

STABILITÉ DES CHEMINÉES D'ÉQUILIBRE

RAPPEL TRÈS SOMMAIRE DES ÉLÉMENTS DE CE PROBLÈME

par Mlle CLÉMENT,
Licenciée ès Sciences

INTRODUCTION.

La bonne régularisation d'une installation hydroélectrique impose souvent la construction d'une cheminée d'équilibre. Celle-ci est essentiellement un régulateur de pression. Elle réduit considérablement, dans la galerie d'aménée, le coup de bélier d'onde produit par les manœuvres rapides du distributeur de la turbine. Ces manœuvres, commandées par un régulateur, doivent assurer à chaque instant l'égalité entre la puissance fournie par la turbine et la puissance demandée par le réseau. Toute perturbation sur le réseau oblige donc le régulateur à modifier rapidement le vannage de la turbine ; il se produit alors, d'une part, une série d'ondes qui vont s'évanouir dans la cheminée et, d'autre part, un phénomène d'oscillations en masse intéressant la quantité d'eau contenue dans la galerie d'aménée.

Ces deux phénomènes issus de la même cause ont cependant des périodes suffisamment différentes pour qu'on puisse les analyser séparément. Seul le problème d'oscillations en masse retiendra d'ailleurs notre attention dans cet article. Il se concrétise ici par un mouvement pendulaire modifiant à chaque instant le niveau dans la cheminée et obligeant le régulateur à un réglage continu. Un système de vibrations entretenues peut donc prendre naissance et se traduire par des oscillations dans la cheminée.

Le fonctionnement normal des groupes nécessite un amortissement rapide de ces oscillations et dans le cas où une amplitude résiduelle existe, sa valeur ne doit pas dépasser une quantité imposée par l'exploitation de la centrale.

L'étude du comportement du système cheminée-régulateur devant de telles oscillations en masse constitue le problème de la stabilité des cheminées que nous allons rappeler.

ASPECT PHYSIQUE DU PROBLÈME DE LA STABILITÉ

Pour plus de clarté, considérons la représentation schématique de l'installation suivante (cf. figure) comprenant : un réservoir amont, une galerie (de longueur L , de section f), une cheminée d'équilibre (de section F), une conduite forcée et une turbine.

Appelons Z la différence des niveaux de l'eau dans la cheminée, par rapport au niveau statique, Q le débit absorbé par la turbine, W et V les vitesses de l'eau dans la galerie et dans la cheminée.

Nous admettons, constant, en première approximation, le rendement η de la turbine pendant les perturbations envisagées.

Examinons l'action du régulateur sur les oscillations dans la cheminée. Pour cela, supposons une variation de la puissance demandée par le réseau (pour fixer les idées prenons le cas d'une diminution de puissance). Le régulateur ferme rapidement le vannage de la turbine, diminuant ainsi le débit Q , afin d'ajuster la puissance fournie à la nouvelle puissance demandée. Au cours de cette manœuvre du vannage, le niveau dans la cheminée monte, ce fait oblige le régulateur à amplifier son réglage initial dans le sens de la fermeture, accentuant ainsi la variation

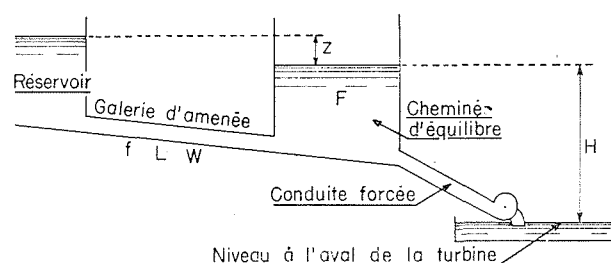


Fig. 1

primitive de niveau ; nous voyons alors s'amorcer un cycle de pompage.

Si la diminution de débit s'était produite sur une installation sans perte de charge, le régulateur ne fonctionnant pas, nous aurions enregistré dans la cheminée des oscillations entretenues. L'action du régulateur a été d'amplifier ces oscillations, les pertes de charge jouant au contraire le rôle de frein.

Il y a lieu de noter que dans cette description sommaire du phénomène, les qualités du régulateur et de la turbine n'ont pas été prises en considération ; l'influence du rendement de la turbine, le statisme du régulateur doivent être envisagés lorsque l'on veut étudier le phénomène dans le détail.

SOLUTION ANALYTIQUE DU PROBLEME

Les équations qui traduisent le phénomène sont au nombre de 3 :

1") équation dynamique de l'eau dans la galerie :

$$\frac{L}{g} \frac{dW}{dt} + Z + C W^n = 0$$

2") équation de continuité

$$f \cdot W = F V + Q \text{ avec } V = \frac{dZ}{dt}$$

3") équation traduisant l'action du régulateur qui est de maintenir constante la puissance du groupe :

$$N = Cte$$

$P_w = C W^n$ représente la loi des pertes de charge admise.

L'étude de la stabilité de ce système d'équations conduit à une condition suffisante pour que les oscillations du système ne soient pas amplifiées.

La précision de cette condition est évidemment fonction de l'exactitude des hypothèses admises dans l'établissement de l'équation (3). Dans un cas simple, THOMAS a déterminé la section minimum que doit avoir une cheminée stable :

$$F > \frac{W^2}{2g} \frac{L}{H} \frac{f}{P_w}$$

Plus tard, JOHNSON, tenant compte dans l'équation (3) de la variation de chute du rendement de la turbine, du statisme du régulateur,

du $\frac{V^2}{2g}$ au droit de la cheminée, a donné une nouvelle condition de stabilité beaucoup plus

proche de la réalité que la précédente.

Toutefois, pour établir ces relations, la cheminée a été supposée de section constante et les pertes de charge ont été prises sous la forme quadratique. Au cours du calcul, les équations ont été linéarisées, c'est-à-dire en termes physiques, seules de petites oscillations ont été envisagées.

Dans de telles conditions, on ne peut obtenir qu'un ordre de grandeur de la section minimum admissible et ceci dans une cheminée à section constante.

Ces résultats ne sont donc pas entièrement satisfaisants, aussi a-t-on cherché une solution expérimentale permettant de tourner les difficultés inhérentes au calcul analytique.

ETUDE SUR MODELE REDUIT DE LA STABILITE DES CHEMINEES

Similitude de M. W.F. Durand.

Envisageons une installation dont le modèle réduit comprend une galerie, une cheminée et un appareil réglant le débit à l'aval.

On suppose la même loi de pertes de charge dans les deux écoulements.

Les équations du mouvement sont évidemment les mêmes que celles écrites précédemment (1, 2, 3).

Nous adopterons les notations (') pour désigner les paramètres du modèle.

Dans ces conditions, les échelles seront ainsi définies :

- $\frac{L}{L'} = \lambda$ échelles longueur
- $\frac{f}{f'} = \varphi$ échelles des sections des galeries
- $\frac{F}{F'} = \Phi$ échelles des sections des cheminées
- $\frac{t}{t'} = \tau$ échelles des temps
- $\frac{W}{W'} = \omega$ échelles des vitesses dans la galerie
- $\frac{C}{C'} = \alpha$ échelles des coefficients et pertes de charge
- $\frac{Q}{Q'} = q$ échelles du débit réglé par l'obturateur aval
- $\frac{Z}{Z'} = \xi$ échelles des dénivelées.

Les conditions de similitude s'obtiennent en écrivant que les phénomènes de vraie grandeur et sur modèle sont régis par les mêmes équations, soit :

$$\frac{\lambda \omega}{\tau} = \xi = x \omega^n \quad (4)$$

$$\varphi \omega = \Phi \frac{\xi}{\tau} = q \quad (5)$$

Nous laissons la relation (3) que nous supposons toujours satisfaite. Ceci revient à admettre provisoirement l'existence d'un appareil permettant de garder constante la puissance hydraulique sur le modèle.

Il reste ainsi 4 relations entre les 8 coefficients définissant les différentes échelles. On peut donc en choisir 4 arbitrairement ; pour des raisons de commodité dans la construction arbitraire, M. W.F. DURAND fixe : λ , φ , Φ , et ξ .

Le choix de ces nombres n'est d'ailleurs pas complètement arbitraire, car ils déterminent :

$$\begin{aligned} \omega, q, \tau, \text{ et } x. \\ \omega = \xi \sqrt{\frac{\Phi}{\varphi} \frac{1}{\lambda}} \quad q = \xi \sqrt{\frac{\Phi \varphi}{\lambda}} \quad \tau = \sqrt{\frac{\lambda \Phi}{\varphi}} \\ x = \frac{\lambda^{n/2} \varphi^{n/2} \xi^{1-n}}{\Phi^{n/2}} \end{aligned}$$

qui doivent rester dans des limites acceptables.

(x) par exemple, doit être compris entre deux valeurs extrêmes. On ne peut, en effet, supprimer complètement les pertes de charge sur le modèle, ni les accroître considérablement sans modifier la nature de l'écoulement.

Des raisons analogues existent pour : ω , q , et τ et conditionnent en fait, le choix des échelles.

Remarquons que la similitude de FROUDE n'est qu'un cas particulier de celle de M. W.F. DURAND.

Il suffit en effet, pour s'y ramener, de poser :

$$\lambda^2 = \varphi = \Phi \quad \xi = \lambda$$

on en déduit :

$$\omega = \sqrt{\lambda} \quad \tau = \sqrt{\lambda} \quad q = \lambda^{5/2} \quad x = \lambda^{1-n/2}$$

L'emploi de cette similitude n'est pas nécessaire comme pourrait le faire croire l'existence de plans d'eau libre qui se trouvent dans l'installation.

Mais l'écoulement considéré ici n'est pas un écoulement « à surface libre », la vitesse au voisinage de cette surface ne lui est pas en effet, parallèle.

La similitude de FROUDE, en imposant une condition supplémentaire, limite donc inutilement la latitude laissée dans le choix des échel-

les et ceci peut conduire à de grandes difficultés de réalisations.

Ne présentant pas cet inconvénient, la similitude de M. DURAND se prête à une application pratique bien plus aisée.

REALISATION SUR MODELE

Nous avons supposé au paragraphe précédent que l'équation (3) était toujours vérifiée. Il faut donc trouver un dispositif mécanique qui permette de rendre constante la puissance hydraulique sur le modèle.

La première idée qui vient à l'esprit est d'employer un petit régulateur analogue à ceux qui équipent les installations hydrauliques mais si l'on peut concevoir un tel appareil mécaniquement semblable à ceux utilisés industriellement, les autres conditions de similitude ne sont pas, en général, vérifiées.

Pour tenir compte de l'action du régulateur, des caractéristiques de la turbine, on pourrait réaliser un dispositif simple remplaçant à la fois le régulateur et la turbine.

En 1930, M. DANIEL imagina un appareil qui lui permit le premier de procéder à l'étude de la stabilité des cheminées.

MODELE REDUIT UTILISE PAR M. DANIEL

Le réglage du débit s'effectue au moyen d'un robinet pointeau. L'ouverture de celui-ci (c'est-à-dire le débit) modifie le niveau piézométrique dans la chambre suivant la loi réalisée dans l'installation ; cette loi doit tenir compte de l'influence du régulateur et des caractéristiques de la turbine sur les oscillations. Donnons quelques détails sur cet appareil.

Le modèle de l'installation comprend un réservoir amont à niveau constant, une conduite et une cheminée en verre, représentant la galerie

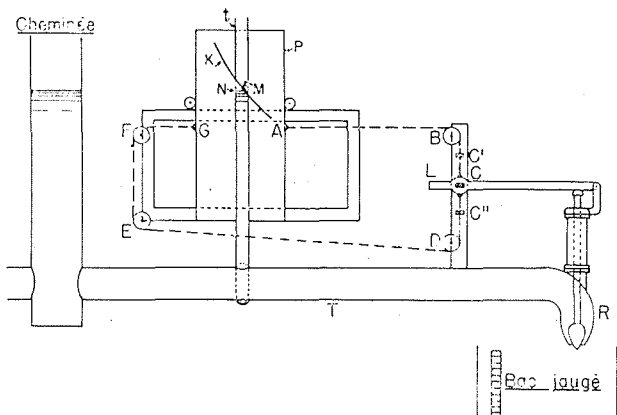


Fig. 2

d'aménée et la chambre d'équilibre. A la conduite forcée correspond un tuyau T muni à son extrémité du robinet pointeau R. Un tube piézométrique t adapté à T permet de connaître à chaque instant le niveau dans la cheminée.

A chaque hauteur du ménisque N dans t on doit faire correspondre un certain débit. Le réglage est réalisé de la façon suivante : l'ouverture du robinet est commandée par un levier de manœuvre L. Au point O du levier, sont attachés 2 câbles tendus ABC et CDEFG, A et G étant deux points d'un panneau P placé en arrière de t et pouvant glisser sur des rails horizontaux ; B et F, des poulies placées de telle sorte que les efforts exercés par le câble sur le panneau soient horizontaux. Quand le point C vient en C', le câble CDEFG tire le panneau vers la gauche. Quand on abaisse le levier en C'', le câble ABC tire le panneau vers la droite. A chaque position du levier L, donc à chaque ouverture du robinet, correspond une position du panneau.

Pour une hauteur donnée dans la cheminée (1 m. par exemple) en jaugeant l'eau s'écoulant de T, on détermine le débit pour les différentes positions du panneau. Ce débit variant comme la racine carrée de la chute, la courbe précédente permet de déterminer le débit en fonction du niveau dans la cheminée pour les différentes positions du panneau. On peut ainsi tracer sur le panneau P les courbes K de la hauteur dans la cheminée du modèle en fonction de la position du panneau, courbes pour lesquelles la puissance disponible est constante.

Supposons que le ménisque N soit placé devant un point M de K. Quand le niveau dans la cheminée varie, pour que N reste sur K, on déplace le panneau. A chaque hauteur dans la cheminée, on fait ainsi correspondre le débit convenu.

Dans le tracé des courbes K, on peut d'ailleurs tenir compte des caractéristiques de la turbine et du régulateur.

AVANTAGES PRESENTES PAR CE MODELE

Nous en signalerons quatre qui nous paraissent particulièrement intéressants :

1°) Il permet, comme nous l'avons déjà indiqué, de tenir compte des caractéristiques de la turbine, de celles du régulateur et des pertes de charge dans les différentes parties du modèle, par exemple les étranglements au bas des cheminées (chambre à étranglement) et en particulier les pertes de charge situées au bas des cheminées.

Dans ce cas, on peut étudier l'influence de tel

ou tel ajustage, en utilisant un modèle accessoire pour la déterminer. Un ajustage géométriquement semblable à celui du modèle ne provoquerait pas, en général, une perte de charge correspondant au rapport de similitude. On créera donc sur le modèle la perte de charge désirée en introduisant un robinet vanne réglable à l'entrée de la conduite forcée.

De nombreuses expériences effectuées par M. CRAYA pour l'usine de l'Oued Fodda, ont montré que, dans ce cas, l'exposant n du CW était peu différent de 2 (entre 1,90 et 2).

2°) Avec ce modèle, il est également possible d'étudier la stabilité d'une installation possédant un déchargeur ; il suffit de déterminer la loi de débit due à cet appareil et d'en tenir compte sur le modèle dans le réglage du robinet pointeau.

Ce type de problème s'est présenté en particulier pour l'usine de Champ-sur-Drac.

3°) Le réglage du débit aval rend inutile la représentation sur le modèle de la chute totale, mais exige seulement la reproduction de la dénivellée entre le niveau statique dans la retenue et le niveau dans la cheminée. La construction du modèle qui peut servir pour toutes les installations de même type en est rendue plus économique et plus aisée.

4°) Signalons enfin que toutes les études indiquées peuvent être envisagées avec des cheminées de forme absolument quelconque ; nous sommes donc loin des formules analytiques applicables seulement aux chambres à sections constantes.

INSTALLATIONS ETUDIEES

La stabilité de nombreuses installations a été étudiée à l'aide de ce procédé. Citons entre autres :

- Oued Fodda (1939) Algérie
- Teillet-Argenty (1930)
- Guchen (Hte-Garonne)
- Nidro Nitro (Espagne)
- Oued Agrioum (Algérie)
- St Michel (Savoie)
- Orgeix (Htes-Pyrénées)
- La Cassagne (Pyrénées-Orientales)
- For Dac (Portugal)
- Veneon (1941-44) (Isère)
- Cordéac (1942 - Isère)
- Lac de Laffrey (1940)
- Monistrol d'Allier (1940)
- Im'Fout (Maroc) (1946-47)
- Michelet (Algérie) - (1942-46)
- Pont Rolland (Côtes-du-Nord).

CONCLUSION

Ce rapide aperçu a permis de montrer l'aide précieuse qu'apporte l'étude expérimentale à la résolution du problème de la stabilité.

Les études analytiques de THOMAS et JOHNSON ont conduit à des formules pratiques, mais ces résultats ne doivent être employés qu'avec beaucoup de prudence et, dans certains cas, de nombreuses approximations, nécessaires à ces calculs, ne permettent plus leur utilisation pratique.

La solution expérimentale, au contraire, s'affranchit des nombreuses hypothèses que l'analyse avait été obligée d'admettre. Seule, elle permet

d'envisager l'étude dans des conditions tout à fait analogues à celles se rencontrant dans la réalité. Restait, évidemment, sa réalisation pratique. Si séduisante qu'elle puisse paraître, la méthode expérimentale n'aurait pas pu être utilisée industriellement si elle conduisait à la construction de systèmes mécaniques compliqués et ne pouvant servir qu'à chaque cas particulier. L'appareil conçu par M. DANIEL a permis d'écartier ces dernières difficultés, la simplicité de sa construction et sa facilité d'adaptation à chaque cas particulier l'ont déjà fait utiliser dans de nombreuses études. Les résultats obtenus ont montré d'ailleurs la bonne concordance des essais sur modèles et des essais industriels

