

# L'influence du débit solide sur les lois d'écoulement d'un fleuve

## CAS PARTICULIER DE LA MEDJERDAH DANS LA DERNIERE PARTIE DE SON COURS

Le but de cette communication est de montrer comment les idées nouvelles sur l'influence du débit solide sur les lois d'écoulement dans les « rivières saturées » ont permis de faire progresser nos connaissances sur la Medjerdah et de préciser grâce à un modèle réduit, les moyens de lutte contre les crues qui dévastent périodiquement des dizaines de milliers d'hectares entre Tébourba et la mer.

Nous commencerons par indiquer rapidement les caractéristiques de la Medjerdah, les problèmes de lutte contre l'inondation qu'elle pose dans sa basse vallée et les grandes lignes du projet de limitation des inondations. Nous expliquerons en détail ensuite les moyens de contrôle de ce programme qui résultent de l'existence d'un modèle réduit du cours de la rivière et des lois récentes d'écoulement des débits liquides et solides. Nous terminerons en donnant un premier bilan des résultats obtenus.

\*\*\*

La Medjerdah, un des fleuves les plus importants de l'Afrique du Nord prend sa source en Algérie dans les monts de Tébessa. Son cours orienté d'Ouest en Est, entre en Tunisie à Ghardimaou. Il traverse la plaine de Souk-el-Arba et Souk-el-Khémis avant de franchir la Dorsale à Pont-de-Trajan et Testour; il entre après Medjez-el-Bab, à Tébourba, dans la basse plaine située à l'Ouest et au Nord de Tunis pour se jeter finalement en Méditerranée, à 9 kilomètres au Sud du Ras-el-Tarfâ (Porto-Farina).

Son bassin versant qui est de 23.000 km.-carrés, dans une région de pluviométrie comprise entre 400 et 550 millimètres (sauf quelques zones à forte pluviométrie) correspond à un apport annuel moyen d'environ 900 millions de mètres-cubes. L'importance de l'évaporation et des infiltrations, la pluviométrie très peu régulière, le climat méditerranéen, expliquent les variations considérables dans le débit qui peut descendre en étiage à 0,5 mètre-cube-seconde, à Bordj-Toum (entre Medjez-el-Bab et Tébourba) et dépasser en crue en ce même point 2.000 mètres-cubes. Le déboisement, le débroussaillage, souvent le mode de culture expliquent que les eaux emportent avec elles à la mer des quantités considérables d'alluvions. On peut pour s'en faire une idée citer les chiffres de 1948-1949 (année humide) :

entre le 11 novembre 1948 et le 21 janvier 1950, débit : 1 milliard de mètres-cubes; matériaux transportés : 17,5 millions de tonnes,

La concentration en matériaux solides varie de 10 à 15 grammes pour les petites crues (moins de 100 mètres-cubes) à 80 et 100 grammes pour les crues plus importantes. En aval de Tébourba la granulométrie en est plus constante; les produits sont fins, tous les graviers sont inférieurs à 0,4 millimètre et 60% sont inférieurs à 0,01 millimètre.

Ces transports solides qui paraissent s'amplifier depuis quelques années ne sont pas nouveaux. C'est à eux qu'est due la formation de la plaine qui s'étend de Tébourba à la mer. Nous ne nous étendrons pas sur ce sujet qui a déjà été décrit par de nombreux auteurs. Ceux-ci (1) ont étudié en détail la formation de la plaine et la divagation de la Medjerdah dans les cinq lits successifs qu'elle a occupés.

Actuellement, le lit même de l'oued entre Tébourba et la mer est constitué par une excavation assez régulière mesurant de 60 à 90 mètres de large et de 6 à 9 mètres de profondeur sous la crête des berges. Celles-ci et le fait capital, sont généralement surélevés par rapport à la plaine qu'elles dominent de 1 à 2,50 mètres si bien que les points hauts de la terrasse sont souvent constitués par les berges elles-mêmes.

Le profil en travers de la vallée comporte une crête axiale où le lit de l'oued est installé et deux dépressions longitudinales parallèles, formant la lettre W.

Ce phénomène est provoqué par l'alluvionnement intense au moment des crues.

Trois conséquences en résultent :

- 1°) Le lit majeur est constitué par toute la largeur de la vallée;
- 2°) Les nappes d'inondation qui franchissent les berges ne peuvent revenir au lit mineur et cheminent parallèlement à celui-ci.
- 3°) Aucun affluent sauf le Chaffrou ne se jette directement dans la Medjerdah entre Tébourba et la mer pour le grand dommage des terres traversées.

Dans cette plaine terminale, le lit mineur est capable de porter entre 700 et 800 mètres-cubes-seconde. Tout débit supplémentaire provoque donc des inondations aussi bien sur la rive droite que sur la rive gauche en des points où les berges sont les plus basses. Nous ne nous étendrons pas sur les points de débordement qui ont été décrits en détail par M. J.-L. Bonnenfant dans son rapport sur les moyens de lutter contre les inondations de ce fleuve.

---

(1) 1.884 - Charles TISSOT - Géographie comparée de la province romaine d'Afrique.

1.911 - Capitaine BERNARD - Le Golfe d'Utique et les boucles de la Medjerdah.

1.936 - J. L. BONNENFANT - Note sur la protection de la basse vallée contre les inondations.

Nous allons rapidement examiner les programmes de lutte contre l'inondation résultant de l'étude de M. J.-L. Bonnenfant, en divisant le cours qui nous intéresse en trois sections séparées par des points de changement de caractéristiques :

- Section à l'amont de Djedeïda;
- Section Djedeïda-Emissaire Henchir-Tobias;
- Section Emissaire - mer.

Sans compter sur l'effet d'amortissement des crues par des barrages de retenue situés en amont, qui n'écarteront pas les crues mais en diminueront seulement la probabilité, ce programme vise à augmenter le débit du lit mineur par trois méthodes :

1°) Envoi direct d'une partie des eaux de crue à la mer, pour éviter les débordements dans la section Emissaire-mer. L'ouvrage de l'Henchir-Tobias qui a été exécuté raccourcit le lit d'environ 10 kilomètres;

2°) Coupure des boucles les plus importantes du fleuve : Protville, Menzel-Rached (raccourcissement de 5 km.). Modifications des ouvrages limitant le débit ou produisant un décrochement dans la ligne d'eau : Djedeïda et El-Bathan;

3°) Endiguement partiel du lit mineur.

Ce programme doit être complété par des travaux d'assainissement des rives et par des mesures à prendre pour limiter les dégâts des crues dépassant le nouveau débit du fleuve.

Nous ne nous occuperons que de ce programme initial.

Son importance a amené la Direction des Travaux Publics de Tunisie à demander à la Société Neyrpic de construire un modèle réduit du cours de la rivière de Bordj-Toum à la mer pour étudier directement chacune des améliorations à apporter au fleuve.

En dehors des difficultés rencontrées pour la construction d'un modèle aussi vaste représentant 80 kilomètres du cours d'une rivière mal connue au point de vue débit et ligne d'eau, il y avait une difficulté de base touchant un problème même à résoudre qui a été créée par l'alluvionnement intense de l'oued. On pouvait immédiatement se demander comment l'oued réagirait devant des travaux devant rompre son équilibre ou contrecarrer son évolution naturelle. On pouvait également craindre des engravements provoqués par des dépôts solides. Le modèle réduit et la théorie devaient répondre à ces questions avant de pouvoir indiquer quantitativement l'intérêt de chacun des travaux projetés ou déjà exécutés.

Une hypothèse simplificative qui peut s'appliquer à la Medjerdah consiste à supposer que le profil en travers du lit n'est pas modifié avec le débit, que les berges sont stables et que seul le fond peut se remblayer ou se creuser. (Rivières dites endiguées). Cette stabilité des berges est naturelle et parfois accentuée par le travail des hommes.

Nous pouvons également considérer la Medjerdah comme une « rivière saturée ». Cette classification résulte des études récentes sur les pertes de charge des conduites pour différentes vitesses d'écoulement et différents débits solides transportés, études que l'on peut également appliquer aux canaux et rivières. Ces études ont mis en

évidence que le coefficient  $\lambda$  de perte de charge défini par la relation :

$$\Delta H = \lambda \frac{V^2}{2g} \frac{L}{D}$$

où  $\Delta H$  = perte de charge en hauteur de mixture entre 2 stations distances de L.

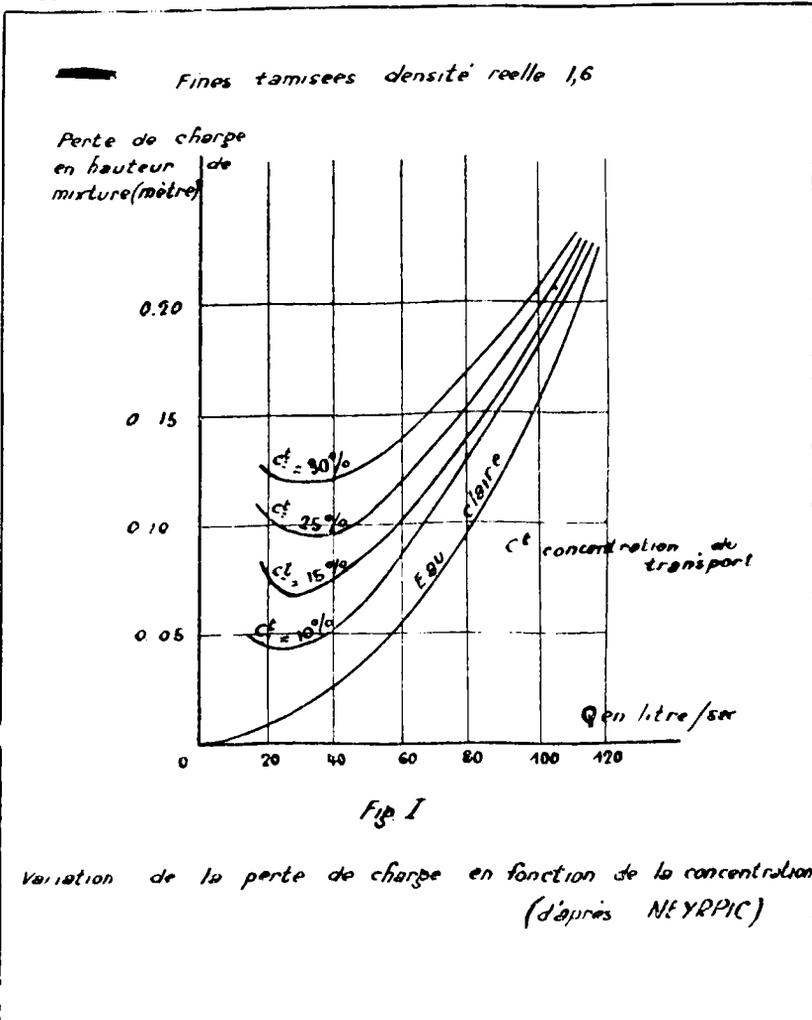
$\lambda$  = coefficient de perte de charge.

V = vitesse moyenne de l'écoulement.

g = accélération de la pesanteur.

D = diamètre de la conduite.

est fonction du débit solide.



Les courbes de la figure n° 1 déterminées au Laboratoire d'Hydraulique NEYRPIIC analogues aux courbes de Blatch Grégory et Siegfried montrent que le coefficient de perte de charge est très différent de celui trouvé en eau claire pour les vitesses faibles

Ceci s'explique par le fait que l'énergie dépensée à maintenir les matériaux en suspension intervient directement dans la perte de charge et en sens contraire dans la turbulence.

On peut dire que pour un même débit solide le coefficient de perte de charge n'est pas toujours constant et que pour une même vitesse d'écoulement il peut varier avec le débit solide, ces conclusions étant valables pour les conduites et les canaux.

Les rivières saturées sont celles qui se situent dans la partie du diagramme où le coefficient de perte de charge est fonction du débit solide. Ce sont des rivières coulant dans leurs propres alluvions où les matériaux transportés sont de même nature que ceux du fond. Les alluvions sont fines et peuvent facilement être mises en mouvement ou déposées; le courant transporte ainsi le maximum de débit solide puisqu'il peut prendre ou déposer les matériaux.

Ces deux considérations expliquent bien que le modèle réduit construit à Grenoble par Neyrpic devait être un *modèle à berges fixes et fond affouillable*. On comprend aussi la nécessité qu'il y avait d'alimenter le modèle en eau et en matériaux solides, la loi du débit solide en fonction du débit liquide pouvant être réglée à volonté.

Le modèle qui a été construit à Grenoble a été réglé conformément à la nature. Il reproduit d'une façon satisfaisante les courbes hauteur/débit en chacun des points de mesure. Il reproduit également correctement les fonds qui ont été observés dans la nature et laisse passer les crues observées en 1948 et 1949 de la même façon que la Medjerdah.

Ce réglage, qui a été très long, a été obtenu par tâtonnements en jouant sur les rugosités des berges et surtout sur la loi débit liquide-débit solide qui permet, avec le matériau solide du modèle (sciure de bois traitée), de reproduire la nature correctement.

Il faut insister sur le fait que les essais qui vont conduire à déterminer des modifications du fond de la rivière ne peuvent se faire commodément qu'avec un débit permanent. En effet, une crue ne peut suffire à modifier les fonds; il faudrait reproduire un cycle de crues analogue à celui de la nature pendant une période très longue. On peut remplacer le cycle par un débit permanent équivalent, analogue au débit fictif caractéristique de la nature que nous allons définir par la suite.

Nous en profiterons pour indiquer une représentation graphique des rivières saturées qui a été proposée, il y a très peu de temps, par M. J.-P. Raynaud, ingénieur aux Etablissements Neyrpic, à Grenoble. Ce graphique permet de retrouver rapidement les lois les plus importantes des rivières saturées vérifiées sur le modèle.

Kennedy, Lacey, Inglis ont montré dans des travaux célèbres entrepris aux Indes pour la construction de canaux d'irrigation que pour un matériau donné et un débit donné toutes les caractéristiques d'un canal étaient imposées (forme du profil en travers, pente, vitesse). Lacey détermina un coefficient dépendant du matériau et appelé « Silt factor » qui lui permettait de comparer entre eux des canaux de caractéristiques différentes. La difficulté de déterminer ce coeffi-

cient a conduit bien des spécialistes à rechercher une représentation plus parlante du phénomène.

M. J.-P. Raynaud s'intéresse à une rivière donnée répondant aux conditions suivantes :

- 1°) la rivière est dite « endiguée »,
- 2°) le régime d'écoulement est uniforme et dure suffisamment pour que l'équilibre soit atteint,
- 3°) les matériaux transportés par charriage et en suspension sont de même nature que ceux du fond,
- 4°) la rivière a une section sensiblement constante et de forme analogue de telle sorte que le rayon hydraulique est une caractéristique du profil en travers.

Il propose de déterminer  $i$  et  $R_h$  les deux inconnues restant par deux relations : l'une exprimant une condition due au débit solide, l'autre une condition de rugosité.

#### a) Condition de débit solide

Les études anciennes de Du Boys sur la traction exercée sur le fond ont été assez longtemps considérées comme dépassées. Depuis quelques années, surtout après les études de Meyer Peter présentées à l'A.I.R.T.H. de Stockholm, en 1948, qui retombent sur des conclusions analogues, on peut adopter les conclusions de Du Boys.

$Q_{\text{sol}} = K \tau (\tau - \tau_c)$	
$Q_{\text{sol}}$	débit solide par unité de largeur
$\tau$	traction sur le fond = « $i R_h$ »
$\tau_c$	traction critique dépendant du matériau
$K$	coefficient dépendant du matériau
«	poids spécifique de l'eau.

La conclusion principale de l'ensemble de ces études est l'importance considérable de la traction sur le fond.

A un débit solide donné, pour une rivière saturée, c'est-à-dire pour une catégorie de matériaux, et pour des débits liquides variant dans une zone assez large, correspond une valeur unique de  $\tau$ , c'est-à-dire que :

$$i R_h = \text{constante.}$$

Ceci se traduit par le graphique  $i R_h$  par une famille d'arc d'hyperboles. Le point de fonctionnement d'une rivière saturée transportant un débit solide déterminé se trouve sur une de ces hyperboles.

#### b) Condition de rugosité

Celle-ci est plus complexe car la rugosité du lit peut varier avec

le débit liquide; la rugosité des berges intervient également. On est conduit en utilisant la forme de Gauckler Stricker.

$$V = k \frac{R^{\frac{2}{3}} i^{\frac{1}{2}}}{i}$$

à définir un coefficient  $k_m$  correspondant à la vitesse moyenne de l'écoulement

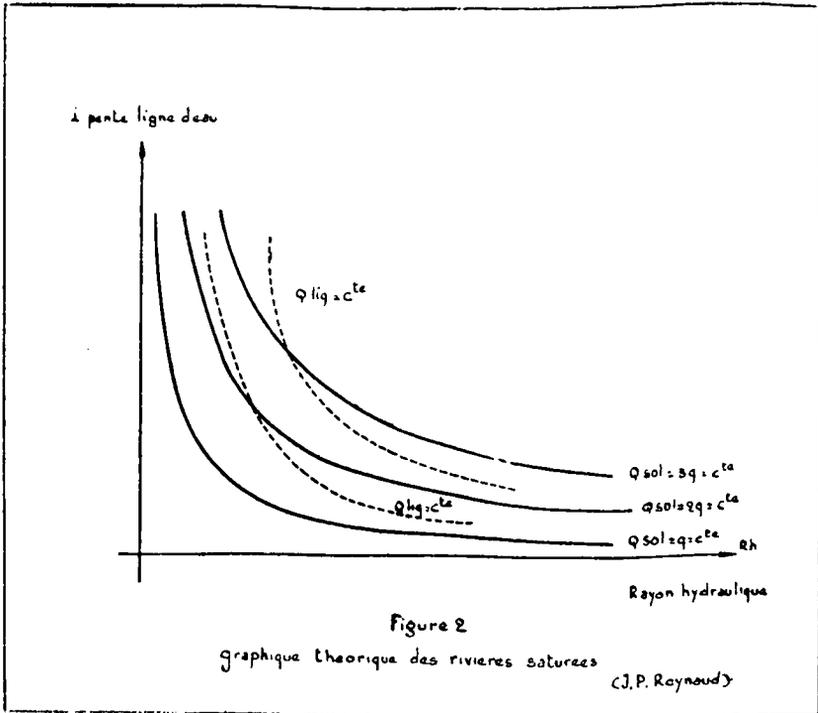
$$V_m = k_m \frac{R^{\frac{2}{3}} i^{\frac{1}{2}}}{i} \quad (\text{formule 1})$$

La valeur de  $k_m$  n'est pas constante pour une vitesse donnée de  $v_m$  lorsque le débit solide varie (voir courbe 1) tout en restant en équilibre avec le fond (cas des rivières saturées).

Pour un débit liquide donné, on peut tracer dans le diagramme  $i$   $R_h$  une courbe déduite de la formule 1 en faisant varier le coefficient  $k_m$  en fonction du débit solide

$$Q = V_m \times \text{Section} = V_m f(R_h) = \text{cte.}$$

La figure n° 2 donne un exemple de diagramme.



Il faut signaler que le fait de traduire ces deux influences par un seul facteur  $km$  oblige à considérer  $Rh$  comme une caractéristique de forme de la section mouillée  $S = f(Rh)$ .

Les résultats obtenus, valables pour une rivière, ne peuvent être étendus à une autre, dont la forme de la section mouillée est différente, sans précautions.

Dans la pratique, le tracé de ces courbes est difficile car la variation de  $km$  est mal connue.

Au contraire sur le modèle réduit, les mesures sont faciles; Neyrpic a déterminé expérimentalement plusieurs de ces graphiques pour l'étude de matériaux à placer sur un modèle réduit. On vérifie assez bien la loi de Du Boys bien qu'une partie du débit solide se fasse en suspension. D'autres expériences devront être entreprises pour vérifier si la loi est encore vraie pour le transport en suspension.

Pour le tracé pratique de la représentation dans le cas d'une rivière, il suffit de tracer une faible partie du graphique, celle-ci ne couvrant qu'une partie faible du graphique  $i Rh$ . La famille de courbe représentant la condition du débit solide si la rivière transporte des matériaux fins et que  $\tau$  est négligeable. On a alors sensiblement :

$$Q_{sol} = K \tau^2 = K (i Rh)^2.$$

Pour tracer la seconde famille de courbe, les mesures de débit et de pente permettent d'obtenir une série de valeurs de  $km$  en fonction de  $i Rh$ .

En raisonnant ensuite sur le profil en travers et en se fixant une cote de fond et de plan d'eau on peut déduire une section et une valeur de  $Rh$ ; en se fixant  $i$ , la valeur de  $i Rh$  donne  $km$  et la formule de Stricker  $V_m$ , donne le débit. Une série d'essais permet de tracer les courbes :

$$Q = \text{constante.}$$

Pratiquement on doit prendre des cotes de fond et des pentes proches de la réalité (10 à 15% de variation) pour conserver quelque valeur aux courbes obtenues.

Avant d'utiliser ce graphique, il faut signaler que l'écoulement uniforme n'existe pas dans la nature. Les gros débits de crue sont trop rapides pour modifier le fond de la rivière pour que sa pente soit égale au fond obtenu par le régime uniforme. Ce creusement correspond à un volume énorme à transporter, qu'une crue ne pourrait emmener. La relation  $i Rh$  obtenue sur place montrera souvent que la pente de la rivière reste quasi constante. Le diagramme obtenu ainsi est le diagramme pratique en opposition du diagramme théorique. Il amène à la notion de débit influençant qui est le débit qui influence la pente de fond de la rivière. C'est celui qui, pour un régime uniforme, donnerait la pente relevée sur la rivière pendant les débits importants mais de faible durée.

Nous lui donnerons le nom de « débit fictif caractéristique ».

### Principales lois d'écoulement des rivières saturées

1°) Variation de la pente avec le débit. Pour que la pente de l'écoulement reste constante quel que soit le débit il faut que la relation entre le débit liquide et le débit solide soit la loi obtenue en coupant le diagramme de la figure n° 2 par la droite  $i = cte$ .

Cette relation n'est jamais vérifiée dans la nature.

En général, la pente de la ligne d'eau a tendance à augmenter avec le débit liquide car le débit solide croît généralement plus vite que le débit liquide.

Au contraire, pour que la pente diminue, il faut que le débit solide croisse peu ou pas du tout. Cette diminution de pente est certaine dans le cas d'eau claire comme le montrerait la formule de Chezy.

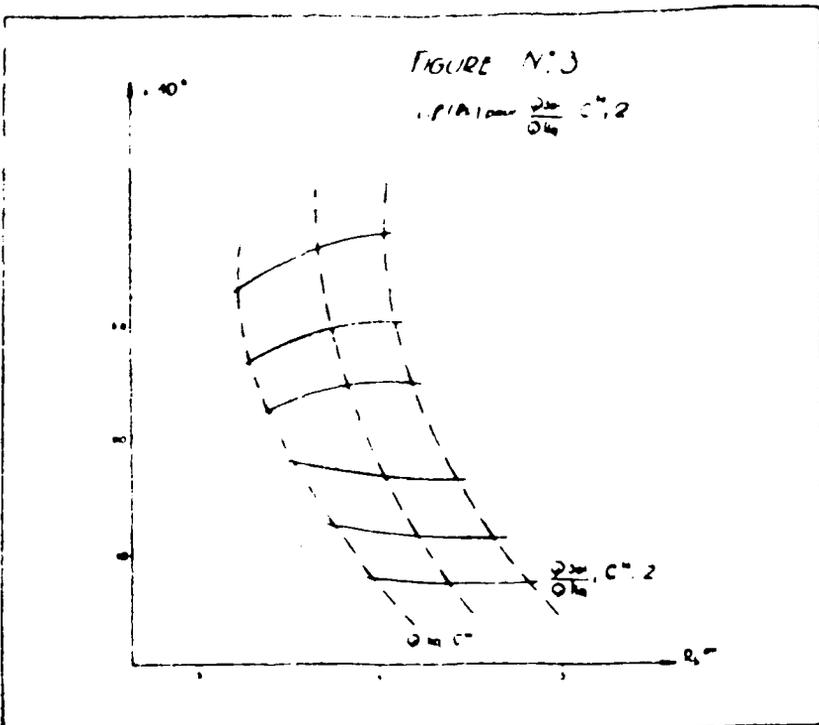
Une rivière peut donc avoir tendance à s'élever ou au contraire à s'enfoncer.

2°) Influence du rayon hydraulique sur la variation de pente quand le rapport débit solide-débit liquide est constant.

La figure n° 3 montre que la croissance de  $R_h$  peut conduire à augmenter ou diminuer la pente suivant la concentration :

Faible concentration :  $i$  augmente.

Forte concentration :  $i$  diminue.



On doit donc se méfier de conclusions trop hâtives, le sens de variation dépendant de nombreux facteurs parmi lesquels la concentration de la mixture est important.

3°) l'utilité du diagramme apparaît également pour étudier la répercussion de travaux en rivière.

4°) *Ligne d'eau d'une rivière.*

Si on considère une rivière saturée partant d'un point A où la cote de fond est imposée par un ouvrage ou pour toute autre raison et aboutissant en un point B où la cote de fond est également imposée (obstacle ou mer), pour le débit fictif caractéristique, tout est déterminé :

pente  $i$  — donc longueur du cours  
    forme de la section, etc...

Ceci signifie qu'une telle rivière est en équilibre pour les données signalées ci-dessus. Ceci n'empêche pas la rivière de modifier son cours; l'effet des crues peut produire des coupures de méandre mais chaque méandre coupé sera compensé par un allongement corrélatif du cours.

Cette loi résulte des travaux des Hindous. On peut la traduire différemment en indiquant que, en chaque point, il y a un régime permanent uniforme qui correspond à l'équilibre qui détermine la pente et la profondeur.

$$i = f(Q) \qquad h = f(Q).$$

Le niveau était imposé en mer, on a pour niveau  $N = 0$  à l'embouchure.

A une distance  $L$ , le niveau sera donc

$$NL = i L$$

$$FL = i L - h \text{ sera l'altitude du fond.}$$

Si, juste en amont, il y a un obstacle créant une perte de charge insuffisante pour rendre le niveau amont indépendant de l'aval

$$\Delta n = \text{fonction de } Q \text{ et de } N$$

on aura en amont

$$NL = i L + \Delta N$$

$$FL = i L + \Delta N - h.$$

Si on a un barrage déversant jamais noyé par l'aval, dont la loi niveau-débit soit  $NB$  on aura :  
au barrage :

$$NB$$

$$FB = NB - n$$

en amont :

$$NB + i L$$

$$NB + i L - h$$

La loi niveau-débit en un point quelconque dépend donc de deux facteurs :

— l'un qui exprime la loi de niveau en un point aval contrôlé par la disposition des lieux (mer, pont, barrage).

— l'autre qui dépend de la distance et de la pente d'équilibre de la rivière.

Le modèle réduit de la Medjerdah a permis d'examiner les conséquences de chacun des travaux exécutés ou proposés.

### 1°) Création de l'émissaire de l'Henchir Tobias

Il a eu pour conséquence :

— un abaissement de niveau très important en aval de Protville. Le pont de Protville freine un peu la propagation vers l'amont mais l'effet se propage toutefois jusqu'au profil 120 et peut-être jusqu'à Djedeïda.

A ces effets directs, il faudra ajouter que sa création a modifié totalement l'équilibre de la rivière. Nous avons en effet expliqué précédemment qu'une rivière comme la Medjerdah dans sa section Djedeïda-mer avait atteint son équilibre (de même d'ailleurs que dans la section Djedeïda-Bordj Toum). La création de l'émissaire partage le débit influençable en deux à son niveau. Il modifie les conditions aux limites. L'application du diagramme montre qu'il permet d'augmenter la pente superficielle.

Il rend donc possible, parce que stables, les travaux envisagés de coupure de boucle.

### 2°) Les coupures de boucle

Les idées exposées ci-dessous montrent qu'on est assuré de la stabilité des coupures dans la mesure où le raccourcissement du lit correspond à celui autorisé par l'émissaire.

Il faut ajouter que les coupures sont en quelque sorte auto-stables. En effet, l'augmentation du débit du lit mineur qu'elles provoqueront conduira à modifier dans le sens de l'augmentation le débit fictif caractéristique du fleuve. Cette augmentation pour les concentrations du débit solide considéré correspond à une augmentation de la pente (figure 3).

Cette auto-stabilité est un phénomène très particulier à la Medjerdah; il est dû au fait que le lit actuel est insuffisant et rejette sur la rive tout débit au delà de 800 mètres-cubes-seconde.

Les études montrent que le débit de la section Djedeïda - Emissaire pourra être porté à 1.200 mètres-cubes environ. Notons que tout travail (endiguement) augmentant encore ce débit, augmentera le débit caractéristique et conduira à augmenter la pente, c'est-à-dire à stabiliser les travaux projetés de raccourcissement du lit.

Les études se poursuivent sur la section Bordj-Toum - Djedeïda.

F. VALIRON,

*Ingénieur Principal des Etudes et Grands Travaux  
à la Direction des Travaux Publics.*