

totale sera de 225 000 chevaux. La première chute, que l'on compte mettre en marche au début de 1911, contiendra dix groupes électrogènes de 14 000 chevaux chacun. Cette Société s'est en outre assuré la propriété des chutes de Matre (89 000 HP) et de Tyn (78 000 HP), de sorte que, à un moment donné, elle pourra disposer, en Norvège, de 400 000 chevaux pour la fabrication des nitrates.

D'autre part, la *Badische Anilin* a demandé la concession des chutes de l'Alz, dans la Haute-Bavière, de 50 000 chevaux, pour exploiter son procédé en Allemagne (*).

Si l'industrie des nitrates a besoin de forces énormes à bon marché, à cause du faible rendement thermique des fours électriques, elle n'a pas, par contre, à s'inquiéter de la matière première, car la mine à laquelle elle s'approvisionne est aussi inépuisable que peu coûteuse.

P. PIERRON, *Docteur ès-Sciences,*
Professeur à l'Institut de Chimie de Lyon.

AMÉNAGEMENT DES CHUTES

CALCUL DU DIAMÈTRE ÉCONOMIQUE DES CONDUITES FORCÉES

Le calcul des conduites forcées présente une grande importance dans l'établissement des projets d'usines hydrauliques. Cette importance est d'autant plus grande que la chute est plus haute et la conduite plus longue. On constate souvent dans ce cas que la dépense engagée par l'achat des conduites est l'article le plus élevé du devis d'aménagement: Il importe donc de serrer ce calcul de très près, et de choisir le diamètre qui conduit à la solution la plus économique.

Le plus souvent, cependant, on se fixe plus ou moins arbitrairement la valeur de la perte de charge ou de la vitesse à réaliser, et on en déduit le diamètre au moyen des formules connues (Darcy, Lévy, Flamant, etc.). Il est de toute évidence que cette méthode présente une grande part d'arbitraire, de sorte qu'elle ne conduit qu'exceptionnellement à la solution la plus économique. On voit, en effet, qu'une diminution de diamètre restreint sensiblement les frais d'établissement, et par suite les charges annuelles d'intérêt et d'amortissement, mais comme elle correspond à une diminution de la puissance disponible, on peut prévoir qu'il doit exister une combinaison du diamètre et de la vitesse plus économique que toutes les autres. C'est précisément cette combinaison que nous nous proposons de déterminer.

Nous chercherons d'abord à exprimer le poids moyen du mètre linéaire de tuyau en fonction du diamètre D et de la hauteur de chute H .

On sait que, pour un diamètre donné, l'épaisseur croît proportionnellement à la charge et que, pour une charge donnée, elle augmente proportionnellement au diamètre. Il résulte de là que le poids moyen du mètre linéaire est une fonction parabolique de la forme :

$$p_m = k I D^2 \quad (1)$$

k étant un coefficient numérique qui dépend à la fois du taux de travail admis pour le métal, du poids spécifique du

tuyau, de la largeur des recouvrements, et de l'importance des brides d'assemblage.

Pour les tuyaux en acier couramment employés, et pour un taux de travail de 7 kg. par m/m², on a sensiblement :

$$k = 1,3$$

Si L est la longueur de la conduite, son poids total sera donc :

$$p = 1,3 H D^2 L \quad (2)$$

(Cette formule suppose implicitement que l'inclinaison de la conduite est uniforme, condition à peu près réalisée dans la plupart des installations).

Recherche de la solution la plus économique. — Soit N le nombre d'heures de fonctionnement prévu par année. La puissance recueillie sera par an, en chevaux-heure :

$$P = N P'$$

P' étant la puissance moyenne en chevaux disponible aux bornes de l'usine.

Soit v le prix de vente du cheval an aux bornes de l'usine. La recette annuelle sera donc :

$$R = v N P' \quad (3)$$

Quant aux dépenses elles comprennent :

1° Une partie fixe M , indépendante de la conduite forcée (intérêts et amortissements du reste de l'installation).

2° Une partie variable X provenant de l'intérêt et de l'amortissement de la conduite.

Si nous appelons f le prix en francs de la tonne d'acier, et t le taux d'amortissement et d'intérêt par franc, cette partie variable aura pour expression :

$$X = a D^2 \quad (4)$$

en posant : $a = 1,3 H L t f$ (5)

et la dépense annuelle sera :

$$M + X = M + 1,3 H D^2 L t f$$

Les bénéfices annuels seront donc :

$$B = r N P' - (M + 1,3 H D^2 L t f) \quad (6)$$

La solution la plus économique sera évidemment celle qui rendra maxima ces bénéfices.

Nous appellerons q le débit moyen en mètres cubes, h la perte de charge brute, ρ le rendement global de l'usine seule.

L'expression de la puissance moyenne sera alors :

$$P' = \frac{1000}{75} Q (H-h)\rho$$

Nous pourrions, en première approximation tout au moins, poser $\rho = 0,75$, ce qui nous conduit à la forme simple bien connue :

$$P' = 10 Q (H-h) \quad (7)$$

Il nous reste à exprimer h en fonction des données précédemment admises. Nous nous servirons pour cela de la relation suivante, qui donne la perte de charge J par mètre de tuyau :

$$J = 0,00243 \frac{Q^2}{D^5} \quad (8)$$

Cette relation équivaut à la formule monôme :

$$D = 0,3 \sqrt[5]{\frac{Q^2}{J}}$$

(*) Le débit dérivé serait de 60 m³, et la chute aurait environ 100 m. de hauteur, la puissance maxima serait ainsi de 60 000 chevaux. Comme le débit d'étiage tombe à 20 m³, on se propose de créer un réservoir important, en utilisant le lac Chiemssee.

(Nous la choisissons de préférence à la formule de Darcy, parce qu'elle donne, sous une forme plus simple, pour des tuyaux neufs en acier, les mêmes résultats que la formule de M. Maurice Lévy. Or, on sait que, d'après les expériences faites au canal du Verdon, c'est la formule de M. Lévy qui donne les résultats les plus exacts. La formule et les tables de Darcy (tuyaux vieux) donne des diamètres trop grands à partir de 0^m50 de diamètre et au-dessus).

En remplaçant h par sa valeur :

$$h = 0,00243 \frac{Q^2 L}{D^5}$$

nous aurons pour expression de la puissance moyenne :

$$P = 10 Q \left(H - 0,00243 \frac{Q^2 L}{D^5} \right) \quad (9)$$

et pour celle de la dépense Y correspondant à la puissance perdue par frottement :

$$Y = \frac{b}{D^5} \quad (10)$$

en posant : $b = 0,0243 v Q^3 N L$ (11)

L'expression des bénéfices annuels sera par suite :

$$B = 10 Q v N H - M - \left(a D^2 + \frac{b}{D^5} \right)$$

La seule variable qui figure dans le second nombre est D . L'expression de B sera donc maxima quand le terme soustractif entre parenthèse sera minimum.

Nous poserons :

$$z = a D^2 + \frac{b}{D^5}$$

et nous chercherons la valeur de D qui donne $\frac{dz}{dD} = 0$

Nous trouvons ainsi :

$$\frac{dz}{dD} = 2aD - \frac{5b}{D^6}$$

D'où :

$$D = \sqrt[7]{\frac{5b}{2a}} = \sqrt[7]{0,046 \frac{v Q^3 N}{H f}} \quad (12)$$

expression que l'on calculera facilement par les tables de logarithmes où la règle à calcul.

On voit que la solution est indépendante de la longueur L de la canalisation.

La valeur ainsi trouvée pour D est celle qui correspond au maximum d'économie. C'est cette formule que nous proposons pour le calcul du diamètre des conduites forcées.

Dans certains cas, et sous l'influence de conditions spéciales, on pourra être amené à adopter une valeur différente, mais, même s'il en était ainsi, l'application de notre formule permettrait toujours de choisir le diamètre qui se rapproche le plus possible de la valeur économique.

Remarque : D'une part, d'après la relation (4), on a :

$$X = a D^2 = a \left(\frac{5b}{2a} \right)^{\frac{2}{7}}$$

D'autre part, d'après la relation (10), on a aussi :

$$Y = \frac{b}{D^5} = \frac{b}{\left(\frac{5b}{2a} \right)^{\frac{5}{7}}}$$

On a donc :

$$\frac{Y}{X} = \frac{2}{5}$$

D'où la règle suivante : *La conduite forcée la plus économique est celle pour laquelle la valeur de l'énergie perdue annuellement par les frottements est égale aux deux cinquièmes du coût annuel d'intérêt et d'amortissement (*)*.

Observations. — Nous avons vu que t représente le taux d'amortissement et d'intérêt par franc. On peut prendre en général pour taux de l'intérêt 5 pour 100, soit $v = 0,05$.

Quant au taux imputable à l'amortissement, il dépend essentiellement des conditions du projet étudié. S'il s'agit par exemple d'une usine d'éclairage faisant l'objet d'une concession de vingt ans, l'installation devant faire retour à la commune ou à l'Etat après cette date, il est nécessaire de prévoir l'amortissement complet en vingt ans au maximum. On prendra alors le taux d'amortissement de 5/0.

Nous aurions donc dans ce cas :

$$t = 0,05 + 0,05 = 0,1$$

S'il s'agit au contraire d'une usine particulièrement affectée à une industrie quelconque, la durée d'amortissement des tuyaux pourrait être prolongée. Il y a lieu cependant de prévoir les accidents possibles et, éventuellement, les frais d'assurances qui pourraient être contractés pour couvrir les risques de ces accidents.

En tenant compte de toutes ces considérations, ils nous paraît raisonnable de poser $t = 0,1$ quelque soit le cas.

Les valeurs de v et de N dépendent de la nature de l'industrie et du milieu économique, on pourra les déterminer par comparaison avec des usines similaires travaillant dans les mêmes conditions.

Applications. — Dans le but de préciser le mode d'emploi de notre formule, nous donnerons deux exemples d'application concernant deux chutes très différentes dont nous avons eu à étudier l'aménagement.

Première chute : $H = 120$ mètres.
 $Q = 0,03$ mètres cubes. $L = 250$ mètres.
 $N = 3600$ heures. $v = 200$ francs.
 $f = 500$ francs. $t = 0,10$ franc.

La formule (12) nous donne dans ce cas :

$$D = \sqrt[7]{\frac{0,046 \times 200 \times 0,03^3 \times 3600}{120 \times 0,1 \times 500}} = \sqrt[7]{0,0015} = 0,29$$

Donc : $D = 0^m29$

D'où une section : $S = \frac{N J^2}{4} = 0,063$ m².

La vitesse sera : $V = \frac{Q}{S} = 0^m47$

Dans ces conditions, la formule de Lévy donne :

$$J = 0,00014 \quad \text{et} \quad h = 0,0014 \times 250 = 0,35$$

Le pourcentage de la perte de charge brute sera donc :

$$\frac{0^m35}{120} = 0,29 \text{ pour } 100.$$

Deuxième chute : $H = 560$ mètres.
 $Q = 1,4$ mètre cube. $L = 2000$ mètres.
 $N = 6000$ heures. $v = 200$ francs.
 $f = 450$ francs. $t = 0,10$ franc.

(*) Ce résultat avait déjà été obtenu par M. Arthur S. Adams (*Transactions of the American Society of Civil Engineers*, décembre 1907 tome LIX), par une méthode à peu près analogue, mais avec une autre formule pour le calcul de la perte de charge, ce qui conduit à un coefficient numérique légèrement différent pour la valeur de D dans l'expression (12).
 N. D. L. R.

Dans ce cas, la formule (12) nous donne :

$$D = \sqrt[7]{\frac{0,046 \times 200 \times 1,4^3 \times 6000}{560 \times 0,1 \times 450}} = \sqrt[7]{3,6} = 1^m20$$

On trouve alors, avec la formule de Lévy :

$$J = 0,00018 \quad h = 0,0018 \times 2000 = 3,60$$

La vitesse de l'eau est ici de 1^m20.

Le pourcentage de la perte de charge brute est donc :

$$\frac{3,60}{500} = 0,6 \text{ pour } 100.$$

L. PIERRE,
Ingenieur I. E. G.

INSTALLATIONS HYDRO-ÉLECTRIQUES

LES INSTALLATIONS DE LA SOCIÉTÉ ANONYME DES FORCES MOTRICES DE BRUSIO

(Suite)

Station de transformation de Fiattamala

La vallée du Poschiavino, particulièrement étroite depuis Campocologno, laissait peu de choix pour la construction d'un bâtiment d'une certaine importance, il fallut cependant faire sauter plusieurs centaines de mètres cubes de rocher pour pouvoir dégager l'emplacement nécessaire.

La station de Piattamala est destinée à élever, de 7.000 à 50.000 volts, la tension du courant venant de l'usine de Brusio.

Elle se compose d'un vaste bâtiment de 55 mètres de longueur sur 21 mètres de largeur, et d'une tourelle annexe pour le départ des lignes à haute tension. Elle contient 24 transformateurs monophasés, prévus pour une puissance de 1.250 K. V. A., qui ont été fournis par la Société Alioth ainsi d'ailleurs que tout l'appareillage de la station.

CHAMBRE DES MESURES. — Le tunnel contenant la double canalisation triphasée dont il a été parlé précédemment, aboutit au rez-de-chaussée de la station d'où les conduites d'arrivée montent dans la chambre des mesures. Des couteaux permettent de couper la canalisation ou de réunir en parallèle ses deux branches. La station peut donc fonctionner avec les deux moitiés séparées ou montées en parallèle. On n'a pas employé d'interrupteurs automatiques, car le déclenchement subit de la charge totale aurait pu être dangereux pour l'installation hydraulique.

La chambre des mesures comporte, immédiatement après les couteaux de sectionnement, deux tableaux, munis chacun : de trois ampèremètres avec transformateurs d'intensité, dont un pour chaque phase ; — d'un voltmètre avec commutateur ; — d'un voltmètre enregistreur ; — et de deux wattmètres enregistreurs montés en série et fournis par deux constructeurs différents, cela afin d'avoir un double contrôle.

La même salle contient également les ampèremètres et voltmètres des lignes de départ à 50.000 volts, ce qui permet de surveiller d'un seul point le fonctionnement de l'ensemble.

Les barres à 7.000 volts sortant de la chambre des mesures, se rendent dans la salle des transformateurs, qui sont montés en étoile par groupes de trois.

Chaque groupe de transformateurs est pourvu d'un interrupteur tripolaire du côté 7.000 volts, et d'un interrupteur simple sur chaque phase de la haute tension. L'interrupteur à 7.000 volts et les trois interrupteurs à 5.000 volts de cha-

que groupe peuvent déclencher automatiquement au moyen d'un disjoncteur à relai monté sur la basse tension, ce qui assure l'isolement complet d'un groupe en cas d'accident, et empêche les autres transformateurs de débiter sur ceux qui sont avariés.

Toutes les canalisations électriques sont séparées les unes des autres par des cloisons en béton, c'est d'ailleurs là une règle absolue que l'on a suivie dans toutes les stations et sous-stations.

TRANSFORMATEURS. — Les transformateurs à noyaux verticaux (fig. 19 et 20) sont à bain d'huile refroidie par circulation d'eau. Au lieu du serpentin généralement adopté, la Société Alioth entoure la partie supérieure de la cuve à huile d'une chemise en tôle, dans laquelle l'eau froide, entrant par la partie inférieure, et sortant par en haut, se renouvelle constamment. Des nervures intérieures permettent d'activer le refroidissement. Avec ce système, on n'a pas à craindre les fuites.

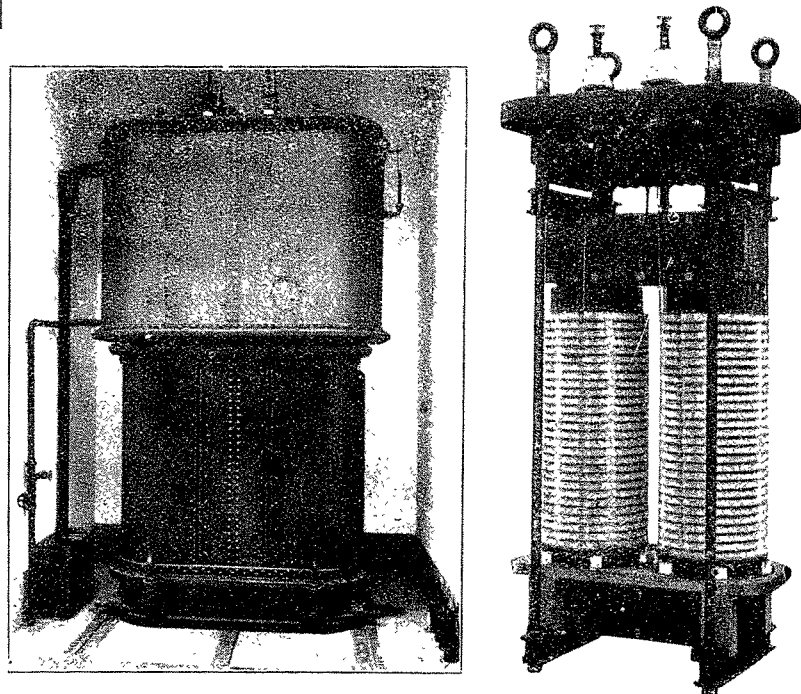


FIG. 19 ET 20. — TRANSFORMATEUR MONOPHASÉ DE 1.250 K.V.A.
A BAIN D'HUILE, REFFROIDI PAR CIRCULATION D'EAU

La puissance normale des transformateurs est de 1.250 K. V. A. Le rapport de transformation de chaque groupe monté en étoile est, suivant la tension des aternateurs de la centrale,

$$\frac{7\,500}{47\,000} \quad \text{ou} \quad \frac{7\,700}{48\,300}$$

L'enroulement haute tension extérieur est constitué par 36 bobines empilées, et séparées les unes des autres par des cales isolantes en mécanite. De cette façon, la tension limite de 1.000 volts entre les extrémités d'une même bobine, que l'on s'impose généralement, n'est pas atteinte ; de plus, les réparations sont grandement facilitées, et le remplacement d'une bobine brûlée est une opération relativement rapide.

Les rendements imposés par le cahier des charges, soit 97,5 % à pleine charge, et 96,5 % à demi-charge, ont été facilement atteints (fig. 21).

Les chutes de tension prévues, et déterminées au moyen du diagramme classique de Kapp,

$$\text{soit } 1 \% \text{ pour } \cos \varphi = \bar{1}$$

$$\text{et } 2,2 \% \text{ pour } \cos \varphi = 0,80.$$

n'ont pas été dépassées.