

L.J. VANDEPERRE, Ingénieur Civil des Constructions, Docteur Spécial en Mécanique Appliquée, Professeur à l'Université Libre de Bruxelles, J. PLISNIER et A. WINAND, Ingénieurs Civils des Constructions, Assistants à l'Université Libre de Bruxelles . . . 53

De drie hoofdproblemen in verband met de stroming van niet-samendrukbare vloeistoffen door buis- of pijpleidingen. (2^e deel en slot). (Samenvatting) . . . 82

COMPTE RENDU - VERSLAG

La structure du revêtement en béton de ciment, par R. DUTRON, Directeur du Laboratoire de Recherches et de Contrôle du G.P.C., A.J.P. van der BURGH, Directeur du Rijkswegenbouwlaboratorium, La Haye et G. STREIT, Regierung-Baumeister a.D., Hannovre. . . 83

De structuur van de wegverharding van cementbeton. (Samenvatting) . . . 92

CHRONIQUES - KRONIEKEN

CHINE - CHINA — Fundering der pijlers van de grote brug op de Yangtze. — *Les fondations des piles du grand pont sur le Yangtze. (Résumé)* . . . 93

ETATS-UNIS - VERENIGDE STATEN — Construction de deux barrages en enrochements avec masque d'étanchéité amont en béton. — *Bouw van 2 dammen uit steenstortingen met afdichtend scherm in beton. (Samenvatting)* . . . 94

FRANCE - FRANKRIJK — Juiste en volledige berekening van cilindrische schaalgewelven met constante dikte en cirkelvormige richtlijn. — *Calcul rigoureux complet des voiles cylindriques d'épaisseur constante à directrices circulaires. (Résumé)* . . . 96

BIBLIOGRAPHIE

The Theory of Suspension Bridges, by A. PUGSLEY, éditeur Edward Arnold, London. — **Hydraulique générale**, par A. SCHLAG, éditions Sciences et Lettres, Liège. — **Mécanique des sols appliquée aux travaux publics et au bâtiment**, par K. TERZAGHI et R.B. PECK, éditeur Dunod, Paris. — **La Mécanique des Roches, appliquée aux travaux publics**, par J. TALOBRE, éditeur Dunod, Paris. — **La coordination modulaire dans le bâtiment**, publié par l'O.E.C.E., Paris. — **Annuaire hydrologique du Congo Belge et du Ruanda-Urundi** 1956, par E.J. DEVROEY, publication du Comité Hydrographique du Bassin congolais, Bruxelles. — Communications présentées par la R.I.L.E.M. : **Résultats obtenus lors de l'auscultation continue depuis 1949 du pont en béton précontraint sur la Meuse à Sclayn**, par H. LOUIS et E. DEHAN. (Comm. 13). — **Résultats de l'auscultation de deux ponts-route et d'un pont-rails métalliques**, par F. HEBRANT, H. LOUIS et A. SOETE (Comm. 21). — **Prestressed Concrete Grid Bridges with Stiffened Exterior Beams**, by ANDREW GALLIA, extrait de *Constructional Review*. — **L'Universitaire-Science et Technique**, n° 4-1956, Alexandrie. — **Cahiers du Centre Scientifique et technique du Bâtiment**. (Vol. 29), Rédaction-Administration, Paris . . . 97

MEMOIRES-VERHANDELINGEN

CONTRIBUTION A L'ETUDE DES FLEUVES A MAREE

PROBLEME DES DISCONTINUITES

par

L. BONNET

Inspecteur Général honoraire des Ponts et Chaussées

PREAMBULE

Dans une première étude sur les fleuves à marée, qui fut publiée dans les Annales des Travaux Publics de Belgique, fascicules 3, 4, 5 et 6 de 1922 et 1, 2, 3 et 5 de 1923, j'ai montré, qu'en se basant sur la notion de l'énergie de l'onde marée fluviale et sur la déperdition de cette énergie par suite des résistances du fleuve à la propagation de l'onde, il est possible de résoudre les problèmes les plus intéressants qui se présentent sur un fleuve à marée.

La théorie est basée sur les lois du mouvement des ondes de translation établies par M. Boussinesq et sur une étude de feu Merten, professeur à l'Université de Gand, concernant la variation de la largeur d'un fleuve à marée.

Elle suppose que le lit du fleuve varie d'une manière continue, de sorte qu'elle ne résout pas la question des perturbations qu'introduisent, dans la propagation de la marée fluviale, les discontinuités brusques du fleuve sous la forme d'un élargissement ou d'un étranglement, d'un exhaussement ou d'un approfondissement. La présente étude comble cette lacune et met à la disposition de l'Ingénieur des formules simples pour résoudre les problèmes des discontinuités. Elles ont été vérifiées au Laboratoire de Recherches Hydrauliques d'Anvers où elles ont donné des résultats concordants avec les essais de discontinuités effectués sur un modèle de rivière à marée, dont la similitude avait été réalisée avec la rivière dans son état naturel.

Comme le calcul des discontinuités est basé sur les données fournies par le calcul de la propagation de la marée fluviale dans le cas d'un fleuve dont le lit varie continûment, nous rappellerons au préalable les équations fondamentales qui s'y rapportent et qui ont paru dans les fascicules indiqués plus haut de 1922 et 1923. Les données sont relatives au calcul des sections sous marée haute moyenne, de l'amplitude de la marée et du débit de flot.

§ 1. — Loi des sections à marée haute moyenne

Dans les équations rappelées ci-après les lettres ont les significations suivantes :

- σ = surface de la section à marée haute,
- σ_0 = surface de la section à marée haute à l'origine aval du fleuve,
- λ = profondeur moyenne à mi-marée,
- λ_0 = profondeur moyenne à mi-marée à l'origine aval
- χ = distance du point considéré du fleuve au point pris comme origine à l'aval du fleuve,
- $\lambda = \lambda_0 \pm a\chi$, loi de variation de la profondeur moyenne à mi-marée,
- R = constante dépendant de la résistance du fleuve à la propagation de la marée fluviale,

V = vitesse moyenne de l'eau dans une section transversale,

V_0 = vitesse moyenne de l'eau dans la section à l'origine aval du fleuve,

W = coefficient de variation de la vitesse dans l'expression : $V = V_0 \pm Wx$,

W_1 = valeur du rapport $\frac{W}{V_0}$, qui, pour l'Escaut maritime, doit être divisé par 1,15.

La superficie de la section transversale sous marée haute moyenne, dans les cas les plus fréquents, est donnée par les relations suivantes.

PREMIER CAS. — VITESSE MOYENNE DE L'EAU EST CONSTANTE.

1°) Profondeur moyenne à mi-marée constante :
 $\lambda = \lambda_0$

$$(1) \log \sigma = \log \sigma_0 - R \log e \lambda_0^{-3/2} \times x$$

2°) Profondeur moyenne à mi-marée décroissante suivant la formule :

$$\lambda = \lambda_0 - ax$$

$$(2) \log \sigma = \log \sigma_0 - \frac{2 R \log e}{a} \times [(\lambda_0 - ax)^{-1/2} - \lambda_0^{-1/2}]$$

3°) Profondeur moyenne à mi-marée croissante suivant la formule :

$$\lambda = \lambda_0 + ax$$

$$(3) \log \sigma = \log \sigma_0 - \frac{2 R \log e}{a} \times [\lambda_0^{-1/2} - (\lambda_0 + ax)^{-1/2}]$$

SECOND CAS. — VITESSE MOYENNE DE L'EAU VARIE SUIVANT UNE LOI LINEAIRE.

$$V = V_0 \pm Wx$$

1°) Profondeur moyenne à mi-marée constante :

$$\lambda = \lambda_0$$

$$(4) \log \sigma = \log \sigma_0 - R \log e \lambda_0^{-3/2} x + \log \left(\frac{1}{1 \pm W' V} \right)^2$$

2°) Profondeur moyenne à mi-marée décroissante suivant la formule :

$$\lambda = \lambda_0 - ax$$

$$(5) \log \sigma = \log \sigma_0 - \frac{2 R \log e}{a} \times [(\lambda_0 - ax)^{-1/2} - \lambda_0^{-1/2}] + \log \left(\frac{1}{1 \pm W' V} \right)^2$$

3°) Profondeur moyenne à mi-marée croissante :

$$(6) \log \sigma = \log \sigma_0 - \frac{2 R \log e}{a} \times [\lambda_0^{-1/2} - (\lambda_0 + ax)^{-1/2}] + \log \left(\frac{1}{1 \pm W' V} \right)^2$$

Pour de larges fleuves à marée, tel que l'Escaut, nous avons trouvé que, $2 R \log e$ peut être pris égal à 0,688, le kilomètre étant pris pour unité de longueur.

Dans les parties peu larges des rivières et fleuves, il faut multiplier le coefficient de résistance ci-dessus par :

$$\frac{\text{périmètre de la section}}{\text{largeur du fleuve}} = \frac{1 + 2 \lambda}{1}$$

§ 2. — Loi de l'amplitude

La signification des lettres, qui figurent dans l'équation ci-après de l'amplitude de la marée, est donnée en partie au paragraphe précédent, relatif au calcul des sections transversales du fleuve. Il reste à indiquer la signification des lettres suivantes :

l_0 = la largeur du fleuve à mi-marée à l'origine aval du fleuve,

l = la largeur du fleuve à mi-marée à une distance x de l'origine aval du fleuve,

h_0 = l'amplitude de la marée à l'origine aval du fleuve,

h = l'amplitude de la marée à une distance x de l'origine du fleuve.

L'équation théorique donnant l'amplitude de la marée en un point situé à une distance x de l'origine aval du fleuve est la suivante :

$$(7) h = h_0 \frac{\lambda_0}{\lambda_1} \sqrt{\frac{l_0}{1} \times \frac{\sigma}{\sigma_0}}$$

Mais quand on applique cette équation au calcul des amplitudes de la marée fluviale, qui se propage dans l'Escaut et ses affluents soumis à marée, on obtient des résultats qui sont un peu plus grands que ceux de la réalité. Pour établir l'équivalence, il faut multiplier le second membre de l'équation par un coefficient φ qui a la valeur suivante :

$$(8) \varphi = \frac{1}{1 + \sum \frac{B}{a} \left(\frac{1}{\lambda_{\min}} - \frac{1}{\lambda_{\max}} \right) + \sum \frac{B}{\lambda^2} x}$$

Le deuxième terme du dénominateur se rapporte aux sections de profondeur variable, suivant la loi linéaire $\lambda = \lambda_0 \pm ax$.

Le troisième terme se rapporte aux sections de profondeur uniforme.

Le facteur B est une constante, qui pour l'Escaut maritime et ses affluents soumis à marée peut être pris égal à 0,125.

§ 3. — Loi du débit

Soient :

V le volume de flot,

v le volume des eaux d'amont pendant le flot,

h l'amplitude de la marée,

σ la section sous marée haute proportionnelle à l'énergie de l'onde marée fluviale.

La théorie publiée en 1922 et 1923 montre que le volume de flot, le volume des eaux d'amont pendant le flot, l'amplitude de la marée, la section sous marée haute proportionnelle à l'énergie de l'onde sont reliés par une propriété intéressante.

Le rapport de ces valeurs est :

$$(9) \frac{(V + v) h}{\sigma} = C$$

dans lequel C est une constante pour toute section de fleuve à marée, dont le lit varie continûment et dont il ne se détache pas d'affluents à marée.

Nos études au laboratoire ont montré que la valeur de la constante en aval d'une discontinuité est vraie pour le calcul de la modification du débit de la marée au droit de la discontinuité en ce sens que la valeur de la constante de l'onde marée principale est valable pour les ondes dérivées qui s'y produisent, comme nous verrons plus loin. Nous entrons dans quelques détails au chapitre III de la présente étude.

§ 4. — Lois diverses

La théorie publiée en 1922 et 1923 traite encore du niveau moyen du fleuve, de la vitesse de propagation de l'onde marée fluviale, des courbes locales de marée, de la durée du gagnant et du perdant, de la durée du flot et du jusant, des vitesses des courants de flot et de jusant, elle permet de calculer, d'une manière pratique, avec une précision suffisante ces différents éléments de la marée fluviale. Comme ceux-ci n'interviennent pas dans le calcul des modifications apportées par les discontinuités dans la propagation de l'onde marée fluviale, nous ne rappellerons pas ici les formules auxquelles l'étude conduit et nous nous permettons de renvoyer à la publication des Annales des Travaux Publics de Belgique des années 1922 et 1923.

CHAPITRE I

L'INFLUENCE DES DISCONTINUITES SUR LA FORME DE L'ONDE MAREE FLUVIALE

Les fleuves à marées ne présentent pas toujours, sur toute leur longueur, une section transversale qui diminue continûment de l'aval vers l'amont.

Ordinairement un fleuve à marées présente, en certains points de son parcours, des élargissements, des étranglements, des approfondissements ou des exhaussements brusques du fond.

Ces discontinuités n'existent que sur une longueur limitée, mais elles y modifient néanmoins la puissance hydraulique du fleuve : débit de flot et amplitude de la marée.

Le changement apporté à l'amplitude de la marée apparaît clairement par l'interprétation de l'équation (7) ci-dessus, qui donne la valeur de l'amplitude. En effet si à une section 1, il succède une section 2 de largeur et de profondeur différentes on obtient pour l'amplitude dans la section 1, à gauche de a b, et pour celle de la section 2, à droite de a b, les valeurs suivantes :

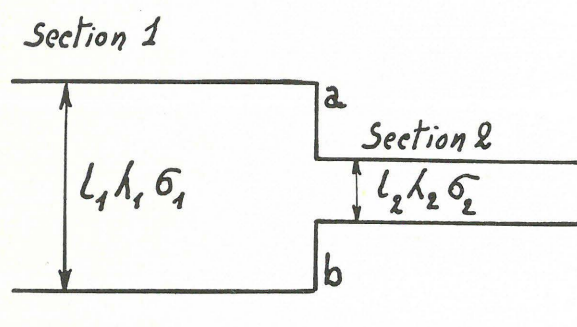


Fig. 1.

$$(10) \quad h_1 = h_0 \frac{\lambda_0}{\lambda_1} \sqrt{\frac{l_0}{l_1} \times \frac{\sigma_1}{\sigma_0}}$$

$$(11) \quad h_2 = h_0 \frac{\lambda_0}{\lambda_2} \sqrt{\frac{l_0}{l_2} \times \frac{\sigma_2}{\sigma_0}}$$

Si nous négligeons la variation possible de σ , nous voyons que :

$h_1 \text{ ab} > h_2 \text{ ab}$ s'il y a un élargissement ou un approfondissement et que

$h_1 \text{ ab} < h_2 \text{ ab}$ s'il y a un étranglement ou un relèvement du fond.

Il en résulte qu'il se forme en a b une onde négative, qui se propage vers l'aval, dans le cas de l'élargisse-

ment ou de l'approfondissement du fleuve; et, une onde positive, qui se propage également vers l'aval, dans le cas d'un étranglement du fleuve ou d'un relèvement du fond.

Ces ondes réfléchies empruntent toutes deux leur énergie à l'onde marée fluviale directe, ce qui a pour conséquence de diminuer l'énergie de cette onde.

Cette réduction de la puissance hydraulique de l'onde marée fluviale directe se fait différemment suivant que l'onde réfléchie est négative ou positive.

Dans le cas d'une onde négative, le volume du flot augmente mais l'amplitude de la marée diminue. Cependant l'augmentation qui s'opère d'une part ne compense pas la réduction qui se produit d'autre part, de

sorte que dans l'ensemble il y a une perte de puissance hydraulique pour l'onde marée fluviale principale.

Dans le cas d'une onde positive, le volume de flot diminue et l'amplitude augmente; mais la dernière majoration ne compense pas la première réduction, de sorte que dans l'ensemble, il y a de nouveau une perte de puissance hydraulique pour l'onde marée principale.

Dans la pratique une discontinuité est accompagnée le plus souvent d'une autre, qui agit en sens contraire de la première.

Ainsi un élargissement produit normalement un exhaussement du fond.

Le premier fait naître une onde négative avec augmentation du volume de flot et réduction de l'amplitude de la marée; tandis que le second donne lieu à une onde

positive avec réduction du volume de flot et augmentation de l'amplitude de la marée. Ces deux effets se neutralisent en tout ou en partie.

Dans le cas d'un étranglement on a le plus souvent un approfondissement. Ces deux discontinuités tendent à nouveau à se neutraliser en tout ou en partie.

En général, les discontinuités rendent le problème encore plus compliqué que dans les cas considérés ci-dessus. Ainsi l'élargissement d'un fleuve à marées est normalement suivi, à quelque distance en amont, d'un étranglement et à un étranglement local succède, plus en amont, un élargissement.

Si nous considérons les profondeurs, on constate qu'un exhaussement du fond est suivi d'un approfondissement et vice-versa.

Ces discontinuités, qui marchent par paires produisent toutes deux des ondes réfléchies qui réagissent l'une sur l'autre.

Considérons, par exemple, le cas de l'élargissement du croquis ci-contre :

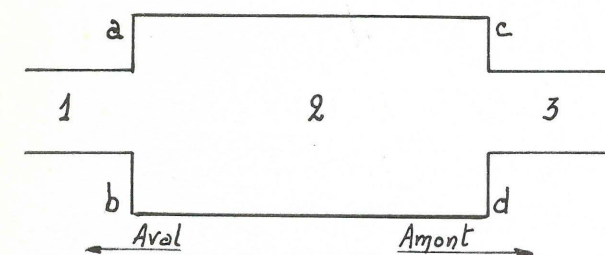


Fig. 2.

En a b, il se forme une onde négative qui se propage vers l'aval et diminue la hauteur de la marée en a b. L'onde marée principale ainsi abaissée continue sa propagation au travers de la partie élargie du fleuve vers l'amont.

En c d, il se forme une onde positive qui relève la hauteur de la marée. L'onde positive est réfléchie vers l'aval et arrive jusqu'en a b, où elle réagit sur l'onde négative formée précédemment. En même temps, elle reforme une nouvelle onde positive par suite de l'existence de la partie étranglée en a b. Cette nouvelle onde positive est réfléchie vers c d, où elle réagit sur l'onde

marée principale et la première onde positive réfléchie. En général, on peut s'arrêter à cette dernière réaction pour calculer les caractéristiques de l'onde marée qui se propage dans la section 3 et pour corriger celles de l'onde marée qui se propage dans les sections 1 et 2. En effet les réactions ultérieures sont trop peu importantes pour influencer encore l'onde marée principale et les ondes réfléchies, qui se sont produites antérieurement. De plus la durée de la propagation des ondes réfléchies entre a b et c d, et vice-versa, place l'instant de l'amplitude maxima de ces ondes de plus en plus en retard sur l'instant des hautes eaux de l'onde marée principale, de sorte qu'elles n'ont plus d'influence sur l'amplitude de la marée ni en a b ni en c d.

Tout ce que les dernières ondes réfléchies peuvent faire, c'est de créer des gonflements ou des creux sur les flancs des courbes de marée.

Ces altérations des courbes marée locales ne jouent pratiquement pas de rôle dans le régime d'un fleuve à marées et peuvent être négligées.

Le mécanisme décrit ci-dessus des modifications apportées à l'onde marée fluviale directe, dans le cas d'un élargissement, peut se répéter pour les autres discontinuités locales telles qu'un étranglement, un approfondissement ou un exhaussement du fond du fleuve.

Il résulte des considérations ci-dessus que les discontinuités introduisent des perturbations sérieuses dans la propagation d'une marée fluviale et qu'elles en affaiblissent l'énergie. Aussi ne peuvent-elles être utiles que dans des cas spéciaux, pour corriger des situations locales.

Nous analysons plus loin quelques-uns de ces cas.

CHAPITRE II

CALCUL DES MODIFICATIONS APPORTEES PAR LES DISCONTINUITES DANS L'ENERGIE ET L'AMPLITUDE DE L'ONDE MAREE FLUVIALE

Considérons un fleuve à marées présentant une discontinuité dans la section transversale A B.

Admettons que l'aval soit vers la gauche et l'amont vers la droite.

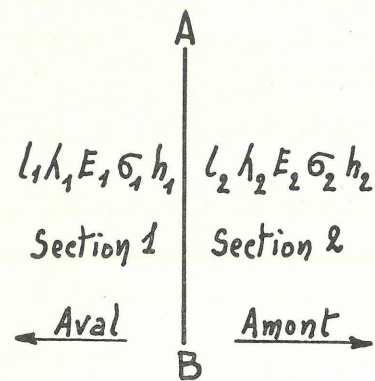


Fig. 3.

Soient l_1 et λ_1 la largeur et la profondeur moyenne sous mi-marée dans la section 1 et soient l_2 et λ_2 les mêmes éléments dans la section 2. Soient E_1 la valeur de l'énergie de l'onde marée fluviale; σ_1 la section sous marée haute, proportionnelle à E_1 et h_1 , l'amplitude de la marée fluviale dans la section 1. Ces éléments sont à calculer suivant la théorie générale rappelée dans le préambule de ce mémoire.

Soient pour la section 2 E_2 la valeur de l'énergie de l'onde marée fluviale; σ_2 la section sous marée haute proportionnelle à E_2 , h_2 l'amplitude de la marée fluviale, en tenant compte de la discontinuité en A B.

L'onde fluviale ($\sigma_2 h_2$) est celle qui se propage vers l'amont dans la section 2. L'onde réfléchie ($\sigma_1 - \sigma_2$, $h_1 - h_2$) est celle qui retourne vers l'aval.

L'énergie d'une tranche de l'onde marée fluviale dans la section 1, égale à l'unité, a pour valeur $E_1 = \rho g l_1 h_1^2$.

L'énergie de l'onde réfléchie en A B, qui a une amplitude égale à $h_1 - h_2$ vaut :

$$E_1 - E_2 = \rho g l_1 (h_1 - h_2)^2.$$

$$\frac{E_1}{E_1 - E_2} = \frac{\rho g l_1 h_1^2}{\rho g l_1 (h_1 - h_2)^2} = \frac{h_1^2}{(h_1 - h_2)^2}$$

Comme E_1 et E_2 sont respectivement proportionnels à σ_1 et σ_2 , nous pouvons écrire :

$$\frac{\sigma_1}{\sigma_1 - \sigma_2} = \frac{h_1^2}{(h_1 - h_2)^2}$$

$$\text{d'où : } \sigma_1 (h_1 - h_2)^2 = (\sigma_1 - \sigma_2) h_1^2$$

$$2\sigma_1 h_1 h_2 = \sigma_2 h_1^2 + \sigma_1 h_2^2$$

Nous pouvons écrire d'autre part :

$$h_2 = h_1 \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \sqrt{\frac{l_1}{l_2} \times \frac{\sigma_2}{\sigma_1}}$$

En remplaçant cette valeur de h_2 dans l'équation précédente nous obtenons :

$$2\sigma_1 h_1^2 \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \sqrt{\frac{l_1}{l_2} \times \frac{\sigma_2}{\sigma_1}} = \sigma_2 h_1^2 +$$

$$\sigma_1 h_1^2 \left(\frac{\lambda_1}{\lambda_2} \right)^2 \left(\frac{l_1 \times \sigma_2}{l_2 \times \sigma_1} \right)$$

d'où

$$(12) \quad \sigma_2 = 4\sigma_1 \frac{\lambda_1^2 \lambda_2^2 l_1 l_2}{(\lambda_1^2 l_1 + \lambda_2^2 l_2)^2}$$

En remplaçant dans l'équation de la valeur de h_2 , σ_2 par sa valeur on obtient :

$$h_2 = h_1 \frac{\lambda_1}{\lambda_2} \sqrt{\frac{l_1}{l_2} \times \frac{4\sigma_1 \lambda_1^2 \lambda_2^2 l_1 l_2}{\sigma_1 (\lambda_1^2 l_1 + \lambda_2^2 l_2)^2}}$$

$$(13) \quad h_2 = 2h_1 \frac{\lambda_1^2 l_1}{\lambda_1^2 l_1 + \lambda_2^2 l_2}$$

Les équations (12) et (13) sont les relations qui permettent de calculer les nouvelles valeurs de σ et de h pour la continuation du problème de la marée fluviale en amont de la discontinuité et pour la correction de σ et de h en aval de la discontinuité par suite de la propagation vers l'embouchure de l'onde réfléchie qui a une énergie proportionnelle à $\sigma_1 - \sigma_2$ et une amplitude égale à $h_1 - h_2$.

Discussion. a) Supposons que la profondeur en A B ne varie pas, c.à.d. que $\lambda_1 = \lambda_2$ dans ce cas les expressions (12) et (13) deviennent :

$$(14) \quad \sigma_2 = 4\sigma_1 \frac{l_1 l_2}{(l_1 + l_2)^2}$$

$$(15) \quad h_2 = 2h_1 \frac{l_1}{l_1 + l_2}$$

b) Quand le fleuve débouche dans un immense lac au point que l_2 puisse être admis égal à l'infini

$$\sigma_2 = 0 \quad \text{et} \quad h_2 = 0$$

Ce qui doit être, puisqu'il n'y a plus d'onde en cette section finale.

c) Quand au contraire un barrage ferme le fleuve en A B, l_2 devient nul et les équations 11 en 12 donnent comme valeur :

$$\sigma_2 = 0 \quad h_2 = 2h_1$$

d) Supposons que la largeur soit la même tant dans la section 1 que dans la section 2, c.à.d. que $l_1 = l_2$, dans ce cas les formules (12) et (13) deviennent :

$$(16) \quad \sigma_2 = 4\sigma_1 \left(\frac{\lambda_1 \lambda_2}{\lambda_1^2 + \lambda_2^2} \right)^2$$

$$(17) \quad h_2 = 2h_1 \frac{\lambda_1^2}{\lambda_1^2 + \lambda_2^2}$$

Si nous supposons maintenant que $\lambda_2 = 0$, c.à.d. si nous admettons qu'en a il existe un barrage, nous obtenons :

$$\sigma_2 = 0 \quad \text{et} \quad h_2 = 2h_1$$

e) Les relations (9) et (10) peuvent encore se mettre sous la forme suivante :

$$(18) \quad \sigma_2 = 4\sigma_1 \frac{\lambda_1^2 \lambda_2^2 l_1 l_2}{(\lambda_1^2 l_1 + \lambda_2^2 l_2)^2}$$

$$= 4\sigma_1 \frac{\lambda_2^2 l_2}{\lambda_1^2 l_1} \left(1 + \frac{\lambda_2^2 l_2}{\lambda_1^2 l_1} \right)^2$$

$$(19) \quad h_2 = 2h_1 \frac{\lambda_1^2 l_1}{\lambda_1^2 l_1 + \lambda_2^2 l_2}$$

$$= h_1 \frac{2}{1 + \frac{\lambda_2^2 l_2}{\lambda_1^2 l_1}}$$

On peut se demander pour quelles valeurs de λ_2 et l_2 , l'énergie σ_2 soit égale à σ_1 , et h_2 égale à h_1 , c'est-à-dire pour quelles valeurs de ces éléments, l'onde négative et l'onde positive qui se forment en A B, par suite de la variation simultanée de la profondeur et de la largeur du fleuve, se neutralisent.

Pour cela, il faut que :

$$\frac{\lambda_2^2 l_2}{\lambda_1^2 l_1} = 1 \quad \text{ou} \quad \lambda_2^2 l_2 = \lambda_1^2 l_1.$$

CHAPITRE III

VERIFICATION DE LA THEORIE DES DISCONTINUITES

Au Laboratoire de Recherches Hydrauliques d'Anvers, il fut créé, sous la direction de Mr. Lamoën, actuellement professeur à l'Université de Liège, un modèle de rivière à marées : la Nèthe, dans le but d'étudier les modifications que subissait la marée fluviale, quand on introduisait des modifications dans le lit de la rivière.

C'est lui qui releva également ces changements avec grande compétence et précision auxquelles je rends hommage.

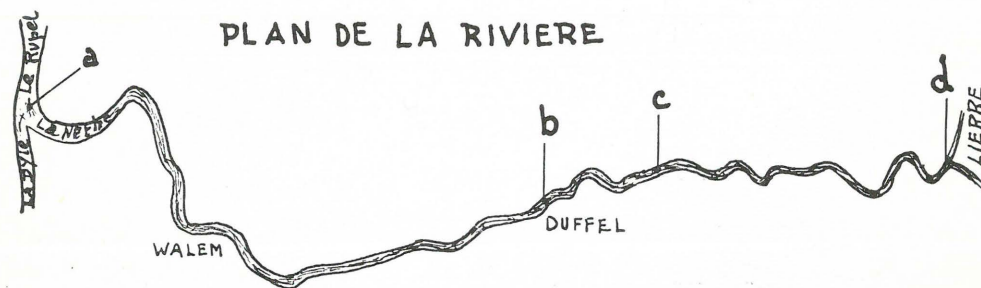
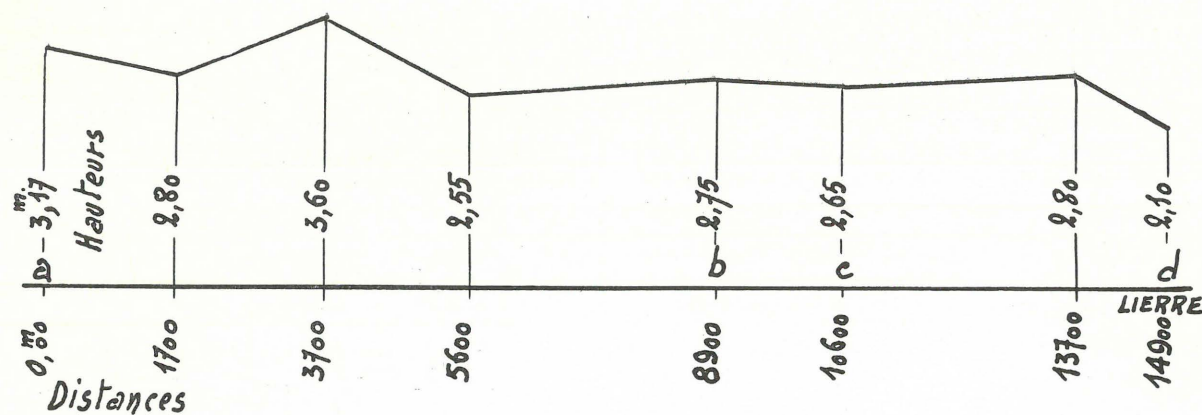
Pour la construction du modèle on adopta les échelles suivantes :

$$\text{Longueur et largeur : } \frac{1}{150}$$

$$\text{Profondeur : } \frac{1}{40}$$

$$\text{Temps : } \frac{\sqrt{40}}{150} = \frac{1}{23,71}$$

La rivière présentait sous mi-marée les profondeurs moyennes figurées au croquis ci-contre :



Figures 4 et 5.

Après quelques tâtonnements et une adaptation judicieuse des rugosités du lit du modèle on obtint une similitude satisfaisante avec la nature. Ceci peut être vérifié par l'examen du tableau ci-dessous, qui donne les amplitudes de la marée fluviale aux points principaux de la rivière, dans les trois cas suivants : en nature, dans le modèle et d'après calcul en appliquant la méthode rappelée au préambule du présent mémoire.

Une similitude aussi précise put être obtenue dans les volumes de flot.

Dans cette vérification, nous avons admis à l'embouchure, la section transversale sous marée haute qui y existait réellement; elle avait une surface de 432 m².

Le calcul théorique nous donna aux points principaux de la rivière, dont question ci-dessus, les sections transversales suivantes sous le niveau de marée haute :

- b) Section à 8900 m de l'embouchure : 105,70 m²
- c) Section à 10 600 m de l'embouchure : 78,— m²
- d) Section à Lierre : 34,60 m²

TABEAU DES AMPLITUDES

Distances cumulées	Entre-distances	Indication des points de la rivière	Nature	Modèle	Calcul
a) 0,00 m		Embouchure.	3,84 m	3,83 m	3,84 m
b) 8 900 m	8900 m	Origine des discontinuités.	—	2,64 m	2,64 m
c) 10 600 m	1700 m	Fin des discontinuités.	—	2,54 m	2,55 m
d) 14 300 m	4300 m	Lierre.	2,25 m	2,26 m	2,26 m

Un calcul préalable sur la rivière existante donna comme valeur de la constante c, dans la loi du débit : 20 000.

En se servant de cette valeur, nous calculâmes les valeurs théoriques du débit de flot aux points principaux considérés ci-dessus.

Ces résultats ainsi que ceux donnés par la nature et par le modèle au laboratoire, permirent de dresser le tableau ci-dessous :

TABEAU DES VOLUMES DE FLOT

Nos d'ordre	Indications des points de la rivière	Nature	Modèle	Calcul
a	Embouchure.	2 467 000	2 293 000	2 260 000
b	Origine des discontinuités.	—	864 000	802 000
c	Fin des discontinuités.	—	594 000	610 000
d	Lierre.	319 000	—	306 000

Après avoir réalisé la similitude du modèle avec la nature dans les conditions ci-dessus, il fut procédé à l'introduction de discontinuités dans le modèle, à partir d'un point b (voir profil des profondeurs et plan de la rivière) situé à une distance de 8 900 m de l'embouchure, jusqu'au point c situé à une distance de 1700 m du point b.

Les discontinuités réalisées furent les suivantes :

- 1°) Un élargissement dont le rapport des largeurs était égal à 2,6 à l'origine b et 3,93 à l'extrémité c.
- 2°) Un rétrécissement, dont le rapport des largeurs était égal à 1/3.
- 3°) Un exhaussement du fond en diminuant de moitié la profondeur moyenne sous marée basse.

§ 1. — Elargissement

L'énergie en ab, sans tenir compte de l'élargissement, est proportionnelle à 105,7 ; l'amplitude h est égale à 2,64 m. Par suite de la formation d'une onde négative en ab, positive en cd, leur renvoi vers l'aval et la ré-

percussion de l'une sur l'autre, l'énergie de l'onde marée se modifie comme suit :

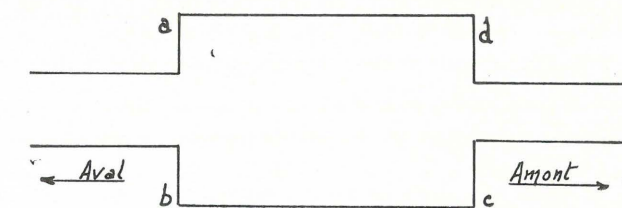


Fig. 6.

1°) En ab, où il se forme une onde négative proportionnelle à 21,1, l'onde marée, qui se propage jusqu'en cd, n'a plus qu'une énergie de valeur 84,6.

2°) La propagation de la marée jusqu'en cd réduit son énergie jusqu'à 62,86.

3°) En cd, la formation de l'onde positive réduit une nouvelle fois l'énergie de l'onde marée jusqu'à 40,80.

4°) L'onde positive qui retourne vers l'aval a une valeur de 62,86 — 40,80 = 22,06, mais en ab son énergie n'est plus proportionnelle qu'à 16,4 par suite de l'usure qui se produit entre cd et ab. Une partie de cette dernière onde positive est à nouveau renvoyée vers l'amont. Cette partie a une énergie de 3,2. La réaction de l'onde positive sur l'onde négative en ab donne comme valeur finale de l'énergie en ab : 97,8.

5°) En ce qui concerne l'énergie finale de l'onde marée en cd elle résulte de l'onde marée initiale diminuée de l'énergie des deux ondes positives réfléchies vers l'aval au point considéré soit 42,4.

6°) Les amplitudes de la marée sont ainsi modifiées comme suit :

Indication de l'endroit	Avant élargissement		Après élargissement	
	Modèle	Calcul	Modèle	Calcul
a b	2,64	2,64	2,25 m	2,28
c d	2,54	2,55	2,30 m	2,19

La réduction de la puissance hydraulique en amont de l'élargissement se fait sentir nettement par le calcul et par l'essai en modèle.

Pour s'en rendre compte il suffit d'examiner le tableau ci-dessus et les observations à Lierre, situé à 3,1 km en amont du point c d.

Les observations de Lierre donnèrent les amplitudes suivantes de la marée :

- 1) Avant élargissement : 2,25 m.
- 2) Après élargissement a) modèle : 2,06 m
b) calcul : 2,00 m.

Les essais faits sur les débits de la marée confirmèrent totalement des indications données par le relevé des amplitudes.

Voici comment les calculs peuvent être disposés pour obtenir une vue claire sur les conséquences de la production des ondes négatives et positives au droit des discontinuités.

POINT ab.

a) Onde marée principale :

$$\frac{20\,000 \times 105,7}{2,64\text{ m}} = 802\,000\text{ m}^3$$

b) Onde négative réfléchie :

$$\frac{20\,000 \times 21,1}{1,17} = \frac{361\,000\text{ m}^3}{1\,163\,000\text{ m}^3}$$

L'essai en laboratoire donne 1 244 000 m³.

POINT cd.

a) Onde marée principale :

$$\frac{20\,000 \times 62,86}{1,15\text{ m}} = 1\,090\,000\text{ m}^3$$

Cette onde est diminuée du volume de l'onde positive réfléchie vers l'aval.

$$\frac{20\,000 \times 22,06}{0,70\text{ m}} = 630\,000\text{ m}^3$$

Cette onde positive qui retourne vers ab forme, en ce point, une nouvelle onde positive qui se propage vers cd. De cette nouvelle onde positive, il n'y a qu'une partie d'énergie 1,57 et d'amplitude 0,40 m qui remonte la rivière en amont de cd.

Cette seconde onde positive a un volume de

$$\frac{20\,000 \times 1,57}{0,40} = 79\,000\text{ m}^3$$

De sorte que le volume final de l'onde marée qui se propage en amont de c est égal à : 1 090 000 — 630 000 + 79 000 = 539 000 m³.

L'essai en laboratoire a donné 507 000 m³.

Si l'on veut continuer à calculer les débits en amont de l'élargissement, il faut déterminer la valeur de la constante c qui s'y rapporte soit :

$$\frac{539\,000 \times 2,19\text{ m}}{40,80 + 1,57} = 27\,800$$

Dans laquelle :

539 000 est le volume de la marée ;

2,19 m l'amplitude finale ; 40,80 + 1,57 l'énergie résultante au point c considéré. La constante c ainsi

obtenue permet de calculer les débits de la marée pour tous les points situés plus en amont, notamment pour Lierre.

En ce point on obtient :

$$\frac{27\,800 \times 18,82}{2} = 262\,000$$

soit beaucoup moins que le volume de 306 000 m³, quand il n'y a pas d'élargissement.

De tout ce qui précède il résulte qu'au point de vue théorique, un élargissement n'est pas favorable à la conservation de la puissance hydraulique d'un fleuve à marée.

Voyons ce qui en est au point de vue pratique.

Nous avons vu qu'à l'origine ab de l'élargissement, il se forme une onde négative qui provoque un appel supplémentaire d'eau.

Cet accroissement de débit de flot donne une majoration de la vitesse des courants en aval de l'élargissement. Cette majoration n'est toutefois pas tout à fait en rapport avec l'augmentation du débit de flot. Car si l'on continuait l'étude on verrait que l'onde négative augmente la durée du flot et diminue celle du jusant. Dans ces conditions, la vitesse des courants de flot augmente moins qu'on ne peut le croire à première vue. Ce qui est cependant certain, c'est que la vitesse du courant de jusant augmente d'une manière appréciable. L'élargissement tend ainsi à égaliser l'intensité des deux courants de marée, de sorte que le sable qui est traîné sur le fond et amené par le courant de flot, a une plus grande chance que précédemment d'être ramené vers l'aval par le courant de jusant.

Dans l'élargissement, la situation est moins favorable.

L'essai en laboratoire a donné comme débit de la marée à l'origine de l'élargissement 1.163.000 m³. Sans élargissement, le même débit de la marée n'est que 802.000 m³, de sorte que l'élargissement ne procure qu'une augmentation d'environ 50 % du débit de la marée. Pour cette faible majoration, la marée doit entretenir une section environ 3,2 fois plus grande que celle sans élargissement. Dans ces conditions, la vitesse du courant sera notablement diminuée et il y aura une grande tendance à dépôt de sable. Ces dépôts provo-

queront la formation d'une onde positive, qui neutralisera en partie l'onde négative, qui se produit à l'origine de l'élargissement, et par conséquent tendra à détruire l'effet heureux que l'onde négative exerce sur la bonne tenue du fleuve à l'aval de l'élargissement. En résumé, le maintien des profondeurs dans un élargissement de fleuve à marées est toujours précaire.

En amont de l'élargissement, la situation est aussi plus mauvaise. En effet nous avons vu plus haut que l'onde marée fluviale sort de l'élargissement avec une énergie diminuée, ce qui a pour conséquence de réduire le débit de flot et l'amplitude de la marée. Nous voyons ainsi qu'un élargissement ne peut être utile que si l'on ne doit que considérer la situation en aval de l'élargissement, tandis que la situation en amont n'est que d'intérêt secondaire. Ou bien encore, quand la puissance hydraulique de l'onde marée doit être diminuée, pour que celle-ci puisse se propager vers l'amont du fleuve, sans danger d'y provoquer des inondations.

§ 2. — Rétrécissement

Nous avons vu dans le problème de l'élargissement que l'énergie de l'onde marée principale en ab, est proportionnelle à 105,7 quand il n'y a pas de discontinuité et que l'amplitude y est égale à 2,64 m.

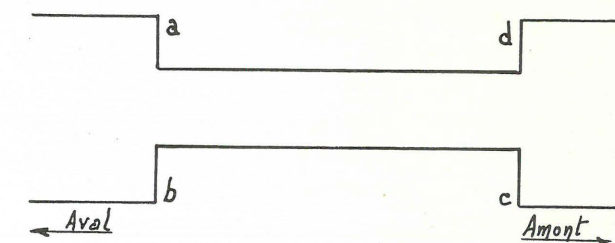


Fig. 7.

L'étranglement a pour conséquence de former en ab une onde positive et en cd une onde négative, qui toutes deux se propagent vers l'aval. L'onde négative arrivant en ab y est réfléchie en partie par suite de l'élargissement existant.

Cette nouvelle onde réfléchie retourne vers c d'où elle provoque un nouvel abaissement de la marée.

Ces diverses actions sur l'onde marée principale ont pour effet de réduire l'énergie en a b de 105,7 à 73,78

et en c d de 78 à 31. A Lierre l'énergie n'est plus proportionnelle qu'à 13,76 au lieu de 34,58.

Quant aux amplitudes, elles sont modifiées suivant les indications du tableau ci-dessous :

Indication des postes	Avant rétrécissement			Après rétrécissement	
	Nature	Modèle	Calcul	Modèle	Calcul
a b	2,64	2,64	2,64	2,62	2,49
c d	—	2,54	2,55	0,96	1,06
Lierre	2,14	2,25	2,26	0,95	0,95

Une réduction considérable se produit aussi dans les débits de flot. Voici les résultats obtenus sur le modèle et par le calcul :

Indication des postes	Volume de flot	
	Modèle	Calcul
a b		453 000
c d	360 000	388 000

Sans étranglement, les débits calculés de la marée fluviale sont en a b et c d respectivement 802.000 m³ et 610.000 m³.

Dans l'ensemble, les calculs et les essais faits au laboratoire de recherches hydrauliques d'Anvers montrent qu'un rétrécissement est néfaste pour la conservation de l'énergie de l'onde.

Il est à écarter nettement à moins qu'il soit accompagné d'un approfondissement dans la partie rétrécie. Dans ce cas, l'approfondissement peut neutraliser en tout ou en partie les conséquences mauvaises introduites par l'étranglement.

Cette discontinuité n'est à considérer que si la partie du fleuve entre a b et c d est trop peu profonde pour la navigation. Dans ce cas, on peut tenter de l'approfondir par un rétrécissement.

§ 3. — Exhaussement

Le relèvement du fond agit de la même façon qu'un rétrécissement. En b, il se produit une onde positive et

en c une onde négative qui se propagent toutes deux vers l'aval. L'onde négative venant de c, subit en b l'influence de l'approfondissement et augmente encore sa hauteur, ce qui a pour conséquence la formation d'une nouvelle onde négative qui se propage vers l'amont et influence la hauteur de la marée en c. La

théorie établie au chapitre II permet de suivre les modifications introduites dans les caractéristiques de la marée par le relèvement du fond.

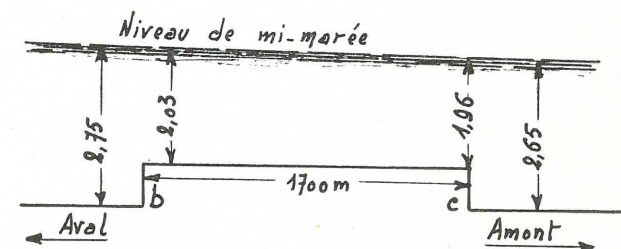


Fig. 8.

Les résultats obtenus par le calcul théorique furent confirmés par l'essai au Laboratoire de Recherches Hydrauliques d'Anvers.

Le tableau I, qui suit, donne les valeurs proportionnelles à l'énergie de l'onde marée fluviale avant exhaussement du fond et après.

Tableau I

Postes	Résultats du calcul	
	Avant relèvement	Après relèvement
b	105,7	90,6
c	78	55,2
Lierre	34,6	24,5

Le tableau II ci-après donne les amplitudes obtenues par calcul et par essai en laboratoire.

Tableau II

Postes	Résultats essai Laboratoire		Résultats calcul après relèvement
	Avant relèvement	Après relèvement	
b	2,64	2,58	2,68
c	2,54	2,26	2,02
Lierre	2,25	2,06	1,82

Il y a un écart de 0,24 m au point c, comme celui-ci se répercute nécessairement sur l'amplitude de la marée à Lierre, c'est l'écart en c qui est cause de l'écart à Lierre. La différence constatée est donc probablement uniquement due à une différence de résistance dans la partie exhaussée du modèle par rapport à celle admise dans le calcul.

Aucun essai n'a été fait concernant les débits de la marée.

CONCLUSIONS

Il résulte des essais faits au Laboratoire de Recherches Hydrauliques d'Anvers, et du calcul théorique, que

les discontinuités sur un fleuve à marées doivent être évitées autant que possible.

Elles ne doivent être admises que pour éviter un mal plus grand. Sur l'Escaut maritime, il existe à la frontière Hollando-Belge un grand élargissement accompagné d'un exhaussement du fond. Ces discontinuités réduisent notablement l'énergie de l'onde marée qui s'engage dans l'Escaut à Flessingue.

Cette réduction est pour le moment un mal nécessaire, car l'Escaut en Belgique n'est pas calibré pour recevoir une onde marée de la puissance de celle qui peut se propager en Hollande.

Dans ces conditions, la discontinuité à la frontière Hollando-Belge ne peut disparaître, en tout ou en partie, que si l'on aménage l'Escaut belge en conséquence.

Si l'on procède à cette modification il est possible de réaliser un fleuve maritime dont les sections assurent le passage de navires beaucoup plus grands que ceux qui fréquentent actuellement le fleuve.

Le moment est venu de procéder à ce changement dans le but d'assurer, dans un proche avenir, le passage des grandes unités dont on annonce la construction pour le transport des huiles, des minerais et probablement pour toutes les marchandises en vrac.

BIJDRAGE TOT DE STUDIE DER TIJRVIEREN BEREKENING DER DISCONTINUÏTEITEN

In een eerste studie, verschenen in het « Tijdschrift der Openbare Werken van België » afleveringen 3, 4, 5 en 6 van 1922, afleveringen 1, 2, 3 en 5 van 1923, heb ik aangetoond, indien men zich steunt op het begrip energie van een tijgolf en op het verlies dezer energie onder de uitwerking van de weerstand van de rivier, dat het mogelijk is de voornaamste vraagstukken op te lossen, die zich voordoen in een tijrivier.

Nochtans was deze theorie maar toepasselijk op rivieren, waarvan de afmetingen regelmatig veranderen, zodat ze geen oplossing gaf voor plotselinge verandering van breedte en diepte van een rivier.

De huidige studie vult deze leemte aan en de getrouwheid ervan werd onderzocht in het Waterbouwkundig Laboratorium van Antwerpen.

Daar de theorie der discontinuïteiten zich steunt op de uitslagen gegeven door een toepassing van de berekening der tijrvieren, waarvan de afmetingen regelmatig veranderen, worden eerst de bijzonderste formules van deze berekening herinnerd.

Zij hebben betrekking op de berekening der dwarsdoorsneden, der tijhooften en van de vloeddebieten.

In hoofdstuk 1 wordt uitgelegd hoe een plotselinge verandering der breedte of der diepte van een stroom de energie der tijgolf vermindert, meestal op nadelige wijze voor het goed behoud van de tijrivier.

Er wordt getoond in welke gevallen kan overgegaan worden tot het inbrengen of het behouden van een discontinuïteit in een tijrivier.

In hoofdstuk II wordt de theorie der discontinuïteiten ontwikkeld voor de voornaamste karakteristieken van een tij.

Het is in hoofdstuk III dat overgegaan wordt tot het onderzoeken van de getrouwheid der theorie, door ze toe te passen op een model van tijrivier, verwezenlijkt in het Waterbouwkundig Laboratorium van Antwerpen.

Drie gevallen worden onderzocht : een verbreding, een vernauwing en een verondieping.

De proeven bevestigden de uitslagen der theorie.

De studie eindigt met de conclusie dat de discontinuïteiten zoveel mogelijk moeten vermeden worden. Zij zijn slechts gerechtvaardigd om een groter kwaad te verhinderen.

QUELQUES INFORMATIONS CONCERNANT LES ARMATURES POUR BETON PRECONTRAIT ET INTERESSANT L'UTILISATEUR

par

E. DEHAN

Ingenieur en Chef-Directeur des Ponts et Chaussées

F. FONTAINE

Conducteur des Ponts et Chaussées

Les armatures les plus utilisées en béton précontraint sont des fils d'acier à très haute charge de rupture.

Bien que les caractéristiques de résistance soient très élevées, la tension admissible adoptée pour le calcul est, dans de nombreux pays, encore assez réduite; en Belgique, notamment, elle voisine les 6/10 de la charge de rupture.

On a voulu fixer le taux de travail en se référant, comme cela se pratique pour l'acier doux, à une limite élastique; pour ces aciers, dont le diagramme d'allongement ne présente pas de palier d'étirage ni de point caractéristique, on a adopté une limite élastique correspondant à un allongement permanent de 2 ‰; cette valeur relevée sur le diagramme d'allongement par un tracé de parallèles est purement conventionnelle; elle aurait pu être choisie pour une valeur supérieure de l'allongement permanent et le taux de travail en eut été augmenté.

La crainte du fluage ou de la relaxation a parfois été invoquée pour justifier le maintien d'une faible valeur de la tension admissible. Ces phénomènes sont étudiés par de nombreux organismes et, en Belgique, par les Centres universitaires de Liège et de Louvain; il apparaît que l'augmentation du fluage ou de la relaxation n'équivaut pas l'augmentation de la tension de service, du moins lorsque l'on ne s'approche pas exagérément de la rupture (0,8 R).

Des essais de fatigue réalisés sur des poutres en béton précontraint ont mis en évidence la possibilité de rupture des armatures pour des sollicitations moyennes normales (0,6 R) et des taux de variation de 10 à 15 %; ces résultats pourraient justifier le maintien d'une tension de travail réduite, mais on objecte que, dans les ouvrages, le taux de variation n'atteint pas 10 à 15 %. Plusieurs relevés que nous avons pratiqués sur des ponts en béton précontraint ont confirmé la chose; le taux de variation était de 4 à 6 %; des essais de fatigue pratiqués sur fil nu, en laboratoire, en adoptant des tensions et des variations de tension correspondant à ces dernières valeurs, n'ont pas conduit à rupture.

Les motifs présentés ci-dessus, discutés mais non absolument rejetés, ne sont pas seuls responsables du maintien de la tension admissible à la valeur de 0,6 R.

A toute personne qui a le souci de la tenue d'un ouvrage en béton précontraint se posent des questions qui restent sans réponse parce qu'elles n'ont jamais été l'objet de recherches, étant souvent aléatoires, ou n'ayant pu être invoquées comme origines certaines d'incidents.

Ces problèmes créent un climat d'insécurité qui n'est pas favorable à l'adoption de tensions de service élevées :