Méthode de calcul d'un chenal en escalier et à biefs affouillables pour la régularisation d'un torrent

The rational design of a stepped channel
consisting of a series of loose-bed stilling pools
for regularizing a torrential stream

PAR J. LOMBARDI ET G. MARQUENET

INGÉNIEURS AU LABORATOIRE NATIONAL D'HYDRAULIQUE

English synopsis p. 638

Dans un but de défense contre les crues des torrents dont le lit divague, on peut envisager, à la traversée d'une ville par exemple, la réalisation d'un chenal comme une succession de biefs affouillables, limités longitudinalement par deux perrés verticaux et transversalement par des seuils maçonnés, perpendiculaires à l'axe du chenal. Les seuils constituent la partie fixe du chenal. Dans certaines conditions et du fait de l'existence de fonds affouillables dans le bief, l'allure générale du chenal est celle d'un escalier dont chaque bief constitue une marche.

C'est pour déterminer les caractéristiques d'un

chenal en escalier, à biefs affouillables, et s'assurer de son comportement en période de crue, qu'une étude sur modèle réduit a été réalisée au Laboratoire National d'Hydraulique à Chatou.

La note suivante résulte en partie de cette étude.

Le chapitre I comporte l'exposé d'une méthode de calcul d'un tel chenal, et signale les principes qui permettent de préciser les indications fournies par cette méthode.

Le chapitre II est relatif à la généralisation de la méthode de calcul et à son application à la régularisation des torrents.

CHAPITRE I

DÉTERMINATION D'UN CHENAL EN ESCALIER ET A BIEFS AFFOUILLES

A. — Généralités.

La réalisation d'un chenal en escalier et à biefs affouillables permet d'atteindre les buts suivants :

1° *Supprimer les divagations du torrent.* L'élimination des divagations n'est possible qu'à

partir d'un certain débit par unité de largeur et dépend de la longueur du bief. La suppression des divagations du torrent revient, en canalisant l'écoulement, à supprimer les dégradations des berges : c'est le rôle des perrés.

2° *Provoquer une dissipation fractionnée de*

l'énergie de l'écoulement en un endroit déterminé. C'est le rôle de la forme en escalier du chenal. A chaque marche, on détruit par un ressaut noyé l'énergie correspondant à la chute; l'eau est ensuite abandonnée avec le minimum d'énergie sur la partie affouillable du bief.

3° *Ne pas gêner le transit des matériaux charriés par le torrent; ce but est atteint si la pente générale du chenal est bien choisie; en général, elle est égale à la pente moyenne du lit avant tout aménagement.*

Le fonctionnement du chenal en escalier, à biefs affouillables, est lié à l'importance relative du débit solide et du débit liquide. Pour une pente du chenal et pour un débit liquide donnés, le débit solide de saturation peut être considéré comme l'élément déterminant du fonctionnement du chenal (1).

En effet, si le débit solide de saturation est assuré, à l'entrée du chenal, il se produit progressivement un nivellement général des fonds. Les parties affouillées se remblaient, les seuils s'effacent et la pente d'équilibre finale coïncide avec la pente générale du chenal; dans ce cas, le comportement du chenal ne pose pas, en général, de difficultés.

Si le débit solide admis est supérieur au débit de saturation, des dépôts ont lieu. Il en résulte une augmentation de la pente générale; c'est, par exemple, le cas d'une pente initiale trop faible et le cas où des éboulements provoquent momentanément un accroissement exceptionnel du charriage en amont du chenal : ce dernier ne pourra évacuer l'excès de débit solide que par une modification de pente.

Si le débit solide est inférieur au débit solide de saturation du chenal, les biefs s'affouillent; on retrouve la forme générale du chenal en escalier, les seuils qui constituent les parties fixes étant alors dégagés vers l'aval; dans ce cas, un ressaut à l'aval de chaque seuil assure une destruction fractionnée de l'énergie.

Dans tous les cas où il y a charriage, il y a aussi transport des éléments fins par suspension.

Enfin, en l'absence de tout débit solide, les affouillements se développent dans chaque bief, jusqu'à atteindre un état d'équilibre; ce dernier, dit « pavage », constitue, pour les fonds, une véritable couche de protection. Il est caractérisé

par une granulométrie beaucoup plus forte que celle de la masse même des matériaux de fonds.

B. — Principes d'étude du chenal en escalier.

Nous venons de voir que le comportement des biefs du chenal varie beaucoup suivant l'importance du débit solide. Pour dimensionner un élément de chenal, seuil et bief proprement dit, il convient de définir un débit liquide fondamental Q , au-dessous duquel on admet que les eaux ne sont pas chargées en matériaux de fond.

Le débit Q admis dans le chenal est fixé par les données hydrologiques du torrent et aussi par les caractéristiques de son lit (nature, granulométrie, pente moyenne). Toute surestimation de ce débit est dans le sens de la sécurité. On sait, en effet, que le remblaiement des biefs, dû au transport solide, assure une protection des seuils d'autant plus grande que le débit solide effectif se rapproche du débit solide de saturation associé au débit liquide Q et à la pente générale du chenal.

Au-delà du débit liquide fondamental Q , on admet l'existence d'un charriage qui peut d'ailleurs ne pas atteindre la valeur du débit solide de saturation. Le charriage peut agir dans le sens de la sécurité des ouvrages s'il se rapproche des conditions de saturation du chenal.

L'étude complète d'un chenal évacuateur de crue en escalier à biefs affouillables comprend donc deux phases :

- 1° Détermination du type et des dimensions des seuils et détermination de la longueur des biefs pour le débit liquide fondamental Q sans charriage;
- 2° Etude du comportement du chenal pour des débits liquides allant en croissant du débit liquide fondamental Q jusqu'à la crue exceptionnelle, compte tenu d'un charriage inférieur ou égal au charriage de saturation.

C. — Détermination des caractéristiques des biefs.

Un chenal en escalier et à biefs affouillables est donc formé d'une succession de biefs dont le type est représenté figure 1. La figure 1 donne l'aspect d'un bief après passage du débit fondamental Q sans charriage.

Chaque bief comprend :

- 1° Un seuil déversant prismatique dont le profil peut être du type CREAGER ou parabolique; ce seuil rectiligne est placé perpendiculairement à l'axe du chenal. La partie aval

(1) On sait qu'en régime permanent le débit solide de saturation correspond au débit solide maximum qui peut être entraîné par un débit liquide donné, sur une pente donnée.

FIG. 1.

du seuil présente un radier qui constitue une partie du bassin d'amortissement où un ressaut noyé assure la destruction de l'énergie de la masse d'eau correspondant à la chute. Ce bassin d'amortissement est réalisé d'une part sur le radier bétonné du seuil et d'autre part sur le matériau de fond lui-même. Les essais ont montré que ce type de seuil était particulièrement favorable à la réalisation d'un chenal en escalier;

2° A l'aval du seuil, une pente obtenue par pavage naturel du fond pour le débit Q ; ce pavage constitue une pente d'équilibre statiquement stable pour le débit considéré. Cette pente de pavage est obtenue par pivotement autour du seuil aval du sol initialement à la pente du talus naturel. Le mode de réalisation du chenal justifie ce point : on effectue des terrassements pour la fondation des seuils sans réaliser le déblai des terres dans le bief; c'est le torrent lui-même qui établira la pente d'équilibre de pavage.

Nous allons rechercher des relations permettant le dimensionnement des seuils et des biefs conformément aux principes qui ont été exposés.

Le problème a pour objet de trouver une relation entre la longueur L d'un bief et la hauteur P d'un seuil, pour l'évacuation d'un débit liquide q

par unité de largeur, la pente générale du chenal étant J_0 , dans des conditions telles qu'il n'y ait pas d'affouillements dangereux pour la stabilité de l'ouvrage. Le problème comporte naturellement une infinité de solutions. La hauteur de chute P d'un seuil et la longueur L du bief varient dans le même sens. La fonction $L(P)$ étant connue pour un débit liquide donné (le débit fondamental Q par exemple), pour une pente générale du chenal et pour une granulométrie des matériaux de fond déterminées, des considérations hydrauliques (divagations aux faibles débits, interaction des seuils), économiques (coût de la réalisation des ouvrages), et constructives (stabilité des seuils), permettent de déterminer le point optimum de la fonction $L(P)$ pour le dimensionnement des ouvrages.

L'établissement de la fonction $L(P)$ nous amène à étudier successivement les points suivants :

- 1 — Ecoulement sur le seuil, formation du ressaut.
- 2 — Pente d'équilibre de pavage relative au débit Q .
- 3 — Ecoulement sur la pente d'équilibre de pavage.
- 4 — Détermination de la fonction $L(P)$.

Les notations utilisées (voir figure 1) sont les suivantes :

NOTATIONS :	UNITÉ
Q : débit fondamental, défini comme le débit maximum ne provoquant pas de charriage	m ³ /s
b : largeur du chenal.....	m
q : débit par unité de largeur du chenal : $q = \frac{Q}{b}$	m ³ /s/m
J ₀ : pente moyenne du talus naturel	
α : angle du talus naturel avec l'horizontale	degrés
J : pente d'équilibre de pavage pour un débit q	
β : angle avec l'horizontale de la pente de pavage.....	degrés
n : coefficient de sécurité affecté à J; $n < 1$	
l : distance entre deux seuils consécutifs	m
l ₁ l ₂ : dimensions du seuil.....	m
L : longueur du bief ou distance entre les sommets de deux seuils consécutifs.....	m
h : charge sur le seuil.....	m
y : tirant d'eau sur le seuil.....	m
v : vitesse moyenne d'approche..	m/s
P : hauteur de chute sur le radier du seuil.....	m
H : charge sur le radier au pied du déversoir.....	m
y ₁ : tirant d'eau au pied du déversoir	m
v ₁ : vitesse moyenne au pied du déversoir	m/s
y ₂ : tirant d'eau aval théorique nécessaire au maintien d'un ressaut libre et stable, correspondant à y ₁ et q.....	m
μ : coefficient d'immersion du ressaut	μ > 1
y ₃ : tirant d'eau de l'écoulement uniforme du débit Q sur la pente de pavage J.....	m
d : un diamètre du matériau hétérogène constituant le sol.	m
d ₉₀ : diamètre caractéristique de pavage; diamètre du pourcentage 90 de la courbe de granulométrie	m
g : accélération de la pesanteur..	m/s ²

I. — *Ecoulement sur le seuil. — Formation du ressaut.*

Compte tenu des notations précédentes, et en admettant les hypothèses simplificatrices de répartition uniforme des vitesses et de répartition hydrostatique des pressions, que la nature du problème traité justifie, on a les relations suivantes :

$$h = y + \frac{v^2}{2g}$$

$$H = h + P$$

$$H = y_1 + \frac{v_1^2}{2g} \quad (1)$$

$$q = v_1 y_1 \text{ (équation de continuité)} \quad (2)$$

L'élimination de v₁ entre les équations (1) et (2) donne :

$$y_1^3 - H y_1^2 + \frac{q^2}{2g} = 0 \quad (3)$$

FIG. 2.

D'autre part, la charge h peut être liée au débit q par une relation de la forme :

$$q = m \sqrt{2g} \cdot h^{3/2} \quad (4)$$

1° VALEUR DU COEFFICIENT DE DÉBIT m :

Le déversement sur le seuil est analogue au déversement sur un seuil épais incliné. La forme du profil aval du seuil ne joue pratiquement aucun rôle; elle sera définie plus loin en adoptant un profil type CREAGER correspondant à la charge totale h; un profil parabolique pourrait d'ailleurs aussi convenir.

Pour un débit donné q, la comparaison de la relation :

$$q = v y = \sqrt{2g(h-y)} \cdot y$$

déduite de la figure 2, et de la relation :

$$q = m \sqrt{2g} h^{3/2}$$

donne pour le coefficient de débit (fig. 3 a) :

$$m = \frac{y}{h} \sqrt{1 - \frac{y}{h}}$$

Dans nos calculs, nous admettrons pour le coefficient de débit la valeur $m = 0,3$, qui conduit à une sécurité pour le dimensionnement du seuil; le choix de cette valeur sera justifié au paragraphe « Examen de la méthode de calcul ».

Nous aurons donc :

$$q = 0,3 \sqrt{2g} h^{3/2} \quad (4)$$

FIG. 3 a.

FIG. 3 b.

D'autre part, dans la relation (3), on peut négliger le terme y_1^3 devant les autres termes :

$$\frac{q^2}{2g} - y_1^2 H = 0 \quad (3')$$

L'étude de la variation de l'erreur ainsi comise sur y_1 peut être faite en fonction du rapport $\eta = \frac{H}{h}$ dans lequel H est la charge sur le radier et h la charge au sommet du seuil [I], ou en introduisant P , hauteur de chute sur le radier $\eta = 1 + \frac{P}{h}$. Elle s'effectue par la résolution des équations (3) et (3'), compte tenu de la relation (4), et montre qu'elle est négligeable dans les cas pratiques (elle décroît rapidement de 5,8 % à 0,5 % lorsque η varie de 2 à 10). De plus, la théorie du ressaut montre que la valeur approchée de y_1 , calculée à partir de la relation simplifiée (3') et qui est légèrement inférieure à la valeur exacte de y_1 , conduit à une valeur y_2 supérieure à la valeur exacte et, en conséquence, dans le sens de la sécurité.

2° FORMATION DU RESSAUT AU PIED DU SEUIL :

En négligeant l'effet de courbure au pied du seuil pour assurer la formation d'un ressaut libre stable sur un fond horizontal pour un débit par unité de largeur q et un tirant d'eau amont y_1 , le tirant d'eau aval doit avoir la valeur y_2 :

$$y_2 = -\frac{y_1}{2} + \sqrt{\frac{y_1^2}{4} + \frac{2q^2}{gy_1}}$$

compte tenu de la valeur y_1 tirée de (3'), y_2 devient :

$$y_2 = -\frac{q}{2\sqrt{2g}} (h + P)^{-0,5} + \sqrt{\frac{q^2}{8g} (h + P)^{-1} + \frac{2\sqrt{2}}{\sqrt{g}} q (h + P)^{0,5}} \quad (5)$$

La valeur de y_2 caractérise le tirant d'eau aval nécessaire à la formation d'un ressaut libre; en admettant la formation d'un ressaut noyé [II], avec un degré d'immersion μ supérieur à l'unité, ce tirant d'eau aval doit être égal à :

$$y'_2 = \mu y_2$$

Dans cette étude, nous avons admis $\mu = 1$, car le radier adopté à l'aval du seuil déversant n'est pas horizontal, mais présente une légère contre-pente (3 à 5 degrés) dans le sens de l'écoulement. Cette forme de radier présente les avantages suivants :

(*) Ces chiffres romains se rapportent à la bibliographie, à la fin de l'article.

- 1° A l'aval du radier, pour les débits inférieurs au débit fondamental Q , il se forme un talus naturel de gros matériaux de fond principalement, qui constitue la limite aval du bassin d'amortissement;
- 2° L'effet conjugué de la contre-pente et de la courbure des filets liquides au pied du seuil déversant contribue à assurer la localisation du ressaut noyé à l'intérieur du bassin d'amortissement, tant que le débit ne dépasse pas le débit fondamental Q admis dans les calculs;
- 3° Le ressaut noyé étant plus ramassé sur lui-même qu'un ressaut libre, il est possible de diminuer la longueur du radier;
- 4° Pour des débits liquides supérieurs au débit fondamental Q et pour de faibles valeurs du transport solide, la contre-pente du radier, en provoquant la formation à l'aval de ce dernier d'un rouleau à axe horizontal qui ramène les matériaux contre le mur para-fouille, assure automatiquement la protection aval du seuil contre les affouillements.

II. — Pente d'équilibre de pavage pour le débit fondamental Q

Il faut déterminer la valeur de la pente d'équilibre de pavage obtenue pour le débit Q par pivotement autour du seuil aval du sol initialement à la pente du talus naturel.

Pour cette détermination, nous nous baserons sur les expériences du professeur MEYER-PETER (III).

On trouvera quelques réserves et remarques sur la validité de la similitude du paysage et du transport solide au paragraphe : « Examen critique de la méthode de calcul d'un chenal. Affouillabilité des biefs. Similitude du transport des matériaux de fond. »

Deux cas peuvent se présenter :

- 1^{er} cas : la pente d'équilibre de pavage pour le débit Q se situe dans les limites de validité des équations de MEYER-PETER ($J \leq 2,3 \%$).
- 2^e cas : la pente d'équilibre de pavage n'est pas dans les limites de validité des équations de MEYER-PETER ($J > 2,3 \%$).

1^{er} CAS : les relations de MEYER-PETER sont applicables

Nous adoptons les notations suivantes :

NOTATIONS :	UNITÉ
Q : débit liquide.....	m ³ /s
b : largeur du chenal.....	m
Q_s : débit liquide total déterminant pour le transport solide	m ³ /s
q_s : débit liquide déterminant pour le transport solide, par unité de largeur	m ³ s/m
V : vitesse moyenne de l'écoulement	m/s
y_m : tirant d'eau moyen sur le secteur étudié.....	m
a : section mouillée.....	m ²
J : pente moyenne de la ligne d'énergie ou pente du fond en régime uniforme	
d : un diamètre caractéristique du matériau	m
$\bar{\omega}_s$: poids spécifique du matériau solide	t/m ³
$\bar{\omega}$: poids spécifique de l'eau....	t/m ³
$\bar{\omega}''_s$: poids spécifique du matériau sous l'eau :	
$\bar{\omega}''_s = \bar{\omega}_s - \bar{\omega}$	
k_w : coefficient de rugosité des parois.	
k_s : coefficient de rugosité du lit.	

D'après MEYER-PETER (III), la pente de « repos absolu » ou pente d'équilibre de pavage vérifie la relation :

$$\bar{\omega} \cdot \frac{Q_s}{Q} \left(\frac{k_s}{k_r} \right)^{3/2} \cdot y_m J = A'' \cdot \bar{\omega}''_s \cdot d$$

dans laquelle $A'' = 0,03$ environ.

Dans cette relation, on admet que la pente hydraulique est liée à la fois à la rugosité des matériaux et, aussi, aux sinuosités du profil en long.

Le coefficient de rugosité des matériaux k_r est défini selon STRICKLER par la relation :

$$k_r = \frac{C}{\sqrt{d}}$$

Dans ces formules, où C est une constante égale à 26, d correspond au diamètre caractéristique du pavage ($d_{90\%}$ de la courbe de granulométrie); le coefficient de rugosité k_s est calculé sur la base de la pente d'énergie totale.

Pour un lit plan, et c'est le cas des biefs du

chenal qui sont de faible longueur, $k_s = k_r$, la relation ci-dessus peut s'écrire :

$$\bar{\omega} \frac{Q_s}{Q} \cdot y_m \cdot J = A'' \cdot \bar{\omega}''_s \cdot d \quad (6)$$

Le débit liquide total Q_s déterminant pour le transport solide résulte de la considération de l'influence des parois (IV). Il est défini par la relation :

$$Q_s = b q_s = b \cdot Q \frac{k_{10}^{3/2}}{2 y_m k_s^{3/2} + b k_w^{3/2}}$$

L'équation de continuité :

$$Q = a \cdot k_s \cdot R^{2/3} \cdot J^{1/2} \quad (7)$$

où :

$$k_s = k_r = \frac{C}{\sqrt[6]{d}} \text{ avec } C = 26 \text{ et } d = d_{90} \quad (8)$$

et la relation (6) permettent la détermination de la pente d'équilibre de pavage relative au débit fondamental Q .

On peut affecter la valeur théorique J de la pente de pavage telle qu'elle est donnée par la relation de MEYER-PETER, d'un coefficient n inférieur à l'unité, pour tenir compte du phénomène de concavité que l'on observe au voisinage du seuil aval lorsqu'on recherche expérimentalement la pente de pavage.

2° CAS : les relations de MEYER-PETER ne sont pas applicables

On se trouve hors du domaine d'application des relations de MEYER-PETER. Il faut déterminer sur modèle la pente d'équilibre de pavage relative au débit q , et tracer éventuellement la courbe de la variation de la pente nJ en fonction de la longueur l du bief. Dans un cas particulier, cette courbe a été trouvée légèrement croissante. Il est alors facile de considérer, dans ce qui suit, une valeur correcte de nJ .

III. — *Ecoulement sur la pente d'équilibre de pavage.*

Nous considérons l'écoulement sur la pente de pavage nJ comme uniforme. La formule de STRICKLER :

$$v = k R^{2/3} (nJ)^{1/2}$$

d'où :

$$k = \frac{C}{\sqrt[6]{d}} \quad (8)$$

donne de bons résultats dans les limites de validité des essais du professeur MEYER-PETER ($J < 2,3 \%$) en prenant pour C la valeur 26 et pour d la valeur d_{90} de la courbe de granulométrie.

Nous admettons que cette formule est applicable à tous les cas pratiques (même aux pentes supérieures à 2,3 %).

L'erreur que cette hypothèse peut entraîner sur la valeur du tirant d'eau n'a qu'une très faible répercussion sur la détermination de la fonction $L(P)$.

L'équation de continuité $Q = va$, compte tenu de (8), donne :

$$Q = \frac{26}{\sqrt[6]{d_{90}}} b y_3 \left(\frac{b y_3}{b + 2 y_3} \right)^{2/3} (nJ)^{1/2} \quad (9)$$

L'équation (9) constitue une relation entre le tirant d'eau y_3 et le débit Q , en fonction des trois paramètres :

- b : largeur du chenal,
- d_{90} : diamètre caractéristique de pavage,
- nJ : pente d'équilibre de pavage.

IV. — *Détermination de la fonction $L(P)$. — Dimensionnement d'un bief.*

Nous avons étudié successivement :

- a) L'écoulement sur le seuil et la formation du ressaut au pied du seuil déversant.
- b) L'écoulement en régime uniforme sur la pente d'équilibre de pavage nJ .

Il faut lier les différents résultats obtenus. Des considérations géométriques simples sur le profil en long du bief le permettent et conduisent à la détermination de la fonction $L(P)$.

Deux conditions doivent être satisfaites :

- 1° Assurer la continuité entre a) et b);
- 2° Les sommets des seuils doivent se situer sur une parallèle à la ligne moyenne d'énergie dans le chenal, c'est-à-dire la pente générale du chenal J_0 .

Dans ce qui suit, nous progresserons de l'amont vers l'aval.

1. — DÉFINITION DU SEUIL :

Dans cette étude, nous avons choisi arbitrairement comme seuil déversant le type CREAGER. En adoptant les axes de référence OX , OY du

profil conformément à la figure 4, l'équation définissant le parement aval à partir du sommet, pour une charge fondamentale h , est, d'après E. SCIMENI (V) :

$$\frac{Y}{h} = 0,47 \left(\frac{X}{h} \right)^{1,8}$$

FIG. 4.

La partie amont du profil est définie par un arc de cercle de rayon $0,4 h$; l'ordonnée du point extrême amont est $0,12 h$.

On en déduit :

$$X = 1,521 h^{4/9} \cdot Y^{1/1,8} \quad (10)$$

il vient l_1 (figure 1) :

$$l_1 = 1,521 \cdot h^{4/9} \cdot P^{1/1,8} \quad (11)$$

Quant à l_0 , on a sensiblement :

$$l_0 = 0,3 h \quad (12)$$

On pourrait définir le radier du seuil en lui donnant une longueur égale à la longueur du ressaut sur un fond horizontal. Mais cette condition conduit, dans les cas pratiques, à des radiers trop coûteux.

Le type de radier à contre-pente de 3 à 5 degrés, qui permet un « tassement » du ressaut sur lui-même, a montré au cours d'essais qu'on obtenait de bons résultats en lui donnant une longueur de l'importance de $l_1 + l_0$. Nous adopterons cette hypothèse dans ce qui suit, soit :

$$l_2 = 1,521 \cdot h^{4/9} \cdot P^{1/1,8} + 0,3 h \quad (13)$$

Pour un débit q par unité de largeur et une hauteur de chute P sur le radier, le seuil se trouve donc entièrement défini.

Les équations (11) et (13) définissent les familles de courbes : $l_1(q)$ et $l_2(q)$ de paramètre P .

2. — PROFIL EN LONG DU BIEF :

En se déplaçant suivant le profil en long du bief, et compte tenu des deux conditions :

- Continuité de l'écoulement sur le radier et sur la pente nJ ;
 - Sommets des seuils sur une parallèle à la pente générale J_0 du chenal,
- on obtient la relation géométrique (voir fig. 5)

$$\vec{AG} = \vec{AB} + \vec{BC} + \vec{CD} + \vec{DE} + \vec{EF} + \vec{FG}$$

ou, avec les notations adoptées :

$$\left(\frac{\vec{L}}{\cos \alpha} \right) = \vec{P} + \vec{l}_1 + \vec{l}_2 + \vec{y}_2 + \vec{y}_3 + \left(\frac{\vec{l} + \vec{l}_0}{\cos n\beta} \right) \quad (14)$$

La construction du profil en long d'un bief ne présente aucune difficulté; on calcule les valeurs de y_2 , y_3 , l_1 et l_2 par les équations suivantes :

$$(5) : y_2 = - \frac{q}{2\sqrt{2g}} (h + P)^{-0,5}$$

$$+ \sqrt{\frac{q^2}{8g} (h + P)^{-1} + \frac{2\sqrt{2}}{\sqrt{g}} q (h + P)^{0,5}}$$

$$(9) : Q = \frac{26}{\sqrt[6]{d}} b y_3 \left(\frac{b y_3}{(b + 2 y_3)} \right)^{2/3} (nJ)^{1/2}$$

$$(11) : l_1 = 1,521 h^{4/9} P^{1/1,8}$$

$$(13) : l_2 = 1,521 h^{4/9} P^{1/1,8} + 0,3 h$$

FIG. 5.

L'application de la relation (14) détermine la fonction qui lie la longueur L du bief à la hauteur de chute P sur les radiers pour des valeurs données des différents paramètres :

J_0 : pente générale du chenal : $\text{tg } \alpha = J_0$,

d_{90} : diamètre caractéristique du pavage,

nJ : pente d'équilibre du pavage déduite de la granulométrie du matériau de fond, du débit par unité de largeur et de la rugosité des parois,

$q = \frac{Q}{b}$: débit par unité de largeur.

En pratique, on connaît :

- La pente générale J_0 du chenal en escalier; elle est choisie en fonction de la pente du lit en amont du chenal et des considérations sur le transit des matériaux solides accompagnant la crue exceptionnelle.
- La granulométrie des matériaux de fond.
- La largeur du chenal fixée par des considérations hydrologiques (crue exceptionnelle) et, dans certains cas, économiques.

V. — Abaques. — Utilisation.

La longueur L des biefs peut être considérée comme une fonction de la hauteur P d'un seuil sur le radier par l'intermédiaire de l_1 , l_2 , y_2 , y_3 , les termes q , nJ , d_{90} , b jouant le rôle de paramètres.

Nous donnons sous forme d'abaques les valeurs l_1 , l_2 , y_2 , y_3 en fonction de Q ou q pour les variations suivantes des paramètres :

$b =$ de 5 à 40 m

$d_{90} =$ de 0,02 à 0,70 m

$nJ =$ de 1 à 10 %

Q variant lui-même de 0 à 150 m³/s et q de 0 à 5 m³/s/m.

La valeur de y_3 est déduite de l'abaque n° 1, tandis que les valeurs de l_1 , l_2 et y_2 sont déterminées par l'abaque n° 2.

La valeur de nJ étant connue par des essais ou par l'application des formules (6) et (7), les valeurs de l_1 , l_2 , y_2 , y_3 étant déduites par simple lecture sur les abaques, la construction graphi-

ABAQUE 1.

que du profil en long du bief selon la relation (14) permet de tracer par point la courbe L(P).

Remarquons que L, définie comme la distance entre les sommets des seuils, est d'ailleurs égale à la distance entre deux seuils consécutifs puisque l_0 ne dépend que de q .

CONSTRUCTION ET UTILISATION DES ABAQUES

1. — Abaque I.

Il est utilisé pour le calcul de y_3 et traduit les deux relations :

$$Q = \frac{26}{\sqrt[6]{d_{90}}} b y_3 \left(\frac{b y_3}{b + 2 y_3} \right)^{2/3} \cdot (nJ)^{1/2} \quad (9)$$

$$\text{et } q = \frac{Q}{b}$$

La relation (9) est décomposée comme suit :
— Troisième quadrant :

$$A = b y_3 \left(\frac{b y_3}{b + 2 y_3} \right)^{2/3} = A(y) \text{ de paramètre } b$$

— Deuxième quadrant :

$$B = A \cdot (nJ)^{1/2} = B(y) \text{ de paramètres } b \text{ et } n$$

— Premier quadrant :

$$Q = \frac{26 B}{\sqrt[6]{d_{90}}} = Q(y) \text{ de paramètres } b, n \text{ et } a_9,$$

— Quatrième quadrant :

$$q = \frac{Q}{b}$$

Q , d_{90} , nJ et b étant connus pour calculer y_3 en fonction de Q , on progresse dans le sens trigonométrique suivant un tracé analogue à a , b , c , d , e , porté sur l'abaque I par réfraction sur les courbes marquées d_{90} , nJ , b ; le quatrième quadrant permet de passer de Q à q par réfraction sur les droites marquées b .

2. — Abaque II.

Il est utilisé pour le calcul de l_1 , l_2 et y_2 et traduit les quatre relations (4), (5), (11) et (13).

ABaque 2.

On a reproduit, dans les quadrants :

— *Premier quadrant* :

Relation (11) : $l_1 = l_1(q)$ de paramètre P

— *Deuxième quadrant* :

Relation (13) : $l_2 = l_2(q)$ de paramètre P

— *Troisième quadrant* :

Relation (4) : $q = q(h)$ pour $m = 0,3$

— *Quatrième quadrant* :

Relation (5) : $y_2 = y_2(q)$ de paramètre P

VI. — Caractéristiques optima d'un bief.

Nous venons de voir que la solution du problème du chenal en escalier et à biefs affouillables comportait une infinité de solutions; pour choisir sur la courbe L(P) le point optimum de dimensionnement d'un seuil et d'un bief, nous ferons appel à diverses considérations.

I. — CONSIDÉRATIONS HYDRAULIQUES

a) Divagation :

En période de basses eaux, il se produit des divagations de l'écoulement dans le bief lorsque celui-ci a une longueur supérieure à une certaine valeur; dans un cas particulier, nous avons trouvé pour cette longueur 2,5 fois la largeur du chenal.

Ces divagations peuvent donner lieu à des concentrations de l'écoulement; il peut s'ensuivre, particulièrement le long des perrés du chenal, des affouillements dont l'importance est difficilement prévisible. Ce phénomène oriente le choix vers les biefs et, corrélativement, les seuils de faible importance.

b) Interaction des seuils :

L'interaction des seuils n'est à prendre en considération que pour les débits liquides supérieurs au débit fondamental Q, jusqu'à la crue exceptionnelle, et pour des débits solides inférieurs au débit solide de saturation.

Si les eaux ne sont pas chargées à saturation en matériaux solides, nous avons vu que le remblaiement des biefs ne se fait pas totalement jusqu'à la pente générale J_n du chenal. Il peut y avoir interaction de l'écoulement sur les différents biefs.

Des essais ont montré que les seuils ne doivent pas être trop rapprochés les uns des autres pour éviter ce phénomène d'interaction; autre-

ment dit, la tendance est cette fois vers l'éloignement des seuils, c'est-à-dire vers le choix de seuils de plus grande importance.

2. — CONSIDÉRATIONS DE STABILITÉ

Des considérations de stabilité peuvent, dans certains cas, faire éliminer des seuils de masse insuffisante. Il faut en particulier tenir compte des effets de dépression qui s'exercent sur le parerement aval du seuil lorsque le débit évacué par le chenal dépasse le débit fondamental Q, pour lequel le profil de seuil a été calculé, et lorsque les eaux sont insuffisamment chargées en matériaux solides. L'ordre de grandeur de ces dépressions peut être calculé (VI).

3. — CONSIDÉRATIONS ÉCONOMIQUES

Il est clair que, pour une pente d'équilibre de pavage nJ donnée, l'importance des perrés croît avec la longueur des biefs et corrélativement avec l'importance des seuils. Par contre, pour l'ensemble du chenal, le coût total des seuils varie en sens inverse de la longueur des biefs.

Il est donc nécessaire d'étudier, en fonction de L et P, l'importance relative des perrés et des seuils. Cette fonction détermine l'optimum économique du dimensionnement des seuils au point de vue génie civil.

Dans chaque cas particulier, les considérations ci-dessus, dont les tendances sont opposées, déterminent le point optimum de la fonction L(P) et par suite le dimensionnement des seuils et des biefs.

Il serait sans doute prématuré de dire que cette méthode de calcul permet d'établir le projet définitif d'un chenal évacuateur de crue en escalier avec biefs affouillables; comme nous allons le voir au paragraphe suivant, des réserves s'imposent dans l'état actuel de nos connaissances sur les questions de transport solide; cependant, elle permet facilement l'étude d'un projet; des essais sur modèle permettent de préciser très rapidement les résultats théoriques.

D. — Examen critique de la méthode de calcul d'un chenal.

Dans l'exposé de la méthode de calcul pour le dimensionnement d'un chenal en escalier et à biefs affouillables, nous avons introduit des éléments relatifs, d'une part, à l'écoulement proprement dit et, d'autre part, au transport des matériaux solides. Si les premiers sont suffisamment connus, les seconds laissent subsister une part d'incertitude que seules pourront lever des

études systématiques au Laboratoire, accompagnées d'observations dans la nature. Il s'agit, en effet, d'un problème nouveau et peu connu : celui du transport solide en granulométrie continue, pour de fortes pentes et pour des matériaux pouvant atteindre des dimensions notables. On sait que les remarquables études de MEYER-PETER ont été réalisées avec des pentes ne dépassant pas 2,3 % et des matériaux dont le diamètre moyen atteignait au plus 28,6 mm.

Dans ce qui suit, nous allons examiner ces divers facteurs qui caractérisent d'une part le fonctionnement du seuil et, d'autre part, l'affouillabilité des biefs.

I. — Fonctionnement des seuils.

1. — DÉBIT FONDAMENTAL Q :

Pour ce débit, on admet que les eaux ne sont pas encore chargées en matériaux; son choix est motivé par des données hydrologiques et les caractéristiques du lit du torrent (granulométrie, pente); toute surestimation de ce débit est dans le sens de la sécurité.

2. — FORME DU SEUIL. — STABILITÉ :

Il est important que le seuil soit prismatique et perpendiculaire à l'axe du chenal, et que les perrés soient peu inclinés par rapport à la verticale. On évite ainsi les affouillements dus aux contre-courants qui se produisent pour des débits assez importants immédiatement à l'aval du radier du seuil et le long des perrés dans le cas de seuils incurvés ou de perrés fortement inclinés.

La forme même du profil du seuil a peu d'influence sur l'écoulement si le seuil déversant est prolongé par un radier légèrement relevé vers l'aval. Il est préférable que le profil adopté pour le débit fondamental Q conduise à un écoulement sans dépression sur le parement aval. On devra tenir compte dans le calcul de stabilité des seuils des dépressions sur le parement aval, dans l'hypothèse de l'écoulement de la crue exceptionnelle avec faible débit solide, mais pour laquelle il ne serait pas justifié de calculer le profil déversant.

La partie supérieure du profil doit être de préférence plongeante vers l'amont (voir figure n° 4). Ceci permet, d'une part, de supprimer pratiquement les affouillements contre le parement amont et, d'autre part, de faciliter le passage du transport solide en faisant jouer à cette partie du profil amont le rôle de tremplin.

Enfin le raccordement du profil déversant et du radier incliné sera assuré par une courbe de façon à limiter l'effet de pilonnage du radier par les matériaux de grandes dimensions; d'ailleurs, si le transport solide est suffisant, ce pi-

lonnage ne se fait plus sur le radier mais sur les matériaux de fond eux-mêmes, par suite du remblaiement de la fosse d'amortissement.

3. — COEFFICIENT DE DÉBIT m :

Au paragraphe « Ecoulement sur le seuil », la valeur m a été définie en fonction de $\frac{y}{h}$, rapport du tirant d'eau à l'aplomb du seuil à la charge totale $y + \frac{v^2}{2g}$ par la fonction :

$$m = \frac{y}{h} \sqrt{1 - \frac{y}{h}}$$

On a retenu pour les calculs la valeur $m=0,3$; notons que, pour cette valeur, $\frac{y}{h} = 0,38$.

L'étude de la fonction $m\left(\frac{y}{h}\right)$ (figures 3 a et 3 b) montre que :

— pour les valeurs de $\frac{y}{h} \geq 2/3$, le coefficient de débit est maximum et égal à 0,385, l'écoulement passant sur le seuil par son tirant d'eau critique;

— pour les valeurs de $\frac{y}{h} < 2/3$ — écoulement supercritique — m prend une valeur inférieure à 0,385.

Il est facile de voir que pour toutes les valeurs de $\frac{y}{h} > 0,38$, soit $\frac{y}{y_{cr}} > 0,67$, le coefficient de débit réel est supérieur à 0,3. La limite supérieure de cet écart est voisine de 18 %.

En général, pour les cas pratiques, la valeur $m=0,3$ que nous proposons pour le coefficient de débit, conduit à une sécurité sur le dimensionnement du seuil, celui-ci étant calculé pour une valeur plus forte de la charge.

4. — PROTECTION AVAL DES RADIERS DES SEUILS :

Si le talus à l'aval du bassin d'amortissement formé au pied de chaque seuil vient à être ébréché, le ressaut pour le débit fondamental Q (eaux non chargées) peut ne plus se former sur le radier; mais alors, le léger relèvement du radier assure, comme on l'a déjà dit, la protection de celui-ci contre les affouillements.

II. — Affouillabilité des biefs. — Similitude du transport des matériaux de fond.

L'étude théorique et les essais sur modèle ont permis de trouver les dimensions optima à donner aux biefs et aux seuils. On peut cependant se demander dans quelle mesure on retrouvera dans le réel les phénomènes observés sur le mo-

dèle, dans les conditions homologues de débits solide et liquide. C'est poser le problème de la similitude de la pente de pavage et du transport solide.

Pour des variations de pente de 0,4 à 23 ‰ et du diamètre moyen des matériaux de 0,4 à 28,6 mm, — essais du professeur MEYER-PETER — le problème a déjà été abordé : on pourrait évidemment faire quelques réserves, mais nous pensons, compte tenu de la nature de notre problème pour lequel on admet de larges coefficients de sécurité, que les données de ces expériences sont suffisantes pour des pentes inférieures à 2,3 ‰.

Dans les cas pratiques où l'on doit envisager la réalisation d'un chenal en escalier et à biefs affouillables, la pente et, corrélativement (1), le diamètre moyen des matériaux de fond, peuvent se situer en dehors des limites d'utilisation des relations de MEYER-PETER.

Les phénomènes de pavage et de transport solide aux fortes pentes sont peu connus. Celui-ci, en particulier, se présente sous l'aspect « d'écoulement de laves ». Nous ferons cependant quelques remarques sur ces phénomènes :

1. — L'influence de la pente semble être prépondérante; l'examen de la formule de MEYER-PETER :

$$q_s^{2/3} J = ad + b g_s^{2/3}$$

(où a et b sont des constantes, et d un diamètre caractéristique des matériaux)

bien qu'elle soit en dehors de ses limites de validité, montre que ad est négligeable devant les autres termes; il y aurait donc proportionnalité entre le débit liquide q_s et le débit solide g_s , rapportés tous deux à l'unité de largeur.

2. — La forte valeur de la pente et la rugosité du lit imposent évidemment un écoulement turbulent rugueux. Au point de vue théorique, ce régime d'écoulement se situe dans la zone de validité de la similitude.

Nous avons pu récemment faire une comparaison entre les aspects d'un pavage obtenu sur un modèle au 1/30° d'un torrent de pente 6 ‰ et celui observé dans la nature pour des débits liquides homologues. La similitude du pavage est acceptable, mais il faudrait multiplier les observations.

L'affouillabilité des biefs dans la nature est liée à deux autres facteurs :

1. — La constance de la granulométrie dans le temps; il semble qu'il soit assez facile de se faire

FIG. 6.

une opinion sur cette question par un examen géologique du bassin versant du torrent étudié.

2. — L'insuffisance du débit solide par rapport au débit de saturation g_s relatif à un débit liquide donné. Pour des débits liquides supérieurs au débit fondamental Q et pour des débits solides, affectés d'un coefficient de sécurité pouvant atteindre la valeur 0,3, des essais ont montré, dans un cas particulier, que les affouillements dans les biefs n'atteignaient pas des valeurs dangereuses pour la stabilité des ouvrages.

III. — Application de la méthode de calcul à un cas particulier.

Nous avons appliqué la méthode de calcul exposée ci-dessus à l'étude d'un chenal en escalier

FIG. 7.

(1) On sait qu'il existe une relation plus ou moins bien définie entre la pente et les dimensions des matériaux de fond.

FIG. 8.

pour la régularisation du torrent « Le Cady » à la traversée de Vernet-les-Bains (Pyrénées-Orientales). L'étude sur modèle au 1/30^{ème} a permis de mettre en évidence un bon accord entre les résultats d'essais et les indications théoriques fournies par la courbe L(P) (fig. 6), où les points R et S traduisent les limites imposées par les divagations et la stabilité minimum.

FIG. 9.

Nous indiquerons simplement ici que, pour une pente générale du talus naturel de 6 % environ, une granulométrie des matériaux de fond continue du sable au bloc rocheux de 1,20 à 1,50 m de dimension principale, un débit fondamental de 50 m³/s, une largeur du chenal de 22 m, nous avons adopté le seuil qui fait l'objet de la figure 7.

L'étude sur modèle a montré que le comportement du chenal ainsi réalisé est correct jusqu'à la crue exceptionnelle de 300 m³/s, même pour de faibles débits solides égaux aux 3/10^{ème} du débit solide de saturation.

Les photographies (figures 8 et 9) sont relatives à l'écoulement du débit fondamental de 50 m³/s et à l'aspect des fonds stabilisés après cet écoulement. La photographie figure 10 montre le comportement du chenal pour une crue de 200 m³/s, le débit solide pris en considération n'étant que les 3/10^{ème} du débit solide de saturation.

IV. — Conclusions.

Si la détermination théorique ou expérimentale d'un chenal évacuateur de crue en escalier

FIG. 10.

à biefs affouillables n'offre pas de difficultés, il semble cependant que des observations effectuées sur des ouvrages réels permettraient d'apporter les corrections nécessaires à la méthode de calcul; en particulier, elles pourraient permettre de diminuer l'importance des coefficients

de sécurité. Il n'est pas possible de réaliser sur modèle des extrapolations importantes sur la granulométrie des matériaux employés, la valeur des pentes et les débits liquide et solide, les moyens qu'il faudrait mettre en œuvre étant hors de proportion avec des essais de laboratoire.

CHAPITRE II

GÉNÉRALISATION DE LA MÉTHODE DE CALCUL D'UN CHENAL EN ESCALIER ET A BIEFS AFFOUILLABLES

APPLICATION A LA RÉGULARISATION DES TORRENTS

Généralités

Pour régulariser un torrent, il n'est pas nécessaire et économique de réaliser un chenal qui canalise le torrent avec la sécurité requise par exemple à la traversée d'une agglomération. Le principe de régularisation en escalier des torrents est bien connu; il consiste à disposer des seuils perpendiculaires à l'écoulement (en pierres sèches, gabions, fascines, etc...) et d'assurer leur liaison avec les rives naturelles par des perrés sur quelques mètres seulement, de part et d'autre du seuil. Il semble possible, pour la régularisation des torrents, d'adopter le type de seuil que nous avons défini; il n'est pas nécessaire en particulier que le seuil soit construit en maçonnerie ou en béton. Un seuil réalisé en gabions de poids suffisant, ou en troncs d'arbres placés perpendiculairement à l'écoulement, dont le profil serait traité convenablement, devrait donner satisfaction pour un coût de construction assez réduit. Il est essentiel de soigner la réalisation du profil, pour éviter la destruction du seuil par les affouillements qui se produisent à l'aval; un seuil vertical est à proscrire dans la plupart des cas, car il donne toujours lieu à des affouillements concentrés au pied du seuil, même avec des eaux chargées en matières solides.

Le chenal étudié au chapitre I est caractérisé par une largeur constante et une pente constante.

Il est possible d'étendre la méthode de calcul aux deux cas suivants :

- 1° La pente J_0 du lit du torrent à régulariser est variable, mais on peut considérer sa largeur b comme constante.
- 2° La pente J_0 et la largeur b du lit sont variables.

I. — *Torrent de pente variable et largeur du lit constante.*

Nous admettons que la largeur b , considérée comme constante, est une moyenne pour le secteur du torrent à régulariser, et que les faibles élargissements ou rétrécissements du lit du torrent sont toujours progressifs, de façon à éviter les phénomènes secondaires tels que décollements, tourbillons, ressauts locaux.

La méthode consiste à fractionner le lit du torrent en tronçons, 0-1, 1-2, $(n-1)-n...$ pour lesquels on peut admettre que le lit a une pente constante $J_0, J_1, ... J_{n-1}...$ Il suffit ensuite d'appliquer la méthode de calcul exposée au chapitre I, à chacun des chenaux de largeur b et de pente $J_0, J_1... J_{n-1}...$

On obtient ainsi n courbes $L(P)$ dans l'étude de la relation entre la longueur d'un bief et la hauteur de chute sur le radier du seuil.

Pour le dimensionnement des seuils et des biefs, on tiendra compte naturellement des considérations économiques, de stabilité et hydrauliques (divagation, débit solide inférieur à la saturation).

On pourra rechercher également pour l'ensemble du lit :

- soit des biefs de longueur sensiblement constante $L = L_0$. L'importance des seuils se déduit immédiatement de la famille de courbes $L(P)$ par la condition $L = L_0$;
- Soit des seuils de hauteur de chute sur le radier constante $P = P_0$. L'importance des biefs se déduit immédiatement de la famille de courbes $L(P)$ par la condition $P = P_0$.

II. — *Torrent de pente et largeur du lit variables.*

Nous supposons évidemment une variation progressive de la largeur du lit pour éliminer tous les phénomènes de décollement, de tourbillons, de ressauts locaux.

La méthode consiste à décomposer le lit du torrent à régulariser en tronçons dans lesquels on peut admettre une pente naturelle du lit J_n constante. Pour chacun de ces tronçons de pente constante, la largeur du lit est alors variable. On assimilera la variation de la largeur du lit dans le tronçon $(n-1)-n...$ à une variation linéaire par exemple, ou à une suite de variations linéaires définissant des tronçons secondaires $[(n-1)-n]_0$, $[(n-1)-n]_{1...}$ ou toute autre disposition simplifiant les calculs.

On ramène ainsi le problème à l'étude d'un chenal de pente générale J_n constante mais de largeur variable $b = b(L)$.

Pour préciser quelques points essentiels de ce problème, nous allons reprendre successivement les questions étudiées lors de l'établissement de la méthode de calcul d'un chenal en escalier, sans toutefois examiner de nouveau la méthode de façon détaillée.

1° ECOULEMENT SUR LE SEUIL :

Le débit fondamental Q sans charriage doit être défini pour la largeur minimum du torrent, qui ne se trouve pas nécessairement à l'origine du chenal.

2° PENTE D'ÉQUILIBRE DE PAVAGE DANS LA ZONE D'UN BIEF D'ORDRE n :

Il s'agit de déterminer, pour le débit fondamental Q sans charriage, la valeur de la pente d'équilibre de pavage obtenue par pivotement autour du seuil aval du sol initialement à la pente J_n du lit naturel.

Cette pente, dans la zone d'un bief d'ordre n , dépend de la largeur b de la section transversale considérée du torrent.

Si la pente d'équilibre est déterminée par le calcul, et ce sera le cas où les relations du professeur MEYER-PETER s'appliquent, on pourra admettre soit une largeur moyenne pour le bief si la variation totale de largeur n'est pas excessive, soit une variation linéaire approchée de la largeur telle qu'elle résulte des formes des rives du torrent; dans cette dernière hypothèse, la pente d'équilibre J de pavage sera donc déterminée comme une fonction de l'abscisse du point courant de l'axe de l'écoulement.

On pourra naturellement affecter la pente J d'un coefficient de sécurité $n < 1$ pour tenir compte de la tendance à la concavité qu'apporte le seuil aval.

Dans le cas où les relations du professeur MEYER-PETER ne seraient pas applicables, il faudrait demander à des essais sur modèle la valeur de la pente d'équilibre de pavage.

3° ECOULEMENT SUR LA PENTE DE PAVAGE :

Nous admettrons que le calcul du coefficient de rugosité par la formule de STRICKLER est encore applicable pour les pentes supérieures à 2,3 %. Pour le débit fondamental Q , la valeur du tirant d'eau y_3 dépendra de la largeur b , fonction de l'abscisse de la section considérée.

4° DÉTERMINATION DE LA FONCTION $L(P)$:

La détermination de la fonction $L(P)$ par une série de tracés du profil en long est analogue à celle de l'étude précédente. La seule différence réside dans le fait que la pente d'équilibre de pavage et le tirant d'eau sur cette pente sont fonction de l'abscisse du point courant, par l'intermédiaire de la largeur b .

Le choix du dimensionnement des seuils par les courbes $L(P)$, correspondant chacune à un certain tronçon de torrent, sera aussi guidé par les considérations habituelles, économiques, hydrauliques et de stabilité des ouvrages.

On pourra concevoir la réalisation :

- 1° soit de biefs de longueur sensiblement constante; l'importance des seuils se déduit des n courbes $L(P)$;
- 2° soit des seuils de même hauteur de chute; la longueur des biefs se déduit des n courbes $L(P)$.

CONCLUSIONS

L'exposé de la méthode de calcul d'un chenal en escalier et à biefs affouillables montre qu'il est possible d'aborder l'étude de la régularisation d'un torrent autrement que par la voie purement empirique.

L'application de cette méthode, à un cas concret, a donné toute satisfaction sur un modèle établi à l'échelle du 1/30^{ème}, pour une pente générale voisine de 6 % et pour un débit de crue maximum de 300 m³/s, dans la réalité.

Si l'étude théorique préalable permet de préciser un projet de régularisation d'un torrent, en vue d'une étude plus approfondie sur modèle, des observations sur des ouvrages existant, fonctionnant bien ou mal d'ailleurs, devraient permettre d'apporter quelques corrections à la méthode de calcul. Il serait vraisemblablement possible, après un certain nombre d'observations, de réduire les sécurités importantes que nous avons été appelés à prendre. En particulier, le choix du

débit fondamental Q a une répercussion directe sur l'importance et le coût des ouvrages. Il faudrait chercher à dégager une loi empirique capable de mieux préciser la valeur du débit fondamental Q à prendre en considération.

Toutefois, il semble qu'on peut dire qu'une régularisation de torrent, conçue selon notre méthode, doit donner satisfaction. Elle intéresserait en particulier les torrents alpestres et pyrénéens, et ceux d'Afrique du Nord.

Chatou : Mai 1950.

BIBLIOGRAPHIE

- I. — Bruno POGGI. — Sopra gli scaricatori a scala di stramazzi. *Energia Elettrica*, octobre 1949, page 600.
- II. — Ralph WEAVER, Michèle VIPARELLI, WOODWARD, YATES. — Control of the hydraulic jump by sills. *Proceedings A.S.C.E.*, décembre 1949.
- III. — MEYER-PETER. — Quelques problèmes concernant le charriage des matières solides dans les rivières alpines et subalpines. *Mémoires et Travaux de la Société Hydrotechnique de France*.

Volume II, année 1949, p. 102. *La Houille Blanche*, n° B, 1949, p. 688.

- IV. — MULLER. — *Theoretische Grundlagen der Fluss und Wildbachverbaungen*, Verlag A.G. Gebr. Leeman et Co., Zurich, 1943, p. 15.
- V. — E. SCIMEMI. — Il profilo delle dighe sfioranti. *Energia Elettrica*, décembre 1937.
- VI. — Harald LAUFFER. — Strömung in Kanälen mit gekrümmter Sohle. *Wasserkraft und Wasserwirtschaft*, n° 19 et 20, 1936.
- VII. — A. SCHOKLITSCH. — *Hydraulic Structures*, tome II, pp. 1053-1115.

DISCUSSION

M. le Président remercie MM. LOMBARDI et MARQUENET et ajoute que le Laboratoire National d'Hydraulique a fait une amorce de généralisation de la méthode pour la régularisation des torrents : un certain nombre d'abaques préétablis permettraient de résoudre rapidement un problème analogue s'il se présentait. Entre les mains expertes des auteurs, cette étude donnera certainement des conclusions d'ici peu de temps.