25e Année — No 203 Novembre-Décembre 1926

LA HOUILLE BLANCHE

ÉDITIONS J. REY-B. ARTHAUD, Éditeur, GRENOBLE

Abonnement pour une Année { France....... 40 francs / Étranger..... 50 francs } Le Numéro : 7 francs

Compte Chèques Postaux LYON 5-84

SOMMAIRE

HYDRAULIQUE

La Solution générale du Problème de la Détermination des Dimensions Economiques Maximum d'une Conduite forcée en Métal et son Application aux Calculs pratiques.

Par PAUL P.-SANTO RINI, *Ingénieur E. P. Z., Directeur de la « Société Anonyme d'Etudes et d'Entreprises », Athènes.*

CONDUITES FORCÉES ÉQUIVALENTES POUR AMÉNAGEMENTS HYDRAULIQUES EN GÉNÉRAL : USINES HYDRO-ÉLECTRIQUES, INSTALLATIONS DE POMPAGE, ADDUCTION D'EAU, etc.

§ 1. — Equivalence économique des conduites

L'exemple numérique type traité au § 4 du ch. III nous a permis d'obtenir les valeurs suivantes de la fonction caractéristique :

	$n = 1$	$n = 2$	$n = 3$
En négligeant les frais des changements du diamètre	143308	142098	141859
En tenant compte des frais des changements du diamètre	143766	143014	143233

La différence, notamment entre les chiffres de la deuxième ligne — les seuls entrant en ligne de compte — est tout à fait insignifiante et nous pouvons affirmer que, au point de vue du rendement économique, les conduites à un, deux ou plusieurs diamètres, sont *pratiquement équivalentes*.

La base de l'équivalence économique des conduites à un ou plusieurs diamètres calculée d'après notre méthode est une certaine *loi d'équilibre entre l'énergie dissipée par le frottement de l'eau le long des parois de la conduite et le poids du métal de cette conduite.*

Il s'ensuit que nos *lois de la subdivision et des diamètres sont valables pour toutes les conduites forcées où la puissance correspondant au frottement entre l'eau et la paroi de la conduite entre en ligne de compte avec le coût de la conduite.*

Notre méthode trouve donc son application non seulement pour le calcul des conduites forcées hydroélectriques, mais, sous réserve d'une interprétation conforme du facteur T, aussi pour les conduites de pompage d'eau, etc.

Les conduites à 1, 2, 3..., etc., diamètres étant sensiblement équivalentes au point de vue économique, il est évident qu'en pratique on ne passera à une conduite à deux diamètres ($n = 1$) seulement dans les cas où, pour des *raisons constructives* — épaisseur de paroi trop forte pour pouvoir être rivetée ou soudée, etc. — on aura avantage à *réduire* la valeur du diamètre aval, et qu'on n'envisagera une conduite à 3 diamètres ($n = 2$) que lorsque la conduite à 2 diamètres se montrera toujours encore insuffisante sous ce rapport; et ainsi de suite.

Il ne sera fait exception à cette règle que lorsque le constructeur de la conduite spécifiera des *prix différents par tonne* de conduite de grand et de petit diamètre et de forte et faible épaisseur de paroi. D'autre part, les *frais de transport* peuvent devenir plus faibles dans le cas des conduites de diamètres variables, mais seulement si la différence est suffisamment grande pour pouvoir faire glisser l'un dans l'autre les tuyaux de diamètres différents.

Ensuite, vu la différence du prix des *conduites rivetées et soudées*, il est souvent avantageux d'étudier la combinaison de ces deux procédés de construction et il arrive alors que le diamètre optimum du tronçon riveté soit différent de celui soudé.

Ce n'est donc en principe que sous ces conditions que la subdivision d'une conduite en plusieurs tronçons de diamètres différents puisse se justifier aussi au point de vue *économique*.

Considéré sous ce point de vue, notre procédé est destiné à rendre d'appréciables services aussi bien aux ingénieurs qu'aux fournisseurs des conduites forcées.

Ainsi, si le client demande *une certaine conduite* à un ou plusieurs diamètres, il est parfois très utile pour le constructeur de pouvoir immédiatement établir, s'il ne peut proposer au client une *autre conduite équivalente*, qui, pour des raisons particulières à ses disponibilités ou à son appareillage, il pourrait livrer plus rapidement ou à meilleur compte.

En cas d'agrément, l'avantage serait également du côté du client, la conduite établie sur la base de notre procédé étant, économiquement parlant, équivalente à la conduite commandée, tout en revenant meilleur marché.

§ 2. — Etablissement des conduites équivalentes.

Nous indiquerons maintenant le procédé à suivre pour établir les dimensions des conduites équivalentes. Basons-nous sur le cas d'une conduite à un seul diamètre constant.

Cette conduite est évidemment celle qui assure la *vitesse d'eau minimum*. Plus grand sera le nombre des diamètres, plus faible sera cette vitesse dans les tronçons amont, mais d'autant plus forte le sera-t-elle dans ceux d'aval. Il est donc indispensable d'être renseigné sur la limite maximum de la vitesse d'eau admise, cette vitesse définissant ainsi la valeur maximum de n que l'on ne pourra donc pas dépasser sous aucun prétexte.

Ensuite, l'axe de la conduite est subdivisé par la construction fig. 23 (à l'aide de l'abaque fig. 11) ou, dans les cas exceptionnels, à l'aide de l'abaque fig. 27 :

1° En une section amont et une section aval ($n = 1$);

2° La section amont restant la même, la section aval est subdivisée en 2 tronçons ($n = 2$);

3° La section amont restant la même, la section aval est subdivisée en 3 tronçons ($n = 3$);

et ainsi de suite. Il s'agit là d'un travail d'un quart d'heure à une heure tout au plus, suivant que l'on se contente de l'application de la construction fig. 23 ou que l'on juge indispensable de procéder avec l'abaque fig. 27.

Connaissant maintenant la subdivision de la conduite et la longueur de chaque tronçon, il ne reste plus qu'à déterminer les diamètres de ces tronçons.

La conduite de base est une conduite dont nous connaissons le diamètre D.

Ce diamètre correspond à notre formule

$$D = \sqrt[7]{\frac{T\,L}{y\,(L - l_0) + h_0\,l_0}}$$

et il s'ensuit que la valeur de T — *implicitement déterminée par l'indication des éléments de la conduite de base* — devient

$$T = D^7\,\frac{y\,(L - l_0) + h_0\,l_0}{L}$$

Nous rappellerons que les termes composant cette expression sont tous des *constantes*, en partie dépendant de la configuration de l'axe de la conduite. Ainsi :

D = diamètre de la conduite de base;
h_0 = constante constructive = charge statique correspondant au point à partir duquel commence à croître l'épaisseur de paroi;
l_0 = longueur du premier tronçon d'épaisseur de paroi constante.
L = longueur totale de la conduite;
y = charge statique au centre de gravité de la section $(L - l_0)$ de la conduite.

La valeur de T ainsi obtenue est donc ici une *constante absolue*. En effet, une fois la conduite de base prescrite, les conduites que nous voulons établir n'ont d'autre prétention que celle d'être équivalentes à la conduite de base, le *rendement économique étant sensiblement identique pour toutes ces conduites.*

Une fois la valeur de T ci-dessus calculée — D^7 se lit directement sur notre abaque fig. 29 — on calcule

$$\tau_0 = \frac{T}{h_0} \quad \text{et} \quad \tau_r = \frac{T}{y_r}$$

où l'on donne à r les valeurs 1, 2, 3... n. Avec ces valeurs de τ on obtient les diamètres

$$D_0 \quad \text{et} \quad D_r$$

par l'emploi de l'abaque fig. 29 qui nous évite l'extraction de la septième racine des τ correspondants.

§ 3. — Exemple numérique [1]

Soit une *conduite de base* de tracé rectiligne, caractérisée par :

L = 2300 m
l_0 = 570 m
h_0 = 89 m
H = 306 m
D = 1,17 m
y = 0,5 (89 + 306) = 198 m

La valeur de T, commune à toutes les conduites équivalentes, est donc :

$$T = \overline{1{,}117}^7 \cdot \frac{198 \cdot 1730 + 89 \cdot 570}{2300} = \underline{512}$$

Pour démontrer l'équivalence des conduites en question, nous calculerons parallèlement leurs poids et leurs pertes de charge.

---

[1] Cet exemple numérique a été entièrement calculé avec une règle à calcul.

Pour le *calcul du poids*, nous admettrons :

$$w = \frac{\lambda}{2\,k\,\varphi} = \frac{1{,}15}{2\,.\,12\,000\,.\,0{,}90} = 0{,}0000533$$

$$t = \pi\,z\,p = \pi\,.\,1{,}15\,.\,7{,}86 = 28{,}4$$

Il résulte donc :

$$P = w\,t\int^{L} D^2\,h\,dx = w\,t\sum_{r=1}^{r=n} D_r^2\,y_r\,l_r = 0{,}0000533\,.\,28{,}4$$

$$\sum_{r=1}^{r=n} D_r^2\,y_r\,l_r$$

$$\underline{P = 0{,}00152 \sum_{r=1}^{=n} D_r^2\,y_r\,l_r}$$

Pour le *calcul des pertes de charge*, nous admettrons :

$$g = 6{,}5\,\frac{\mu}{c^2}$$

$$Y = g\,Q^2\int_0^L \frac{dx}{D^5} = 6{,}5\,\mu\,Q^2 \sum_{r=1}^{r=n} \frac{l_r}{c_r^2\,D_r^5}$$

Le débit étant supposé

$$Q = 3{,}0\ m^3/sec.$$

et avec

$$\mu = 1{,}05$$

la perte de charge s'exprimera par

$$Y = 61{,}5 \sum_{r=1}^{r=n} \frac{l_r}{c_r^2\,D_r^5}$$

où c sera calculé par la formule abrégée de *Kutter* avec $m = 30$

a) *Conduite de base à un diamètre.*

1) Les éléments de cette conduite sont :

$$D = 1{,}17\ m \quad \text{sur} \quad L = 2300\ m$$

2) Le poids de la conduite :

$$\underline{P} = 0{,}00152\,.\,\overline{1{,}17}^2\,(89\,.\,570 + 198\,.\,1730) = \underline{819\ t}$$

3) La perte de charge :

$c = 64{,}3$

$$Y = 61{,}5\,\frac{2300}{64{,}3^2\cdot\overline{1{,}17}^5} = \underline{15{,}55\ m}$$

b) *Conduite équivalente à deux diamètres.*

$$\tau_0 = \frac{T}{h_0} = \frac{512}{89} = 5{,}76 \;\therefore\; D_0 = 1{,}28\ m \text{ (abaque fig. 29)}$$

$$\tau_1 = \frac{T}{y} = \frac{512}{198} = 2{,}59 \;\therefore\; D_1 = 1{,}15\ m \text{ (abaque fig. 29).}$$

1) Les éléments de cette conduite sont donc :

$D_0 = 1{,}28\ m$ sur $l_0 = 570\ m$
$D_1 = 1{,}15\ m$ sur $l_1 = 1730\ m$

2) Le poids de la conduite :

$\overline{1{,}28}^2$	89.570	=	83150
$\overline{1{,}15}^2$	198.1730	=	453500
	$\underline{P}$ =		536650 . 0,00152 = $\underline{815\ t}$

3) La perte de charge :

$$c = 65{,}3 \qquad \frac{570}{65{,}3^2\cdot\overline{1{,}28}^5} = 0{,}03883$$

$$c = 64{,}1 \qquad \frac{1730}{64{,}1^2\cdot\overline{1{,}15}^5} = 0{,}2092$$

$$\underline{Y} = 0{,}24803\,.\,61{,}5 = \underline{15{,}27\ m}$$

c) *Conduite équivalente à trois diamètres.*

Pour la *section amont*, les dates restent les mêmes que pour le cas $n = 1$.

La *section aval* sera subdivisée par l'abaque fig. 11.

$$\frac{H}{h_0} = \frac{306}{89} = 3{,}44$$

Nous menons donc la perpendiculaire par le point d'abcisse 3,44 lue sur l'échelle horizontale, jusqu'à la courbe $n = 2$. L'horizontale par ce point vers la droite sera désignée par 2 — 1 — C — A par analogie à l'exemple tracé sur l'abaque. 2 — C est la section aval de la conduite et équivaut à 1730 m. La section amont correspond, par contre, à une fraction seulement de C — A, la conduite débutant sous une charge statique $h' = 20\ m$ et non au niveau hydrostatique.

Nous lisons la subdivision du segment 2 — A par le point 1 :

A — 1 = 18,4 $mm \sim h_1$
A — 2 = 30,4 $mm \sim 306\ m$

Il s'ensuit donc

$$h_1 = \frac{18{,}4}{30{,}4}\,.\,306 = 185\ m$$

Cette valeur détermine sur le profil en long les longueurs des tronçons l_1 et l_2, mais dans ce cas particulier, la conduite étant supposée rectiligne, nous obtenons ces longueurs directement par l'abaque fig. 11 :

2 — 1 = 12,0 $mm \sim l_2$
2 — C = 21,6 $mm \sim 1730\ m$

Il s'ensuit donc

$$l_2 = \frac{12{,}0}{21{,}6}\,.\,1730 = 960\ m$$

$$l_1 = 1730 - 960 = 770\ m$$

D'autre part, la conduite étant rectiligne, on obtient les valeurs de y directement :

$$y_1 = \frac{89 + 185}{2} = 137\ m$$

$$y_2 = \frac{185 + 306}{2} = 246\ m$$

La subdivision étant maintenant établie, nous passons aux diamètres :

$$\tau_1 = \frac{512}{137} = 3{,}74 \;\therefore\; D_1 = 1{,}21\ m$$

$$\tau_2 = \frac{512}{246} = 2{,}08 \;\therefore\; D_2 = 1{,}11$$

1) Les éléments de cette conduite sont donc :

$$\begin{cases} D_0 = 1{,}28\ m & \text{sur } l_0 = 570\ m \\ D_1 = 1{,}21\ m & \text{sur } l_1 = 770\ m \\ D_2 = 1{,}11\ m & \text{sur } l_2 = 960\ m \end{cases}$$

2) Le poids de la conduite :

$$\overline{1,28}^2 . 89 . 570 = 83150$$
$$\overline{1,21}^2 . 137 . 770 = 154400$$
$$\overline{1,11}^2 . 246 . 960 = \underline{291500}$$
$$\underline{P} = 529050 . 0,00152 = \underline{804\ t}$$

3) La perte de charge :

$$c = 65,3 \qquad \frac{570}{\overline{65,3}^2 \cdot \overline{1,28}^5} = 0,03885$$

$$c = 64,7 \qquad \frac{770}{\overline{64,7}^2 \cdot \overline{1,21}^5} = 0,0707$$

$$c = 63,7 \qquad \frac{960}{\overline{63,7}^2 \cdot \overline{1,11}^5} = 0,1402$$

$$\underline{Y} = \overline{0,24973} . 61,5 = \underline{15,38\ m}$$

d) *Conduite équivalente à* quatre *diamètres.*

Les éléments de la section *amont* restant toujours tels quels, ce n'est que de la subdivision de la section *aval* que nous nous occuperons ici.

Pour déterminer cette subdivision, nous prolongeons la verticale par $\frac{H}{h_0} = 3,44$ jusqu'à l'intersection avec la courbe $n = 3$ et nous obtenons la subdivision 3 — 2 — 1 — C — A.

Les charges statiques inconnues h_1 et h_2 sont interprétées par les segments A — 1 et A — 2 ; nous obtenons :

$$h_1 = \frac{14,5}{20,4} . 306 = 146\ m$$

$$h_1 = \frac{21,7}{30,4} . 306 = 219\ m$$

Les valeurs l_1, l_2 et l_3 se lisent maintenant sur le profil en long de la conduite. Celle-ci étant ici d'axe rectiligne, nous obtenons ces longueurs toujours par l'abaque fig. 11 :

$$l_3 = \frac{8,7}{21,6} . 1730 = 700\ m$$

$$l_2 = \frac{7,3}{21,6} . 1730 = 585\ m$$

$$l_1 = 1730 - 1285 = 445\ m$$

Ensuite, les charges statiques y aux centres de gravité des tronçons l, s'établissent ici directement :

$$y_1 = \frac{89 + 146}{2} = 118\ m$$

$$y_2 = \frac{146 + 219}{2} = 182\ m$$

$$y_3 = \frac{219 + 306}{2} = 262\ m$$

Les diamètres de la section aval deviennent donc :

$$\tau_1 = \frac{512}{118} = 4,34 \therefore D_1 = 1,23\ m$$

$$\tau_2 = \frac{512}{182} = 2,82 \therefore D_2 = 1,16\ m$$

$$\tau_3 = \frac{512}{262} = 1,95 \therefore D_3 = 1,10\ m$$

1) Les éléments de cette conduite sont donc :

$$\left\{\begin{array}{llll} D_0 = 1,28\ m & \text{sur} & l_0 = 570\ m \\ D_1 = 1,23\ m & \text{sur} & l_1 = 445\ m \\ D_2 = 1,16\ m & \text{sur} & l_2 = 585\ m \\ D_3 = 1,10\ m & \text{sur} & l_3 = 700\ m \end{array}\right.$$

2) Le poids de la conduite :

$$\overline{1,28}^2 . 89 . 570 = 83150$$
$$\overline{1,23}^2 . 118 . 445 = 79550$$
$$\overline{1,16}^2 . 182 . 585 = 143500$$
$$\overline{1,10}^2 . 162 . 700 = \underline{221900}$$
$$\underline{P} = 528100 . 0,00152 = \underline{801\ t}$$

3) La perte de charge :

$$c = 65,3 \qquad \frac{570}{\overline{65,3}^2 \cdot \overline{1,28}^5} = 0,03883$$

$$c = 64,9 \qquad \frac{445}{\overline{64,9}^2 \cdot \overline{1,23}^5} = 0,03745$$

$$c = 64,0 \qquad \frac{585}{\overline{64,0}^2 \cdot \overline{1,16}^5} = 0,0677$$

$$c = 63,6 \qquad \frac{700}{\overline{63,6}^2 \cdot \overline{1,10}^5} = 0,1073$$

$$\underline{Y} = \overline{0,25128} . 61,5 = \underline{15,47\ m}$$

Nous constatons donc que les quatre conduites à

1 — 2 — 3 — 4 diamètres

sont sensiblement du même poids :

819 — 815 — 804 — 801 tonnes (¹)

la perte de charge étant également presque identique :

15,55 — 15,27 — 15,38 — 15,47 mètres (¹)

Ces résultats nous semblent donc pleinement justifier la qualification de « conduites équivalentes ».

(¹) Ces chiffres ont été obtenus par l'emploi de la règle à calcul. D'autre part, les longueurs des tronçons et les diamètres n'ont pas été calculés exactement, mais simplement déduits de l'abaque fig. 11 et fig. 29. La précision de ces résultats correspond donc à celle que l'on obtient ordinairement par les moyens couramment utilisés.