

LA HOUILLE BLANCHE

ÉDITIONS J. REY-B. ARTHAUD, Éditeur, GRENOBLE

Abonnement pour une Année } France... .. 40 francs } Le Numéro : 7 francs
 Étranger... .. 50 francs }

Compte Chèques Postaux LYON 5-84

SOMMAIRE

HYDRAULIQUE. — Les ressauts sur les canaux de section de pente et rugosités constantes, par MM. E. MONTAGNÉ et M. BERNADAC, licencié ès sciences, anciens élèves de l'Institut Polytechnique de Grenoble.

ÉLECTRICITÉ. — Etude des courants de Foucault dans un disque métallique, dans un cas particulier par M. BARBILLON, directeur de l'Institut Polytechnique de Grenoble. — Calcul mécanique des lignes électriques dans le cas de longues portées en forte pente (*suite et fin*).

LÉGISLATION. — L'aménagement des chutes d'eau et la Loi du 16 octobre 1919. Conférence faite à la Chambre de Commerce de Grenoble, le 14 janvier, par M. L'HUILLIER, avocat à la Cour d'Appel de Grenoble.

DOCUMENTATION.

BIBLIOGRAPHIE.

HYDRAULIQUE

Les ressauts sur les canaux de section pente et rugosités constantes

par MM. E. MONTAGNÉ, et M. BERNADAC, licencié ès sciences, Anciens élèves de l'Institut polytechnique de Grenoble.

Il ressort des travaux publiés sur les ressauts étudiés expérimentalement, qu'ils se produisent à des endroits à peu près fixes et qu'ils sont causés par une variation de section, de pente, de condition d'écoulement ou par un obstacle.

tion d'équilibre dynamique de la masse comprise entre les sections amont et aval, autrement dit on applique le théorème des projections des quantités de mouvement.

Mais on suppose d'abord que les filets, avant et après le res-

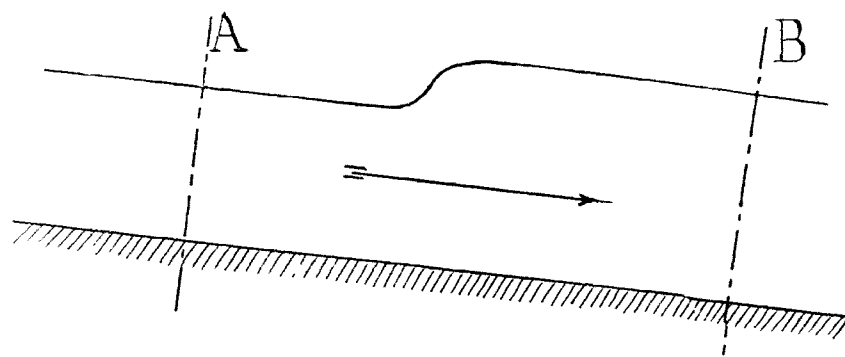


Fig. 1

Nous ne connaissons pas d'étude expérimentale en dehors des conditions ci-dessus, mais nous avons pu étudier le phénomène du ressaut, que nous nommerons plutôt, dans ce cas particulier, intumescence, parce que cette dernière appellation répond beaucoup mieux à sa formation, sur un caniveau de la rue de Verdun, à Carcassonne.

CRITIQUE DE LA THÉORIE CLASSIQUE DU RESSAUT.

Dans le cas qui nous occupe dans le présent article, c'est-à-dire lorsque la cause de la formation du ressaut n'est pas une modification de pente, de section ou de rugosité, on écrit l'équa-

saut, peuvent être regardés comme parallèles (Flamant N^o 65) et nous n'essaierons pas d'établir le contraire, bien que le parallélisme des filets, dans des plans sensiblement horizontaux, ne puisse se concevoir qu'en dehors de la formation de l'intumescence. On écrit ensuite l'équation de continuité des états permanents entre les sections amont et aval.

L'expérience et le raisonnement montrent que cette équation est inapplicable à ce cas.

Supposons, en effet, comme dans la théorie classique, que l'intumescence soit formée selon la figure ci-dessous. Nous prendrions comme exemples celles qui se forment sur un caniveau de

la rue de Verdun à Carcassonne parce que nous n'en connaissons pas d'autre qui présente cette particularité. Son faible débit (2,5 l/s. en moyenne) ne constituerait évidemment pas un obstacle à sa reproduction dans un laboratoire, mais il serait indispensable d'obtenir la même pente, la même rugosité ou les conditions d'écoulement que nous déterminerons. Il faudrait surtout le construire sur une longueur suffisante, 80 à 100 mètres au moins. Cette longueur est indispensable pour observer d'abord la formation des ondes et suivre, ensuite, leur propagation.

La vitesse moyenne dans la section (profondeur moyenne 0,019 m., pente $i = 0,0375$) et en amont, sur une grande longueur est donnée par la formule de Bazin. Nous avons remarqué que cette formule rend compte des vitesses mesurées en prenant le coefficient convenable, c'est-à-dire celui qui est relatif aux parois en maçonnerie de moellons. Le caniveau étudié est en effet de section rectangulaire, sa largeur est de 0^m23 et son radier est formé de pavés régulièrement placés.

Le contrôle de la vitesse moyenne mesurée montre, d'une manière indiscutable, aussi bien pour ce caniveau que pour ceux, en ciment lissé étudiés par la suite, que leur faible tirant d'eau n'est pas la cause de conditions d'écoulement sensiblement différentes de celles de canaux à rayon moyen bien plus grand. Il faudrait, pour obtenir de grandes différences, une profondeur telle que la viscosité devienne prépondérante dans l'établissement des formules.

L'application des lois de similitude peut, d'autre part, être utilisée pour se rendre compte, approximativement tout au

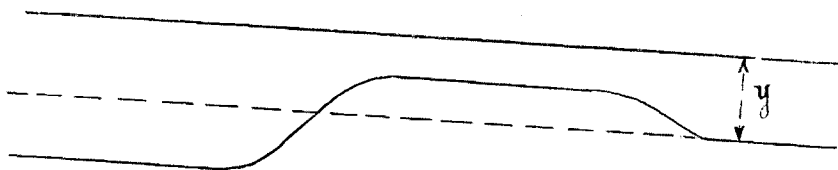


Fig. 2

moins, de ce que seraient les expériences sur des canaux de plus grandes dimensions.

Nous nous sommes assurés que l'écoulement était régulier bien en amont de l'endroit où se forme la première intumescence; la pente y est inférieure à 0,0375. Quand, au bout de plusieurs heures, pendant lesquelles les ondes se succèdent régulièrement, le débit vient à baisser, l'écoulement devient régulier. Il en est de même lorsque le débit, donc le tirant d'eau augmente d'une façon sensible. Ceci fait déjà prévoir que, pour une même pente et une même rugosité, le phénomène est lié à la vitesse moyenne et au tirant d'eau; nous verrons pourquoi.

Considérons, pour le moment, l'intumescence immédiatement après sa formation. Puisque la pente est constante et la longueur de l'intumescence considérable par rapport à sa hauteur, elle est soumise, du fait de son plus grand rayon moyen, à de nouvelles conditions d'écoulement, et nous avons mesuré une vitesse presque double (1^m10/s.) de la vitesse en amont, 0^m58/s. pour un écoulement régulier.

La vitesse de 1^m10 est elle aussi, sensiblement d'accord avec la formule de Bazin. Elle est due au plus grand rayon moyen, ce qui montre bien qu'une intumescence formée, se déplace, dès que la pente est constante en amont et en aval. Sa hauteur, au dessus du plan d'eau normal, ne dépasse pas 0,02 m. dans notre cas; elle est limitée, et la raison en apparaîtra plus loin. Sa vitesse moyenne, plus grande que celles des sections précédentes, creuse

un vide en amont et le profil en long d'une partie du canal est semblable à la figure ci-dessous.

La longueur, sur laquelle la profondeur h est fortement abaissée, n'a pu être mesurée exactement, mais elle est très comparable à la longueur de l'intumescence, ce qui établit une corrélation entre les deux parties. Le débit est, par suite, essentiellement variable (périodiquement quand sa valeur en amont donne un phénomène très pur) et l'équation de continuité est inapplicable.

La discordance entre la formule connue, permettant de calculer la vitesse pour laquelle le ressaut doit se produire, pour un tirant d'eau donné, et les résultats expérimentaux, ne doit donc pas surprendre. Cette formule, dans le cas où la condition générale de la production du phénomène se trouve satisfaite (Flamant N° 113) pour un canal rectangulaire est :

$$\frac{a u^2}{g \cos i} \cdot \frac{l}{w} > 1$$

dans laquelle U est la vitesse moyenne, i la pente, l la largeur, a la section mouillée et a un coefficient dont la valeur peut être calculée par la formule

$$a = 1 + 235 b$$

pour les sections rectangulaires très larges de $l > 5 h$ et b étant le coefficient de la formule de Chézy.

$$Ri = b u^2$$

Nous obtenons $a = 1,55$ environ.

Ce coefficient exprime le rapport entre la force vive réelle et la force vive calculée à l'aide de la vitesse moyenne. On sait que cette dernière, dans le cas de différences de vitesses très accusées, entre les divers points d'une section mouillée, donc dans le cas de fortes rugosités, est très inférieure à la force vive réelle

Mais $\frac{w}{l} = h$ (profondeur) et $\cos i$ est très voisin de 1.

On a donc

$$a u^2 > gh$$

qu'on peut mettre sous la forme

$$\frac{a u^2}{2g} > \frac{h}{2}$$

Le ressaut serait d'autant plus accusé et d'autant plus long que $\frac{a u^2}{2g}$ s'écarterait davantage de $\frac{h}{2}$.

Nous avons trouvé, juste à l'endroit où la première intumescence se produit

$$1,55 \times 0,58^2 = 2,7 gh$$

Il faut remarquer que, en amont, et pour une même pente, l'écoulement est régulier. Nous paraissions donc être à la limite de la formation.

Nous avons constaté que, pour des écarts encore plus grands, sur des caniveaux en ciment lissé, l'écoulement était régulier. Or, la vitesse moyenne, donnée par un tirant d'eau déterminé, a été approximativement égale à la vitesse donnée par la formule de Bazin. Comme pour une rugosité plus grande, et les tirants d'eau étant semblables, l'impossibilité d'appliquer la formule ne doit pas être attribuée à la viscosité.

Voici les résultats pour des caniveaux en ciment lissé, à pente constante, à largeur variant entre 5 et 7 fois le tirant d'eau et $a = 1,05$ environ.

Caniveau N° 1 :

Pente $i = 0,042$.
 h moyenne = 0,018 m.
 $u = 1,14$ m.
 $a u^2 = 1,37$.
 $gh = 0,17$
 $a u^2 = 8 gh$

Écoulement régulier.

Aucune intumescence et aucun ressaut ne se sont formés pour des tirants d'eau plus petits ou plus grands.

Caniveau N° 2 :

Pente $i = 0,023$
 $a = 1,05$
 $u = 0,96$ m.
 h moyenne = 0,013 m.
 $a u^2 = 0,97$
 $gh = 0,127$
 $a u^2 = 7,6 gh$.

Écoulement régulier.

Bazin a donné l'équation de la courbe de la répartition des vitesses, parabole du second degré dans son ensemble.

En appelant v la vitesse du filet situé à la profondeur z :

$$V = Vm - \theta (z - h)^2$$

$$\text{ou} \quad -\frac{dV}{dz} = 2\theta (z - h)$$

θ étant un coefficient numérique.

On sait que la différence des vitesses est la cause de la suspension des corps solides dans un courant et du glissement des particules d'eau vers les filets les plus rapides. Dès que la différence des vitesses est suffisante, des corps solides, déterminés, entrent en suspension. Ils sont donc soumis à des forces verticales et en admettant que ces forces soient proportionnelles à la cause qui les produit, nous voyons qu'elles iront en décroissant du fond vers la surface comme $\frac{dV}{dz}$ (Flamant N° 40).

Une particule d'eau partant du fond sera successivement soumise, dans un plan vertical (au moins théoriquement) à toutes les valeurs de $\frac{dV}{dz}$ et, par conséquent, à toutes les forces verticales. La mesure de ces forces est bien difficile. Nous pourrions les calculer si nous connaissions les composantes verticales correspondant aux différentes vitesses horizontales. Il nous faudrait déterminer d'abord le rapport, fixe ou variable, entre une vitesse verticale et $\frac{dV}{dz}$. Dans un caniveau où les vitesses prennent des va-

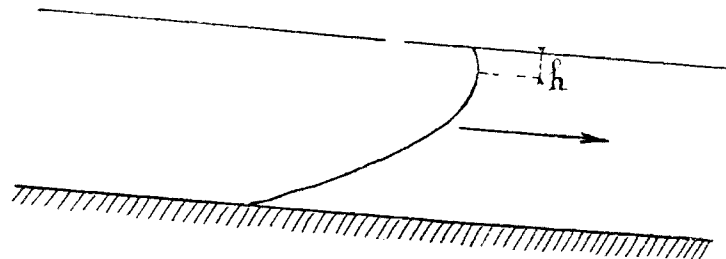


Fig. 3

Pour des pentes moindres et donnant de $a u^2 = 2 gh$ à $a u^2 = 6 gh$, les écoulements sont réguliers.

D'ailleurs, pour la formation d'une intumescence, sur un canal de 2 m. de profondeur, la formule classique donnerait une vitesse de 4^m25 environ, c'est-à-dire que, en se plaçant dans les conditions qui fixent notre étude, et dans les canaux où sont réalisées en général les plus grandes vitesses, l'occasion d'observer le ressaut ne se serait présentée qu'exceptionnellement.

Nous allons voir, par contre, la condition nécessaire pour qu'une intumescence se produise. Elle n'existe pas, et de très loin, dans les caniveaux en ciment lissé étudiés plus haut, ni en général, dans les canaux industriels. Elle existe dans la rue de Verdun, à Carcassonne.

ESSAI DE CALCUL DE LA CONDITION NÉCESSAIRE A LA FORMATION D'UNE INTUMESCENCE SUR UN CANAL DE SECTION, PENTE ET RUGOSITÉ CONSTANTES.

Considérons sur un canal de pente uniforme i et de grande largeur, la parabole représentant la répartition des vitesses dans un plan vertical.

Soit h' la profondeur du filet animé de la vitesse maximum Vm et z la profondeur à laquelle se trouve un filet donné.

leurs très différentes, nous avons préféré ne tenir compte que de la composante verticale de la vitesse moyenne. Nous obtenons ainsi, en vertu du principe cité plus haut une force vive inférieure à la force vive réelle qui, elle, correspondrait à toutes les vitesses verticales.

Francis a montré que la composante verticale de la vitesse moyenne pouvait être mesurée en introduisant dans le fond d'un canal de l'eau de savon et en mesurant la distance à laquelle cette eau de savon apparaissait à la surface. Il a ainsi obtenu une distance variant de 10 à 30 fois la profondeur, c'est-à-dire que la composante verticale variait de 1/10 au 1/30 de la composante horizontale. On peut trouver des chiffres s'écartant notablement de ceux de Francis, ils prouvent seulement que l'auteur des expériences ne les avait pas exécutées dans des cas particuliers, comme celui des petits canaux à parois très rugueuses.

Une particule partant du fond décrit donc une trajectoire, d représente à l'échelle convenable la vitesse moyenne, u et h la vitesse verticale moyenne V_1 .

On a

$$\frac{d}{h} = \frac{u}{V_1}$$

Le canal étant de grande largeur, les filets voisins, dans un plan horizontal seront soumis aux mêmes forces. Si nous considérons un prisme vertical de section et de longueur égales à l'unité, nous voyons qu'il y aura équilibre entre la force verticale dont il est le siège et son poids quand on aura :

$$\frac{1}{2} m V_1^2 = w \quad (1)$$

w étant le poids spécifique du liquide. D'après nous, l'intumescence doit se produire à partir du moment où cette relation, par suite des conditions d'écoulement, prend naissance, c'est-à-dire dès que l'inégalité

$$\frac{1}{2} m V_1^2 > w$$

est satisfaite.

Dans un canal où l'écoulement est régulier, on obtiendra vite une valeur approchée de V_1 , mais il n'en est pas de même dans un caniveau à parois très rugueuses. Il faut, dans ce cas, considérer

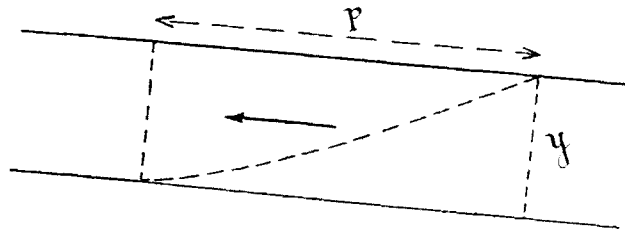


Fig. 4

une surface assez grande pour faire une estimation de la vitesse moyenne verticale. Il serait utile de tenir compte d'un grand nombre de vitesses verticales, mais c'est très délicat. Nous prendrons simplement la vitesse moyenne et nous négligerons la différence ainsi obtenue. Néanmoins, cette dernière s'ajoute à celle qui provient du remplacement des vitesses verticales élémentaires par la vitesse moyenne. On ne sera donc pas étonné si la vitesse verticale mesurée, suffisante pour la formation d'une intumescence, est sensiblement inférieure à la vitesse donnée par (1).

En utilisant une solution de fluorescéine sodique, introduite dans le fond à l'aide d'un long tube recourbé et aplati, pour ne

pas modifier l'écoulement, nous avons trouvé sur le caniveau de la rue de Verdun :

$$V_1 = 0,35 \text{ m/s. pour } u = 0,58 \text{ m/s.}$$

L'application de la formule (1) donnerait une vitesse verticale de 0,15 m/s.

Quand le tirant d'eau diminue, les vitesses verticales ne sont plus, dans les joints des pavés, que des vitesses locales; elles n'affectent plus toute la surface considérée. Quand il dépasse 0,03 m., la rugosité a moins d'influence sur l'écoulement et la vitesse verticale moyenne n'a plus une valeur suffisante pour former l'intumescence. C'est ce qui limite la hauteur de cette dernière.

Appliquons aussi la formule (1) aux caniveaux en ciment lissé N^o 1 et 2 où l'écoulement était uniforme.

Nous trouvons pour le N^o 1 (vitesse verticale 7,6 cm/s.).

$$\frac{1}{2 \times 981} \times 7,6^2 = 0,03 \text{ gr par excès}$$

et pour le N^o 2 (vitesse verticale 6,4 cm/s.).

$$\frac{1}{2 \times 981} \times 6,4^2 = 0,02 \text{ gr}$$

donc des chiffres d'un ordre de grandeur bien différent du poids spécifique.

L'inégalité

$$\frac{1}{2} m V_1^2 > w$$

ne serait satisfaite, sur un canal industriel, qu'à la condition d'obtenir, dans des parois très rugueuses, un faible tirant d'eau et une vitesse considérable.