Régime variable dans un canal d'amenée associé à une galerie en charge

Unsteady flow in a head race canal leading
to a pressure tunnel

PAR

L. ESCANDE

ET

J. NOUGARO

MEMBRE DE L'INSTITUT,
INGÉNIEUR I.E.T.,

DIRECTEUR DE L'ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE
D'ÉLECTROTECHNIQUE ET D'HYDRAULIQUE DE TOULOUSE

LAURÉAT DE L'INSTITUT
INGÉNIEUR I.E.T.,

PROFESSEUR A L'ÉCOLE NATIONALE SUPÉRIEURE
D'ÉLECTROTECHNIQUE ET D'HYDRAULIQUE DE TOULOUSE

Etude de deux problèmes associant les intumescences produites dans un canal d'amenée et les oscillations en masse engendrées dans une galerie en charge. — Le premier problème concerne un système galerie-cheminée d'équilibre faisant suite à un canal à écoulement libre; le second problème concerne un siphon intercalé dans un canal d'amenée. — Présentation des méthodes d'études théoriques, analytiques ou graphiques utilisées; concordance satisfaisante de leurs résultats avec les résultats expérimentaux obtenus.

A study of two problems connecting waves in a head race canal with mass oscillations set up in a pressure tunnel.—The first problem deals with a tunnel-surge-tank system connected to an open canal. The second problem deals with a siphon set in a head race canal.—Theoretical, analytical and graphical methods used, are presented. Satisfactory agreement of results obtained in this way with experimental results.

INTRODUCTION

Dans le présent article, nous résumons les résultats que nous avons obtenus dans l'étude de deux problèmes associant les intumescences produites dans un canal d'amenée aux oscillations en masse engendrées dans une galerie en charge.

Le premier problème, exposé au chapitre I, concerne le fonctionnement d'une cheminée

d'équilibre, dont le tunnel fait suite à un canal à écoulement libre.

La seconde question (chapitres II et III) envisage le cas d'un siphon intercalé dans un canal d'amenée.

Comme on le verra, la méthode de calcul utilisée pour le premier problème peut être facilement adaptée à l'étude du second phénomène.

CHAPITRE I

OSCILLATIONS DANS UNE CHEMINÉE D'ÉQUILIBRE PLACÉE A L'AVAL D'UNE GALERIE EN CHARGE PRÉCÉDÉE ELLE-MÊME D'UN CANAL A ÉCOULEMENT LIBRE

1. — Méthode de calcul

Nous allons considérer une installation d'amenée d'eau comportant, disposés en série, de l'amont vers l'aval :

- Un canal d'amenée à écoulement libre;
- Une galerie en charge;
- Une cheminée d'équilibre.

Lors d'un arrêt du débit des turbines, il se produit des oscillations du plan d'eau dans la cheminée d'équilibre et des intumescences dans le canal d'amenée.

Nous avons pu résoudre le problème des interactions entre les deux ouvrages au moyen d'un calcul aux différences finies dont nous allons exposer le principe.

Si l'on applique au système constitué par le canal d'amenée, la conduite en charge et la cheminée d'équilibre, l'équation générale des forces vives, on aboutit à la relation suivante :

$$\frac{L}{gf} \frac{dq}{dt} + Z'_n - Z''_n + Kq^2 = 0$$

Les notations sont indiquées sur la figure 1.

FIG. 1

En passant des différentielles aux différences finies et en considérant un intervalle de temps Δt , on peut en déduire la variation de débit Δq produite dans la conduite en charge, durant cet intervalle.

$$|\Delta q| = \frac{gf}{L} \Delta t [Z'_n - Z''_n + Kq^2]$$

Cette équation permet le calcul de Δq , à partir des valeurs moyennes de Z'_n , Z''_n et q durant l'intervalle considéré : il suffit, en pratique, de

prendre pour celles-ci les valeurs obtenues à la fin de l'intervalle précédent.

On peut déduire, de cette variation de débit, la variation de hauteur d'eau dans la cheminée d'équilibre $\Delta Z'_1$.

Simultanément, cette diminution de débit dans la galerie en charge provoque une surélévation de niveau au débouché aval du canal d'amenée.

Soit Δq_1 la variation du débit pendant le premier intervalle de temps Δt et $\Delta Z'_1$ la variation de hauteur d'eau dans la cheminée d'équilibre, on a :

$$\Delta Z'_1 = \frac{Q_0 - (\Delta q_1/2)}{F} \cdot \Delta t$$

On en déduit la hauteur d'eau Z'_1 .

Durant le même intervalle de temps, le volume d'eau refoulé dans le canal d'amenée a pour valeur :

$$\Delta \Omega_1 = \Delta t \times \frac{\Delta q_1}{2}$$

La surélévation du niveau $\Delta Z''_1$ peut être calculée en écrivant que le volume d'eau qui passe dans l'intumescence élémentaire correspondante est égal au volume $\Delta \Omega_1$. On obtient ainsi :

$$\frac{1}{2} \Delta Z''_1 \cdot c_0 \cdot l_0 \cdot \Delta t = \Delta t \frac{\Delta q_1}{2}$$

$$\Delta Z''_1 = \frac{\Delta q_1}{c_0 l_0}$$

et donc Z''_1 ; c_0 est la célérité de l'intumescence ainsi formée dans le canal d'amenée et l_0 la largeur au miroir correspondante.

Durant le deuxième intervalle de temps Δt , en prenant les valeurs de Z'_1 et Z''_1 définies précédemment, on peut calculer Δq_2 et en déduire la variation de hauteur d'eau dans la cheminée d'équilibre :

$$\Delta Z'_2 = \frac{Q_0 - \Delta q_1 - (\Delta q_2/2)}{F} \cdot \Delta t$$

et, par suite, la hauteur d'eau Z'_2 .

A la fin de cet intervalle de temps, le volume d'eau refoulé dans le canal, depuis l'instant initial, a pour valeur :

$$\Delta \Omega_2 = \Delta t \left[\Delta q_1 + \frac{\Delta q_2}{2} \right]$$

Si $\Delta Z''_2$ est la surélévation correspondante, l'égalité des volumes permet d'écrire, comme précédemment :

$$c_1 \cdot \Delta t \cdot l_1 \cdot \Delta Z''_1 + c_1 \cdot \Delta t \cdot l_1 \cdot \Delta Z''_2 = \Delta t [\Delta q_1 + \Delta q_2/2]$$

soit :

$$\Delta Z''_2 = \frac{1}{c_1 l_1} \left(\Delta q_1 + \frac{\Delta q_2}{2} \right) - \Delta Z''_1$$

en appelant c_1 la célérité de l'intumescence ainsi formée dans le canal d'amenée et l_1 la largeur au miroir correspondante.

On aurait de même, durant le troisième intervalle de temps Δt , en utilisant les valeurs de Z'_2 et Z''_2 calculées précédemment :

$$|\Delta q_3| = \frac{gf}{L} \Delta t [Z'_2 - Z''_2 + Kq_2^2]$$

On connaît ainsi la variation de hauteur d'eau dans la cheminée d'équilibre :

$$\Delta Z'_3 = \frac{Q_0 - \Delta q_1 - \Delta q_2 - \Delta q_3/2}{F} \cdot \Delta t$$

Le volume d'eau refoulé simultanément dans le canal a pour valeur :

$$\Delta \Omega_3 = \Delta t [\Delta q_1 + \Delta q_2 + \Delta q_3/2]$$

L'égalité des volumes d'eau permet d'aboutir à la valeur :

$$\Delta Z''_3 = \frac{1}{c_2 l_2} (\Delta q_1 + \Delta q_2 + \Delta q_3/2) - (\Delta Z''_1 + \Delta Z''_2)$$

On opère ainsi pour les intervalles de temps successifs. En particulier, pendant le $n^{\text{ième}}$ intervalle Δt , on a :

$$|\Delta q_n| = \frac{gf}{L} \Delta t [Z'_{n-1} - Z''_{n-1} + Kq_{n-1}^2]$$

$$\Delta Z'_n = \frac{Q_0 - \Delta q_1 - \Delta q_2 - \dots - \Delta q_{n-1} - \Delta q_n/2}{F} \Delta t$$

$$\Delta Z''_n = \frac{1}{c_{n-1} l_{n-1}} \left(\Delta q_1 + \Delta q_2 + \dots + \frac{\Delta q_n}{2} \right) - (\Delta Z''_1 + \Delta Z''_2 + \dots + \Delta Z''_{n-1})$$

2. — Application à la cheminée d'équilibre de l'usine de Saint-Christaud

La méthode exposée précédemment a été appliquée à l'étude des ouvrages d'amenée de l'usine de Saint-Christaud, en projet sur la Garonne.

Les données numériques retenues pour le calcul sont les suivantes :

$$\begin{aligned} Q_0 &= 135 \text{ m}^3/\text{s} \\ F &= 154 \text{ m}^2 \\ L &= 500 \text{ m} \\ f &= 38,5 \text{ m}^2 \\ P_0 &= 0,61 \text{ m} \\ R_0 &= 9 \text{ m} \end{aligned}$$

Cote du plan d'eau à l'entrée de la galerie (bassin de mise en charge) en régime permanent : 257,00.

La méthode de calcul n'a été appliquée que pour la première oscillation du plan d'eau dans la cheminée d'équilibre.

Les comparaisons entre les résultats théoriques et des essais réalisés sur le modèle réduit de l'usine de Saint-Christaud ont porté, d'une part, sur la cheminée d'équilibre, d'autre part, sur le canal d'amenée.

La figure 2 reproduit la courbe d'oscillation déduite des calculs théoriques et la courbe d'oscillation enregistrée sur le modèle réduit, pour une fermeture du distributeur très brève (2 s en-

FIG. 2

viron), que nous assimilons, pour les calculs théoriques, à une manœuvre instantanée, eu égard à la valeur $T = 84$ s de la période du système galerie d'amenée-cheminée d'équilibre.

Les différences que l'on enregistre sont caractérisées par les valeurs suivantes :

- cote maximum théorique 266,
- cote maximum expérimentale 266,50,
- cote minimum théorique 253,50,
- cote minimum expérimentale 254,20.

FIG. 3

On note la bonne approximation fournie par la méthode théorique que nous venons d'exposer.

Le maximum théorique est atteint au bout de 22,5 s, alors que le maximum déduit de la courbe expérimentale est atteint au bout de 26 s. Le premier minimum théorique se situe à 68 s contre 74 s, déduit de la courbe expérimentale.

La figure 3 reproduit la première oscillation d'intumescence au débouché de la galerie en charge, dans le canal d'amenée. Les deux courbes se rapportent respectivement aux résultats de l'étude théorique et à un enregistrement de coupure du débit réalisé sur le modèle réduit.

L'examen comparatif des deux courbes permet de se rendre compte de la bonne approximation obtenue; le maximum théorique situe la crête de la première oscillation à la cote 258,71 contre 258,58 fournie par la mesure expérimentale.

On voit que les résultats obtenus par notre méthode de calcul aux différences finies sont en bonne concordance avec les valeurs expérimentales.

CHAPITRE II

GALERIE EN CHARGE SITUÉE ENTRE DEUX PARTIES D'UN CANAL D'AMENÉE A ÉCOULEMENT LIBRE

1. — Généralités sur la méthode de calcul

La méthode de calcul que nous avons exposée au chapitre précédent peut être étendue, moyennant quelques modifications, au cas d'une galerie en charge séparant deux parties d'un canal d'amenée à écoulement libre.

Si une intumescence prend naissance à la partie aval du canal d'amenée, elle se propage jusqu'au débouché du siphon. Le débit de celui-ci est alors progressivement réduit et une partie de l'onde incidente se transmet à la portion amont du canal d'amenée. L'équation d'oscillation en masse s'applique à l'ensemble constitué par les deux portions du canal d'amenée et le siphon. On peut donc établir une méthode de calcul comparable à celle que nous avons indiquée au chapitre précédent. Mais, cette méthode, purement analytique, ne permet de calculer les variations de plan d'eau que dans les sections des canaux d'amenée placées immédiatement à l'amont et à l'aval du siphon.

Toutefois, en combinant ce calcul aux différences finies avec une méthode graphique d'étude des intumescences, on peut résoudre entièrement le problème et déterminer les intumescences sur toute la longueur du canal d'amenée.

Nous allons exposer successivement les deux étapes du calcul.

2. — Calcul aux différences finies

En conservant les mêmes notations :

- q débit traversant le siphon,
- Q_0 débit maximum initial,
- Z'_n hauteur d'eau à l'aval du siphon, comptée à partir du niveau amont,
- Z''_n hauteur d'eau à l'amont, comptée à partir du niveau amont,
- L longueur du siphon,
- f section du siphon,

l'équation d'oscillation en masse s'écrit :

$$\frac{L}{gf} \frac{dq}{dt} + Z'_n - Z''_n + kq^2 = 0$$

Les conditions initiales correspondent à l'instant où l'onde partie de l'extrémité aval du canal d'amenée atteint le débouché du siphon. Il se produit, à cet instant, une surélévation instantanée du plan d'eau due à l'onde incidente :

$$\Delta Z'_0 = \frac{Q_0}{c'_0 l_0}$$

c'_0 étant la vitesse de propagation de l'intumescence, et

l_0 la largeur au miroir du canal.

Cette onde incidente se réfléchit en partie et donne lieu à une variation supplémentaire :

$$\Delta Z'_{01} = \frac{Q_0}{c'_{01} l_{01}}$$

c'_{01} et l_{01} étant les nouvelles valeurs de la vitesse de propagation et de la largeur au miroir.

Ces deux valeurs permettent ainsi de déterminer Z' à l'instant initial que l'on considère.

Le débit dans le siphon n'a subi aucune variation et, par suite, Z'' est encore nul.

On peut alors calculer, pendant un intervalle de temps Δt , la variation de débit Δq_1 qui se produit dans le siphon :

$$|\Delta q_1| = \frac{gf}{L} \Delta t [Z'_0 + kQ_0^2]$$

Le débit moyen $Q_0 - (\Delta q_1/2)$ sortant du siphon provoque une surélévation à l'aval :

$$\Delta Z'_1 = \frac{Q_0 - (\Delta q_1/2)}{c'_1 l'_1}$$

Simultanément, le débit moyen $\Delta q_1/2$, qui ne pénètre plus à l'amont du siphon, crée une variation de niveau, à l'amont de ce dernier :

$$\Delta Z''_1 = \frac{\Delta q_1/2}{c''_1 l''_1}$$

Connaissant ainsi à la fin du premier intervalle de temps les valeurs de q_1 , Z'_1 et Z''_1 , on peut calculer la nouvelle variation de débit Δq_2 durant le deuxième intervalle de temps Δt .

$$|\Delta q_2| = \frac{gf}{L} \Delta t [Z'_1 - Z''_1 + kq_1^2]$$

Un débit $Q_0 - \Delta q_1 - (\Delta q_2/2)$ continuant à sortir du débouché aval du siphon conduit à une nouvelle surélévation :

$$\Delta Z'_2 = \frac{Q_0 - \Delta q_1 - (\Delta q_2/2)}{c'_2 l'_2}$$

Simultanément, le débit qui ne pénètre plus à l'amont du siphon crée une variation de niveau durant cet intervalle :

$$\Delta Z''_2 = \frac{\Delta q_1 + \Delta q_2/2}{c''_2 l''_2} - \Delta Z''_1$$

On peut ainsi, pour tous les intervalles de temps successifs Δt , opérer pareillement et calculer à l'instant n :

$$|\Delta q_n| = \frac{gf}{L} \Delta t [Z'_{n-1} - Z''_{n-1} + kq_{n-1}^2]$$

$$\Delta Z'_n = \frac{Q_0 - \Delta q_1 - \Delta q_2 \dots - \Delta q_{n-1} - \Delta q_n/2}{c'_n l'_n}$$

$$\Delta Z''_n = \frac{\Delta q_1 + \Delta q_2 + \dots + \Delta q_{n-1} + \Delta q_n/2}{c''_n l''_n} - (\Delta Z''_1 + \dots + \Delta Z''_{n-1})$$

Ce calcul se poursuit jusqu'au moment où l'intumescence réfléchie à la chambre d'eau aval revient au siphon. Connaissant les éléments caractéristiques de cette onde, que l'on peut déterminer à partir des célérités et des largeurs du canal, il est possible de poursuivre le calcul selon la même méthode, en tenant compte des nouvelles conditions qui sont ainsi imposées.

3. — Combinaison des méthodes de calcul analytiques et graphiques

La méthode analytique exposée précédemment permet de relier les phénomènes de la partie aval du canal d'aménée à ceux de la partie amont. Cette méthode fournit ainsi des conditions aux limites se rapportant à l'aval et à l'amont du siphon.

On peut donc utiliser, pour les deux parties du canal d'aménée une des méthodes graphiques classiques permettant la détermination des surélévations engendrées par une intumescence.

Nous avons adopté la méthode simplifiée due à l'un de nous (1). Nous rappelons qu'elle repose sur la construction d'un diagramme en H.Q. utilisant des caractéristiques rectilignes de pente $(a \pm U)/gs$ pour les ondes suivant le courant ou remontant ce dernier; elle est déduite de la méthode de Bergeron, dont elle permet, moyennant une approximation justifiée par de nombreuses expériences, de lever l'une des hypothèses restrictives.

Après la première réflexion d'intumescence en provenance de la chambre d'eau aval, l'équation d'oscillation en masse permet le calcul, à chaque instant, de la variation de débit du siphon, comme nous l'avons exposé précédemment :

$$|\Delta q_n| = \frac{gf}{L} \Delta t [Z'_{n-1} - Z''_{n-1} + kq_{n-1}^2]$$

Le débit du siphon est, par suite :

$$Q_0 - \Delta q_1 - \Delta q_2 \dots - \frac{\Delta q_n}{2}$$

On a ainsi un lieu du point de fonctionnement, à l'instant considéré, sur le graphique.

(1) J. NOUGARO, Thèse de Doctorat, Faculté des Sciences, Toulouse, n° 457 : *Etude théorique et expérimentale de la propagation des intumescences dans les canaux découverts.*

CHAPITRE III

APPLICATION AU CAS D'UN SIPHON ÉTABLI SUR UN MODÈLE RÉDUIT DE CANAL D'AMENÉE

1. — Caractéristiques du système étudié

Pour vérifier la méthode précédente, nous avons intercalé un siphon, sur un modèle réduit, à l'échelle 3/100 du canal d'amenée de l'usine de Saint-Christaud, en couvrant, sur une certaine longueur, une partie du canal d'amenée par des dalles de béton.

FIG. 4

Le modèle comprend, en allant de l'amont vers l'aval, toutes les dimensions étant celles de l'ouvrage réel :

- Un bassin d'alimentation;
- La première partie du canal d'amenée (longueur 1 050 m);
- Le siphon en charge (longueur $L = 600$ m. Section $f = 47,7$ m²);
- La deuxième partie du canal d'amenée (longueur 1 360 m);
- La galerie en charge (longueur $L = 500$ m. Section $F = 38,5$ m²);
- La cheminée d'équilibre ($F = 154$ m²).

Les autres données résultant des conditions d'expérimentation et servant de base à l'étude théorique sont les suivantes :

- Débit initial $Q_0 = 135$ m³/s.
- Tirant d'eau au bassin de mise en charge 7,07 m
- Tirant d'eau à l'aval du siphon 6,98 m
- Tirant d'eau à l'amont du siphon .. 8,36 m
- Perte de charge dans le siphon $P'_0 = 1,38$ m

Différence de cote du plan d'eau entre l'aval du siphon et le bassin de mise en charge :

$$h = 0,182 \text{ m}$$

La figure 4 reproduit les dispositions principales de l'installation.

Les débits sont mesurés à l'aide d'un déversoir type de Bazin.

Les variations du plan d'eau sont enregistrées à l'aide d'un dispositif mis au point par le Laboratoire et essentiellement constitué par deux électrodes verticales plongeant dans l'eau (*).

Les variations du plan d'eau sont enregistrées aux points suivants :

- Bassin de mise en charge;
- Section de sortie du siphon;
- Section d'entrée du siphon.

Les expériences ont été effectuées en éliminant l'influence de la cheminée d'équilibre par coupure du débit à l'amont de celle-ci.

2. — Etude théorique de la propagation des intumescences

Nous considérons également, pour l'étude théorique, l'arrêt brusque total du débit $Q_0 = 135$ m³/s, effectué à l'amont de la chambre d'équilibre.

Nous avons effectué l'étude théorique en utilisant successivement deux constructions graphiques, correspondant à des hypothèses différentes.

La première qui est, à priori, la plus rigoureuse, tient compte des pertes de charge et de la pente du fond; elle est établie avec des caractéristiques rectilignes de pente $(a \pm U)/gS$, selon la méthode rappelée précédemment. L'épure con-

(*) J. LAGASSE et J. NOUGARO : Note aux Comptes rendus Académie des Sciences, t. 234, 1952.

bes correspondant aux points où les enregistrements ont été effectués. La figure 7 reproduit les courbes théoriques déduites de l'épure et du calcul aux différences finies dans le cas où l'on tient compte des pertes de charge et de la pente du fond d'une part, et dans le cas de l'épure simplifiée, d'autre part.

En dehors de toute comparaison avec l'expérience, le rapprochement des valeurs obtenues par les deux épures justifie l'approximation in-

trodueite par la construction graphique simplifiée : les différences de cote sont, au plus, égales à 0,10 m.

Or, les constructions graphiques, quelle que soit la méthode employée, ne peuvent faire apparaître les oscillations secondaires qui accompagnent la formation d'un front d'ondes et qui sont particulièrement importantes à la réflexion du siphon; on se rend compte de la très bonne approximation que l'on obtient par la méthode

FIG. 6

FIG. 7

FIG. 8

simplifiée, particulièrement intéressante par le gain notable de temps qu'elle apporte à la construction graphique.

Les constructions graphiques permettent également de déterminer la variation de débit dans le siphon, en fonction du temps. Les courbes données par la figure 8 reproduisent les variations obtenues au moyen des deux constructions

fournis par les deux constructions graphiques est très bonne.

3. — Vérification expérimentale

La différence entre les deux épures théoriques étant très faible, comme nous venons de le voir, nous ne retenons, pour la comparaison avec les résultats expérimentaux, que les valeurs théori-

FIG. 9

graphiques. Elles montrent que le débit diminue assez rapidement jusqu'à une valeur de l'ordre de $60 \text{ m}^3/\text{s}$; celle-ci se maintient constante jusqu'au moment où l'intumescence réfléchie au bassin de mise en charge atteint le siphon. Le débit, à partir de cet instant, diminue à nouveau très vite, s'annule, puis reprend une certaine valeur avec, par la suite, des oscillations dues au fait que l'écoulement s'effectue dans le sens amont aval ou en sens inverse.

Ici encore, la concordance entre les résultats

fournies par la méthode utilisant la première construction graphique.

Les courbes théoriques et expérimentales sont reproduites sur la figure 9.

Les valeurs théoriques sont toujours légèrement supérieures aux valeurs moyennes expérimentales : les écarts sont d'ailleurs très faibles et nettement inférieurs à l'amplitude des oscillations secondaires.

Les méthodes théoriques que nous avons indiquées fournissent une bonne approximation.