A propos de gel de conduites forcées

The problem of freezing in penstocks

PAR G. FERRAND

PRÉSIDENT-DIRECTEUR GÉNÉRAL DE LA SOCIÉTÉ DAUPHINOISE D'ÉTUDES ET DE MONTAGES

Caractère « impensable » du gel d'une conduite forcée. — Sévérité des consignes de sécurité dans ce domaine. — Etude du phénomène dans deux hypothèses différentes : glaciation en bloc sur une certaine longueur; glaciation progressive sans accroissement de volume, l'eau en excès étant chassée vers l'aval. — Calcul des tensions résultantes qui, dans les deux cas, révèlent l'impossibilité industrielle d'éviter le dépassement de la limite élastique de la paroi de la conduite. — Intérêt des tuyaux surpressés, seuls à même de supporter sans rupture de telles déformations.

The impossibility of a penstock freezing. The strict nature of safety precautions to be observed in this field. The phenomenon studied making two different assumptions: solid freezing over a certain length, progressive freezing without an increase in volume, excess water being expelled downstream. The resultant forces calculated demonstrating that it is industrially impossible to avoid exceeding the elastic limit of the penstock walls. The importance of using prestressed pipes which are capable of withstanding such deformation without fracturing.

Une conduite forcée peut-elle geler? Si la chose s'est déjà produite, très rarement il est vrai, et sur d'anciennes conduites de petits diamètres en des circonstances tout à fait exceptionnelles, il est impossible de penser que cela puisse se produire maintenant, surtout lorsqu'il s'agit de conduites forcées modernes de grande puissance.

Non seulement une conduite forcée ne doit pas geler, mais toute formation d'un simple anneau de glace est interdite. Le gel complet d'un tuyau amène inévitablement sa rupture et la formation d'un anneau de glace constitue un grave danger pour les turbines lorsque, au dégel, des fragments de glace se détachent de la paroi de la conduite pour pénétrer dans les turbines.

Des dispositions sont donc prises pour éviter toute formation de glace à l'intérieur des conduites forcées. Des consignes d'exploitation basées sur les études faites par M. MASSÉ sur les conduites forcées du lac d'Oo, en 1938-39, sont partout en vigueur dans ce but. Nous les reproduisons ci-dessous :

DISPOSITIONS ET PROTECTION CONTRE LE GEL

« Dans les conduites, l'eau peut geler, si la vitesse admise est insuffisante. La vitesse minimum à admettre doit être déterminée par l'exploitant, compte tenu de la température minimum, de la situation de la conduite et des dispositions d'ensemble de l'aménagement hydraulique.

« Pour déterminer le débit minimum à conserver pendant les périodes de grands froids, on divise la conduite en tronçons tels que, pour chacun, on puisse considérer comme constant le débit Q , la température ambiante T , la section S , le coefficient de transmission K entre paroi et air ambiant.

« Appelons pour chaque tronçon :

θ_H la température de l'eau au départ du tronçon,

θ_R la température de l'eau au terminus du tronçon;

posons :

$$\theta_0 = \theta_H - T \qquad \theta = \theta_R - T$$

on obtient :

$$\frac{\theta_0}{\theta} = e^{SK/CQ}$$

dans laquelle :

e la base des logarithmes népériens
 $\log_e = 0,434$,

S la surface totale de paroi du tronçon
 exposé à l'air,

C le coefficient calorifique de l'eau
 $= \sim 1.000$ calories par m^3 .

« Le volume du débit correspondant à θ
 est donné par la formule suivante :

$$Q = \frac{SK}{C} \log e \frac{1}{\log \theta_0 - \log \theta}$$

K est à déduire d'essais à faire pour cha-
 que cas particulier.

« On peut admettre pour K maximum :

$$\frac{35}{3\,600}$$

$$\text{et pour } K \text{ minimum : } \frac{10}{3\,600}$$

« A la mise en marche de l'exploitation,
 et avant que l'exploitant ait pu déterminer
 la valeur réelle de K , il est recommandé de
 maintenir dans les conduites, pour mettre
 celles-ci à l'abri du gel, les vitesses sui-
 vantes :

Vitesse minimum

Jusqu'à 0,800 m de diamètre...	0,50 m/s
de 0,800 m à 1,000 m...	0,45 m/s
1,000 m à 1,500 m...	0,35 m/s
1,500 m à 2,000 m...	0,25 m/s
2,000 m et au-dessus...	0,15 m/s

« En cas d'impossibilité de maintenir le
 débit nécessaire, soit par les turbines, soit
 par les robinets de vidange, les conduites
 seront complètement vidangées et l'exploita-
 tion arrêtée.

« Le gel n'est pas à craindre dans les
 conduites en puits ou en galeries fermées
 ou enterrées et recouvertes sur un mètre
 d'épaisseur au-dessus de la génératrice
 supérieure.

« Les parties de conduites et accessoires
 où normalement l'eau est immobile et qui
 ne sont pas suffisamment abritées seront
 calorifugées.

« Les parties enrobées d'une épaisseur
 de un mètre de maçonnerie sont à l'abri
 du gel.

« En ce qui concerne les collecteurs, des
 dispositions spéciales seront prises dans les
 périodes de grands froids, lorsque le débit
 est insuffisant pour alimenter toutes les
 turbines, et que, dans certaines parties,
 l'eau est immobile ou en mouvement ralenti.
 Par exemple, on procéderait aux calorifu-
 geages nécessaires et on ferait fonctionner
 les turbines le plus à l'aval, à l'exclusion
 des autres.

« Lorsque certaines parties des conduites
 et accessoires sont situées à l'intérieur de
 chambres de manœuvres, il est recom-
 mandé de chauffer celles-ci lors des périodes
 de grands froids, non seulement pour évi-
 ter le gel de l'eau, mais aussi pour assurer,
 le cas échéant, un fonctionnement normal
 des appareils de manœuvre et de sécu-
 rité. »

Mais si le gel d'une conduite est impensable,
 il ne nous a pas paru inutile d'examiner ce qui
 pourrait se passer si l'eau d'une conduite forcée
 se gelait complètement.

**

On peut faire deux hypothèses très différentes
 sur le processus de glaciation totale d'une partie
 de la conduite.

I. — Sur une certaine longueur L , le poids
 total de la glace est le poids de l'eau corres-
 pondant au volume total de cette longueur.

II. — Avant que la prise soit complète, les
 aiguilles de glace ont laissé s'écouler, vers l'ex-
 trémité aval, une partie de l'eau non encore
 gelée.

L'hypothèse I correspond au cas d'un résér-
 voir cylindrique, fermé aux extrémités, indéfor-
 mable en longueur.

L'hypothèse II peut se traduire ainsi : pendant
 toute la durée de glaciation à 0° , l'accroissement
 de volume a été nul, la glace chassant l'eau en
 excès, de sorte que la pression est restée égale
 à la pression atmosphérique.

M. et Mme CHENAIS ont donné dans leur livre,
Constantes physiques de l'eau, un diagramme
 représentant la diminution de volume, par fu-
 sion de la glace, à des températures comprises
 entre 0° et -20° ; chacune de ces fusions étant
 obtenue par compression uniforme sous une
 pression qui est celle résultant de la formule de
 Clapeyron. Nous reviendrons plus loin sur
 celle-ci.

Chacune de ces transformations, effectuée
 ainsi, étant réversible, nous pouvons considérer
 ce diagramme comme représentant tout aussi
 bien l'augmentation de volume d'un poids d'eau
 unité devenue glace et refroidie à -0° , à la
 pression atmosphérique. Toutefois, en raisonnant
 ainsi, nous négligeons la variation de volume

résultant, pour l'eau, de l'abaissement de température $- \theta$ combiné à un accroissement de pression telle que l'état liquide soit maintenu jusqu'à $- \theta$. La quantité ainsi négligée est infime en regard du changement de volume de la transformation eau-glace.

Nommons :

V_0 le volume initial à 0° d'un poids π d'eau à la pression atmosphérique,

ΔV_0 l'augmentation de volume de cette eau

transformée en glace, refroidie à $- \theta$ sans changement de pression.

Le diagramme ci-dessus se traduit ainsi :

$$\frac{\Delta V_0}{\pi} = 0,09 + 0,0021 \theta \quad (1)$$

Le premier terme 0,09 provient de ce que à 0° , l'augmentation par glaciation est de 90 cm^3 par kg d'eau.

Hypothèse I

Le poids total est resté constant de 0° à $- \theta$; mais l'augmentation de volume a été freinée par la paroi de la conduite. La pression, nulle lorsque l'eau était à 0° , est devenue p à $- \theta$.

Nommons k le coefficient de compressibilité de la glace.

Sous l'effet d'une pression uniforme p dans toute la masse, le volume n'a pu augmenter de ΔV_0 , comme formule (1); il est devenu :

$$V_\theta + \Delta V_0 - kp (V_0 + \Delta V_0). \quad (2)$$

Nommons le $V(\theta)$.

La propagation uniforme de la pression p à la paroi ne pourrait pas être admise si la glace était un solide parfaitement élastique.

L'ouvrage précité montre que sa limite élastique est très faible ($\sim 0,3 \text{ kg cm}^2$) et que sa plasticité la rend coulante sous la pression. On peut donc admettre qu'après un certain temps θ et p sont uniformes dans toute la masse.

On a finalement, au moyen de (1) et (2) :

$$V_\theta = V_0 - kp V_0 + \frac{\pi}{1\,000} (90 + 2,1 \theta) (1 - kp)$$

d'où :

$$\frac{V_\theta - V_0}{V_0} = \frac{\pi}{1\,000 V_0} (90 + 2,1 \theta) (1 - kp) - kp$$

En négligeant la petite différence de volume spécifique de l'eau entre 4° et 0° , on aura pour $L = 1 \text{ cm}$, en nommant r le rayon intérieur de la conduite et δr l'augmentation de longueur du rayon correspondant à $(V_\theta - V_0)$:

$$V_0 = \pi r^2 \times (1 \text{ cm})$$

$$V_\theta - V_0 = 2\pi r \delta r \times (1 \text{ cm})$$

d'où :

$$\frac{2 \delta r}{r} = \frac{V_\theta - V_0}{V_0} = \frac{\pi}{1\,000 V_0} (90 + 2,1 \theta) (1 - kp) - kp \quad (3)$$

D'autre part, si la paroi s'était contractée librement du fait de l'abaissement de température de 0° à $- \theta$, son rayon serait devenu :

$$r_1 = r (1 - \alpha \theta), \alpha \text{ coefficient de dilatation de l'acier} \quad (4)$$

La tension t , provenant de p , augmentera r_1 d'une quantité dr_1 , telle que :

$$\frac{dr_1}{r_1} = \frac{t}{E} \quad (5)$$

E module d'élasticité de l'acier.

r_1 est donc devenu, vu (4) et (5) :

$$r_1 \left(1 + \frac{dr}{r_1} \right) = r (1 - \alpha \theta) \left(1 + \frac{t}{E} \right)$$

L'augmentation relative du rayon r est :

$$\frac{r (1 - \alpha \theta) \left[1 + \frac{(t/E)}{r} \right] - r}{r} = \frac{t}{E} - \alpha \theta \left(1 + \frac{t}{E} \right)$$

Mais elle est aussi $\partial r/r$ résultant de (3).

En égalant ces deux expressions de $\partial r/r$, il vient :

$$\frac{\pi}{1\,000\,V_0} (90 + 2,1 \theta) (1 - kp) - kp = 2 \left[-\alpha \theta \left(1 + \frac{t}{E} \right) + \frac{t}{E} \right]$$

Cette formule s'écrit :

$$\left[1 + \frac{\pi}{1\,000\,V_0} (90 + 2,1 \theta) \right] kp + 2 \frac{t}{E} (1 - \alpha \theta) = \frac{\pi}{1\,000\,V_0} (90 + 2,1 \theta) + 2 \alpha \theta \quad (6)$$

La formule d'équilibre de la paroi donne :

$$t = \frac{r}{e} p \quad (7)$$

Portant dans la formule précédente, on aura :

$$\left[\left(1 + \frac{(90 + 2,1 \theta) \pi}{1\,000\,V_0} \right) k + 2 \frac{r}{e} (1 - \alpha \theta) \frac{1}{E} \right] p = \frac{\pi}{1\,000\,V_0} (90 + 2,1 \theta) + 2 \alpha \theta$$

Dans ces formules :

$$\begin{cases} \alpha = 0,125 \cdot 10^{-4} & k = 12 \cdot 10^{-7} \text{ cm}^2/\text{kg} \\ E = 2\,000\,000 \text{ kg/cm}^2 \end{cases} \quad (8)$$

V_0 étant le volume d'une longueur de conduite de 1 cm. Pour l'eau limpide, on a approximativement :

$$\frac{\pi}{V_0} = 1 \quad (8')$$

La formule précédente devient, en remplaçant α , k , E , π/V_0 par ces valeurs :

$$\begin{aligned} \left[(1090 + 2,1 \theta) 12 \cdot 10^{-7} + 10^{-3} \frac{r}{e} (1 - 0,125 \cdot 10^{-4} \theta) \right] p &= 90 + 2,125 \theta \\ p &= \frac{90 + 2,125 \theta}{12 \cdot 10^{-7} (1090 + 2,1 \theta) + 10^{-3} (r/e) (1 - 0,125 \cdot 10^{-4} \theta)} \end{aligned} \quad (9')$$

En laissant « t » en évidence dans (6), on aurait obtenu, pour p , la formule :

$$p = \frac{90 - 2\,000 (t/E) + [2,1 + 2\,000 \alpha [1 + (t/E)]] \theta}{(1090 + 2,1) k} \quad (10')$$

Voyons quelle valeur de p donnent ces formules pour le moment où, à 0° , la prise en glace est achevée, c'est-à-dire en y faisant, $\theta = 0$. Il vient :

$$p = \frac{90}{12 \cdot 10^{-7} 1090 + 10^{-3} (r/e)} \quad (9'')$$

$$p = \frac{90 - 2\,000 (t/E)}{(1090 + 2,1) 12 \cdot 10^{-7}} \quad (10'')$$

Prenons pour t le maximum qu'on puisse atteindre sans déformation permanente avec un tuyau surpressé : $t = 50 \text{ kg/mm}^2$, donc $5\,000 \text{ par cm}^2$.

La dernière (10') donne :

$$p = \frac{90 - 5\,000 \cdot 10^{-3}}{1\,092 \cdot 12 \cdot 10^{-7}} = \frac{85}{1,31 \cdot 10^{-3}} = 65\,000$$

Cette valeur de p , portée dans (7), donne :

$$t = \frac{r}{e} \times 650$$

D'où :

$$\frac{r}{e} = \frac{5\,000}{650} = 7,7$$

ce qui n'est pas industriel.

L'autre formule donne :

$$p = \frac{90 \cdot 10^3}{1,31 + (r/e)}$$

$$\text{pour } \frac{r}{e} = 100, \quad p = \frac{90 \cdot 10^3}{101,3} = \sim 900$$

Pour ce r/e (7) donne $t = 100\,900$. Donc incompatibilité.

CONCLUSIONS POUR L'HYPOTHÈSE I

On peut en conclure que, dans l'hypothèse I, le gel complet à 0° produit forcément des déformations permanentes (*). Ceci était d'ailleurs évident a priori. En effet, à 0° , l'ordre de grandeur des augmentations de volume du fait de la glaciation est 10 %, alors que le coefficient de compressibilité de la glace étant de l'ordre de 10^{-6} , une augmentation de pression de 100 kg par cm^2 diminue l'unité de volume de glace de 10^{-4} unités de volume seulement.

L'élasticité de la paroi est donc impuissante à empêcher le gonflement de glaciation à 0° .

Hypothèse II

Après glaciation à 0° , le poids π de glace contenu dans le volume V_0 de la conduite est inférieur de 90 % au poids d'eau initial, puisque, comme on l'a vu, 90 cm^3 d'eau par kg d'eau ont été chassés vers l'aval au cours de cette glaciation.

On a donc :

$$\pi = V_0 - 90 \frac{V_0}{1\,000} = V_0 (1 - 0,09) \quad (11)$$

D'autre part, le terme 0,09 de la formule (1) ayant disparu, celle-ci devient :

$$\frac{\Delta V_0}{\pi} = 0,0021 \theta \quad (12)$$

(2) étant uniquement la traduction, en lettres, de la définition de k , elle est la même ici.

En portant dans (2) l'expression (12) de ΔV_0 , il vient :

$$V \theta = V_0 - kp V_0 + (1 - kp) \pi \quad 0,0021 \theta$$

(*) Nous n'avons pas tenu compte, ici, que l'augmentation de la pression provenant de la ténacité de la paroi peut empêcher, en partie, la congélation; si les gouttes d'eau reparaissent, elles fuient sous la compression; on se trouve alors dans le cas de l'hypothèse II qui va être étudiée ci-après.

ou bien :

$$\frac{V\theta - V_0}{V_0} = \frac{\pi}{1\,000\,V_0} 2,1\,\theta (1 - kp) - kp$$

En tenant compte de (11) :

$$\frac{V\theta - V_0}{V_0} = \frac{1 - 0,09}{1\,000} 2,1\,\theta (1 - kp) - kp$$

(3) devient alors :

$$\frac{2\,\delta r}{r} = \frac{V\theta - V_0}{V_0} = \frac{1 - 0,09}{1\,000} 2,1\,\theta (1 - kp) - kp$$

L'expression de $\delta r/r$ provenant de t et de θ est, comme précédemment :

$$\frac{t}{E} - \alpha\,\theta \left(1 + \frac{t}{E} \right)$$

de sorte que :

$$\frac{1 - 0,09}{1\,000} 2,1\,\theta (1 - kp) - kp = 2 \left[\frac{t}{E} - \alpha\,\theta \left(1 + \frac{t}{E} \right) \right]$$

Cette relation s'écrit :

$$1,911\,\theta (1 - kp) - 1\,000\,kp = 2\,000 \left[(1 - \alpha\,\theta) \frac{t}{E} - \alpha\,\theta \right]$$

ou bien :

$$(1,911 + 2\,000\,\alpha)\,\theta = 2\,000\,\frac{t}{E} (1 - \alpha\,\theta) + (1\,000 + 1,911\,\theta)\,kp$$

En portant dans cette expression les valeurs numériques (8), on obtient :

$$1,936\,\theta = (1 - 0,125 \cdot 10^{-4}\,\theta) \frac{t}{1\,000} + 12 \cdot 10^{-7} (1\,000 + 1,911\,\theta)\,p \quad (13)$$

en utilisant (7), ceci devient :

$$1,936\,\theta = \left[(1 - 0,125 \cdot 10^{-4}\,\theta) \frac{1}{1\,000} \frac{r}{e} + 12 \cdot 10^{-7} (1\,000 + 1,911\,\theta) \right] p$$

(13) et (14) donnent comme expressions de p :

$$p = \frac{-(t/1\,000) + [1,936 + 0,125 \cdot 10^{-7}\,t]\,\theta}{12 \cdot 10^{-7} (1\,000 + 1,911\,\theta)} \quad (13')$$

$$p = \frac{1,936\,\theta}{12 \cdot 10^{-7} (1\,000 + 1,911\,\theta) + (1/1\,000)r/e (1 - 0,125 \cdot 10^{-4}\,\theta)} \quad (14')$$

ABAISSEMENT DE LA TEMPÉRATURE DE FUSION DU FAIT DE LA COMPRESSION

On connaît la formule de Clapeyron :

$$\lambda = T (v' - v) \frac{dp}{d\theta}$$

v volume spécifique de la glace (à t° sous une pression p),

T température absolue de fusion $= \theta + 273$.

où :

λ est la chaleur latente de fusion,

v' volume spécifique de l'eau,

Au voisinage de 0° , cette formule donne, si la pression est exprimée en atmosphères :

$$\frac{d\theta}{dp} = -0,0075$$

Comme $\theta = 0$, pour $p = 1$ atm., il en résulte :

$$p = 1 - \frac{0}{0,0075}$$

ou :

$$p = 1 - 133,40 \quad (15)$$

Cette formule donne la table suivante :

Température					
de fusion :	0°	1°	2° 5	5°	7° 5
Pression nécessaire :					
(en atmosphères)	1	133	333	666	1 000

Etant donné le degré d'approximation de tout ceci, nous remplacerons 1 atm. par 1 kg/cm².

EXEMPLES : Voyons si à -1° , la fusion de la glace pourra se produire avant que la tension de la paroi ait atteint la limite élastique.

Pour cela, faisons $\theta = 1$, $p = 133$ (voir 15'), dans la formule (13). On obtient :

$$(1 - 0,125 \cdot 10^{-4}) t = 1\,000 (1,936 - 12 \cdot 10^{-7} \cdot 1\,001,911) \cdot 133$$

d'où :

$$t = 1\,776 \text{ kg/cm}^2$$

(7) donne :

$$\frac{r}{e} = \frac{1\,776}{133} = 13,35$$

Pour -2° , d'où $p = 266$, on trouve :

$$t = 3\,553, \text{ d'où } (r/e) = 13,36$$

Pour -5° , d'où $p = 666$, on trouve :

$$t = 8\,870, \text{ d'où } (r/e) = 13,3$$

Essayons $(r/e) = 100$ et voyons s'il peut y avoir fusion de la glace par compression venant de la paroi.

Utilisons la formule (14'); voyons ce qu'elle donne, pour $(r/e) = 100$ aux diverses températures. On obtient :

Pour $\theta = 1$ $p = 19,36$, (7) donne alors $t = 1\,936$.

Pour $\theta = 2$ $p = 38,72$, (7) donne alors $t = 3\,872$.

A plus basse température on dépasserait la limite élastique pour t .

Dans les deux cas nous voyons que la limite élastique est atteinte bien avant que la fusion se produise (tableau 15').

Pour $(r/e) > 100$, la même formule montre que la limite élastique est atteinte pour des températures comprises entre 0 et -2° .

Cherchons maintenant, au moyen de la formule (13'), à quelle température sera atteinte une tension maximum de 35 kg/mm², elle montre qu'il faut descendre plus bas que -2° :

$$\text{à } -2^\circ, \text{ on aura } p = 230$$

$$\text{à } -3^\circ, \text{ on aura } p = 1\,920$$

Au-delà de -2° , on dépasse donc la pression résultant de la formule (15) et du tableau (15').

Mais la formule (7) montre que, au-delà de -2° , les (r/e) correspondant aux « p » de (15') sont voisins de 13,3. On retombe sur le cas du premier exemple de ce paragraphe.

CONCLUSIONS POUR L'HYPOTHÈSE II

La surfusion par compression ne peut se produire dans les conduites forcées.

La limite élastique de la paroi est atteinte pour des températures voisines de -2° quand r/e est voisin de 100.

Pour des parois de plus faible épaisseur, elle est atteinte pour des températures se rapprochant de plus en plus de 0° .

Ainsi donc le gel d'une conduite amènerait inévitablement la déformation plastique des tuyaux avec risque de rupture pour ceux dont l'épreuve hydraulique n'aurait pas été poussée jusqu'à obtenir et dépasser la limite élastique apparente de l'acier les constituant. Par contre, les tuyaux surpressés qui, par définition, subissent au cours de leur fabrication une déformation plastique importante, subiraient sans risque de rupture une déformation supplémentaire, car les possibilités de déformations restantes des tuyaux surpressés avant rupture sont encore supérieures à celles que pourrait amener le gel.