

---

# Une approche rationnelle de la morphologie fluviale

## *A rational approach to river morphology*

Marcel Ramette

Ingénieur de Recherches  
Attaché au Département Laboratoire National d'Hydraulique (LNH)  
6, quai Watier – Chatou

---

La morphologie fluviale s'intéresse aux formes des fleuves.

C'est une science qui est directement liée à l'environnement et aux activités de l'homme ; elle doit en principe être capable d'expliquer et de quantifier les phénomènes non seulement pour une simple satisfaction de l'esprit mais aussi pour répondre au problème essentiel du devenir d'un fleuve modifié par l'homme dans telle ou telle partie de son cours.

Que cherche le néophyte, ingénieur ou étudiant, qui ouvre un traité de morphologie fluviale ? Une description qualitative des différents types de cours d'eau, certes, mais aussi une réponse à des questions qu'il se pose sinon à des problèmes concrets qu'il doit résoudre :

Pourquoi des lits rectilignes, d'autres sinueux, certains étroits, d'autres très larges, des îles dans telle rivière et pas dans telle autre ?

Comment va réagir un cours d'eau dont on modifie certaines de ses caractéristiques ?

A quelles lois ou principes obéissent donc les cours d'eau ?

Or que trouve ce néophyte dans son traité de morphologie fluviale ?

En premier lieu des descriptions nombreuses de types de rivières qui lui confirment, si besoin était, la diversité et la complexité du domaine qu'il aborde.

Il s'attend donc à trouver, dans la suite de sa lecture, un schéma directeur simple qui, en élaguant l'accessoire de l'essentiel, le conduise à comprendre le pourquoi des choses avant d'entrer dans le détail des phénomènes.

En fait il va trouver une quantité de résultats d'expériences ou d'observations, certaines datant du début du siècle, et desquelles sont extraites des corrélations, parfois très convaincantes, mais parfois assorties de réserves telles que "ces corrélations ne sont valables que pour les rivières indiennes ou bien égyptiennes... ou de telle région des Etats-Unis".

Il va s'interroger sur la "théorie du régime" qui n'a de théorique que le nom.

Bref il restera sur sa faim et sans doute refermera-t-il le Traité persuadé que cette science, sans lien apparent avec les notions d'Hydraulique que l'Ecole lui a enseignées, assortie de quantités de réserves sur le domaine de validité de telle ou telle corrélation, est avant tout une science expérimentale que seuls les vieux spécialistes chevronnés peuvent manipuler avec précaution.

Théoriquement en effet, à partir des seules lois connues à la disposition des hydrauliciens le schéma directeur que recherchait le néophyte ne peut pas être bâti, le problème "morphologie fluviale" ne peut pas être fermé au sens mathématique du mot ; pour être davantage qu'une science des corrélations il faut ajouter quelques relations supplémentaires aux équations connues de l'hydraulique classique.

Deux études récentes faites à Chatou<sup>(1)</sup> nous ont convaincus que ces relations supplémentaires pouvaient découler de quelques principes imaginés a priori et qui, sans être choquants pour l'esprit, avaient l'avantage de permettre de bâtir ce schéma directeur et de retrouver ainsi la plupart des corrélations admises.

Il nous a semblé intéressant de résumer les 2 études citées en référence dans ce rapport synthétique qui pourra servir de base de réflexions à quiconque veut s'initier à la morphologie fluviale et qui incitera peut-être le spécialiste à considérer cette science avec une autre optique.

---

(1) M. Ramette.

1) Cours d'eau sauvages – Cours d'eau aménagés – Rapport E40 79/10bis

2) Canaux alluviaux – critères de stabilité – Rapport E40 79/15

## Paramètres et Lois connues intervenant en morphologie fluviale

### Paramètres

• Une rivière peut être géométriquement définie en un certain point de son cours par :

- sa largeur :  $L$
- sa profondeur :  $H$
- la longueur d'onde de ses méandres  $2B$
- l'amplitude de ses méandres :  $2A$
- la pente de sa ligne d'eau  $J_1$

Soit 5 paramètres géométriques fonction de l'abscisse comptée depuis l'origine amont du cours d'eau.

• Les paramètres qui influencent le creusement du lit sont : le débit, les sédiments qui constituent ce lit et que l'on peut caractériser schématiquement par 2 diamètres : un diamètre moyen et un diamètre maximum, et enfin la pente générale de la vallée dans laquelle s'écoule la rivière :

- Débit  $Q$
  - diamètre moyen  $d_m$
  - diamètre "maximum"  $d_{90}$
  - pente de la vallée  $J_0$
- $$\delta = \frac{d_{90}}{d_m}$$

Soit 4 paramètres, qui sont en fait les données du problème, eux aussi dépendant de l'abscisse et en fonction desquels on cherche à calculer les 5 paramètres géométriques du cours d'eau.

### Lois connues – (1ère relation)

Il n'existe a priori qu'une seule loi connue ; c'est celle qui régit l'écoulement de l'eau ; nous adopterons la loi de Manning Strickler :

$$Q = K_s \frac{(LH)^{5/3}}{(L + 2H)^{2/3}} J_1^{1/2} \quad (I)$$

$K_s$ , coefficient de rugosité, nous le verrons plus loin, est une fonction de  $H, L, d_m$  et  $J_1$ .

Nous disposons donc d'une seule relation :

$$Q(L, H, d_m, J_1) \quad (II)$$

pour déterminer 6 inconnues :  $K_s, L, H, J_1, A, B$ , fonctions de l'abscisse. Il faut donc trouver cinq relations complémentaires pour résoudre le problème, relations dans lesquelles devront apparaître des paramètres fonction de l'abscisse.

### Lois hypothétiques auxquelles obéiraient les cours d'eau

#### Remarques préliminaires

Avant d'énumérer ces lois nous ferons quelques remarques préliminaires qui nous permettront d'apporter une certaine justification aux hypothèses qui seront faites.

Le lit d'un cours d'eau, tel qu'on l'observe à une certaine époque a une histoire : à l'origine de sa forma-

tion il était constitué d'un écoulement liquide s'étalant dans une vallée dans laquelle, à partir d'une zone préférentielle située probablement sur la ligne de plus grande pente et si sa puissance érosive le permettait, il a creusé un lit pour "s'enterrer" progressivement jusqu'à permettre l'évacuation de la totalité du débit qui lui venait d'amont.

Dans certains cas, pour des rivières "jeunes", ce creusement n'est pas achevé; dans la plupart des cas le lit a atteint sa configuration définitive.

Qui dit creusement dit travail et l'on peut imaginer que le cours d'eau, obéissant à la loi du moindre effort, qui est une règle assez générale dans la nature ou chez l'homme, a essayé de dépenser un minimum d'énergie potentielle de creusement pour récupérer, en fin d'opération, un maximum d'énergie cinétique afin de réaliser un rendement énergétique maximum.

Dans cette tendance au moindre effort l'écoulement n'essaie sûrement pas de creuser un lit dont la pente serait supérieure à la pente que lui offre la vallée sous peine d'excaver inutilement son cours aval ou bien de creuser un lit trop "confortable" pour évacuer le débit maximum le plus fréquent qui lui vient d'amont.

On voit donc apparaître deux premières conséquences à cette loi de moindre effort :

- La première est que la pente du cours d'eau est au plus égale à celle de la vallée.
- La seconde est que le lit a tendance à s'organiser pour évacuer à plein bord le débit le plus fréquent et ce quelle que soit l'abscisse considérée.

Une autre "préoccupation" pour le cours d'eau est d'évacuer, en même temps que le débit liquide, le débit solide et l'on peut supposer que les différentes sources qui convergent vers le point origine amont du cours d'eau principal pour constituer le débit liquide  $Q$ , sont issues de vallées à pente plus forte et entraînent avec elles un matériel solide considérable qui sature l'écoulement liquide ; et c'est l'hypothèse que nous ferons, à savoir que le cours d'eau doit évacuer le maximum possible de débit solide (une justification a posteriori de cette hypothèse est donnée dans la conclusion).

En définitive et par ordre de priorité le cours d'eau doit s'organiser pour obéir aux règles suivantes :

#### Contraintes :

- Ecoulement à plein bord du débit  $Q$
- Saturation en débit solide et, bien entendu, continuité de ce débit solide.

#### Principe :

- Rendement énergétique maximum pour le creusement du lit.

Compte-tenu des 2 contraintes précédentes on conçoit que cette dernière règle ne pourra peut-être être respectée qu'à partir d'une certaine abscisse où le lit atteindra un état d'équilibre lui permettant de respecter à la fois les contraintes et le principe du rendement énergétique maximum.

La contrainte "Ecoulement à plein bord du débit" a été traduite par l'équation (I) de Manning Strickler. Nous allons traduire la contrainte "saturation en débit solide" et le principe "rendement maximum".

**Saturation en débit solide (2e relation)**

Si l'on se réfère à l'équation (I) on constate qu'il existe une infinité de couples  $L, H$ , permettant l'écoulement à plein bord du débit liquide.

A chacun de ces couples de valeurs  $L, H$ , correspond une valeur du débit solide  $G$  et on conçoit que pour un seul couple de ces valeurs,  $G$  pourra présenter un maximum.

Dans la partie amont d'un cours d'eau les sédiments sont en général suffisamment grossiers pour supposer que leur transport se fait surtout par charriage sur le fond.

Une formule couramment utilisée dans ce cas est celle de Meyer Peter.

$$G = K L (\tau - \tau_c)^{3/2} \quad (III)$$

- $G$  = débit solide en  $m^3/s$
- $K$  = constante
- $\tau = \bar{\omega} R_H J_1 \cdot \alpha$
- $\tau_c \neq 0,08 d_m$
- $R_H$  Rayon hydraulique
- $L$  largeur
- $J_1$  pente locale
- $\alpha$  coefficient  $< 1$  tenant compte des ondulations du fond.

Localement et pour  $Q, J_1, d_m$  donnés :

d'après (II)  $G = f [H, L]$

d'après (I)  $H = \varphi [L]$

et donc  $G = \psi [L]$

la saturation, c'est-à-dire le maximum de débit solide, sera déterminée par  $dG = 0$  soit  $\psi'(L) = 0$

$L$  sera donc connu et on en déduira  $H$ .

Il est intéressant de traduire la saturation en débit solide d'une façon plus générale en introduisant les paramètres sans dimensions :

$$\beta = \frac{L}{H} \quad \text{et} \quad \gamma = \frac{\tau}{\tau_c}$$

On trouvera le détail des calculs dans le rapport cité en référence<sup>(2)</sup> qui aboutissent aux relations de saturation suivantes :

$$\beta = \frac{30\gamma - 12}{10 - \gamma} \quad \text{ou} \quad \gamma = \frac{10\beta + 12}{30 + \beta} \quad (IV)$$

qui ne sont en fait que des approximations car ces relations sont établies en supposant  $K_s$  constant.

La relation (I) de Manning Strickler peut elle aussi s'exprimer avec ces mêmes paramètres (relation VIII du rapport (1)).

$$\frac{\gamma(\beta + 2)^{3/4}}{\beta^{3/8}} = \frac{17,1}{K_s^{3/8}} \delta^{1/4} Q^{3/8} d_m^{-3/4} J_1^{13/16} \quad (V)$$

(2) "Cours d'eau sauvages - Cours d'eau aménagés", LNH N° E40 - 79 - 10 bis.

La relation IV ( $\beta, \gamma$ ) est tracée sur la figure 1.  
La relation V ( $\beta, \gamma$ ) ne peut être tracée que si  $J_1$  et  $K_s$  sont donnés.

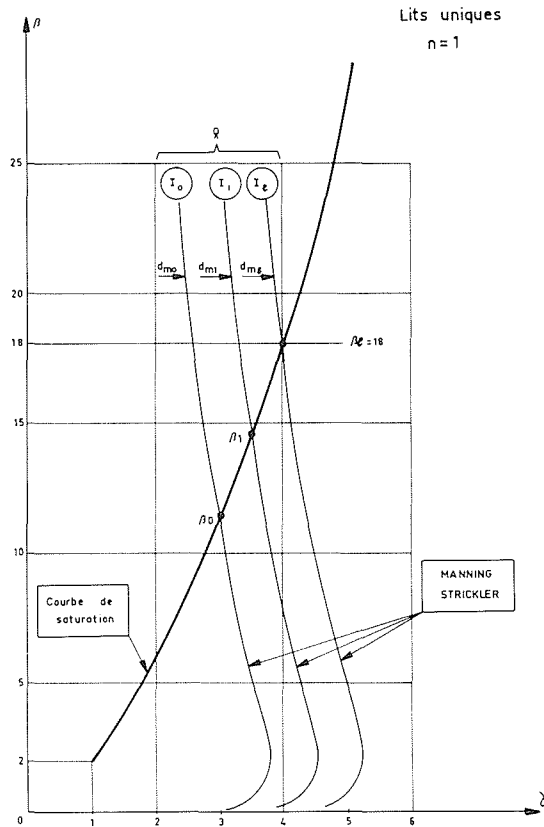
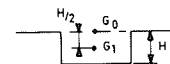


Figure 1

**Principe de "rendement" maximum (3e relation)**

Pendant la phase de creusement depuis la surface de la vallée jusqu'au fond du lit de profondeur  $H$ , le centre de gravité de l'écoulement s'est abaissé de  $H/2$ .

$\rho g Q \frac{H}{2}$  représente l'énergie potentielle de creusement de la masse  $\rho Q$ .



Si  $V_0$  était la vitesse initiale de cette masse et  $V$  la vitesse après creusement, l'énergie cinétique récupérée est :

$$\rho \cdot Q \cdot \frac{V^2 - V_0^2}{2}$$

Le rendement énergétique est maximum si :

$$\frac{V^2 - V_0^2}{gH} \quad \text{est maximum}$$

$V_0$  étant une constante initiale il faut donc :

$$\frac{V^2}{gH} \quad \text{maximum}$$

$\mathcal{F}_i = V/\sqrt{gH}$  est le nombre de Froude de l'écoulement après creusement.

Le rendement est donc maximum si  $\mathcal{F}$  est maximum ; c'est-à-dire, puisque  $V = Q/LH$ , que  $LH^{3/2}$  doit être minimum

$$\text{soit : } \frac{dL}{dH} = -\frac{3L}{2H} = -\frac{3}{2}\beta \quad (\text{VI})$$

L'équation différentielle que l'on peut tirer de l'équation de Manning Strickler (I) en supposant en première approximation  $K_s = C^{\text{ste}}$

$$\text{s'écrit : } d \cdot \frac{(LH)^{5/3}}{(L+2H)^{2/3}} = 0$$

soit, tous calculs faits :

$$\frac{dL}{dH} = -\frac{L}{H} \frac{5L+6H}{3L+10H} \quad (\text{VII})$$

La combinaison de (VI) et (VII) donne :

$$\frac{L}{H} = \beta = 18 \quad (\text{VIII})$$

Et on constate que le rendement énergétique est maximum pour la valeur  $\beta = 18$  à laquelle, d'après (IV), correspond la valeur  $\gamma = 4$ .

#### Expression de $K_s$ (4e relation)

$K_s$ , coefficient de rugosité de Manning Strickler exprime la perte de charge due au frottement sur le fond du cours d'eau déformé éventuellement par les ondulations (dunes, rides etc. . .) que le courant peut engendrer.

Dans le domaine des dunes et rides les pertes de charge ont fait l'objet d'études expérimentales très poussées en particulier par Engelund.

Le résultat de ces études a été mis sous une forme analytique par Chollet et Cunge<sup>(3)</sup> et nous avons montré<sup>(4)</sup> que cette expression analytique :

$$K_s = 11,3 \sqrt{g} d_m \left[ \frac{\beta + 2}{\beta H} \right]^{2/3} \left[ 0,06 + 0,16 \left( \frac{H J_1}{d_m} \right)^2 \right]^{5/8} J_1^{-5/8} \quad (\text{IX})$$

était équivalente, dans un domaine très large de variation des paramètres, à l'expression suivante :

$$K_s = 8,70 \left( \frac{10\beta + 12}{30 + \beta} \right)^{0,907} \frac{(\beta + 2)^{0,667}}{\beta^{0,306}} \frac{d_m^{0,737}}{Q^{0,361} J_1^{0,727}} \quad (\text{X})$$

(3) Journal of Hydraulic Research, Vol. 17, 1979, N° 1.

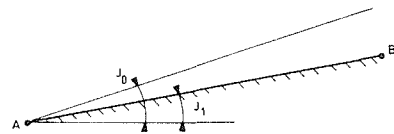
(4) Rapport LNH E40/79/15

#### Remarques sur $J_1$ et sur l'aspect du lit

Nous avons vu précédemment que  $J_1$  était au plus égal à la pente générale de la vallée  $J_0$ .

Dans le cas où  $J_1 = J_0$  l'axe du lit du cours d'eau ne peut que coïncider avec la ligne de plus grande pente de la vallée, supposée plane ; il est donc *rectiligne*.

Si  $J_1 < J_0$  le lit ne peut rester rectiligne que si l'on suppose que sa partie amont peut "s'enfoncer" comme indiqué sur le schéma en basculant autour d'un point A aval (le littoral par exemple). Ceci supposerait donc, puisque le point A est quelconque, que le point B caractérisant le fond du lit à l'origine amont est lui aussi quelconque



Or ce point ne peut être quelconque car il définit la côte de fond du profil en travers qui doit répondre par hypothèse à deux contraintes :

- évacuation à plein bord du débit  $Q$
- saturation en débit solide.

Cette éventualité d'un lit rectiligne avec  $J_1 < J_0$  ne peut donc être retenue.

$J_1 < J_0$  ne peut se traduire que par un lit qui augmente la longueur de son cours en serpentant autour de la ligne de plus grande pente c'est-à-dire par l'apparition de méandres.

On peut maintenant se poser la question suivante :

Quel est le critère d'apparition de ces méandres ?

Nous avons vu plus haut que le lit s'organisait progressivement de l'amont vers l'aval pour répondre

- d'une part à 2 contraintes :
  - écoulement à plein bord du débit liquide,
  - saturation en débit solide;
- d'autre part à loi du moindre effort.

Tant que le cours d'eau peut répondre aux 2 contraintes en écoulant le débit  $Q$  sous la pente  $J_1 = J_0$  il le fera sous peine d'excaver un lit de section plus grande que nécessiterait  $J_1 < J_0$  ce qui irait à l'encontre de la loi du moindre effort.

Dans la partie amont du cours d'eau on peut donc admettre que  $J_1 = J_0$  et que le lit sera en général rectiligne.

Dans ces conditions quel est le paramètre qui, variant avec l'abscisse, peut justifier d'une évolution du lit d'une configuration rectiligne vers une configuration à méandres ? Parmi les quatre paramètres cités au début de cet article et si l'on suppose que  $Q$ ,  $J_0$ , et  $\delta$  (étendue granulométrique) sont fixés, le seul qui puisse varier avec l'abscisse est le diamètre  $d_m$  du sédiment qui, par usure, diminuera.

On peut donc concevoir que le lit évoluera depuis un profil amont, caractérisé par  $\beta_0$ , jusqu'au profil de "rendement énergétique" maximum correspondant à  $\beta = 18$ , valeur qu'il va garder plus en aval, et qui correspondra à l'apparition des méandres comme nous le justifions ci-après.

**Schémas d'évolution du lit**

Compte-tenu de ce qui vient d'être dit on peut maintenant proposer un schéma explicatif de description et d'évolution possible de divers types de cours d'eau en utilisant les axes  $\beta, \gamma$  de la figure 1.

*Relation de saturation*

La relation  $\beta = \frac{30\gamma - 12}{10 - \gamma}$  traduit (approximativement) la saturation en débit solide (fig. 1).

*Relation de Manning Strickler*

$$\frac{\gamma(\beta + 2)^{3/4}}{\beta^{3/8}} = \frac{17,1}{K_s^{3/8}} \delta^{1/4} Q^{3/8} d_m^{-3/4} J_1^{13/16} \quad (V)$$

Cette relation peut, elle aussi, être tracée sur la figure 1.

avec

- $d_m = d_{m0}$  (diamètre moyen du sédiment à l'origine amont)
- $\delta = \delta_0$
- $J_1 = J_0$  (pente de la vallée)
- $Q =$  débit en  $m^3/s$
- $K_s = F \cdot (\beta)$  donné par la relation (X)

*1<sup>ère</sup> configuration – Lit unique*

Soit  $(I_0)$  une première configuration de la courbe  $\beta, \gamma$  traduisant Manning Strickler et telle qu'elle coupe la courbe de saturation en un point  $\beta_0 < 18$ . Ce point caractérise le lit à sa limite amont car il répond aux 2 contraintes imposées.

Plus en aval, par usure, le diamètre caractéristique  $d_m$  a diminué jusqu'à la valeur  $d_{m1} < d_{m0}$ .

A cette nouvelle valeur de  $d_m$  correspond une 2<sup>ème</sup> courbe  $(I_1)$ ; il sera facile de s'assurer qu'elle a bien la configuration tracée sur la figure 1 et qu'il y correspond un 2<sup>ème</sup> point de fonctionnement  $\beta_1 > \beta_0$ .

Plus en aval encore il existe une valeur  $d_{m\ell} < d_{m1}$  et une seule, telle que la courbe  $(I_\ell)$  coupe la courbe de saturation au point  $\beta_\ell = 18$  correspondant à l'équilibre.

La valeur de  $d_{m\ell}$  peut être tirée de la relation de Manning Strickler dans laquelle on pose  $\beta = 18, \gamma = 4, K_s = f(18), \delta = \delta_0, J_1 = J_0$ .

Une relation d'usure du type suivant (5) :

$$d_m = d_{m0} e^{-Kx} \quad \text{avec } K = f(V, K_1) \quad (XI)$$

- $V$ , vitesse du courant
- $K_1$  coefficient caractérisant la dureté du sédiment permettra de déterminer l'abscisse  $x_\ell$  pour laquelle  $d_m = d_{m\ell}$ .

Sur toute la longueur  $x_\ell$  le lit reste rectiligne.

Si  $x > x_\ell$  le lit ayant atteint sa configuration d'équilibre,  $\beta_\ell = 18$ , il n'y a aucune raison qu'il évolue vers une valeur de  $\beta$  différente de 18.

La relation de Manning Strickler s'écrit alors :

$$Q^{3/8} d_m^{-3/4} J_1^{13/16} = C^{ste} = Q^{3/8} d_{m\ell}^{-3/4} J_0^{13/16} \quad (XII)$$

Mais  $d_m$ , en aval de cette abscisse  $x_\ell$ , continue de décroître. La relation précédente montre que dans ces conditions :

$$J_1 = J_0 \left( \frac{d_m}{d_{m\ell}} \right)^{12/13} \quad (XIII)$$

c'est-à-dire  $J_1 < J_0$  puisque  $d_m < d_{m\ell}$ .

Il y a donc apparition de méandres ; nous décrivons plus loin la méthode à suivre pour en déterminer les caractéristiques géométriques.

*2<sup>ème</sup> Configuration – lit multiple*

Soit  $(II_0)$  une deuxième configuration de la courbe  $\beta, \gamma$  traduisant Manning-Strickler et telle qu'elle coupe la courbe de saturation en un point  $\beta_0 > 18$  (fig. 2). Ce point ne correspond pas, comme précédemment, au point de fonctionnement amont du cours d'eau. Pourquoi ? En effet si l'on imagine l'"histoire" du creusement du lit il y a eu, forcément, pour un certain débit  $Q_\ell < Q$  une courbe  $(II_0)$  (fig. 2) passant par le point  $\beta_\ell = 18$  et qui répondait aux 2 contraintes : écoulement à plein bord du débit  $Q_\ell$ , saturation en débit solide, et qui de plus correspondait au rendement énergétique maximum.

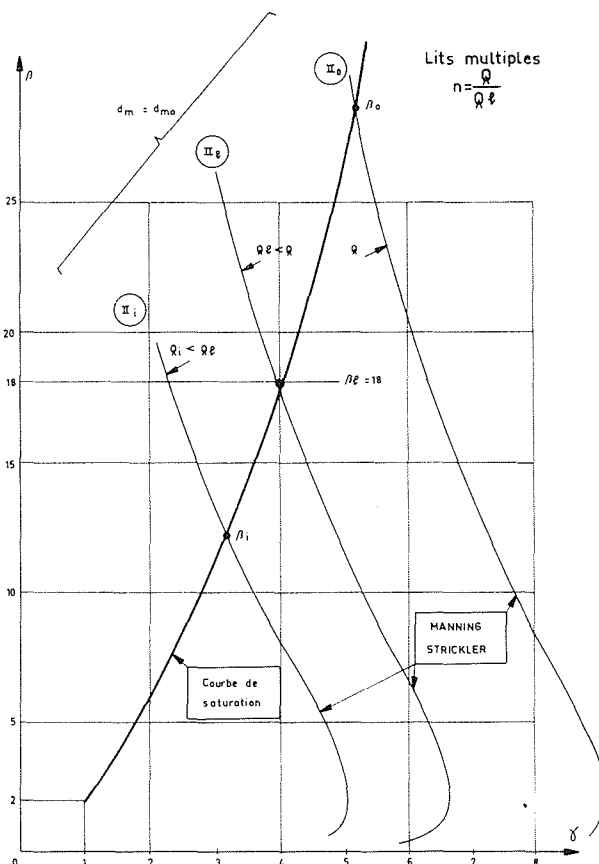


Figure 2

(5) Janos – Bogardi "Sediment transport in alluvial streams" pages 328-345.

A ce point  $\beta_0$  correspondait donc un lit en équilibre, et il n'y a aucune raison que l'écoulement ait recherché un autre équilibre ; par contre pour évacuer l'excédent  $Q - Q_0$  l'écoulement a dû creuser un autre lit ou deux ou n autres lits, chacun d'eux, autant que possible, en équilibre comme le premier.

La valeur de  $Q_0$  peut facilement être tirée de l'équation de Manning-Strickler dans laquelle on posera  $\beta = 18, \gamma = 4, \delta = \delta_0, d_m = d_{m0}, J_1 = J_0$ .

Le nombre de lits élémentaires à l'origine amont du cours d'eau sera donc :

$$n = \frac{Q}{Q_0}$$

Ainsi cette deuxième configuration correspondra aux lits multiples .

Bien évidemment, dans chacun des lits élémentaires constituant le lit multiple, le diamètre du sédiment,  $d_{m0}$  à l'origine, va décroître avec l'abscisse et un raisonnement identique à celui tenu précédemment montre que dans ces conditions la pente  $J_1$  des lits élémentaires sera inférieure à  $J_0$  ce qui engendrera des méandres.

Il y aura ainsi une juxtaposition de lits à méandres et on conçoit que le lit multiple résultant pourra, selon la valeur de  $n$ , correspondre à un lit avec îles ou à un lit très large en tresses "braided bed" selon l'expression anglo-saxonne.

**Caractéristiques des méandres**

Nous possédons deux éléments concernant les méandres .

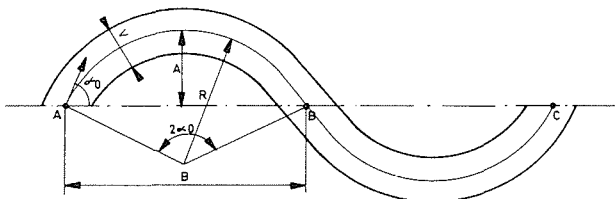
1) les méandres apparaissent pour  $\beta = 18$  et  $d_m < d_{m0}$ .

2) la pente de la ligne d'eau dans cette zone de méandres est donnée par l'expression (XIII) :

$$J_1 = J_0 \left( \frac{d_m}{d_{m0}} \right)^{12/13} \tag{XIII}$$

Ainsi, la connaissance de  $d_m < d_{m0}$  permettra, d'une part de déterminer  $J_1$  et par une équation d'usure du type (XI) l'abscisse correspondante ; d'autre part, à partir de l'équation de Manning Strickler écrite sous la forme (I), avec  $\beta = 18$ , de calculer  $H$  et  $L$ .

- Pour schématiser les méandres nous supposerons qu'ils sont à courbure constante et sont donc constitués d'arcs de cercle de rayon  $R$



Un raisonnement géométrique simple montre que :

$$J_1 = \frac{Z_A - Z_B}{\widehat{AB}} \quad J_0 = \frac{Z_A - Z_B}{AB}$$

$Z_A$  et  $Z_B$  : altitudes des points A et B

donc, d'après (XIII)

$$\frac{J_1}{J_0} = \left( \frac{d_m}{d_{m0}} \right)^{12/13} = \frac{\widehat{AB}}{AB} = \frac{2R \sin \alpha_0}{2R \alpha_0}$$

soit :

$$J_1 = J_0 \frac{\sin \alpha_0}{\alpha_0}$$

Ainsi tout angle  $\alpha_0$  répondant à l'égalité précédente définit un paramètre caractéristique du lit à méandres. La demi-longueur d'onde  $B$ , du méandre, est donnée par la relation :

$$B = 2R \sin \alpha_0$$

de même on trouvera comme demi amplitude :

$$A = R (1 - \cos \alpha_0)$$

$\alpha_0$  est calculable ; une expression de  $R$  en fonction des données devrait constituer la 5<sup>ème</sup> relation permettant de fermer le problème.

Aucune approche simple ne permet malheureusement d'établir cette relation et nous devons nous contenter, pour l'instant, d'une corrélation expérimentale proposée par Leopold et Wolman<sup>(6)</sup> qui posent :

$$R \sim 2 \text{ à } 3L$$

Dans ces conditions et en prenant  $R \# 2,5L$

$$\frac{B \# 5L \sin \alpha_0}{A \# 2,5L (1 - \cos \alpha_0)} \text{ avec } \frac{\sin \alpha_0}{\alpha_0} = \left( \frac{d_m}{d_{m0}} \right)^{12/13} \tag{XIV}$$

Ces expressions ne valent, bien entendu, que ce que vaut la corrélation  $R(L)$ .

**Conclusions**

A partir de deux équations connues :

Manning-Strickler et Meyer Peter, et moyennant quelques hypothèses et principes le problème morphologie fluviale peut donc être résolu dans son ensemble.

Bien entendu il s'agit d'une résolution schématique qui ne prétend pas être le reflet fidèle d'une réalité complexe mais il est très encourageant de constater que les expressions des grandeurs caractéristiques des cours d'eau, trouvées à partir des raisonnements exposés, ne sont pas en désaccord avec la plupart des corrélations significatives que l'on trouve dans les traités de morphologie fluviale (tableau en fin de chapitre).

Les principes et les hypothèses proposés ne seraient donc pas dénués de fondement ; ils peuvent être utilisés pour raisonner sur les tendances nouvelles vers lesquelles tendraient des cours d'eau modifiés par une quelconque intervention humaine ; nous en donnerons deux exemples simples en supposant les berges non protégées donc érodibles.

(6) J.C. Lebreton : Dynamique Fluviale.

Imaginons en premier lieu un cours d'eau à lit multiple défini par le point caractéristique  $\beta_0$  de la courbe  $(II_0)$  (fig. 2) et dans lequel on effectue un soutirage de débit :  $q$ . En aval de ce soutirage, le débit étant plus faible, la nouvelle courbe caractéristique peut très bien être similaire à la courbe  $(I_0)$  de la figure 1 et donc correspondre à un lit unique. Il y aurait donc, dans ce cas, passage d'un lit multiple à un lit unique.

Au lieu d'un soutirage s'il y a, au contraire, apport d'un débit  $q$  dans un lit unique, c'est une tendance au lit multiple qui peut apparaître.

Comme deuxième exemple, supposons un lit unique rectiligne saturé en débit solide ( $G \text{ m}^3/\text{s}$ ) et dans lequel on effectue localement une ponction permanente de graviers ( $g \text{ m}^3/\text{s}$ ) : en aval de cette ponction le nouveau débit solide est  $(G - g) \text{ m}^3/\text{s}$ .

A partir d'une formule du type Meyer-Peter il est toujours possible, en se donnant le débit  $Q$ , la pente  $J_0$  et le coefficient de rugosité  $k_s$  de tracer la courbe  $G(\beta)$  ; c'est ce qui est fait sur la figure 3. Cette courbe présente un maximum correspondant au point de fonctionnement initial  $\beta_0$ .

Le passage de  $G$  à  $(G - g)$  définit, pour la pente initiale  $J_0$ , deux nouveaux points de fonctionnement possibles :  $A$  et  $B$  de la figure 3.

Le point  $A$  pour lequel  $\beta < \beta_0$  correspondrait donc à un lit qui se rétrécit mais se creuse ; le point  $B$  pour lequel  $\beta > \beta_0$  correspondrait à un lit moins profond mais qui s'élargirait considérablement ; on voit mal par quels processus physiques le rétrécissement du lit ou bien l'exhaussement du fond pourraient se produire.

Par contre il existe un troisième point possible de fonctionnement,  $C$ , qui correspond à une deuxième courbe  $G(\beta)$  tracée avec  $J_1 < J_0$  et telle que son maximum corresponde au nouveau débit solide  $(G - g)$ .

Pour tendre vers une pente plus faible le cours d'eau

attaquera ses berges afin d'allonger la longueur de son lit en formant des méandres ; la nouvelle valeur de  $\beta$  n'étant guère différente de  $\beta_0$ , et  $J_1$  étant inférieur à  $J_0$  le nouveau profil en travers du lit aura une section plus grande que la section initiale pour écouler le débit  $Q$  mais pratiquement homothétique ; les processus physiques en jeu sont des processus de creusement et d'élargissement qui, bien que probablement complexes, sont parfaitement concevables.

Ainsi, un prélèvement de sable ou gravier dans une rivière se traduira en général par l'apparition de méandres ou bien, si les berges sont fixées, par une diminution de la pente et par des risques d'attaque localisée de ces berges du fait des vénérités de méandres.

On pourrait ainsi multiplier les exemples d'application des quelques idées exposées, soit pour appréhender les conséquences possibles d'interventions humaines sur les cours d'eau, soit pour aider à la compréhension de la morphologie des éléments d'un réseau hydrographique constitué d'affluents et de défluent.

Pour terminer il nous paraît important de souligner que la notion de saturation en débit solide que nous avons introduite est en fait plus qu'une hypothèse car elle justifie la stabilité du lit unique au point de fonctionnement  $\beta_0$ . En effet que signifie un lit localement instable ? C'est un lit dont les caractéristiques géométriques et en particulier la section mouillée évoluent dans le temps, évolution qui se traduit soit par une augmentation soit par une diminution de la section mouillée, c'est-à-dire par une augmentation du débit solide ou au contraire par une diminution du débit solide pour emporter l'excédent ou déposer le déficit de sédiments.

Si le débit solide est déjà maximalisé, ces évolutions de section ne peuvent évidemment se produire, le lit ne peut donc que rester stable au point de fonctionnement  $\beta_0$ .

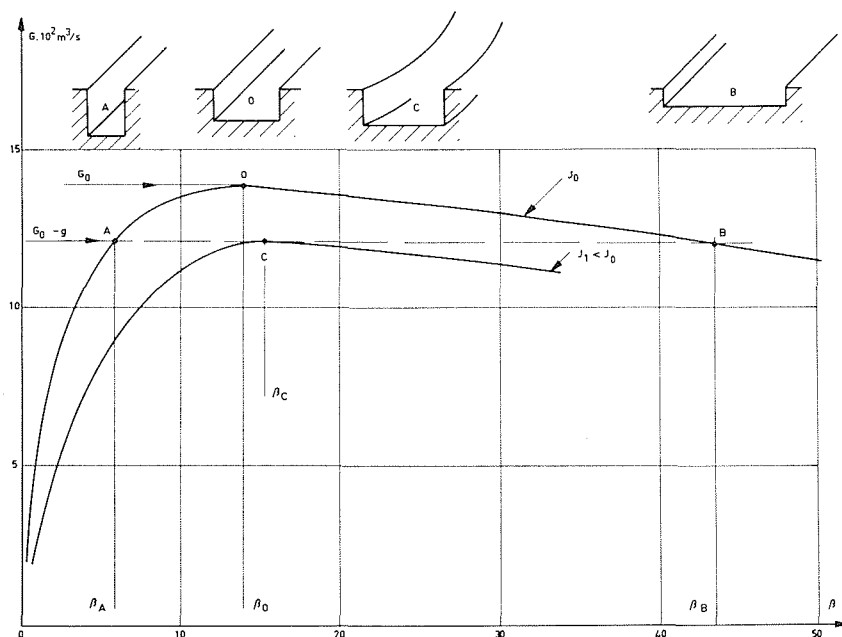


Figure 3

Ce point de fonctionnement caractérise non seulement la stabilité du lit d'un cours d'eau sauvage mais aussi, bien entendu, la stabilité d'un cours d'eau creusé de mains d'homme.

Effectivement, toutes les corrélations que l'on peut trouver dans la littérature concernant les caractéristiques des canaux artificiels stables sont très correctement recoupées par les relations que l'on peut calculer au point de fonctionnement  $\beta_0$ .

Dans le tableau suivant nous donnons un certain nombre d'expressions de grandeurs caractéristiques à l'équilibre de cours d'eau sauvages calculées, par simplification, avec  $K_s = 32$  et pour une plage de valeurs limites  $15 < \beta_0 < 21$  encadrant la valeur théorique  $\beta_0 = 18$ ; en regard les corrélations correspondantes, les plus significatives, que l'on trouve dans les traités de morphologie fluviale.

En bas de ce tableau une corrélation, intéressant les canaux artificiels stables, entre la section, le débit et le diamètre moyen des sédiments et que le calcul au point de fonctionnement retrouve très correctement à condition d'introduire une valeur de  $K_s$  plus exacte tenant compte des déformations du fond (relations IX ou X).

Relations calculées	Remarques	Corrélations expérimentales	Références
$d_{50} = \frac{0.35}{\delta} \left( \frac{1.3}{J_1} \right)^{1.1} \rho^{0.5}$	$\delta = \frac{d_{50}}{dm}$	$d_{90} = 2.7 J_1 \rho^{0.44}$	6, 7
$L = \frac{1.9}{\delta} \rho^{0.75} J_1^{-0.19}$ $L = \frac{1.9}{\delta} \rho^{0.625} J_1^{-0.19}$	Lits simples Lits multiples	$L = \frac{1.7}{\delta} \rho^{0.5} J_1^{0.2}$	9, 7
$L = \frac{1.27}{\delta} \rho^{0.46} d_m^{-0.07} \delta^{0.06}$			7
$2B = 12.8 \rho^{0.46} d_m^{-0.07} \delta^{0.06}$ $2B = 59 \rho^{0.46} \dots \dots \dots$ avec	$\delta = 10$ $d_m = 0.3 \text{ mm}$	avec $d_m = 0.3 \text{ mm}$ , $b = ?$ $2B = 51.3 \rho^{0.47}$	10, 7
$\frac{2B}{2A} = \frac{2 \sin \alpha_0}{1 \cos \alpha}$ $2 < \frac{2B}{2A} < 4.8$	$\frac{\pi}{4} < \alpha_0 < \frac{\pi}{2}$	$\frac{2B}{2A} \approx 2.5$	5, 7
$J_1 \sim \rho^{-0.15}$		$J_1 \sim \rho^{0.11} \delta^{-0.19}$	2, 7
$S = 2.2 d_m^2 \left( \frac{\rho}{d_m^2 \sqrt{15-11g}} \right)^{0.855}$ (Section en m <sup>2</sup> des canaux stables)	$S =$ densité du sédiment $g = 9.81 \text{ m/s}^2$	$S = 2.2 d_m^2 \left( \frac{\rho}{d_m^2 \sqrt{15-11g}} \right)^{0.855}$	11, 8

On constate que les relations calculées et les corrélations expérimentales ne sont pas fondamentalement différentes.

\*  
\* \*

Si ces quelques pages, volontairement dépouillées de tout développement fastidieux, servent au lecteur de fil directeur pour le conduire à travers cette science complexe qu'est la morphologie fluviale et si elles l'incitent à la réflexion et sans doute à la critique, elles auront atteint leur but.

### Bibliographie

- [1] SHUM. – *River Morphology*, Edité par Stanley et Schumm Colorado State University.
- [2] BOGARDI J. – *Sediment transport in alluvial streams*, Publié par Akademiai Kiado Budapest.
- [3] HENDERSON. – *Open channel flow*, Mac Millan, 1966.
- [4] LEOPOLD, WOLMAN, MILLER. – "*Fluvial processes in geomorphology*". Publié par W.H. Freeman and Company London.
- [5] LEBRETON J.C. – *Dynamique fluviale*, Editions Eyrolles Paris.
- [6] LARRAS J. – Problèmes d'hydraulique fluviale, *Annales des Ponts et Chaussées* N° 4, Juillet 1968.
- [7] RAMETTE. – Cours d'eau sauvage – Cours d'eau aménagés. Rapport LNH 40-79 – 10 bis.
- [8] Canaux alluviaux – critères de stabilité, Rapport LNH E 40-79-15.
- [9] PRUS CHACINSKI. – Discussion on flow in alluvial channels. . . , *Proceeding ICE*, Vol. 11, 1958.
- [10] ACHERS et CHARLTON. – Meanders geometry arising from varying flow, *Journal of Hydrology*, Vol. 11 N° 3, North Holland Publ. CO.
- [11] KONDAP et GARDE. – Design of stable channels, *Irrigation and Power*, Octobre 1979, N° 4.