableau 5

Exemples de fréquence du débit de pleins bords selon divers auteurs (synthèse de Wilkerson, 2008).

Zone étudiée	Période de retour du débit à pleins bords (Qpb)	Auteurs
Ouest des Etats-Unis	1,4 (moyenne)	Castro et Jackson (2001)
Belgique	0,7 - 5,3	Petit et Pauquet (1997)
Moitié est des Etats-Unis	1,5	Leopold <i>et al.</i> (1995)
Wyoming (bassin de la Green river)	1,7 (médiane)	Lowham (1982)
Amérique du nord	1,58	Dury (1981)
Nord ouest du bassin du Colorado	1,18 - 1,4 (mode)	Andrews (1980)
Queensland (Australie)	1,1 - 1,85	Dury <i>et al.</i> (1963)
Angleterre et Pays de Galles	0,46	Nixon (1959)

Cette loi présente diverses applications très intéressantes dans le domaine de l'ingénierie hydromorphologique :

- elle permet de sensibiliser les riverains au fait qu'une rivière naturelle déborde souvent dans son lit majeur et qu'il ne s'agit donc pas d'un dysfonctionnement... mais plutôt d'un indicateur de bon fonctionnement ;
- elle permet d'identifier, voire de quantifier l'impact de certains types d'aménagements hydrauliques (recalibrages notamment). Si le débit à pleins bords s'éloigne notablement de Q2 (si le débordement ne se fait qu'à partir de Q5 par exemple), on peut être certain qu'il y a eu recalibrage, avec les conséquences hydromorphologiques et écologiques que l'on connaît (Wasson *et al.*, 1998) ;
- elle peut aider à dimensionner un nouveau lit dans le cadre d'une opération de restauration hydromorphologique.