

NOTE

SUR L'EFFET DES CORPS FLOTTANTS SUR L'ÉCOULEMENT DES RIVIÈRES ET POUSSÉE RÉSULTANTE SUR LES BARRAGES

L. VADOT

Ingénieur-Docteur de l'Université de Nancy

Les rivières et canaux dont l'écoulement s'effectue le plus généralement avec surface libre, peuvent, dans certains cas particuliers, présenter une surface encombrée par les corps flottants. Il s'agira le plus fréquemment de troncs d'arbres (flottage) ou de glace. C'est surtout ce dernier aspect qui retiendra notre attention, le flottage ne présentant plus, en Europe, l'importance qu'il avait autrefois.

Lorsque la température s'abaisse de façon suffisante, et que la durée du froid est assez grande, une certaine partie de l'eau des rivières peut se prendre en glace. Généralement, le gel fait d'abord sentir son action sur les rives où les vitesses sont plus faibles. Des morceaux de glace s'en détachent, et sont charriés par le courant. Si le froid est suffisamment intense, la quantité de glace ainsi véhiculée augmente, et moyennant certaines conditions locales (rétrécissement du lit, obstacle artificiel, piles de ponts, etc...), un embouteillage complet peut se produire. Les blocs se coincent les uns contre les autres (embâcle), formant à la surface de l'eau une croûte solide « relativement » fixe. Les blocs étant arrêtés ont tendance à se souder facilement. Le barrage flottant ainsi constitué arrête les blocs charriés, et la couche de glace s'accroît en dimension. Sous l'effet du courant, les blocs s'accumulent à l'aval ou se glissent sous la croûte superficielle, l'épaisseur de glace augmente, et une obstruction quasi-complète du lit arrivera même, entraînant les accidents que l'on imagine.

Nous ne nous étendrons pas, ici, sur le processus de formation de la glace, problème qui ne nous intéresse pas directement. Nous dirons toutefois

quelques mots des différentes sortes de glace que l'on rencontre. Outre les morceaux détachés des rives, le courant peut charrier des blocs ayant une autre provenance. De petits morceaux de glace (une véritable suspension colloïdale de germes de glace peut même exister dans l'eau) et la neige tombant dans l'eau peuvent devenir des noyaux de cristallisation, et donner naissance à des blocs importants dont la forme est plus régulière que celle des blocs détachés des rives. Une autre forme peut apparaître, quoique plus rarement, c'est la glace de fond. Si la turbulence de l'eau est grande, ainsi que l'agitation de surface, par suite du contact intime avec l'atmosphère et des occlusions d'air frais, une forte baisse de température peut se transmettre jusqu'au fond du lit où la vitesse plus faible favorise la formation d'une couche glacée adhérente au sol ; la croissance de cette couche s'effectuera de bas en haut et peut même aller jusqu'à l'apparition de véritables îlots de glace (observé en Russie). Ce genre de glace lié à l'existence d'une turbulence de toute la masse apparaîtra en particulier à la suite d'un tronçon tumultueux. Sa formation sera entravée par une couche de glace superficielle qui empêche l'apport de froid de l'atmosphère au fond de la rivière.

Influence de la couche de glace sur le niveau d'eau

Voyons, maintenant, quel peut être l'effet d'une couche de glace superficielle sur l'écoulement d'une rivière :

Soit B la largeur de la rivière, h la profondeur, i la pente du radier. Considérons un tronçon de courant se trouvant dans la position 1 avec les caractéristiques : B_1, h_1, i_1 , celui-ci a sa surface animée d'une vitesse moyenne V_1 . L'encombrement des glaces est déterminé par le paramètre σ_1 : rapport de de la surface des glaçons à la surface libre totale de ce tronçon. Un certain temps après, le tronçon envisagé se trouve dans la position 2 caractérisée par : B_2, h_2, i_2, V_2 , et σ_2 . Les valeurs σ_1 et σ_2 de σ sont comprises entre 0 (surface sans glace) et 1 (surface entièrement prise).

Considérons, par exemple, deux sections différentes :

$$B_1 = 300 \text{ m.} \quad h_1 = 3 \text{ m. } 80 \quad i_1 = i_2 \quad C_1 = C_2$$

$$B_2 = 100 \text{ m.} \quad h_2 = 8 \text{ m.}$$

En première approximation, nous avons admis l'égalité des coefficients C_1 et C_2 en faisant toutefois remarquer, qu'en toute rigueur, cette hypothèse ne serait applicable qu'à la condition d'admettre σ_1 peu différent de σ_2 .

Si dans la section 1 on observe une quantité de glace telle que $\sigma_1 = 0,5$, on obtiendra pour la section 2,

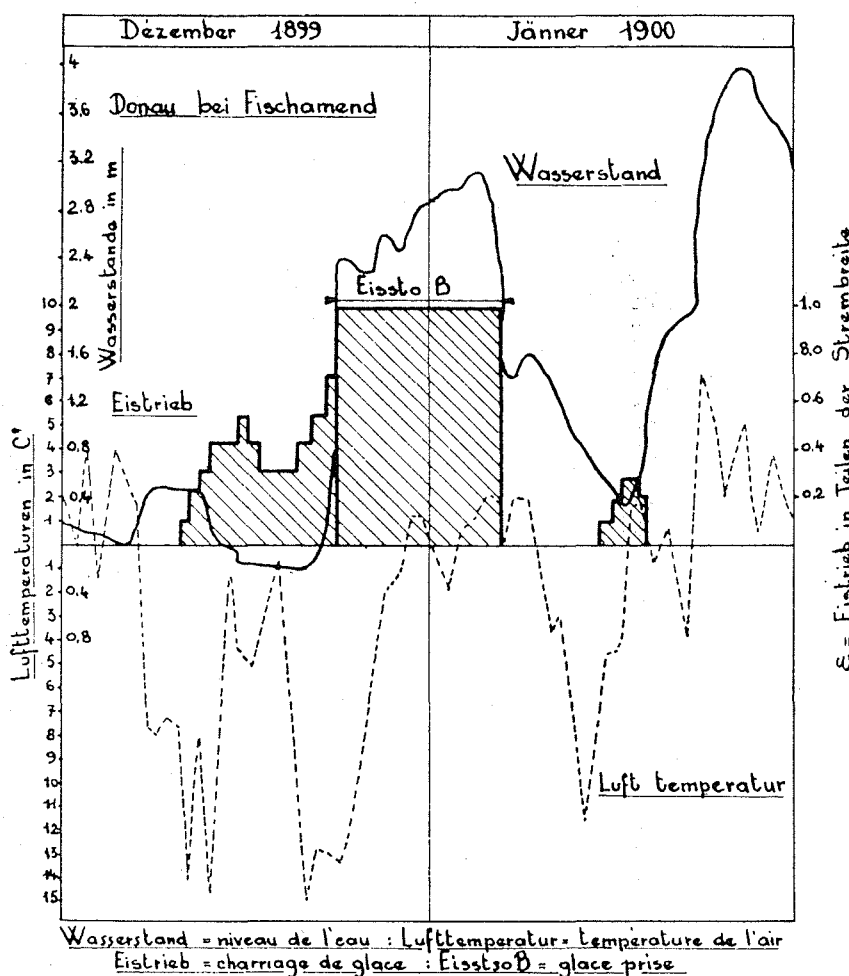


FIG. 1

Il est aisé de voir que σ, B et V sont liés par la relation suivante : $\sigma_1 B_1 V_1 = \sigma_2 B_2 V_2$
Posons :

$V = C \sqrt{R_h i}$ avec $R_h = h$ rayon hydraulique
d'où

$$\sigma_2 = \sigma_1 \frac{C_1 B_1}{C_2 B_2} \sqrt{\frac{h_1 i_1}{h_2 i_2}}$$

$\sigma_2 = 1,04$. Ceci signifie que les glaçons sont pris dans une section 1', en amont de la section 2. La couche superficielle étant complètement formée à partir de la section 1', l'écoulement s'effectue alors à travers un contour fermé.

Supposons la rivière assez large, afin de pouvoir négliger l'effet des rives dans une même section, le

rayon hydraulique prend les valeurs ci-après, suivant les deux régimes :

$$\begin{aligned} \text{à surface libre } R_h &= h \\ \text{à surface prise } R_{hg} &= \frac{hg}{2} \end{aligned}$$

Le débit par unité de largeur, pour les deux régimes est respectivement :

$$\begin{aligned} \text{à surface libre } q &= h C \sqrt{h i} \\ \text{à surface prise } q_g &= h_g C' \sqrt{\frac{hg}{2} i} \end{aligned}$$

Dès lors, si le débit est le même ($q = q_g$) et dans l'hypothèse où la rugosité de la croûte de glace est égale à celle des parois ($C = C'$), h et hg sont liés par la relation suivante :

$$\begin{aligned} hg \sqrt{\frac{hg}{2}} &= h \sqrt{h} \\ \text{d'où } hg &= \sqrt[3]{2h} \end{aligned}$$

La formation de la croûte glacée à une section déterminée entraîne donc un accroissement du niveau d'eau de 25 %, pour passer le même débit.

L'augmentation de niveau peut même être plus élevée si l'on tient compte du simple encombrement de la glace ; il est donc prudent de tabler sur une augmentation de niveau d'au moins 30 %.

Cette augmentation caractéristique du niveau est mise en évidence dans un relevé du Bureau Central Hydrographique de Vienne, représentant les variations de niveau du Danube à *Fischawend* en fonction de la quantité de glace charriée (fig. 1). On observe une brutale augmentation du niveau coïncidant avec toute la durée de prise de la couche superficielle.

L'épaisseur de la couche de glace n'est pas uniforme sur toute la surface ; en particulier dans les coudes, il peut y avoir accumulation en certains points et formation de massifs pénétrant assez profondément sous l'eau. Ces conditions peuvent modifier considérablement l'allure des érosions et auront une répercussion sensible sur les fleuves présentant des périodes de prise de longue durée.

Effets sur les barrages et modifications de la ligne de remous

Considérons un barrage placé en travers d'un fleuve, pour créer une retenue, l'évacuation du débit normal étant assurée par une dérivation, un déversoir, une vanne de fond ou tout autre dispositif. Les glaces charriées seront obligatoirement arrêtées par le barrage, et on aura formation d'une couche progressant vers l'amont. Cette couche de glace crée

sur le barrage une poussée qui vient s'ajouter à la poussée hydrostatique. Cette poussée supplémentaire est due à plusieurs causes. On a tout d'abord des forces tangentielles développées par l'eau sur la surface inférieure de la couche de glace.

En suposant le régime permanent dans le tronçon considéré, la pente de la ligne de charge est égale à celle du radier soit i . La force tangentielle à la paroi τ , le rayon hydraulique R_h et i sont liés par la relation suivante :

$$\tau = i R_h$$

Equation qui traduit l'égalité des forces de pesanteur et celle de flottement.

Pour se faire une idée de l'effort ainsi développé, prenons un cas concret. Le Rhin, en amont de Bâle, présente les caractéristiques suivantes :

- Débit moyen : $Q = 2.000 \text{ m}^3/\text{sec}$.
- Pente du fond : $i = 0,00085$.
- Profondeur moyenne : $h = 6 \text{ m}$.
- Largeur : $B = 145 \text{ m}$.

Après la prise de glace, la profondeur moyenne devient :

$$hg = \sqrt[3]{2h} = 8,40 \text{ m}$$

d'où $R_{hg} = 4 \text{ m}$. 05 en négligeant l'action des rives et :

$$\tau = \frac{0,00085}{1} \times 4,05 = 0,0035 \text{ m}$$

d'eau en mètre courant, ce qui représente pour une largeur de glace de 1 km. une poussée de 3,5 tonnes par mètre de largeur du barrage.

La surface de l'eau fait, en général, un certain angle α avec l'horizontale. Chaque bloc de glace est

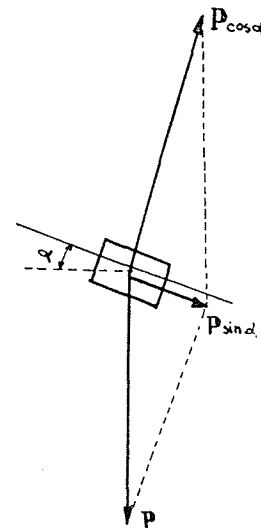


FIG. 2

sollicité par son poids P et par la poussée de l'eau : $P \cos \alpha$ normal à la surface libre. La composante du poids parallèle à surface libre $P \sin \alpha$ vient donc

s'ajouter à la poussée due aux formes du frottement (fig. 2).

Soient p le poids de la couche de glace par mètre courant, et mètre de largeur, l la longueur suivant le courant, la poussée due au poids de la glace comprise entre les sections 1 et 2 sera :

$$\text{poussée} : p \int_1^2 \sin \alpha \, dl = p [z_1 - z_2]$$

z_1 et z_2 représentant la cote de la surface libre respectivement aux sections 1 et 2.

Pour l'exemple envisagé, dans le cas d'une couche de glace de 0 m. 50 d'épaisseur et pour 1 km. de longueur, la poussée due au poids sera :

poussée = γ glace 0,5 . 0,85 = 0,38 tonne par mètre de largeur.

Finalement, la poussée totale pour une longueur de 1 km. sera de 3,88 t./m.

peut venir s'ajouter la force tangentielle due au vent agissant sur la partie supérieure de la croûte de glace.

Il arrive aussi que la poussée des glaces sur les barrages soit considérablement augmentée par le phénomène suivant : un amas de glaces flottantes quasi jointives, s'appuyant sur l'ouvrage de retenue et les rives, possède des interstices d'eau libre ; si celle-ci vient à se prendre en glace, elle augmente de volume et il peut en résulter une poussée assez considérable, l'appui sur les rives étant ici un facteur défavorable. C'est à ce genre de phénomène que certains auteurs attribuent l'essentiel de la progression des glaciers. Le rôle essentiel joué par ce type de poussée explique les efforts tentés par les techniciens pour éviter le contact de la glace et du barrage, en envoyant de l'eau du fond au moyen d'émulsion d'air.

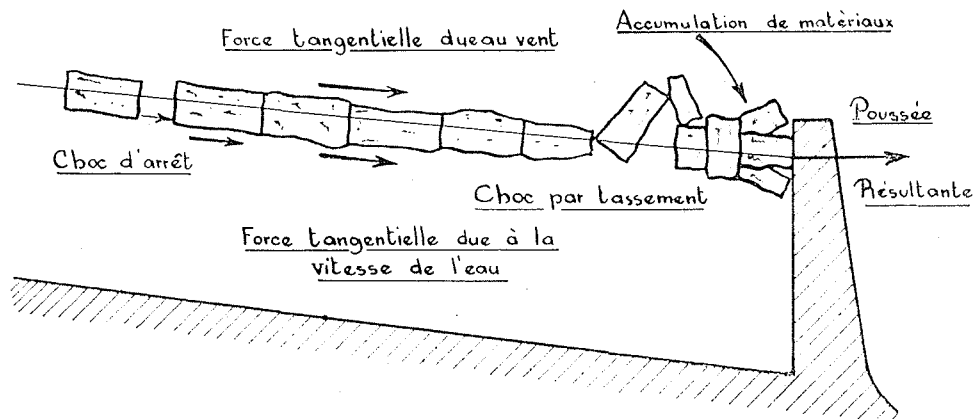


FIG. 3

On obtient aussi un résultat brut ; certains effets viennent accroître la poussée et d'autres la diminuer.

1° AUGMENTATION DE LA POUSSÉE.

À la limite de la croûte de glace, les blocs charriés sur le tronçon encore libre viennent s'arrêter brutalement sur la couche prise. Il en résulte un choc dont l'effet peut ne pas être négligeable. D'autres chocs peuvent prendre naissance dans la croûte de glace elle-même de la manière suivante. Les blocs arrêtés sont enchevêtrés de manière irrégulière ; sous l'effet de la pression sans cesse croissante, l'équilibre de certains blocs peut se rompre : il en résultera un choc violent dont l'action est d'autant plus marquée que ces chocs peuvent se produire au voisinage immédiat du barrage (fig. 3).

Enfin aux forces tangentielles dues à l'eau agissant sur la partie inférieure de la couche de glace.

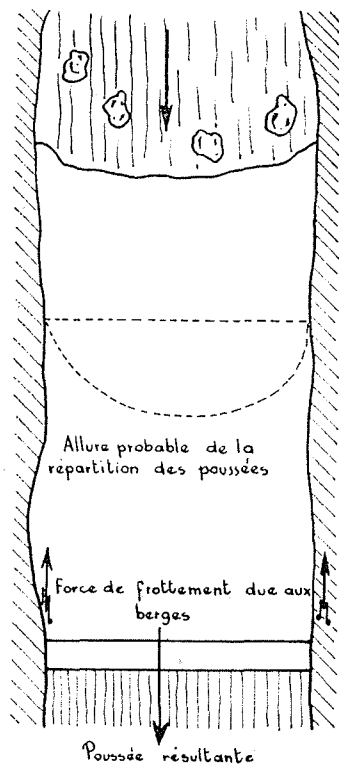
2° DIMINUTION DE LA POUSSÉE.

Cette dernière forme de poussée mise à part, les efforts occasionnés par la glace ont été, dans le paragraphe précédent, supposés entièrement absorbés par le barrage. Pratiquement les rives supportent une partie de cette poussée dans une mesure qu'il est difficile d'évaluer (fig. 4). Les rives absorbent une partie d'autant plus grande de la poussée, qu'elles seront plus resserrées et plus tortueuses ; au contraire, pour un fleuve large et rectiligne, la réaction des rives sera plus faible.

La croûte de glace qui peut être considérée comme fixe par rapport au courant présente, sous l'action de la poussée à laquelle elle est soumise, des déplacements appréciables ; on ne possède pas beaucoup de renseignements précis à ce sujet, mais il semble logique d'admettre que la répartition des vitesses dans une section du fleuve aura, par suite du ralentissement occasionné par les rives, une allure sem-

blable à celle qu'on observe sur les glaciers, c'est-à-dire une répartition sensiblement parabolique, avec maximum au milieu et vitesse très faible aux bords (expériences du glacier du Rhône, forme des bandes boueuses).

La croûte de glace ne conserve pas une épaisseur constante ; elle a tendance à se plisser et à accroître son épaisseur par accumulation de matériaux vers l'aval. En effet, une couche uniforme de glace homogène est soumise à des effets de flambement impor-



tant qui provoquent des cassures et des plissements. A titre d'indication Harry donne, pour l'effet maximum supportable par une couche de glace de 0,80 d'épaisseur et 200 m. de longueur, une valeur de 0,61 tonne par mètre. Le flambement de la couche glacée ne diminue en rien la valeur de la poussée ; au contraire, il occasionne des tassements et des chocs.

On se rend compte aisément que la couche de glace sous l'effet de la poussée a tendance à augmenter d'épaisseur ; le poids par unité de surface augmente ainsi que la poussée due au poids, on peut se demander si la croissance simultanée de l'épaisseur et de la poussée aura une limite.

Considérons un tronçon de longueur l , subissant la poussée du tronçon amont de longueur L . Soient

e l'épaisseur de la glace, b la largeur de la bande considérée, i la pente.

La poussée comprend un terme indépendant de l'épaisseur de la glace dû au frottement de l'eau et un terme variant linéairement avec e dû au poids. Si on néglige les effets sur le tronçon l supposé petit par rapport au tronçon amont on aura pour la poussée :

$$F = Lb (\sigma + \gamma ie)$$

Supposons que la croûte de glace travaille uniquement au flambement. L'effort admissible sera de la forme :

$$F' = K \frac{be^3}{l^2}$$

On atteindra donc une épaisseur fixe quand on aura :

$$F \leq F'$$

ce qui sera atteint pour une épaisseur critique e_c . Pour une épaisseur inférieure à e_c la couche de glace ne sera pas stable et aura tendance à se déformer et à s'accroître jusqu'à ce que la valeur e_c soit atteinte (fig. 5).

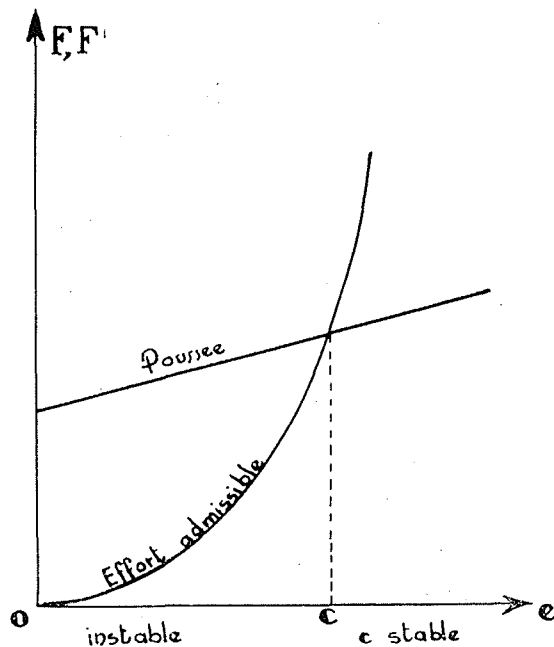


FIG. 5

Effets sur la ligne de remous

Voyons maintenant comment la présence de la glace va agir sur la forme de la ligne de remous.

Soit u la vitesse moyenne, h la profondeur dans une section, c le coefficient de Chezy, $\frac{dz}{dx}$

la pente du fond, $\frac{dh}{dx}$ la pente de surface libre.

Allure des lignes de remous

————— Surface couverte de glace prise

----- Surface libre de glace

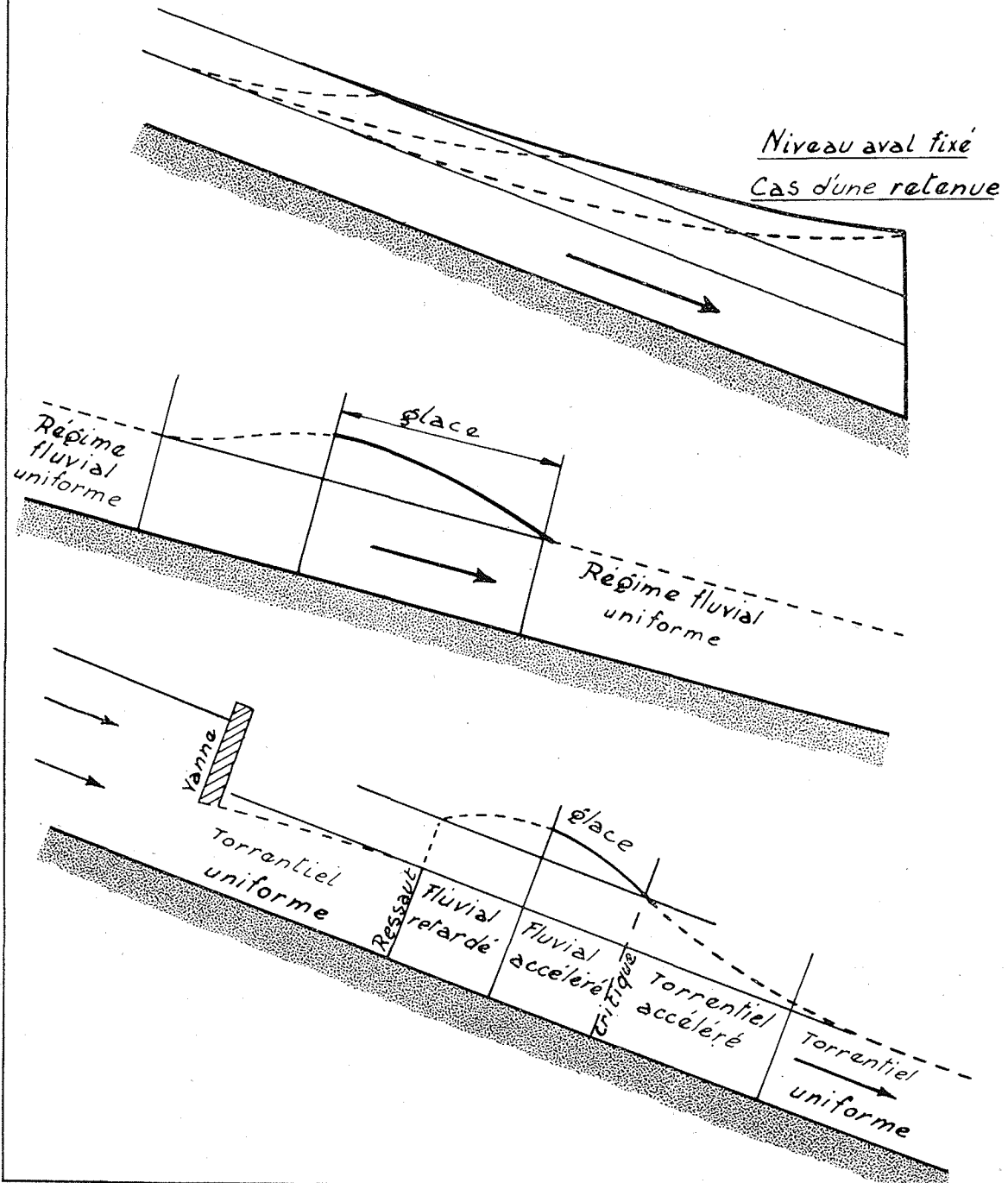


FIG. 6

Dans le cas où la surface est libre de glace, on obtient, en appliquant le théorème de Bernouilli à un tronçon de longueur dx

$$\frac{dh}{dx} = \frac{\frac{dz}{dx} - \frac{u^2}{c^2 h}}{1 - \frac{u^2}{gh}}$$

dans le cas où la surface est encombrée par une croûte de glace fixe de même rugosité que le fond, on aura :

$$\frac{dh}{dx} = \frac{\frac{dz}{dx} - \frac{2 u^2}{c^2 h}}{1 - \frac{u^2}{gh}}$$

Voyons ce qu'on obtiendra dans le cas du Rhin, cité plus haut, pour une retenue de 12 m. avec c = 31,5.

de charge passagère, ces singularités ayant fait l'objet d'une étude détaillée dans un précédent article de M. Blanchet, nous n'avons pas jugé nécessaire de nous arrêter sur cette question.

Nous venons de donner un court aperçu des effets produits par les glaces sur l'écoulement des fleuves et particulièrement au voisinage des barrages. Si les poussées engendrées sont faibles dans le cas de fortes retenues par suite de la faible valeur des vitesses amont, il n'en sera plus de même pour les retenues de faible hauteur, et en particulier pour les usines au fil de l'eau où le problème revêt toute son importance.

BIBLIOGRAPHIE

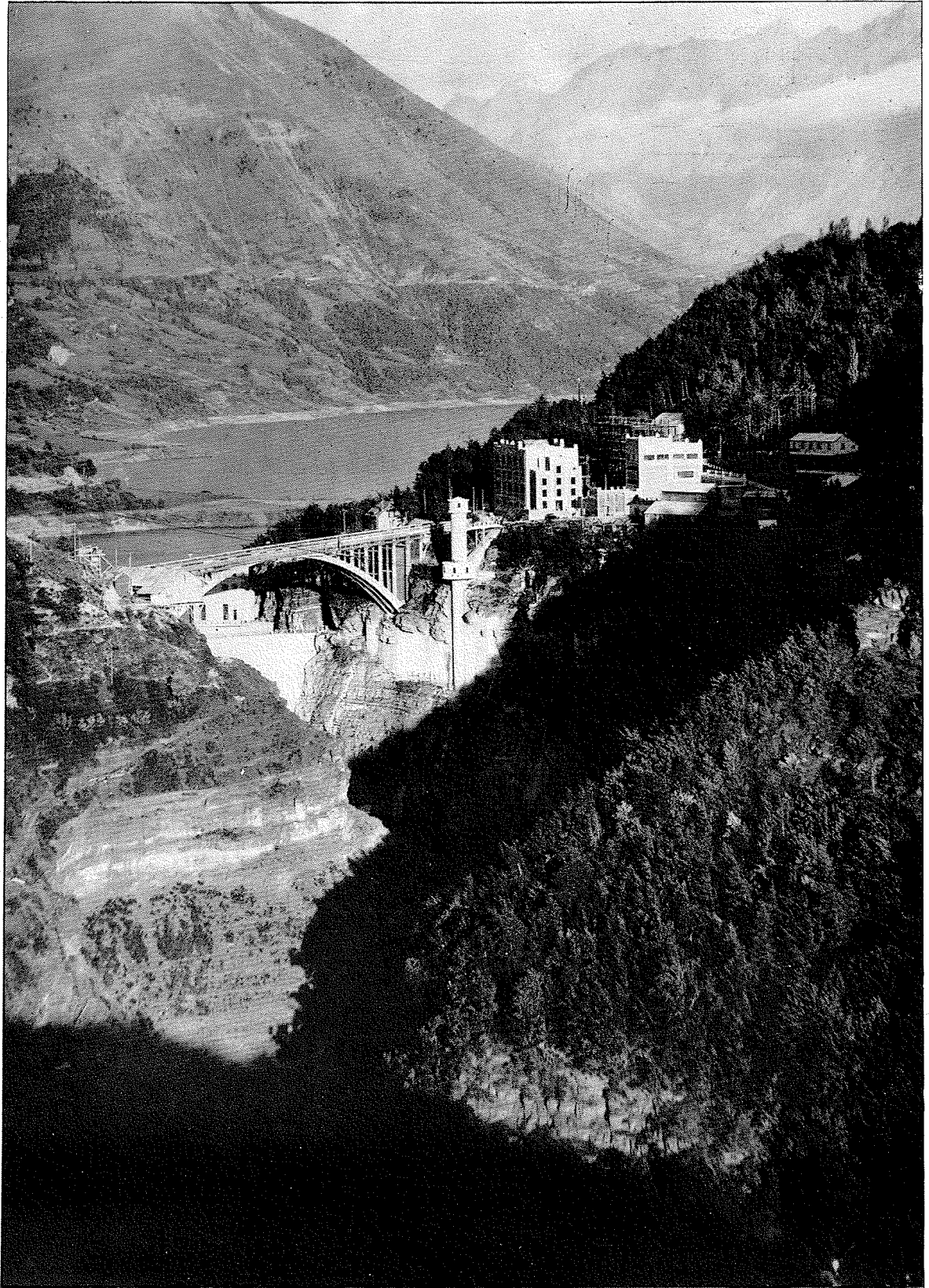
SCHOKLISCH. — Wasserbau.

Km. vers l'amont.	0	1	2	3	4	5	6	7	∞
Surface libre.....	h = 12 m	11.27	10.53	9.82	9.14	8.50	7.885	7.30	6.4
Glace prise	h = 12 m.	11.37	10.74	10.19	9.70	9.27	8.90	8.60	8.1

Dans la figure 6 sont consignés différents cas possibles de lignes de remous. On reconnaîtra aisément les cas classiques d'une retenue dans le premier schéma ; les deux autres envisagent les modifications passagères qu'apporte la glace à la ligne de remous d'un canal. La croûte de glaçon joue, par sa rugosité, un rôle analogue à celui créé par une perte

HARRY. — Action de la glace sur les barrages réservoirs. *Rapport du V^e Congrès de l'Union Internationale des Producteurs et Distributeurs d'Energie Electrique.*

JAKUSCHOFF. — Uber Grundeis Eisstaungen und Massnahmen zu ihrer Bekämpfung mit. d. Instit. J. Wasserbau d. T.H. Berlin.



VUE GENERALE DU SAUT ET PRISE D'AVAL

Photo Bonne et Drac