

CALCUL DE LA FORMATION DE GLACE DANS LES CONDUITES FORCÉES

PAR L. LEVIN *

1. Exposé du problème

L'exploitation des conduites forcées d'installations hydroélectriques aménagées en haute montagne peuvent rencontrer de sérieuses difficultés durant les mois d'hiver. Si la centrale est arrêtée, et la conduite pleine, on s'expose à la propagation du gel, au bout d'un certain temps qu'il est actuellement possible de chiffrer, à toute la masse d'eau. Pour empêcher cette éventualité on est conduit à assurer à la conduite un débit minimal.

Cette précaution garantit le libre passage du débit, mais ne sous-entend nullement une conduite totalement dépourvue de glace. Cette dernière condition exigerait des débits beaucoup plus importants, si toutefois cela est réalisable.

Si la centrale est en fonctionnement, le problème est exactement le même, car son débit n'est autre qu'un débit traversant la conduite forcée. Ce débit devient une donnée du problème; il reste à déterminer si la conduite est susceptible de le transiter, étant donné le volume de glace pouvant se former dans son intérieur.

Dans le passé, ce problème a été très mal connu et les formules empiriques ayant eu cours ont conduit souvent à des mécomptes sérieux. On se contentait alors d'augmenter la valeur du coeffi-

cient de proportionnalité, alors que la formule restait non appropriée. Le résultat ne pouvait évidemment pas, dans ces conditions, être amélioré.

Les Russes, à l'occasion de l'aménagement hydroélectrique de la Sibérie, ont été amenés à pousser à fond cette étude. Les mesures effectuées *in situ* ont confirmé les théories émises.

Cette note expose ces théories.

2. Théorie du bilan thermique d'une conduite forcée

2.1. Eléments d'énergie calorifique.

Les éléments intervenant dans les bilans thermiques, d'une part de l'eau en mouvement, d'autre part des parois intérieurement couvertes de glace, sont assez nombreux. Il importe de ne point en omettre aucun car étant tous du même ordre, le résultat peut s'en trouver sérieusement déformé. La théorie exposée ici, due à Bogoslovski [1], a été construite progressivement et constamment contrôlée par essais *in situ*. L'omission de la chaleur dégagée par le frottement du liquide contre les parois glacées, pourtant très lisses (n de Strickler = 0,01) et même pour faibles vitesses ($v = 0,5$ à 1 m/s), s'est montrée totalement inadmissible, sur la base d'expériences précises.

Les principaux éléments d'énergie thermique sont :

* Chargé de cours à l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne; Chef du Département Recherches de la Société B.V.S.

a) *Chaleur transportée par l'eau :*

$$T_c = 86\,400 \cdot Q \cdot \gamma_e \cdot C_e \cdot \theta_e \quad (1)$$

avec :

- Q débit en m³/s;
- γ_e 1 t/m³, poids spécifique de l'eau;
- C_e 1 kcal/kg.°C, pouvoir calorifique de l'eau;
- θ_e température de l'eau;
- T_c chaleur en Mcal/jour.

b) *Chaleur développée sous l'effet du frottement :*

$$T_f = \frac{54\,600 \cdot \pi \cdot r \cdot 2,67 J^{1,5}}{E \cdot n} \quad (2)$$

avec :

- T_f en Mcal/m.j;
- r rayon intérieur de la glace en m;
- J pente de la ligne d'énergie;
- E 427 kgm/Mcal, équivalent mécanique de la chaleur;
- n coefficient de rugosité suivant Strickler.

c) *Déperdition de chaleur à travers la paroi de la conduite forcée :*

$$T_p = \frac{0,024 \times 2 \pi (-\theta_{ext})}{-(1/\lambda) \ln(r/R_c)} \quad (3)$$

avec :

- T_p en kcal/m.j;
- $-\theta_{ext}$ température moyenne « effective » de l'air;
- λ 2 kcal/m.h.°C, coefficient de conductibilité thermique de la glace;
- R_c rayon de calcul, fictif mais commode, donné par :

$$R_c = R_{int} e^{0,165/w^{0,7} \cdot R_{int}^{0,7}} \quad (4)$$

avec :

- R_{int} rayon intérieur de la conduite forcée;
- e nombre naturel;
- w vitesse du vent en m/s.

La formule (3) est valable pour conduite forcée exposée à l'air. La formule se complique pour conduite enfouie sous une couche de terre ou de neige.

A noter cependant que le rôle de l'épaisseur du métal des parois de la conduite est des plus minimes. C'est la raison pour laquelle cette épaisseur ne paraît pas dans le bilan ci-après.

d) *Chaleur « dissimulée », due à la fusion de la glace :*

$$T_g = -\pi \cdot \gamma_g \cdot L (R_{int}^2 - r^2) \quad (5)$$

avec :

- T_g en Mcal/m;
- γ_g 0,917 t/m³, poids spécifique de la glace;
- L 79,6 Mcal/m, chaleur spécifique de fusion;
- r rayon intérieur de la glace.

e) *Chaleur en rapport avec la capacité calorifique des corps :*

La glace d'épaisseur d m. consomme pour fondre :

$$T_d = 2 \pi \cdot r \cdot d \cdot \gamma_g \cdot L \quad (6)$$

avec :

- T_d en Mcal/m;
- L' eau contenue dans 1 m de longueur de conduite contient la chaleur :

$$T_e = \pi \cdot r^2 \cdot \gamma_e \cdot C_e \cdot \Delta\theta \quad (7)$$

avec :

$\Delta\theta$ variation de la température de l'eau en degrés.

(6) et (7) donnent :

$$d = \frac{r \cdot \gamma_e \cdot C_e \cdot \Delta\theta}{2 \gamma_g \cdot L} \cong 0,007 r \cdot \Delta\theta \quad (8)$$

(voir ci-dessus les valeurs numériques de γ_e ; C_e ; γ_g et L . Pour $\Delta\theta = 1$ °C (ce qui est beaucoup) et même, pour une très grande conduite : $r = 3$ m, (8) donne : $d = 0,021$ m, grandeur négligeable.

La chaleur de capacité de l'eau contenue dans la conduite forcée (à ne pas confondre avec le volume d'eau transitant dans la conduite) peut donc être négligée.

f) *Chaleur transmise de l'eau à la glace :*

$$T_t = 17,2 \pi \left(\frac{Q}{r}\right)^{0,75} (\theta_e + 0,000\,784 H) \quad (9)$$

avec :

- T_t en Mcal/m.j;
- θ_e température de l'eau;

La formule (9) montre l'influence considérable de la température de l'eau sur le phénomène.

g) *Chaleur due à la compression de l'eau :*

Sous l'effet d'une pression p , la température de l'eau s'élève de :

$$\Delta\theta = \frac{10 p^2}{2 E_e \cdot E \cdot \gamma_e \cdot C_e} = 0,0585 \cdot 10^{-9} H^2 \quad (10)$$

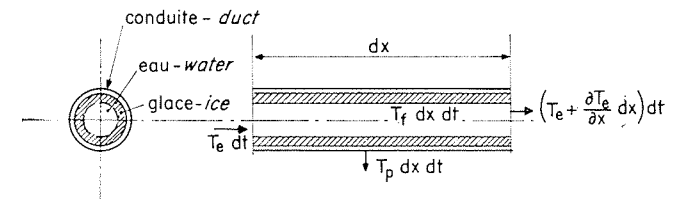
avec :

- $\Delta\theta$ en degrés centigrades;
- H hauteur de la chute en m;
- E_e $2 \cdot 10^4$ kg/cm², coefficient d'élasticité de l'eau;

Les valeurs numériques de E , γ_e et C_e ont été indiquées plus haut.

A noter que d'une part la valeur de (10) est assez faible; d'autre part, elle est, de plus, contrebalancée par l'abaissement du point de fusion de la glace. En définitive, la chaleur due à la compression de l'eau est négligée.

2.2. Bilan thermique.



Le croquis ci-dessus représentant les coupes transversale et longitudinale de la conduite glacée, indique les éléments thermiques « mobiles » entrant en jeu.

Le bilan thermique de l'ensemble : eau traversant la conduite et échange entre glace et extérieur, s'exprime par :

$$\frac{\partial T_e}{\partial x} + T_f - T_p - \frac{\partial T_g}{\partial t} = 0$$

qui, compte tenu de (1), (2), (3) et (5) et de l'hypothèse du glaçage cylindrique de la conduite à partir d'une certaine distance de l'entrée, soit :

$$\frac{\partial r}{\partial x} = 0 \quad \text{et} \quad \frac{\partial r}{\partial t} = \frac{dr}{dt}$$

donne la formule (11) :

$$-86\,400 \, Q \cdot \gamma_e \cdot C_e \frac{\partial \theta_e}{\partial x} + 218 \cdot 10 \frac{n^2 Q^3}{E \pi^2 R_c^{5,33}} \cdot \frac{1}{r_*^{5,33}} - \frac{0,024 \cdot 2 \pi (-\theta_{ext})}{(1/\lambda) \ln r_*} - 2 \pi \cdot \gamma_g \cdot R_c^2 \cdot r_* \frac{dr_*}{dt} = 0 \quad (11)$$

Pour la glace seule, on a :

$$-T_p - \frac{\partial T_g}{\partial t} + T_t = 0$$

qui, avec (3), (5) et (9) donne la formule (12) :

$$17,2 \pi \left(\frac{Q}{R_c}\right)^{0,75} (\theta_c + 0,000\,784 \, H) \frac{1}{r_*^{0,75}} - \frac{0,024 \cdot 2 \pi (-\theta_{ext})}{(1/\lambda) \ln r_*} - 2 \pi \cdot \gamma_g \cdot L \cdot R_c^2 r_* = 0 \quad (12)$$

avec :

x abscisse le long de l'axe de la conduite;

$$r_* = \frac{r}{R_c};$$

t temps en jours;

Les autres symboles ont été explicités plus haut.

Cinq variables indépendantes interviennent dans nos calculs : r_* ; θ_c ; H ; x et t .

θ_c explicité à partir de l'équation (12), dérivée par rapport à l'abscisse et compte tenu de :

$$\frac{\partial H}{\partial x} = J_k - 2,52 \frac{n^2 Q^2}{\pi^2 R_c^{5,33}} \cdot \frac{1}{r_*^{5,33}} \quad (12')$$

donne l'équation (13).

$$\frac{dr_*}{dt} = \frac{67,8 \, Q \cdot \gamma_e \cdot C_e \cdot J_k}{2 \pi \cdot \gamma_g \cdot L \cdot R_c^2} \cdot \frac{1}{r_*} + \left(\frac{218 \cdot 10^3}{E} - 170,6 \right) \frac{n^2 Q^3}{2 \pi^2 \cdot \gamma_g \cdot L \cdot R_c^{7,33}} \cdot \frac{1}{r_*^{6,33}} - \frac{0,024 \lambda (-\theta_{ext})}{\gamma_g \cdot L \cdot R_c^2} \cdot \frac{1}{r_* \ln r_*} \quad (13)$$

J_K étant la pente de la conduite forcée;

avec :

- $\gamma_e C_e$ 1 Mcal/m³. °C;
- n 0,01, coefficient de rugosité de la glace;
- λ 2 kcal/m. heure. °C;
- $\gamma_g L$ 0,917 × 79,6 = 73 Mcal/m³;
- E 427 tm/Mcal.

(13) donne :

$$\frac{dr_*}{dt} = 0,148 \frac{Q J_k}{R_c^2} \cdot \frac{1}{r_*} + 7,49 \cdot 10^{-6} \frac{Q^3}{R_c^{7,33}} \cdot \frac{1}{r_*^{6,33}} - 0,66 \cdot 10^{-3} \frac{(-\theta_{ext})}{R_c^2} \cdot \frac{1}{r_* \ln r_*} \quad (14)$$

La résolution de cette équation différentielle est analytiquement impraticable. La solution graphique est donnée plus bas.

La température de l'eau, grandeur souvent intéressante à connaître par l'ingénieur, peut être explicitée par la voie suivante : l'équation (14) introduite dans (12), et compte tenu de (12'), donne l'équation (15) :

$$\theta_c = 1,254 \, Q^{0,25} \cdot R_c^{0,75} \cdot J_k \cdot r_*^{0,75} + 0,0636 \cdot 10^{-3} \frac{Q^{2,25}}{R_c^{4,58}} \frac{1}{r_*^{4,58}} - 0,000\,784 \, H \quad (15)$$

Le calcul ci-dessus suppose un glaçage intérieur de la conduite forcée parfaitement prismatique, concentrique à cette conduite.

Cette hypothèse a été confirmée assez bien par l'expérience.

3. Solution graphique de l'équation (14)

3.1. Principe.

L'équation différentielle (13), bien que se prêtant à la séparation des variables, prend une forme tellement compliquée que son intégration n'est pas possible.

Le développement en série n'aboutit non plus à une solution valable techniquement.

La simplification de l'équation (13) permettant son intégration, conduit à des résultats fortement distordus et pratiquement non acceptables. Par contre, Bogoslovski [1] a proposé une solution graphique, pas trop compliquée, fournissant des résultats avec une bonne précision pour la pratique industrielle.

Dans l'équation (14), la dérivée dr_*/dt n'est fonction que du rayon relatif r_* . Il est facile de calculer cette fonction pour toute une série de valeurs r_* , variant de 0,05 par exemple, calcul qu'il est fort commode de consigner dans un tableau. On trace la courbe en fonction de dr_*/dt (voir fig. 1). La courbe coupe l'axe des ordonnées ($dr_*/dt = 0$) pour une valeur du rayon relatif fort important :

$$r_* = R_{*lim}$$

qui est le rayon relatif limite vers lequel tend l'installation, exposée aux conditions données : Q , J_k , R_{int} , θ_{ext} , w , etc.).

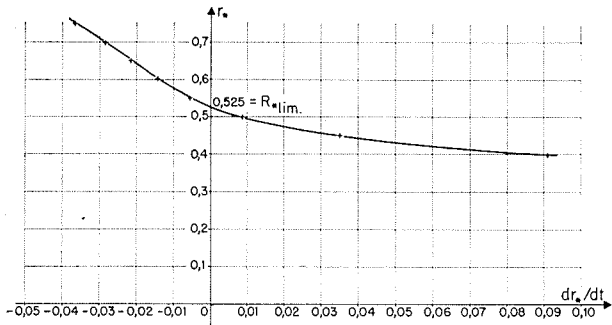
A partir du graphique de la figure 1, on construit la polaire de la figure 2. A partir du pôle 0 distant d'une verticale de :

$$h = \frac{m_r}{m_{dr,dt} \times m_t} \quad (15 \text{ bis})$$

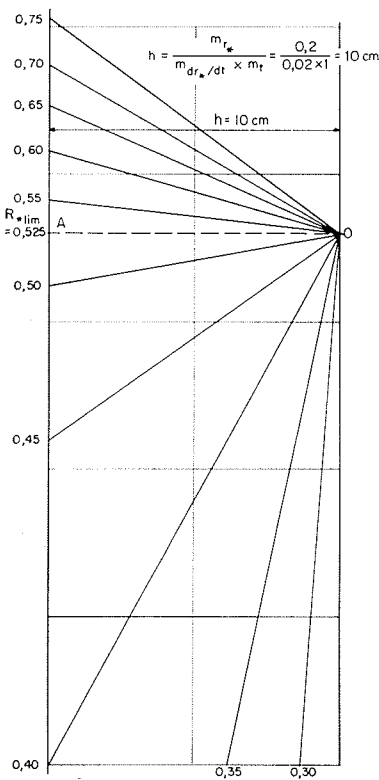
avec m_r , $m_{dr,dt}$ et m_t respectivement les échelles du rayon relatif r_* , de la dérivée dr_*/dt et du temps t .

On trace une horizontale cotée R_{*lim} . A partir de ce point A, on porte sur la verticale, à l'échelle du graphique de la figure 1, les valeurs r_* variant de 0,05 en 0,05, valeurs lues sur le graphique de la figure 1. On obtient ainsi un faisceau de droites que l'on cote en r_* .

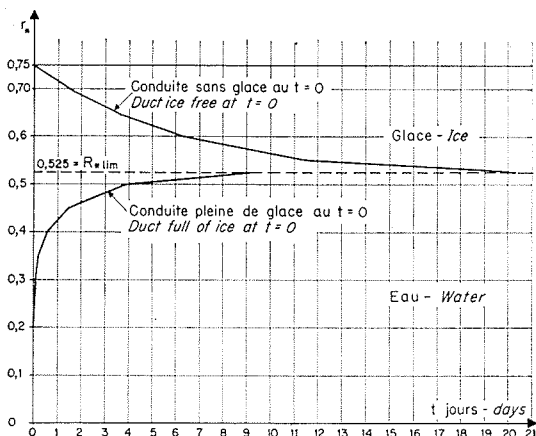
La polaire de la figure 2 permet de construire directement la courbe du rayon relatif r_* en fonction du temps t en jours, but du calcul. Pour cela,



1/ $dr/dt = f(r)$ suivant équation (14), pour $J_k = 0,015$
 $dr/dt = f(r)$ from equation (14), for $R_{int} = 0,6 \text{ m}$
 $\theta_{ext} = -10 \text{ }^\circ\text{C}$
 $w = 4,95 \text{ m/s}$



2/ Polaire.
Polar diagram.



3/

il est nécessaire de partir d'une situation connue à l'instant $t = 0$ (fig. 3). Si la conduite est peu ou pas glacée à l'instant initial, la courbe est descendante, asymptotique à l'horizontale $r_* = R_{*lim}$.

Si, au contraire, la conduite est très glacée ou même pleine de glace, la courbe sera ascendante, toujours asymptotique à l'horizontale R_{*lim} .

La figure 3 donne les résultats pour une conduite forcée, dans des conditions numériques bien déterminées, dans les deux hypothèses :

a) la conduite est complètement dépourvue de glace à l'instant initial;

b) la conduite est pleine de glace à l'instant initial.

La construction des courbes à partir de la polaire de la figure 2, est fort simple. On commence par le point connu initial; on se fixe un court intervalle r_* à partir de ce point. On trace un segment de droite entre les ordonnées correspondantes aux deux valeurs de r_* avec la pente moyenne relative à ces valeurs; pente prise sur la polaire de la figure 2. On procède ainsi de proche en proche en s'approchant du rayon R_{*lim} , la pente des segments devenant de plus en plus faible.

L'exemple de la figure 3 montre que le processus de glaçage de la conduite est bien plus long que celui de la fusion de la glace, conséquence du fait physique de la chaleur « dissimulée », explicité au paragraphe d) de 2.1.

3.2. Exemple numérique [1].

La conduite forcée est caractérisée par les données suivantes :

$$Q = 2 \text{ m}^3/\text{s}$$

$$J_k = 0,015$$

$$R_{int} = 0,60 \text{ m}$$

$$\theta_{ext} = -10 \text{ }^\circ\text{C}$$

$$w = 4,95 \text{ m/s}$$

On calcule tout d'abord, suivant (4) :

$$R_c = 0,6 e^{0,615/(4,95 \times 0,6)^{0,7}} = 0,80 \text{ m}$$

et :

$$R_{*int} = \frac{R_{int}}{R_c} = \frac{0,6}{0,8} = 0,75$$

L'équation (14) prend la forme :

$$\frac{dr_*}{dt} = 0,00694 \frac{1}{r_*} + 0,309 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{1}{r_*^{6,33}} - 0,0103 \frac{1}{r_* \ln r_*} \quad (16)$$

On trouve dans [1] un tableau fort utile pour les calculs, permettant une économie de temps très appréciable (voir tabl. 1); une simple lecture permet de trouver, pour chaque r_* , les valeurs :

$$\frac{1}{r_*} \quad \frac{1}{r_*^{6,33}} \quad \text{et} \quad \frac{1}{r_* \ln r_*}$$

Le tableau 2 contient les éléments de calcul et les résultats de l'équation (16).

La figure 1, contient la courbe $r_*(dr_*/dt)$, suivant les chiffres du tableau 2.

On trouve :

$$R_{*lim} = 0,525$$

Tableau 2 : Eléments de calcul d'un exemple numérique

Таблица 2

Подсчет значений производной $\frac{dr_*}{dt}$ при различных величинах r_* для трубопровода с $R_{вн} = 0,60$ м, $R_{нд} = 0,80$ м, $J_K = 0,0150$ при $Q = 2,0$ м³/сек и $\theta_n = -10^\circ$

r_* (1)	$\frac{1}{r_*}$ (2)	$\frac{1}{r_*^{6^{1/3}}}$ (3)	$\frac{1}{-r_* \ln r_*}$ (4)	$0,00894 \frac{1}{r_*}$ (5)	$0,309 \cdot 10^{-3} \frac{1}{r_*^{6^{1/3}}}$ (6)	$-0,0103 \frac{1}{-r_* \ln r_*}$ (7)	$\frac{dr_*}{dt} = (5) + (6) + (7)$ (8)
0,75	1,333	6,19	4,63	0,00925	0,00191	-0,0476	-0,0365
0,70	1,430	9,59	4,01	0,00991	0,00296	-0,0413	-0,0284
0,65	1,539	15,31	3,57	0,01067	0,00473	-0,0368	-0,0214
0,60	1,669	25,5	3,26	0,01158	0,00787	-0,0336	-0,01415
0,55	1,820	44,1	3,05	0,01261	0,01362	-0,0314	-0,00517
0,50	2,00	80,8	2,89	0,01386	0,0250	-0,0298	+0,00906
0,45	2,22	157,8	2,78	0,01540	0,0488	-0,0286	0,0356
0,40	2,50	332	2,73	0,01732	0,01026	-0,0281	0,0918
0,35	2,86	772	2,72	0,01982	0,238	-0,0280	0,230
0,30	3,33	2,05 · 10 ³	2,77	0,0231	0,634	-0,285	0,629
0,25	4,00	6,51 · 10 ³	2,88	0,0277	2,01	-0,0296	2,01
0,20	5,00	26,8 · 10 ³	3,10	0,0347	8,28	-0,0319	8,28
0,15	6,67	0,1652 · 10 ⁶	3,52	0,0463	51,1	-0,0362	51,1
0,10	10,00	2,16 · 10 ⁶	4,34	0,0694	667	-0,0446	667
0,05	20,0	0,1740 · 10 ⁹	6,68	0,1387	53,8 · 10 ³	-0,0688	53,8 · 10 ³
0	∞	∞	∞	∞	∞	-∞	∞

La figure 2 reproduit la polaire. Les échelles sont (voir fig. 1) :

$$m_{r_*} = 0,2$$

$$m_{dr_*/dt} = 0,02$$

On se fixe de plus :

$$m_t = 1 \quad (1 \text{ jour} \rightarrow 1 \text{ cm})$$

On calcule suivant (15) :

$$h = \frac{0,2}{0,02 \times 1} = 10 \text{ cm}$$

Les rayons sont tracés de la façon suivante : soit à tracer, par exemple, le rayon coté $r_* = 0,4$. On relève, pour cette ordonnée, sur la figure 1, $dr_*/dt = 0,091$, soit 182 mm que l'on porte sur la verticale, à partir du point A correspondant à $R_{*lim} = 0,525$. On relie ce point à 0 et le rayon correspondant à $r_* = 0,40$ est ainsi tracé.

La polaire (fig. 2) étant ainsi dessinée, on peut procéder au tracé de la courbe finale, donnant r_* en fonction du temps. Dans l'hypothèse d'absence de glace à l'instant initial, on part du point $r_* = 0,75$ (rayon relatif de la glace = rayon de la conduite). On désire tracer le segment compris entre les ordonnées $r_* = 0,75$ et 0,70. On relève pour cela la pente du rayon moyen 0,725 de la polaire, figure 2 et on le transporte sur la figure 3, entre les deux ordonnées en question.

On procède de la même façon pour le segment compris entre les ordonnées 0,70 et 0,65 et ainsi, de proche en proche, jusqu'au segment compris entre :

$$r_* = 0,55 \quad \text{et} \quad r_* = R_{*lim} = 0,525$$

Ce dernier segment est quasi parallèle à l'horizontale-asympote. On lit :

$$t_{lim} = 20 \text{ jours environ}$$

La figure 3 contient aussi le calcul graphique basé sur l'hypothèse d'une conduite pleine de glace

à l'instant initial. Procédant comme expliqué ci-dessus, on trouve :

$$t_{lim} = 10 \text{ jours environ}$$

soit la moitié environ du résultat relatif à l'hypothèse non pas de fusion, mais de formation de glace.

4. Essais « in situ »

4.1. Essais in situ.

De nombreux essais ont été effectués en U.R.S.S., et particulièrement en Sibérie. Nous en rapportons deux cas fort typiques.

Cas A [2] :

Conduite forcée $\varnothing 1,82$ m, longue de 577 m. Débit $Q = 2,5$ m³/s, soit vitesse moyenne $V = 0,96$ m/s.

De fin novembre 1961 à janvier 1962, les températures de l'air étaient très basses, atteignant un minimum de -55°C .

La température de l'eau a été : dans la chambre d'eau, de $0,01^\circ\text{C}$; à proximité des turbines, de $0,02^\circ\text{C}$.

Fin décembre 1961, la glace a atteint une épaisseur de 0,70 m environ : la section vive s'est trouvée considérablement réduite et la vitesse moyenne s'est élevée jusqu'à 13 m/s.

Cette situation est très dangereuse du fait de l'accroissement considérable du risque d'un coup de bélier. Les reniflards ont été, d'autre part, bouchés par la glace et des dépressions très élevées étaient à craindre.

Le calcul effectué suivant la méthode de Bogoslovski a bien reproduit la réalité.

Un chauffage de l'eau à la vapeur, consommant une puissance de 523 kW a permis d'élever la température de l'eau de $0,06^\circ\text{C}$ et de faire fondre une grande partie de la glace. Le calcul a encore été conforme à la réalité.

La soustraction de la conduite forcée à l'effet du vent, grâce à une couche de neige (moyen très précaire, peu sûr du fait des possibilités de soufflage par le vent) ou mieux d'un tunnel en planches est très efficace.

Cas B [3] :

Un canal d'aménée à ciel ouvert, de forme assimilable à un rectangle de dimensions $3,3 \times 3,0$ m environ, a fonctionné dans des conditions de froid intense : en décembre et janvier, la température oscillait autour de -25 °C, la température minimale ayant atteint -63 °C.

La température moyenne annuelle a été de $-4,9$ °C, le nombre des jours à température négative s'élevant à 214.

Fin décembre, la glace a rempli la majeure partie de la surface droite du canal, laissant à l'eau une section circulaire $\varnothing 1,80$ m environ. Le résultat du calcul a été conforme à la réalité.

Un excellent remède contre le glaçage constitue l'isolation thermique du plafond du canal. Une assise de madriers couverte de 0,50 m de terre garantit totalement l'installation. La température de l'eau a monté de 0,05 à 0,2 °C. Le calcul est encore ici conforme à la réalité.

4.2. Instrument de mesure de l'épaisseur de la glace.

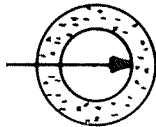
Autrefois on se servait d'une tige traversant une des parois, une épaisseur de glace et butant contre la glace de la paroi opposée (voir croquis ci-contre). Ce moyen rudimentaire est compliqué, cher et peu précis.

Le thermomètre ne peut être d'aucun secours, car la température de l'eau est indépendante de l'épaisseur de la glace, une fois celle-ci ayant commencé à se former.

La mesure de la pression, fonction de l'épaisseur de glace pour un débit donné, est très chère du fait de l'impossibilité pratique de maintenir le dispositif en service pour cause de froid.

L'ultrason est cher et peu précis du fait des bulles d'air emprisonnées dans la glace.

Souslov [4] a proposé et réalisé un appareil basé sur la mesure de la capacité électrique de l'ensemble eau + glace. En effet, la conductibilité électrique de l'eau (80 pour 20 °C) est 10 fois environ supérieure à celle de la glace qui n'est que 8. La variation relative de l'épaisseur de glace se traduit donc par une variation très nette de la conductibilité électrique, facile à enregistrer.



5. Règles pratiques

5.1. Isolation thermique.

Nous avons déjà parlé au chapitre 4 de cet excellent moyen, sinon le meilleur pour éviter le glaçage de la conduite forcée. Les anciennes règles françaises ([5] par exemple) connaissaient déjà ce remède, mais faute de théorie valable, ne pouvaient préciser l'épaisseur de la couche de terre suffisante. D'une façon générale, comme cela arrive dans tous les problèmes où la théorie est mal connue, on

s'expose à des réserves de sécurité excessives. 1 m de terre est certainement trop, l'expérience russe ayant prouvé que 0,50 m suffit amplement, même en Sibérie.

Un habillement de planches peut souvent suffire. S'il est chemisé de polychlorure de vinyle, moyen peu onéreux, le résultat désiré peut souvent être atteint.

Le chargement de neige n'est pas recommandé par les Russes.

5.2. Chauffage de l'eau.

Le chauffage de l'eau doit être considéré, à l'heure actuelle, comme peu économique. Il pourrait dans l'avenir, si le prix du kWh baisse, devenir compétitif par rapport à l'isolation thermique.

5.3. Température de l'eau.

La température de l'eau est un facteur de tout premier ordre. Si elle est très proche de zéro, il sera impossible d'éviter un glaçage important de la conduite, même pour des vitesses de l'eau atteignant et dépassant 10 m/s.

Ce point montre combien les formules anciennes, dont la vitesse constituait le critère de sécurité, étaient mal fondées ([6] par exemple).

Des secteurs de torrent de haute montagne, avec brassage intensif des eaux à l'amont immédiat de la prise d'eau (condition suffisante pour la formation du sorbet « nageant entre deux eaux »), constituent des foyers de refroidissement intense des eaux générateur d'un glaçage dangereux à l'intérieur de la conduite. Une isolation thermique s'avère alors pratiquement indispensable.

5.4. Rôle de la pression.

La nécessité d'isolation diminue avec l'augmentation de la pression (suite au dégagement de chaleur dû à la compressibilité de l'eau). Stegantsev pense [2] qu'aucune mesure d'isolation n'est nécessaire, même en Sibérie, à partir de $p = 6$ kg/cm².

Il faut cependant noter que cet avis n'est pas en accord avec la théorie de [1].

5.5. Température de l'air.

Dans le calcul, il est nécessaire d'introduire la température de l'air θ_{ext} ; or cette température varie au cours des heures, des jours, des semaines, et même des mois de la période froide. Stegantsev [2 et 3] propose, sur la base de sa grande pratique sibérienne, d'adopter pour θ_{ext} la température moyenne du mois le plus froid.

5.6. Adoption d'un glaçage modéré.

La pratique russe montre qu'il n'est point utile de tendre vers une conduite complètement démunie de glace. La fixation de l'épaisseur de la glace tolérée est basée, comme tout problème technique, sur des considérations économiques et résulte d'un compromis entre les influences des principaux facteurs.

En effet, la garantie contre l'apparition de toute glace peut conduire à des dépenses très élevées

d'isolation thermique, mais même en présence de frais modérés, faut-il interdire à la glace d'apparaître sous une faible épaisseur? Nullement, car l'expérience montre qu'avec l'apparition d'une faible épaisseur de glace, la perte de charge, loin de croître, décroît au contraire tellement que même les conséquences de la diminution de section sont largement compensées. En effet, le coefficient de rugosité de la glace est très inférieur à celui relatif à la paroi intérieure des conduites.

On voit par conséquent, qu'il y a matière à un calcul économique, destiné à fixer l'épaisseur optimale de la glace.

Il faut cependant ajouter que pour les revêtements modernes (vinyle, araldite, polyuréthane), le gain en chute peut ne pas se produire dans la même mesure que pour les revêtements bitumineux, car le coefficient de rugosité des premières s'approche de celui de la glace.

Bibliographie

- [1] BOGOSLOVSKI (P.). — La glace dans les conduites forcées de centrales hydroélectriques. *Ed. Gosenergoizdat*, Moscou (1950).
- [2] STEGANTSEV (V.). — Exploitation d'une conduite forcée dans des conditions de froid intense. *Construction Hydrotechnique* (russe), n° 1 (1966).
- [3] STEGANTSEV (V.). — Exploitation d'une dérivation durant un hiver très froid. *Construction Hydrotechnique*, n° 9 (1965).
- [4] SOUSLOV (M.). — Mesure de l'épaisseur de glace à l'intérieur d'une conduite forcée. Recueil d'articles de l'Académie des Sciences de l'U.R.S.S., section sibérienne « Méthodes de lutte contre les conséquences du froid sur les centrales de Sibérie ». Novossibirsk (1965).
- [5] E.B.V. — Prescription et recommandations pour l'essai et l'exploitation de conduites forcées. N.T.G., n° 1229 (1950).
- [6] BOUVER (Ch.). — Le gel dans les conduites forcées. *La Houille Blanche*, mai-juin 1949.

Abstract

The calculation of ice formation in penstocks

by L. Levin *

A close penstock heat balance analysis allowing for the main heat energy elements makes a clean sweep of the old empirical formulae involving the non-freezing of a penstock. The true picture is very much more complicated. According to [1] the basic heat energy elements are expressed by formulae (1) to (10).

The heat balances of the moving water and the ice-coated walls are given by formulae (11) and (12) respectively, with the five following independent variables:

$$r_s, O_e, H, x, t$$

Differentiating O_e from (12) with respect to x yields formula (13), and after replacing the physical constants by their values in the calorie-metre-degree Centigrade-metric ton-hour system, the final formula, (14), is obtained, which unfortunately cannot be integrated. Bogoslovsky [1] gives a sufficiently accurate graphical solution for industrial requirements, which has been confirmed experimentally *in situ* on several occasions ([2] and [3]).

Table 1 enables this graphical solution to be applied very quickly. Figures 1 to 3 show a practical application of the method to a numerical example taken from industrial practice.

Practical rules derived from long experience are given in condensed form in chapter V.

* Chargé de cours à l'École Nationale Supérieure des Mines de Saint-Etienne; Chef du Département Recherches de la Société B.V.S.