

PERTES DE CHARGE CAUSÉES PAR LES GRILLES

par F. CRESTIN

Ancien professeur à l'École Nationale des Eaux et Forêts

Sur les canaux alimentant des turbines hydrauliques, on est amené à placer des grilles, à barreaux plus ou moins serrés, destinées à empêcher l'entrée, dans ces machines, de corps entraînés par le courant et des poissons vivant dans le bief amont. Il en résulte une petite *perte d'énergie* dont il peut être utile de connaître l'ordre de grandeur.

Cette question présentant un certain intérêt pour le Service forestier, M. E. HAHN, alors professeur à l'*Institut Electrotechnique de Nancy* (1), a bien voulu, en 1926-1927, mettre en train une série d'essais dont nous nous proposons d'indiquer les résultats essentiels.

Mais, au préalable, pour mieux faire entrevoir l'extrême complexité des phénomènes mis en jeu par le passage d'un courant liquide à travers une grille, et justifier les conclusions qui seront données, il nous semble utile de rappeler quelques notions élémentaires d'hydraulique, en considérant un cas beaucoup plus simple, celui d'un *corps solide fixe immergé dans un courant*, cas où n'interviennent pas les « interactions » réciproques des barreaux constituant une grille. Si l'on veut éviter la lecture de ces préliminaires, il suffira de passer immédiatement au chapitre II : description des essais et indication des résultats.

I. — ACTION D'UN COURANT LIQUIDE SUR UN SOLIDE FIXE.

Soit une tige cylindrique de diamètre D , dont l'axe est perpendiculaire à la direction du courant; nous supposerons le liquide animé d'une *vitesse uniforme* V (mesurée à une distance suffisante du cylindre pour que les perturbations dues à cet obstacle n'y soient pas sensibles). En outre, pour simplifier encore, le mouvement sera supposé, tout au moins au début, *permanent*, c'est-à-dire que les vitesses et pressions, en un point géométrique donné, y restent les mêmes à tout instant. C'est là un cas dans lequel les phénomènes observés sont, entre certaines limites, sous la dépendance du « Nombre de Reynolds » $Re = \frac{V \times D}{\nu}$ où V est une vitesse, D une dimension, une longueur caractéristique, et ν le « coef-

(1) Actuellement, l'« École Supérieure d'Électrotechnique et de Mécanique appliquée de Nancy ».

coefficient de viscosité cinématique » fonction de la *viscosité* du liquide, c'est-à-dire de la résistance au glissement relatif de deux couches liquides parallèles, distantes de l'unité de longueur et animées de vitesses différant d'une unité de vitesse, fonction aussi de la « masse spécifique » ou masse par unité de volume. Ce coefficient ν varie avec la température. (Exemple : en unités *c. g. s.* on a pour l'eau à 0° : $\nu = 0,0178$ et à 20° : $\nu = 0,01$).

Si l'on considère des valeurs croissantes du nombre $\frac{VD}{\nu}$, la succession des phénomènes est la suivante :

1° Pour d'assez faibles valeurs, les filets liquides contournent l'obstacle, à l'aval comme à l'amont, sans s'en décoller. Une minime partie du liquide forme ce que les hydrauliciens appellent la « couche limite », extrêmement mince, dont la face interne adhère aux parois du solide, donc a une vitesse nulle, la face externe ayant même vitesse que le fluide ambiant.

2° Pour des valeurs plus élevées, on constate un *décollement* de la « veine active » en d et d' (fig. 1); des *surfaces de discontinuité* S et S' la séparent d'une portion de liquide qui ne participe pas à l'écoulement général; c'est le *sillage* de l'obstacle, où apparaissent des *tourbillons* t et t' , tels qu'on peut en observer dans n'importe quel ruisseau. Ces tourbillons sont d'abord à *peu près fixes*.

3° Pour des valeurs encore plus élevées de Re , ces tourbillons *se détachent de l'obstacle*, souvent *alternativement* vers d et vers d' — (tourbillons « alternés » d'où peuvent résulter des oscillations ou vibrations de la tige) — et vont s'éteindre à quelque distance, en aval; l'énergie qu'ils avaient acquise, aux dépens évidemment de celle du courant liquide, se dissipe finalement en chaleur.

Quant à la *couche limite*, suivant diverses circonstances et en particulier suivant les valeurs de Re , elle peut présenter (comme d'ailleurs le fluide extérieur), soit un mouvement dit « laminaire » dans lequel les « lames » d'eau extrêmement minces, en lesquelles on peut la décomposer par la pensée, glissent les unes sur les autres *sans se mélanger*; soit un mouvement dit « turbulent » dans lequel les molécules liquides ont bien une composante V de leur vitesse *suivant la direction générale de l'écoulement*, mais aussi une autre composante V' , *perpendiculaire à cette direction*, dont la grandeur et le sens varient très rapidement; il se produit entre ce que nous venons d'appeler des « lames » un *échange constant*, et *paraissant désordonné, de molécules*, ce qui rend les phénomènes extrêmement complexes, même en régime, en moyenne, permanent.

On conçoit aisément que les portions de liquide en mouvement *turbulent* sont le siège d'importantes pertes d'énergie mécanique, finalement dissipée en chaleur.

Or, le passage d'un courant à travers une grille fait naître ou augmente la turbulence.

De nombreux expérimentateurs ont cherché à mesurer l'effort exercé par un courant sur un obstacle, ou la résistance que celui-ci oppose au passage du courant. On décompose cette résistance en trois parties :

1° le *frottement* au contact des parois solides ;

2° les *pressions différentes* à l'amont et à l'aval ;

3° enfin, pour les corps partiellement immergés, donc dépassant la surface libre, l'énergie consommée par les ondes correspond aussi à une part souvent importante de la résistance (phénomène analogue à la propagation d'« ondes satellites », par exemple celles émanant de la proue et de la poupe lorsqu'un bateau se déplace en eau calme).

La résistance totale est généralement exprimée par le produit :

$R = C \times 1/2 S \rho V^2$ où S est la section au « maître couple » de l'obstacle, mesurée perpendiculairement à la vitesse V , ρ la masse de l'unité de volume du fluide, et C un coefficient numérique qui dépend des formes de l'obstacle et des conditions de l'écoulement.

Souvent C conserve une valeur relativement constante, entre deux limites assez écartées du nombre R ; c'est le cas, en particulier, des obstacles présentant des arêtes vives dont les points de décollement (tels que d et d' de la figure 1) ne s'écartent pas.

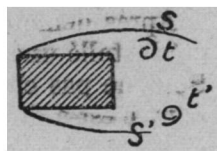
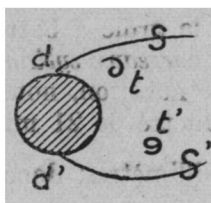


fig. 1

Pour le cylindre, on constate que

lorsque la couche limite devient turbulente, les points d et d' se déplacent vers l'aval, ce qui réduit la largeur du sillage et entraîne pour les valeurs correspondantes de Re , une baisse du coefficient de résistance C .

Tous les phénomènes que nous venons de signaler brièvement se retrouvent, avec plus ou moins d'amplitude, quand on observe le passage d'un courant à travers une grille, mais la complexité est beaucoup plus grande encore, comme il a été dit au début de ce chapitre, parce que l'action individuelle d'un barreau d'une grille doit nécessairement se combiner avec celles des autres barreaux.

II. — DESCRIPTION DES ESSAIS ET PRINCIPAUX RÉSULTATS.

Il est essentiel — nous verrons pourquoi — d'en préciser toutes les conditions. La plupart ont été effectuées dans un canal d'expériences de 30 mètres de long, installé au Laboratoire d'Hydraulique. La section est rectangulaire, sauf des arrondis au raccordement du fond et des parois latérales. La largeur est de 1 m. 60 ; la profondeur a varié entre 0 m. 80 et 1 m. 20 environ.

L'alimentation du canal est assurée par une pompe mue électriquement, et le débit Q mesuré à l'aide d'un déversoir à mince paroi et à seuil horizontal (voir chapitre III) placé à la sortie du canal. Du débit Q on déduit la vitesse moyenne U , qui a varié entre 5 et 70 centimètres par seconde environ. On a employé des barreaux à section rectangulaire mesurant 32×10 millimètres, les filets liquides longeant les grands côtés. e désignera l'épaisseur comptée normalement à ces filets, donc

ici 10 millimètres. L'écartement, ou intervalle libre entre deux barreaux consécutifs, qui sera noté d , a varié de 22,6 à 54,4 millimètres, donc le rapport $r = \frac{d+e}{d}$ qui sera pris comme variable, a eu pour valeurs extrêmes $\frac{32,6}{22,6} = 1,442$ et $\frac{64,4}{54,4} = 1,178$. Pour chaque écartement d , on a fait varier la *vitesse moyenne* U considérée en aval de la grille, entre les limites indiquées ci-dessus.

La grille reposait sur le fond du canal, le haut appuyé sur une poutrelle transversale, et l'espacement des barreaux maintenu par des cales. Elle était tantôt *verticale*, tantôt *inclinée d'un angle i* sur la verticale, généralement *dans le sens du courant*, le haut plus en aval que le bas; mais il a été fait aussi des essais avec une inclinaison i de sens contraire; on verra plus loin l'influence de cette inclinaison.

Après démontage de la grille à barreaux de 32×10 millimètres, il a été installé une grille à *barreaux cylindriques* de diamètre 21 millimètres. Pour ne pas changer de notation, nous continuerons à appeler e l'épaisseur, c'est-à-dire le diamètre de 21 millimètres, et d l'écartement qui a varié de 19,5 à 40,5 millimètres, donc le rapport $r = \frac{d+e}{d}$ de 2,077 à 1,518. Enfin, l'inclinaison i a varié de 0 à 35° pour les barreaux rectangulaires, de 0 à 45° pour les ronds, dans le sens normal, et de 0 à 45°, en sens inverse, pour l'écartement $d = 40,5$ millimètres.

D'autre part, pour voir comment s'appliquent certaines lois de similitude, il a été fait quelques essais dans un canal plus petit, de largeur un peu inférieure à 0 m. 95, profondeur, de 0 m. 37 à 0 m. 50 environ, vitesse jusqu'à 0 m. 55 par seconde, barreaux de 6×20 millimètres espacés de $d = 13$ mm. 2, inclinaison i jusqu'à 25° environ.



Essayons d'abord de décrire sommairement les phénomènes observés. La figure 2 est une coupe verticale prise au milieu de l'intervalle qui

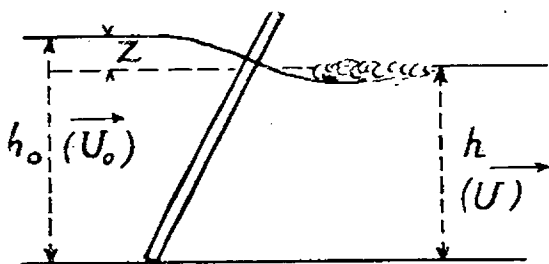


fig. 2

sépare deux barreaux consécutifs. A une distance suffisante vers l'amont, la surface libre est calme, la *profondeur* h_0 est sensiblement la même, en tout point d'une section transversale du canal; le débit Q étant connu par le déversoir situé à son extrémité aval, le quotient de ce débit par la « *section mouillée* » (surface occupée par l'eau dans une section transversale)

est égal, par définition, à la *vitesse moyenne* U_0 . En aval de la grille, on observe, dans certaines conditions, un *ressaut*, une surélévation

brusque de la surface libre accompagnée en général de bouillonnements tumultueux, ressaut qui peut remonter jusqu'à la grille. Mais un peu plus vers l'aval, on retrouve une surface libre assez calme, les sillages des barreaux et les ondes émanant de ceux-ci s'étant atténués; la profondeur devient h et la vitesse moyenne U .

L'expérience donne la différence $z = h_0 - h$.

La figure 3 montre des coupes horizontales, prises à une distance suffisante de la surface libre. Voyons d'abord les *barreaux rectangulaires*. Dans certaines conditions, et en particulier suivant la longueur des barreaux dans le sens du courant comparée à leur épaisseur e et à leur écartement d , il peut y avoir *décollement de la veine active*, tout d'abord aux arêtes amont; la veine se rétrécit entre les barreaux; dans sa partie la plus étroite, sa largeur n'est plus d , mais seulement md ; m est un coefficient de contraction, inférieur à l'unité, (par exemple de 0,6 à 0,9).

En aval de la *section contractée*, la veine active peut se recoller aux parois latérales des barreaux (fig. 3 b). Il y a de nouveau décollement aux arêtes aval, d'où partent des « surfaces de discontinuité » séparant la veine active du « sillage », siège de mouvements tourbillonnaires, comme l'intervalle restant entre cette veine et les faces latérales des barreaux, au delà du premier décollement.

Dans d'autres conditions et, en particulier, lorsque les barreaux sont assez courts dans le sens du courant, il n'existe qu'un seul décollement, aux arêtes amont (fig. 3 a) et la masse tourbillonnaire située entre les barreaux rejoint celle du sillage.

Dans le cas de *barreaux ronds* (fig. 3 c), il n'existe également qu'un seul décollement qui commence en un point variable de la surface du cylindre; la veine active se rétrécit à la *largeur minimum* md et s'engage entre les sillages des deux barreaux consécutifs figurés.

Nous ne dirons rien de plus des *ondes* qui apparaissent dans certaines conditions, à la surface libre, divergent à l'aval des barreaux et s'entre-croisent avant de s'éteindre à une certaine distance vers l'aval.

On se rend compte de l'inextricable complexité de pareils phénomènes, et l'on peut prévoir qu'il ne sera guère possible de les traduire à l'aide de quelques formules générales simples. Nous allons voir maintenant ce que l'on peut tirer des essais.

La *dénivellation* Z caractérise la *partie principale* (de beaucoup la plus importante dans les essais précités) de la *perte d'énergie* par litre d'eau débité par le canal, *cette perte est sensiblement également à Z kilogrammètres si l'on exprime Z en mètres, donc en tout QZ kilogrammètres par seconde, si le débit Q est évalué en litres par seconde.*

Si l'on voulait plus d'exactitude, il faudrait tenir compte du fait que

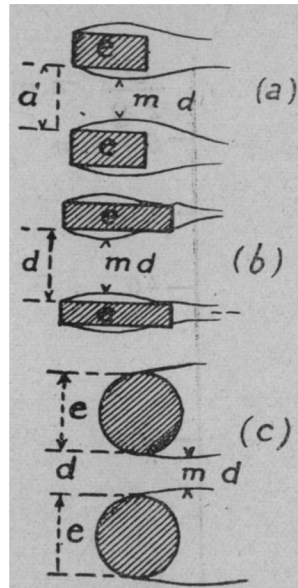


fig 3

la profondeur h étant plus faible, en aval, que h_0 , de la dénivellation Z , la vitesse moyenne U est plus grande que U_0 , donc la *force vive de la masse liquide plus élevée*; on aurait alors à remplacer Z par :

$$Z - \frac{\alpha}{2g} (U^2 - U_0^2) \quad (1)$$

α est ici un coefficient numérique supérieur à l'unité, qui représente le rapport entre la force vive réelle du liquide qui traverse une section

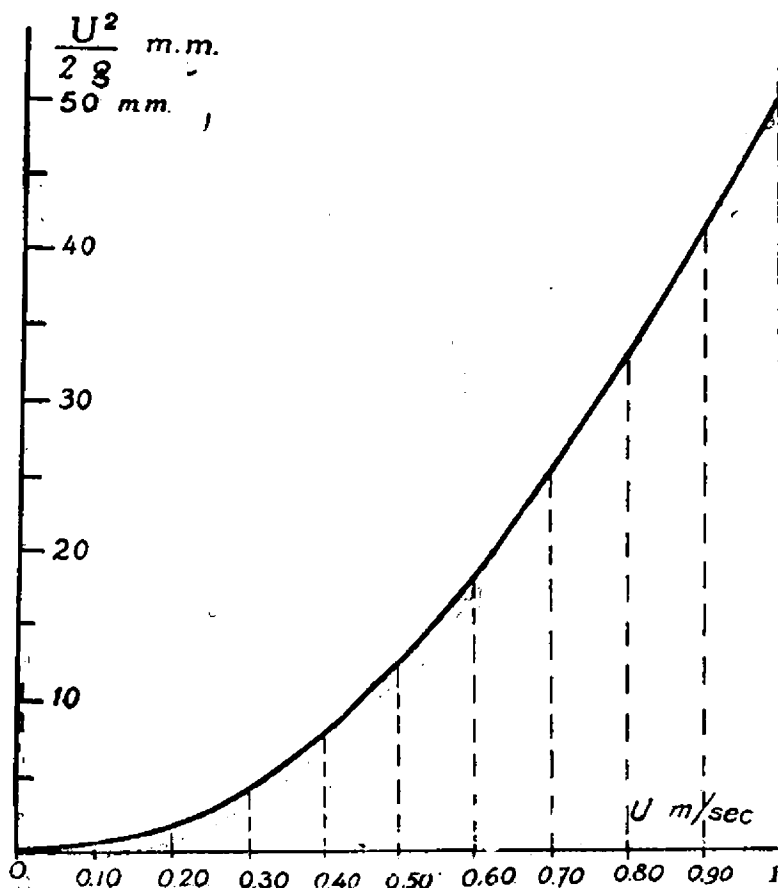


fig. 4

transversale du canal pendant l'unité de temps, et celle que posséderaient les mêmes masses, si leur vitesse était partout égale à la moyenne U .

(Rappelons que la demi-force vive d'un corps de poids p , de masse $m = \frac{p}{g}$ (où g est l'accélération de la pesanteur, soit environ 9,81 mètres par seconde, corps animé d'une vitesse V , a pour expression $1/2 m V^2$).

Mais dans toute la gamme des essais effectués, le terme correctif $\alpha \times \frac{U^2 - U_0^2}{2g}$ (où α est souvent pris voisin de 1,1) est si faible à côté de Z qu'il a semblé plus simple de n'en pas tenir compte; on a d'ailleurs ainsi une évaluation approchée, très légèrement par excès, de la perte.

On rapporte généralement le terme principal Z à ce que les hydrauliciens appellent « la hauteur due à la vitesse » : $\frac{U^2}{2g}$. C'est la hauteur de laquelle il faudrait

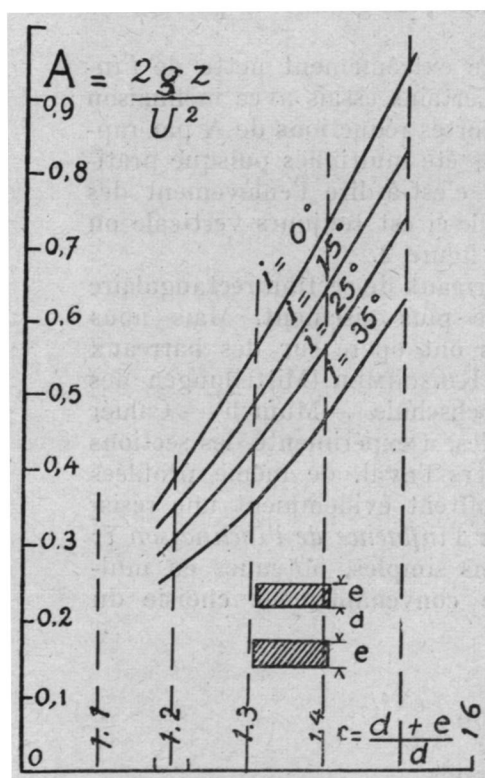


fig. 5

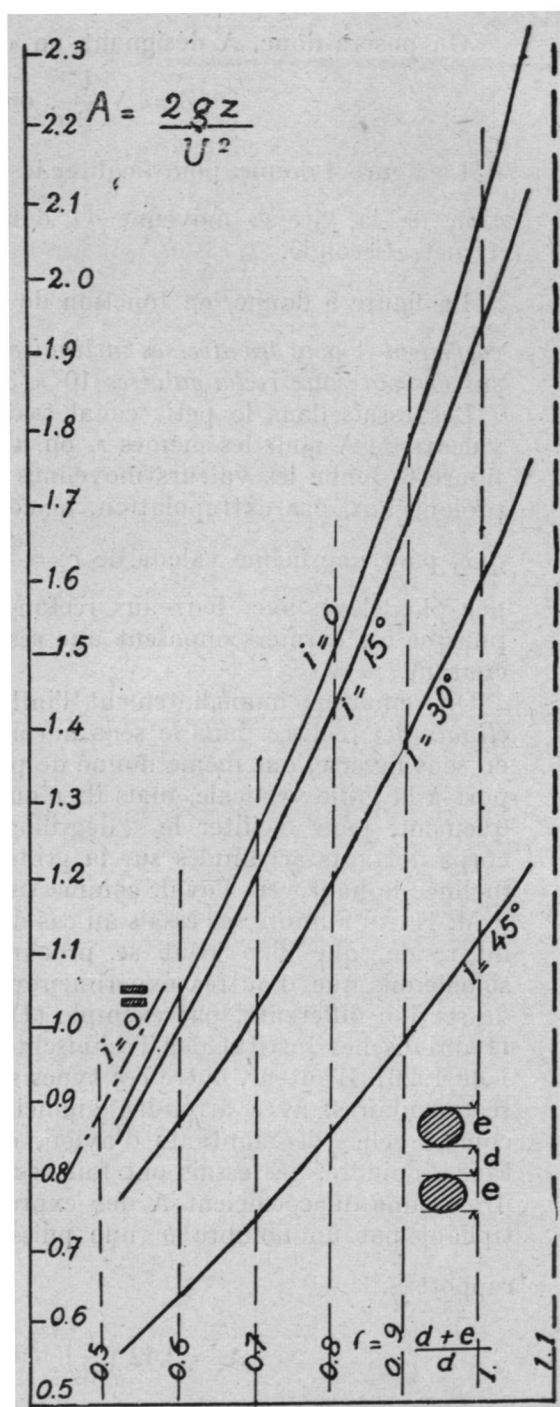


fig. 6

faire tomber un corps en chute libre, sans résistance d'air, pour qu'il atteigne la vitesse U .

On posera donc, A désignant un « coefficient de perte de charge » :

$$Z = A \frac{U^2}{2g}, \text{ ou } A = \frac{2gZ}{U^2} \quad (2)$$

La figure 4 donne, pour faciliter les calculs, les valeurs de $\frac{U^2}{2g}$ en fonction de la vitesse moyenne U définie comme il a été dit, jusqu'à 1 mètre/seconde.

La figure 5 donne, en fonction de $r = \frac{d+e}{d}$, les valeurs moyennes du coefficient A pour les diverses inclinaisons i réalisées dans les essais effectués sur des barreaux rectangulaires 10 × 32 millimètres dans le grand canal.

Les essais dans le petit canal ayant donné sensiblement les mêmes valeurs de A pour les mêmes r, on n'a pas fait figurer ces résultats. La figure 6 donne les valeurs moyennes de A pour les barreaux ronds. En prolongeant, par extrapolation, la courbe $i = 0$ de la figure 5 on voit que, pour une même valeur de $r = \frac{d+e}{d}$, les coefficients A seraient un peu plus élevés avec barreaux rectangulaires, ce qui n'a rien d'étonnant puisque ces derniers opposent une résistance plus grande au passage du courant.

On remarque immédiatement l'influence extrêmement nette de l'inclinaison i réalisée dans le sens normal. Certains essais avec inclinaison en sens inverse, ont même donné de plus fortes réductions de A par rapport à la grille verticale, mais ils n'ont pas été multipliés puisque pratiquement, pour faciliter le « dégrillage », c'est-à-dire l'enlèvement des corps flottants accumulés sur la grille, celle-ci est toujours verticale ou inclinée le haut vers l'aval, comme sur la figure 2.

M. HAHN a limité ses essais au cas de barreaux de section rectangulaire ou ronde, que l'on peut se procurer le plus aisément. Mais nous signalerons que d'autres expérimentateurs ont opéré sur des barreaux de section différente, par exemple (1) O. KIRSCHMER (Mitteilungen des Hydraulisches Institut der Technischer Hochschule — Munich — Cahier I de 1926). L'auteur, outre ces types simples, a expérimenté des sections rectangulaires, avec arrondis, amincies vers l'aval, de même profilées comme celles de montants d'avion, qui offrent évidemment une résistance moindre. Ses essais ont fait ressortir l'influence de l'inclinaison i; il a donné du coefficient A des expressions simples, obtenues en multipliant par un nombre b une puissance convenablement choisie du rapport $\frac{e}{d}$:

$$A = 2,42 \left(\frac{e}{d}\right)^{4/3} \text{ et } 1,79 \left(\frac{e}{d}\right)^{4/3}$$

pour les barreaux rectangulaires et les ronds.

(1) Nous ne pouvons que citer d'autres travaux sur la même question, par exemple l'étude de SCIMEMI dans « L'Energia Electrica », fascicules IX et XI, vol. X et celle de BEREZINSKY « Détermination des pertes de charge dans les grilles ». Revue russe « La construction hydrotechnique », n° 8 — 1939.

Plus récemment, dans son « *Etude théorique et expérimentale de la perte de charge de l'eau à travers une grille* » (voir le Génie Civil du 1^{er} Décembre 1945, page 188). M. le Professeur L. ESCANDE a indiqué le résultat de ses expériences sur barreaux de diverses sections, rectangle plus ou moins allongé, ronde, demi-ronde, trapézoïdale, même de profil aérodynamique. De nombreuses courbes et des formules traduisent les résultats des essais.

En particulier, dans le cas des barreaux rectangulaires courts, avec *décollement de la veine, aux arêtes amont seules* et Z minime à côté de la profondeur h , on aurait sensiblement, d'après la formule de BORDA :

$$Z = \frac{U^2}{2g} \left(\frac{r}{m} - 1 \right)^2 \quad (3)$$

m est un « *coefficient de contraction* », précédemment défini. A s'exprimerait donc très simplement en fonction de $r = \frac{d+e}{d}$, si l'on connaissait m .

Mais ce coefficient ne semble pas constant, même dans les limites des essais faits à Nancy, pour une même valeur de i . Pour obtenir un accord satisfaisant avec ces essais, il faudrait *faire croître* m par exemple, de 0,745 à 0,755 environ, avec les barreaux 32×10 millimètres, pour $i = 0$; de 0,755 à 0,775 pour $i = 15^\circ$; de 0,772 à 0,800 pour $i = 25^\circ$ et de 0,79 à 0,83 environ pour $i = 35^\circ$, lorsque l'on passe des plus faibles valeurs de r aux plus grandes, c'est-à-dire *des plus grands écartements d aux plus petits*.

La relation (3) reste valable pour les barreaux ronds, mais il faudrait, de même, faire croître m approximativement de 0,78 à 0,82 pour $i = 0$, de 0,79 à 0,84 pour $i = 15^\circ$, de 0,81 à 0,89 pour $i = 30^\circ$ et de 0,86 à 0,96 pour $i = 45^\circ$, r passant de 1,52 à 2,08.

On peut obtenir ainsi une valeur approchée de la perte; cependant, lorsque cela est possible, il paraît plus simple d'utiliser les coefficients de perte A , tels que les donnent les figures 5 et 6.

Mais il convient de ne les appliquer sans précaution que dans des conditions ne s'écartant pas trop de celles des essais. Par exemple, pour une forme donnée de barreaux, et une valeur de $\frac{d}{e}$, donc de r comprise

entre les limites indiquées, on ne saurait préciser la correction à faire subir au coefficient A si les autres conditions, (vitesse moyenne, forme du canal, profondeur, etc...) s'écartaient beaucoup de celles des essais.

Dans un cas tout à fait exceptionnel, s'il fallait autre chose qu'un ordre de grandeur, il resterait la ressource de demander à un laboratoire bien outillé pour cela (1), un essai, soit sur une grille conforme au projet, soit plus simplement sur un modèle réduit. *Les lois de similitude* connues en hydraulique permettent d'en tirer toutes indications utiles.

Nous nous bornerons à citer deux de ces lois. Si la viscosité jouait un rôle prépondérant, on utiliserait celle de REYNOLDS, et si le liquide agissant sur le modèle est le même que celui agissant sur l'ouvrage, on adopterait une condition telle que $V' D'$ (modèle) soit égal à VD (réel).

Mais, au cas actuel, la loi dite de REECH-FROUDE paraît généralement

(1) Par exemple le « Laboratoire Dauphinois d'hydraulique à Grenoble ».

convenir, puisqu'il s'agit d'un système « à surface libre » et à haut degré de turbulence. Dans ces cas les plus simples, elle peut s'énoncer comme suit : soit deux systèmes matériels comprenant des solides et liquides au contact *géométriquement semblables*, c'est-à-dire dans lesquels toutes les dimensions homologues de l'ouvrage réel et de son modèle sont dans un même rapport K , on peut réaliser deux mouvements dans lesquels les trajectoires de deux particules homologues, solides ou liquides dans l'ouvrage et dans le modèle, sont aussi des *courbes semblables dans le même rapport K* . Les vitesses, en deux points correspondants, sont dans le rapport \sqrt{K} , les pressions dans le rapport K , etc...

Soit donc deux canaux semblables, deux grilles semblables, les profondeurs semblables, etc... et les vitesses dans le rapport \sqrt{K} l'abaissement Z du plan d'eau dans l'ouvrage réel sera égal à l'abaissement Z' mesuré sur le modèle, multiplié par K .

Ces considérations permettent d'étendre le domaine des applications d'un essai de laboratoire à de nombreux cas réels, sous les conditions indiquées plus haut. Pratiquement, il importe surtout de se rendre compte de l'ordre de grandeur de cet abaissement Z ; on supposera, évidemment, que la grille est parfaitement propre. La perte pourrait être incomparablement plus grande si on laissait s'accumuler sur elle des détritits, corps flottants, etc... qui gênent le passage de l'eau.

Prenons un essai sur grille verticale, barreaux 32×10 millimètres, les plus serrés, $d = 22$ mm. 6; la plus grande vitesse a été $U = 0$ m. 70/seconde, d'où $\frac{U^2}{2g} = 0$ m. 025; $Z = 0$ m. 0245, $A = 0,98$.

Même dans ce cas extrême, le terme correctif de la formule (1) $\alpha \cdot \frac{U^2 - U_0^2}{2g}$ n'atteindrait que 1 mm. 13 environ pour $Z = 24$ mm. 5. Il resterait donc comme perte environ 23 mm. 4, c'est-à-dire que chaque kilogramme d'eau traversant la grille perdrait de son énergie 0 kgm. 0234, quantité bien minime à côté des pertes dans les canaux, les conduites de quelque longueur et dans les turbines.

MESURE D'UN DÉBIT.

Comme on l'a vu, la perte d'énergie est liée à la vitesse du courant, pratiquement à la vitesse moyenne $U = \frac{Q}{S}$ (par exemple U mètres par seconde si le débit Q est évalué en mètre cube/seconde et la section mouillée S en mètres carrés). Dans certains cas, on mesure la vitesse réelle en divers points d'une section transversale convenablement choisie (Tube de PIROR, moulinet de VOLTMANN, etc...) et l'on en déduit le débit Q . Ou bien on détermine ce dernier en bloc (mesure du temps nécessaire au remplissage d'une capacité connue, méthode chimique, etc...). Nous n'envisagerons ici que les procédés ne nécessitant aucun matériel spécial.

1° *Formules de débit* : Si l'on peut trouver une portion de cours d'eau rectiligne, de section transversale S et de pente I invariables sur une

assez grande longueur, la pente de la surface libre étant la même que celle du lit, l'application des formules connues donnera une valeur approchée du débit Q . R est ici le « *rayon hydraulique moyen* », quotient de la *surface mouillée* S par le *périmètre mouillé* p , somme des longueurs des parois et du fond en contact avec l'eau dans une section transversale. La formule la plus simple est celle de CHÉZY : $U = C\sqrt{RI}$. Pour de petits cours d'eau à forte pente et à fond irrégulier, le coefficient C est voisin de 25 à 32 (il dépasse 50 pour des rivières calmes). On aura de meilleurs résultats en utilisant les coefficients C de BAZIN.

2° *Flotteurs, superficiels ou immergés.* — Dans les mêmes conditions que ci-dessus, on pourra songer à l'emploi de flotteurs dont on chronométrera la durée du parcours entre deux sections transversales données. Si la section est voisine d'un trapèze, la vitesse moyenne U peut être de l'ordre de 0,65 à 0,75 V_{\max} , suivant la nature du lit, V_{\max} étant la *vitesse superficielle maximum*. Mieux vaut décomposer la surface libre du cours d'eau en *bandes parallèles* et lâcher un flotteur superficiel suivant l'axe de chacune d'elles; si le vent, les courants parasites ne le dévient pas, on obtiendra la vitesse *superficielle* V_s suivant l'axe de chaque bande; la vitesse *moyenne* U , suivant la même verticale, peut être de l'ordre de 0,75 V_s . On la multipliera par l'aire de la section transversale de la bande. La somme des produits analogues donne le débit.

Les flotteurs *immergés*, lestés pour qu'ils se tiennent *verticaux*, peuvent donner une meilleure mesure de U si la profondeur est extrêmement régulière, ce qui permet de leur donner une longueur voisine des 9/10 de cette profondeur, mesurée sur l'axe de la bande; l'écart, par excès, sur U , peut être de 3 à 5% (1). Il est beaucoup plus grand si l'irrégularité du fond oblige à réduire cette longueur.

3° *Vannes.* — Si le débit à évaluer passe par une vanne, et si h est le charge d'eau au-dessus du centre de cette vanne, S la section de passage de l'eau, α l'inclinaison de la vanne sur la verticale, on a $Q = m S \sqrt{2 gh}$. pour $\alpha = 0$ (vanne verticale), le coefficient de contraction m est voisin de 0,70 — 0,67 — 0,647 ou 0,625 suivant que la veine se contracte sur 1, 2, 3 ou 4 des côtés de l'orifice de sortie, supposé rectangulaire, les côtés inférieur et supérieur horizontaux. Si maintenant l'orifice de sortie occupe toute la largeur du canal, jusqu'au fond, auquel cas il n'y a contraction que sur le côté horizontal supérieur seulement; S étant la section *verticale* de passage, m est voisin de 0,77 pour $\operatorname{tg} \alpha = 1/2$ ($\alpha = 26^\circ 1/2$) et de 0,83 pour $\operatorname{tg} \alpha = 1$ ($\alpha = 45^\circ$).

4° *Déversoir en mince paroi.* — La forme la plus étudiée de l'orifice de sortie est le rectangle (fig. 7) à seuil bien horizontal et côtés latéraux bien verticaux. Les bords minces sont réalisés à l'aide de planches taillées en biseau, ou de tôles minces; la *contraction a lieu* sur les trois côtés, sauf emploi de dispositifs spéciaux évitant les contractions sur les bords latéraux (déversoir occupant toute la largeur du canal, joues verticales

(1) Pour plus de détails sur ces procédés de jaugeage, on pourra consulter le traité « Fleuves et rivières » de M. Maurice PARDÉ. — Collection Armand Colin, 1935.

guidant la lame d'eau à sa sortie...). Il s'agit de mesurer la charge h , hauteur de la nappe d'eau en amont, au-dessus du seuil du déversoir, et cela à une distance suffisante de ce dernier pour que cette nappe soit parfaitement calme et non déprimée. Cela peut se faire en repérant la différence de niveau entre le seuil et l'eau se trouvant dans un « puits calme » P, communiquant avec le canal par un orifice assez bas pour que l'agitation de l'eau ne se communique pas à celle du puits, dans lequel il est commode de placer un flotteur.

Plus simplement, on pourra placer contre le déversoir un tube de verre T sur lequel on lira la charge h , le ménisque d'eau s'y établissant

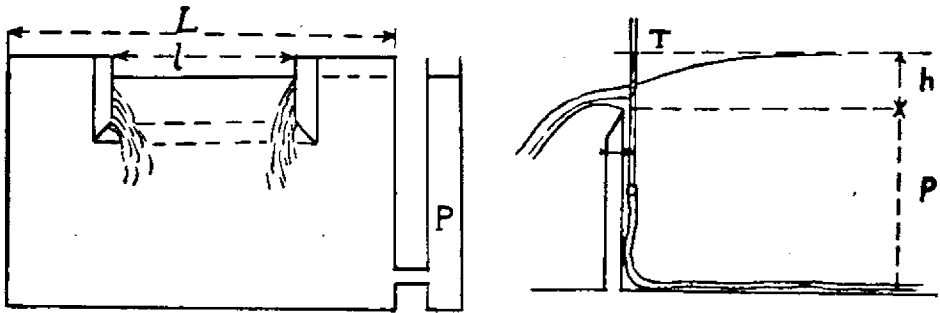


fig. 7

au niveau même de la nappe non déprimée grâce à un tuyau de caoutchouc immergé vers l'amont (fig. 7).

Le mode de jaugeage par déversoir, convenablement appliqué, est un de ceux qui fournissent le débit Q avec le plus de précision. Parmi les formules usuelles, du type $Q = m l h \sqrt{2 g h}$, on peut citer celle de M. HÉGLY qui s'applique au cas où la nappe est contractée sur le seuil et les côtés latéraux. La signification des lettres est indiquée sur la figure 7 ; le coefficient m a pour valeur :

$$m = \left[0,405 - 0,03 \frac{L-l}{L} + \frac{0 \text{ m. } 0027}{h \text{ mètres}} \right] \left[l + 0,55 \left(\frac{l}{L} \frac{h}{h+p} \right)^2 \right]$$

pour une évaluation sommaire, on peut admettre que m s'écarte assez peu de 0,425.