

# LA HOUILLE BLANCHE

J. REY, Éditeur, GRENOBLE

Abonnement pour une Année  $\left\{ \begin{array}{l} \text{France... 36 francs} \\ \text{Étranger . 46 francs} \end{array} \right\}$  Le Numéro : 6 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 SANTO-RINI, Ingénieur E. P. Z., Directeur de la « Société Anonyme d'Etudes et d'Entreprises » à Athènes.

**LES FORCES HYDRAULIQUES.** — Les grands Travaux de régularisation des Chutes de la région des Alpes : Le grand Barrage-Réservoir du Chambon sur la Haute-Romanche, par V. SYLVESTRE, Ingénieur A. et M. et I. E. G. — Aménagement du

Rhin de Bâle à Strasbourg et à Lauterbourg (*suite et fin*), par L. MAHL, Ingénieur.

**ELECTRICITÉ.** — Calcul mécanique des lignes électriques dans le cas de longues portées en forte pente, par le Cdt DEWULF.

**LÉGISLATION.** — Les Sociétés Coopératives et les Groupements Coopératifs en présence des Lois fiscales de toutes catégories, par Paul BOUGAULT, Avocat à la Cour d'Appel de Lyon.

**DOCUMENTATION.** — **INFORMATIONS.** — **BIBLIOGRAPHIE.**

## 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.

#### V. — LE CALCUL DE T

##### § 1. — Généralités.

En principe, le calcul de T est identique à celui de notre méthode de 1921. Toutefois, pour rendre plus sûre l'application de notre procédé, nous donnons dans ce chapitre un exemple numérique type, auquel il est facile de se conformer.

En pratique, comme nous l'avons déjà dit en 1921, le régime d'exploitation est parfois plus compliqué que nous l'admettons dans cet exemple. Mais il convient de remarquer que l'on peut, assez souvent, réduire les données d'un cas envisagé à celles que nous indiquons dans cet exemple. Par contre, dans les cas plus compliqués, ou ceci ne saurait facilement se faire, nous recommandons les calculs sur la base de diagrammes et intégrations graphiques au moyen desquels nous avons toujours pu obtenir rapidement les données nécessaires pour l'établissement de T.

On trouvera, d'ailleurs, une aide précieuse dans l'ouvrage connu de M. LUDIN qui consacre plusieurs chapitres au calcul de cette « constante » pour les cas de réserve thermique, accumulation hydraulique, etc.

Nous pensons qu'il n'est nullement nécessaire de pousser trop loin le calcul de T, cette soi-disant « constante » de l'aménagement. Nous avons, dès 1921, remarqué qu'il n'en était rien de cette constance et que T, fonction de  $c$ ,  $\nu$ ,  $f$  et  $\lambda$  <sup>(1)</sup> était également une fonction du diamètre D.

<sup>(1)</sup> Pour les aménagements industriels  $\lambda =$  constante à cause des régulateurs limitant la pression intérieure maximum à un taux fixe et déterminé à l'avance.

La raison pour laquelle T est généralement considéré comme constante indépendante de D réside dans l'incertitude relative à la détermination exacte des lois entre le diamètre D et  $c$ ,  $\nu$ ,  $f$  et  $\lambda$ . On peut, d'autre part, s'épargner la complication des calculs résultant de l'introduction des lois générales en question, par la simple réflexion que, par exemple,  $f$  est une variable non seulement du diamètre, mais aussi du pays, de l'usine et, surtout, de l'époque.

On s'aperçoit également dans la formule (3) que T est fonction d'un certain nombre de données concernant l'exploitation de la centrale projetée, données qui ne peuvent être évaluées pour une installation en projet que d'une manière très approximative. Mais même, en supposant qu'elles puissent l'être, ce qui pourrait se faire, par exemple, sous certaines conditions favorables, dans le cas d'addition d'une nouvelle conduite à une installation déjà existante, il ne faut guère perdre de vue que les facteurs  $i$ ,  $\nu$  et  $f$  sont sujets à des variations suivant les fluctuations du marché et qu'ils dépendent de la situation économique générale. D'autre part,  $a$  et souvent Q ne peuvent guère être considérés comme constantes absolues.

Les considérations que nous venons de faire sur la variabilité de T nous prouvent que ce facteur est considéré à tort comme « constante de l'aménagement » projeté. Ce serait donc — nous le répétons — pratiquement une erreur grave que de se baser uniquement sur la valeur de T au moment du projet de l'installation, pour en déduire les valeurs définitives à donner aux diamètres d'une conduite forcée devant desservir l'exploitation pendant un minimum probable d'au moins cinquante ans. Cette

observation ne s'applique pas uniquement aux conduites forcées, mais elle concerne aussi bien tous les calculs techniques basés sur une situation économique déterminée. Elle s'adresse au bon sens de l'ingénieur, plutôt qu'à sa règle à calcul.

## § 2. — Explication des termes dont T est fonction.

Pour exécuter le calcul des éléments d'une conduite forcée, il est nécessaire d'établir préalablement la valeur des 14 termes suivants :

1	Q	Débit en $m^3/sec.$
2	a	Nombre d'heures d'exploitation par année.
3	b	Rendement de l'aménagement.
4	c	Coefficient hydraulique de la formule de CHÉZY.
5	$\mu$	Rapport entre la perte de charge totale (frottement, changements de direction et de section, vannes, obturateurs, etc.), et la perte de charge provenant seulement du frottement dans un tuyau rectiligne.
6	k	Taux de travail admissible du métal en $t/m^2$ .
7	$\varphi$	Rapport entre la section de résistance effective et la section théorique du métal (rendement de la soudure).
8	$\lambda$	Rapport entre la charge statique totale (statique et dynamique due au coup de bélier) et la charge statique.
9	z	Rapport du poids effectif de la conduite (y compris les joints et rivets) au poids fictif exprimé en fonction du diamètre et de l'épaisseur de paroi.
10	p	Poids spécifique du métal en $t/m^3$ .
11	f	Prix de la tonne de la conduite toute posée, en francs-or.
12	A	Coût de l'aménagement et machines (à l'exclusion de la conduite forcée) réduit au kWh produit, en francs-or.
13	v	Prix de vente du kWh en francs-or.
14	i	Taux d'intérêt et d'amortissement.

N. B. — Comme unité de prix figure le franc-or ; les formules restent les mêmes pour n'importe quelle autre unité, même papier,

### 1. — $Q = \text{débit en } m^3/sec.$

Le débit Q n'est presque jamais uniforme pendant la durée de l'année : ainsi, les jaugeages effectués antérieurement à l'élaboration du projet nous fournissent des valeurs différentes

$$Q_1, Q_2, Q_3, \dots, Q_n$$

avec leurs durées respectives

$$t_1, t_2, t_3, \dots, t_n.$$

Du moment que dans l'expression de T, la valeur de Q apparaît en troisième puissance, nous pouvons attribuer à Q une valeur moyenne définie par

$$Q^3 \sum_{r=1}^{r=n} t_r = \sum_{r=1}^{r=n} Q_r^3 t_r$$

donc :

$$Q = \sqrt[3]{\frac{\sum_{r=1}^{r=n} Q_r^3 t_r}{\sum_{r=1}^{r=n} t_r}} m^3/sec. \quad (18)$$

### 2. — a = nombre d'heures d'exploitation par année.

La valeur de a dépend des buts que l'on se propose d'atteindre par l'aménagement en étude.

Si donc l'on peut prévoir l'exploitation continue pendant toute l'année, la valeur de a sera de 8760 heures.

Par contre, pour un travail journalier de n heures, la valeur de a se réduira à

$$a = 365 \cdot n \text{ heures}$$

Nous ajouterons qu'il est parfois utile de prendre en considération deux valeurs différentes de a et d'examiner la situation aussi bien pour le cas d'exploitation continue fort problématique, que pour celui d'un service d'environ 8 heures par jour ( $a \sim 3000 \text{ h}$ ).

### 3. — b = rendement de l'aménagement.

Au point de vue qui nous intéresse ici, cette valeur est le quotient de l'énergie effectivement vendue par l'énergie qui peut être théoriquement produite pendant a heures par année.

Si l'on manque de données analogues pour établir ce rapport, l'on peut trouver une indication quant à la valeur à introduire dans les calculs en interprétant b comme le produit des facteurs ci-dessous :

$$b_t = \text{rendement des turbines } (0,84 \div 0,89).$$

$b_r$  = rendement du régulateur (déflecteur, vanne de décharge) en service normal comportant les variations de régime usuelles et provoquant de ce fait des pertes d'eau. Ce coefficient est très voisin de l'unité et peut généralement être négligé, les constructeurs fournissant, d'autre part, des indications précises pour les régimes extraordinaires (presses hydrauliques, etc.).

$$b_g = \text{rendement des génératrices } (0,90 \div 0,95).$$

$b_t \uparrow$  = rendement des transformateurs élévateurs de tension ( $\sim 0,97$ ).

$b_l$  = rendement de la ligne de transport à haute tension ( $0,98 \div 0,90$ ).

$b_t \downarrow$  = rendement des transformateurs abaisseurs de tension ( $\sim 0,97$ ).

$$b_d = \text{rendement du réseau de distribution } (\sim 0,95).$$

$b_c$  = rendement de « consommation du courant », exprimant le rapport entre le courant effectivement payé à celui livré à domicile, englobant donc fuites, courts-circuits, etc.

Le rendement global b s'exprime donc par :

$$b = b_l \cdot b_r \cdot b_g \cdot b_t \uparrow \cdot b_l \cdot b_t \downarrow \cdot b_d \cdot b_c$$

et est généralement sensiblement inférieur aux valeurs jusqu'ici couramment admises pour ce coefficient.

### 4. — c = coefficient de la formule de CHÉZY : $U = c \sqrt{R I}$

Les formules courantes qui fournissent la valeur de ce coefficient en fonction du diamètre D sont très nombreuses.

Or, il est bien connu que leur origine est, dans la plupart des cas, basée sur des séries de jaugeages plus ou moins étendues. Ces formules empiriques ne sont donc, au sens strict du mot, valables que dans les limites de ces observations, ce qui explique leurs fréquentes discordances pour un cas déterminé.

C'est pourquoi, désirant éviter d'imposer une de ces formules à l'exclusion des autres, nous nous sommes abstenus d'introduire dans l'exposé mathématique du problème, le coefficient c en fonction du diamètre, laissant ainsi le choix de la formule à l'appréciation et à l'expérience de l'ingénieur.

Le calcul de c exige au préalable l'évaluation d'un diamètre D. Cette première évaluation peut être faite sur la base de la formule

$$U = \frac{4 Q}{\pi D^2}$$

en se fixant au préalable une vitesse d'eau U admissible au point de vue technique. L'on calcule donc

$$D = 2 \sqrt{\frac{Q}{\pi U}}$$

La répétition des calculs fera ensuite ressortir la vitesse U la plus avantageuse au point de vue du rendement économique de la conduite forcée, mais il s'entend que l'ingénieur devra veiller tout particulièrement à ce que la vitesse U définie par le diamètre aval D ne dépasse pas les limites admises au point de vue technique ( $U < 4 \div 5 \text{ m/sec.}$ ).

Si la valeur de  $U$  résulte supérieure à cette limite, l'on aura tout intérêt, d'après ce que nous avons exposé dans le cours de cette étude, de diminuer cette valeur en augmentant la valeur du diamètre aval, ce qui s'obtient d'une manière économiquement correcte en diminuant d'une ou de deux unités le nombre de tronçons  $n$  prévu.

Une fois la valeur de  $D$  ainsi déterminée, l'on obtient  $c$  par une des formules suivantes :

a) La deuxième (1897) formule de BAZIN

$$c = \frac{87}{1 + \frac{\gamma}{\sqrt{R}}} = \frac{87}{1 + \frac{2\gamma}{\sqrt{D}}} = \frac{87\sqrt{D}}{2\gamma + \sqrt{D}} \quad (19 a)$$

où  $\gamma$  = coefficient, entre 0,16 et 0,23, suivant l'état des parois des tuyaux, présence des rivetages, etc.

b) La formule abrégée de KUTTER,

identique, aux coefficients près, à celle de BAZIN :

$$c = \frac{100\sqrt{R}}{m + \sqrt{R}} = \frac{100\sqrt{D}}{2m + \sqrt{D}} \quad (19 b)$$

un coefficient  $m = 0,35$  se rapportant aux *tuyaux usagés*, les seuls qui entrent en ligne de compte, chaque conduite étant infailliblement condamnée de rentrer tôt ou tard dans cette catégorie.

c) La formule de DARCY

Celle-ci établit une relation entre  $c$  et le diamètre :

$$\frac{1}{c^2} = 0,0002535 + \frac{0,00000647}{D} \quad (19 c)$$

Il appartient à l'ingénieur de faire le choix entre ces formules pour chaque cas déterminé. Le tableau VII renseigne d'une façon rapide sur la valeur de  $c$  d'après les formules de BAZIN (avec  $\gamma = 0,16$ ) et KUTTER (avec  $m = 0,35$ ).

TABLEAU VII  
Coefficients  $c$  d'après BAZIN et KUTTER

D	c		D	c	
	BAZIN	KUTTER		BAZIN	KUTTER
mètres			mètres		
0,05	35,8	24,2	1,05	66,3	59,4
0,10	43,2	31,1	1,10	66,7	60,0
0,15	47,6	35,6	1,15	67,0	60,6
0,20	50,7	39,0	1,20	67,3	61,0
0,25	53,1	41,7	1,25	67,6	61,5
0,30	54,9	43,9	1,30	67,9	62,0
0,35	56,4	45,8	1,35	68,2	62,4
0,40	57,7	47,5	1,40	68,4	62,8
0,45	58,9	48,9	1,45	68,7	63,3
0,50	59,9	50,2	1,50	69,0	63,7
0,55	60,7	51,4	1,55	69,2	64,0
0,60	61,5	52,5	1,60	69,4	64,4
0,65	62,2	53,5	1,65	69,7	64,8
0,70	62,9	54,4	1,70	69,9	65,1
0,75	63,5	55,3	1,75	70,1	65,4
0,80	64,1	56,1	1,80	70,2	65,8
0,85	64,6	56,8	1,85	70,4	66,1
0,90	65,1	57,5	1,90	70,6	66,4
0,95	65,5	58,2	1,95	70,8	66,7
1,00	65,9	58,8	2,00	70,9	67,0

Lorsque la conduite est constituée par plusieurs tronçons de diamètres différents, on déterminera pour chaque tronçon de diamètre  $D$  et longueur  $l$  la valeur  $c$  et le calcul de  $T$  s'effectuera avec une valeur moyenne :

$$c = \sqrt{\frac{\sum_{r=1}^{r=n} \frac{l_r}{D_r^5}}{\sum_{r=1}^{r=n} \frac{l_r}{c_r^2 D_r^5}}} \quad (20)$$

5. —  $\mu$  = rapport entre la perte de charge totale (frottement, changement de direction et de section) et la perte de charge provenant seulement du frottement dans un tuyau rectiligne.

Si la perte de charge provenait seulement du frottement dans un tuyau d'axe rectiligne, elle s'exprimerait par la formule :

$$Y_1 = \frac{64 Q^2}{\pi^2 c^2} \int \frac{dl}{D^5}$$

Les calculs seraient toutefois fort incomplets si l'on ne tenait pas compte des divers facteurs majorant la valeur de  $Y_1$ . C'est pourquoi nous écrivons, pour tenir compte de toutes les pertes de charge réunies :

$$Y = \mu \frac{64 Q^2}{\pi^2 c^2} \int \frac{dl}{D^5}$$

Il est évident que la valeur de  $\mu$  dépend en premier lieu de l'aménagement, de l'assemblage des tuyaux et de la configuration du terrain et ne peut être calculée que pour chaque cas spécial.

On évaluera donc pour le premier calcul de  $T$  la valeur de  $\mu$  à environ  $1,10 \div 1,25$ . Une fois les diamètres calculés sur cette base, l'on déterminera les pertes de charge spéciales

$$Y_2 = \xi_2 \frac{U^2}{2g}$$

$$Y_3 = \xi_3 \frac{U^2}{2g}$$

pour les changements de section, de direction, les vannes, etc. Il résulte alors pour  $n$  causes de perte de charge :

$$\mu = 1 + \frac{\sum_{r=2}^{r=n} Y_r}{Y_1} \quad (21)$$

a) Changement de diamètre.

La valeur de  $\xi_2$  pour le cas de rétrécissement plus ou moins brusque de section s'exprime par la formule

$$\xi_2 = \left( \frac{D_r^2}{\alpha D_{r-1}^2} - 1 \right)^2 \quad (22)$$

où  $\alpha$  est un coefficient voisin de 0,6.

b) Changement de direction.

Cette perte de charge est à prendre en considération pour les angles dans le plan vertical aussi bien que horizontal.

En désignant par  $\omega$  l'angle de centre du raccord courbé et par  $\rho$  le rayon de courbure de l'axe de ce raccord, cette perte de charge se traduit par

$$\xi_3 = \left[ 0,431 + 1,847 \left( \frac{D}{2\rho} \right)^{\frac{7}{2}} \right] \frac{\omega}{90^\circ}$$

Pour des valeurs de  $\frac{\rho}{D} > 5$ , telles qu'elles se rencontrent souvent en pratique, la valeur de  $\xi_3$  devient insignifiante et peut être négligée.

c) Vannes, obturateurs, cône d'entrée, etc.

On trouvera des indications au sujet de ces pertes de charge p. ex. chez FORCHHEIMER (1). Pour les calculs définitifs, il est toujours plus sûr de se renseigner directement auprès des maîtres dont on utilisera les organes obturateurs.

6. —  $k$  = coefficient de travail du métal en  $t/m^2$ .

Ce coefficient dépend essentiellement de la qualité du métal prévue, il est donc une donnée constructive.

(1) *Hydraulik*, p. 236-240.

Pour le fer ordinaire, l'on utilise généralement  $k = 6000 \div 8000 \text{ t/m}^2$ , mais la tendance est actuellement vers les chiffres plutôt supérieurs et qui atteignent, pour l'acier *Siemens-Martin*, la valeur de  $k = 15000 \text{ t/m}^2$ . Il est toutefois à remarquer qu'un pareil taux admissible élevé, implique un calcul absolument complet et rigoureusement exact de la conduite sollicitée par les combinaisons les plus défavorables de toutes les actions auxquelles les divers accidents de service peuvent la soumettre.

#### 7. — $\varphi$ = rendement de la rivure ou soudure.

(Ce coefficient est le rapport de la section de résistance effective à la section non affaiblie par les trous des rivets ou par la soudure).

En ce qui concerne les conduites rivetées, les prescriptions en vigueur dans les différents Etats déterminent les dimensions à maintenir. Ainsi, si le diamètre  $d$  des boulons est fixé à

$$d = 6 \sqrt{e} \quad \text{mm}$$

où  $e$  = épaisseur de la tole, et si l'écartement des boulons est de

$$d + 21 \quad \text{mm},$$

il s'ensuit que la résistance se trouve réduite dans le rapport

$$\frac{42}{42 + d} \quad (\text{pour l'acier})$$

et la valeur de  $\varphi$  devient :

$$\varphi = \frac{42}{42 + 6 \sqrt{e}} \quad (23)$$

On voit donc que  $\varphi$  est ici fonction de l'épaisseur de paroi  $e$  que l'on ne connaît pas *a priori*. On introduira donc dans les calculs une première valeur de  $\varphi$  évaluée  $\sim 0,75$  que l'on corrigera après avoir obtenu une valeur approchée de  $D$ , donc aussi de  $e$ .

Pour les tuyaux soudés,  $\varphi$  oscille entre 0,9 et l'unité, selon la qualité de la soudure. Les tuyaux sont soudés dans le sens de la longueur, c'est donc cette soudure qui est soumise à la plus grande fatigue.

Mais, étant faite dans l'usine, elle peut être exécutée dans les meilleures conditions de réussite uniforme par des machines perfectionnées. D'autre part, en donnant à la soudure une surface de contact supérieure à l'épaisseur de la tôle, l'on réalise facilement et d'une façon tout à fait certaine un coefficient  $\varphi$  égal à l'unité. C'est là, avec les meilleures qualités hydrauliques, un avantage très appréciable des tuyaux soudés par rapport à ceux rivetés, meilleur marché par unité de poids, mais forcément beaucoup plus lourds.

#### 8. — $\lambda$ = influence du coup de bélier.

Une conduite forcée desservant un aménagement industriel doit nécessairement être pourvue d'un organe régulateur de pression en cas de variation du régime de charge, et à plus forte raison, pour le cas de fermetures et ouvertures plus ou moins brusques. Une pareille installation assurant la constance de pression dans les conduites forcées permet de diminuer notablement la valeur à attribuer au coefficient statique de surpression  $\lambda$  due à l'effet dynamique du coup de bélier : le résultat est une conduite beaucoup plus légère, ou, à poids égal, de diamètre plus grand.

Le choix du système de régulateur dont il existe des modèles d'une efficacité absolument certaine est de la plus haute importance pour le calcul de la conduite forcée. En effet, plus le modèle choisi est perfectionné, plus dans certaines limites, la valeur de  $\lambda$  pourra être fixée voisine de l'unité.

Par principe, le souci de l'ingénieur sera celui d'assurer à la conduite une pression intérieure aussi stable que possible. Les chocs dynamiques provenant des coups de bélier sont un formi-

dable agent de dislocation. C'est pourquoi il convient de faire travailler chaque organe de l'aménagement uniquement dans les conditions qui lui sont particulières. Le rôle de la conduite forcée ne devrait être que celui de subir des pressions statiques. Les chocs dynamiques sont du ressort des régulateurs qui s'acquittent du reste parfaitement de cette tâche en ne laissant subir à la conduite que des oscillations de pression presque imperceptibles.

Le prix d'achat des régulateurs n'entre pas en considération vis-à-vis de l'économie qu'ils laissent obtenir dans le poids de la conduite, économie qui peut se chiffrer par une fraction notable de cet article souvent le plus important du devis de l'aménagement entier. Parmi ces régulateurs, les déflecteurs et les vannes compensatrices occasionnent une légère perte d'eau dont il est parfois avantageux de tenir compte dans la valeur du rendement mécanique de l'usine. En effet, ces pertes sont inhérentes au système d'exploitation, elles concernent la partie mécanique de l'usine et il serait peu logique d'en prendre prétexte pour grever sérieusement le budget de la conduite.

L'installation du régulateur de pression de la conduite est donc absolument indispensable. Celui-ci limite la pression statique à une valeur maximum que l'on peut se fixer sur la base des données des constructeurs.

Nous ajouterons qu'il est indispensable de contrôler les surpressions qui se produisent lors des manœuvres des vannes, le régulateur étant supposé hors service. Ces surpressions se déterminent facilement sur la base des remarquables travaux de DE SPARRE, ALLIEVI, etc., expérimentalement vérifiés et réunis dans l'ouvrage bien connu de MM. CAMICHEL, EYDOUX et GABRIEL (1).

Nous ne voyons pas d'inconvénient à ce que le taux de travail du métal de la conduite calculé sur ces bases, dépasse les limites admises pour atteindre une fraction de la limite d'élasticité, les formules précitées tenant grandement compte de divers phénomènes d'ouvertures et fermetures qui ne se produiront certainement pas précisément à l'instant de la défaillance du régulateur.

Enfin, nous pensons qu'il est toujours prudent de vérifier qu'en cas d'ouverture ou fermeture brusques accidentelles (obstruction du jet unique ou bien éclatement au raccord de l'unique turbine), le régulateur toujours supposé hors service, les fatigues du métal restent bien au-dessous de la limite de rupture.

Un pareil examen n'a rien de commun avec le cas où la conduite est calculée au taux de fatigue admissible pour la fermeture pratiquement instantanée, conception qui ne conduit qu'à un important gaspillage de métal.

Les deux examens ci-dessus permettent dans beaucoup de cas de fixer  $\lambda$  à une valeur techniquement sûre, notamment là où la perfection des régulateurs tendrait à suggérer un chiffre trop faible et dangereux dans les suites qu'il est du devoir de l'ingénieur de prévoir.

#### 9. — $z$ = Rapport du poids de la conduite toute posée au poids fictif exprimé en fonction du diamètre et de l'épaisseur de paroi.

La valeur de ce rapport dépend grandement du procédé d'assemblage des tronçons et surtout de la présence de rivetages.

On exécute les premiers calculs avec une valeur approchée, environ

$$z = 1,15 \text{ pour tuyaux soudés}$$

$$z = 1,25 \text{ pour tuyaux rivetés.}$$

et l'on calcule, une fois  $D$  établi, le poids  $P'$  de toutes les jointures et rivetages. En désignant alors par  $P$  le poids de la con-

(1) « Etude théorique et expérimentale des coups de bélier », Toulouse, 1919.

duite exprimé en fonction du diamètre et de l'épaisseur de paroi, la valeur plus exacte de  $Z$  sera :

$$z = 1 + \frac{P'}{P}$$

qui est presque indépendante de la valeur du diamètre et n'aura plus besoin d'être modifiée lors d'un calcul ultérieur éventuel.

10. —  $p$  = poids spécifique du métal en  $t/m^3$ .

$p$  est une valeur constante et peut varier, suivant la qualité du métal employé entre

$$p = 7,5 \div 8,10,$$

la valeur usuelle étant  $7,86 t/m^3$ .

11. —  $f$  = prix de la tonne de la conduite toute posée.

Cette valeur dépend des conditions du marché, du coût des matériaux de construction, de la main-d'œuvre et, évidemment, de l'aménagement projeté. Dans les conditions actuelles d'après guerre, la valeur de  $f$  peut être comprise entre 300 et 600 francs-or par tonne de conduite toute posée, y compris scellements, ancrages, etc.

12. —  $A$  = coût du kWh produit.

La valeur de  $A$  dépend des frais engagés pour l'aménagement y compris la partie mécanique, mais à l'exclusion des conduites forcées. Elle dépend également du nombre des kWh produits.

Il est indispensable de faire une première évaluation de  $A$  sur la base d'aménagements similaires, calculer le diamètre, la puissance et établir un devis provisoire. En divisant ensuite le coût total de l'aménagement (à l'exclusion des conduites) par le nombre des kWh, l'on obtient une nouvelle valeur de  $A$  dont on tiendra compte lors du deuxième calcul de  $T$ .

Les données que l'on trouve généralement dans la littérature se rapportent au coût du kW permanent. Après déduction des frais présumés pour la conduite, l'on peut donc rapporter ces chiffres aux heures de fonctionnement de l'usine par année.

Suivant une communication de M. l'ingénieur KOROWINE, le prix du kW permanent est actuellement compris dans les limites  $400 \div 1800$  francs-or/kW permanent, le premier chiffre se rapportant aux très grandes installations sous hautes chutes et le deuxième aux chutes moyennes établies dans des conditions plutôt défavorables.

Le coût du kW permanent ainsi évalué, l'on peut prendre la valeur de  $A$  dans la table VIII en regard du nombre d'heures d'exploitation par année.

La valeur de  $\left(\frac{v}{i} - A\right)$  doit être positive; dans le cas contraire, l'aménagement projeté conduit à un échec financier. Il

est donc toujours avantageux de comparer la valeur de  $A$  avec le quotient  $\frac{v}{i}$  que l'on trouve dans la table X.

13. —  $v$  = prix de vente du kWh.

Cette valeur dépend entièrement des conditions d'aménagement, d'exploitation, de concurrence et, en dernier lieu, des bénéfices que l'on désire réaliser sur les capitaux engagés. Elle dépend donc aussi bien du prix de revient du kWh de l'aménagement, que de la possibilité d'acquiescer le marché, d'éliminer la concurrence et du prix-limite que les particuliers obtiendraient en réalisant des petites installations thermiques.

Dans les conditions actuelles, la valeur de  $v$  peut être comprise dans les limites

$$v = 0,04 \div 0,25 \text{ francs-or/kWh}$$

14. —  $i$  = taux d'intérêt et d'amortissement.

S'il s'agit d'une concession, cette valeur dépend grandement de la durée de concession et des taux-bénéfices pour les capitaux du marché.

Le tableau IX (KYSER) indique les taux de réparation et de dépréciation des divers éléments de l'aménagement.

TABLEAU IX  
Taux de Réparation et de Dépréciation d'après KYSER.

OBJETS	Réparations SERVICE	Dépréciation	TOTAL
Bâtiments, fondations massives...	1-1,5	1-1,5	2-3
Bâtiments, cheminées .....	1,5-2,0	2	3,5-4
Constructions sous l'eau et sous sol	0,5-1	0,5-1	1-2
Pompes, conduites sous pression..	2-2,5	8-10	10-12,5
Turbines hydrauliques.....	1-1,5	3-4	4-5,5
Vannes, châteaux d'eau, écluses...	3-4	3	6-7
Machines électriques (courant continu).....	2	5	7
Machines électriques (courant alternatif) .....	1,5-2	5	6,5-7
Transformateurs .....	2	4	6
Accumulateurs .....	5	10	15
Tableaux, distribution, appareillage .....	2,5-3	7,5	10-10,5
Conducteurs intérieurs .....	2	5	7
Conducteurs de transport aérien..	1,5-2	2-2,5	3,5-4,5
Isolateurs .....	5	5	10
Poteaux en bois non imprégnés...	15	20	35
Poteaux en bois imprégnés.....	2-2,5	5-6	7-8,5
Poteaux en fer .....	2-2,5	5	7-7,5
Poteaux en béton armé .....	1-1,5	2	3-3,5
Réseaux, câbles.....	0,5-1,0	2-3	2,5-4

TABLEAU VIII

Valeurs de  $A$  en fonction du prix de première installation du kW permanent (conduite exclue) et du nombre d'heures de fonctionnement de l'usine par année.

HEURES PAR ANNÉE	FRAIS DE PREMIÈRE INSTALLATION EN francs-or PAR kW permanent								
	400	500	600	700	800	1000	1200	1500	1800
500	0,800	1,000	1,200	1,400	1,600	2,000	2,400	3,000	3,600
800	0,500	0,625	0,750	0,875	1,000	1,250	1,500	1,875	2,250
1000	0,400	0,500	0,600	0,700	0,800	1,000	1,200	1,500	1,800
1200	0,333	0,417	0,500	0,583	0,666	0,833	1,000	1,250	1,500
1500	0,267	0,333	0,400	0,467	0,533	0,666	0,800	1,000	1,200
1800	0,222	0,278	0,333	0,389	0,445	0,555	0,666	0,833	1,000
2000	0,200	0,250	0,300	0,350	0,400	0,500	0,600	0,750	0,900
2500	0,160	0,200	0,240	0,280	0,320	0,400	0,480	0,600	0,720
3000	0,133	0,166	0,200	0,233	0,266	0,333	0,400	0,500	0,600
4000	0,100	0,125	0,150	0,175	0,200	0,250	0,300	0,375	0,450
5000	0,080	0,100	0,120	0,140	0,160	0,200	0,240	0,300	0,360
6500	0,0615	0,0768	0,0923	0,1076	0,1291	0,1537	0,1845	0,231	0,246
8760	0,0456	0,0572	0,0685	0,080	0,0913	0,1142	0,137	0,1712	0,2055

En moyenne, on peut compter pour :

a) Entretien et réparations.....	2,5% à 3,5%
b) Personnel de service .....	2 % à 4 %
c) Assurance.....	0,5%
d) Intérêt du capital de roulement .....	1 %
e) Intérêt du capital de l'aménagement .....	7 % à 14 %
f) Amortissement .....	2 % à 3 %

Par conséquent, la valeur de  $i$  peut varier dans les limites

$$i = 0,15 \div 0,25.$$

En cas d'appui de l'Etat, dotations, subventions, participation des municipalités, cette valeur peut s'abaisser exceptionnellement jusqu'à 4 à 6%.

Un moyen immédiat de se rendre compte si l'aménagement projeté s'annonce sous des auspices favorables en ce qui concerne le côté économique, est de comparer les valeurs  $\frac{v}{i}$  avec  $\Lambda$ .

La différence  $\left(\frac{v}{i} - \Lambda\right)$  doit être *positive*. Le tableau X renseigne sur les valeurs  $\frac{v}{i}$  pour les différents prix de vente du kWh et les différentes valeurs du taux d'amortissement.

### § 3. — Exemple numérique.

Comme exemple numérique, nous justifierons la valeur  $T = 500$  assumée pour la conduite traitée au ch. II, § 5 et au ch. III, § 4.

La conduite est d'une longueur  $L = 500$  m et la charge statique  $H = 353,55$  m.

$$\left. \begin{aligned} D_0 &= \sqrt[7]{\frac{T}{98,18}} \\ D_1 &= \sqrt[7]{\frac{T}{y_1}} = \sqrt[7]{\frac{T}{\frac{1}{2}(98,18 + 209,43)}} \\ D_2 &= \sqrt[7]{\frac{T}{y_2}} = \sqrt[7]{\frac{T}{\frac{1}{2}(209,43 + 353,55)}} \end{aligned} \right\}$$

Pour déterminer ces diamètres, il est donc nécessaire d'établir la valeur de la « constante »

$$T = \frac{5}{2} \frac{s q Q^3 (v - \Lambda i)}{w t f i}$$

que nous avons fixée à 500 dans l'exemple numérique traité plus haut.

Parmi les termes entrant dans la composition de  $T$  figurent plusieurs que l'on peut immédiatement fixer d'une manière définitive et qui ne subiront aucune variation dans le cours des calculs. Ce sont, avec leur valeur assumée :

$$\left. \begin{aligned} Q &= 5,26 \text{ m}^3/\text{sec} \\ a &= 3000 \text{ heures/année} \\ b &= 0,80 \\ k &= 12000 \text{ t/m}^2 \\ p &= 7,80 \text{ t/m}^3 \\ \varphi &= 0,90 \\ z &= 1,20 \\ f &= 3000 \text{ Francs/tonne} \\ v &= 0,0794 \text{ Francs/kWh} \\ i &= 0,20 \end{aligned} \right\}$$

TABLEAU X

Quotients  $\frac{v}{i}$

$i$	$v$ EN Francs-or									
	0,04	0,05	0,06	0,075	0,08	0,10	0,125	0,15	0,20	0,25
0,04	1,00	1,25	1,50	1,875	2,00	2,50	3,125	3,75	5,00	6,25
0,05	0,80	1,00	1,20	1,500	1,60	2,00	2,50	3,00	4,00	5,00
0,06	0,666	0,8235	1,00	1,250	1,333	1,67	2,08	2,50	3,33	4,17
0,08	0,500	0,625	0,750	0,9375	1,000	1,25	1,5625	1,875	2,50	3,125
0,10	0,400	0,500	0,600	0,750	0,800	1,00	1,25	1,500	2,00	2,50
0,12	0,333	0,41625	0,500	0,625	0,666	0,8325	1,04	1,25	1,666	2,08
0,15	0,267	0,333	0,400	0,500	0,533	0,666	0,833	1,00	1,333	1,666
0,18	0,222	0,277	0,333	0,417	0,444	0,555	0,695	0,833	1,111	1,388
0,20	0,200	0,250	0,300	0,375	0,400	0,500	0,625	0,750	1,000	1,250
0,22	0,1815	0,227	0,273	0,341	0,364	0,455	0,568	0,682	0,908	1,135
0,25	0,160	0,200	0,240	0,300	0,320	0,400	0,500	0,600	0,800	1,000

La subdivision de la conduite, le nombre  $n$  étant supposé fixé, ne dépend que de  $H$ . Le nombre  $n$  ayant été déterminé :  $n = 2$ , les longueurs des tronçons ont été trouvées :

$$\left. \begin{aligned} l_0 &= 138,85 \text{ m} \\ l_1 &= 157,33 \text{ m} \\ l_2 &= 203,82 \text{ m} \end{aligned} \right\} \begin{aligned} &\text{(En pratique, cette subdivision ne se fera} \\ &\text{jamais analytiquement, mais par le moyen} \\ &\text{de la construction (Fig. 23) assurant des résultats} \\ &\text{immédiats).} \end{aligned}$$

alors que les charges statiques aux points de subdivision de la conduite sont :

$$\left. \begin{aligned} h_0 &= 98,18 \text{ m} \\ h_1 &= 209,43 \text{ m} \\ h_2 &= 353,55 \text{ m} \end{aligned} \right\} \begin{aligned} &\text{(En pratique, ces charges ne seront jamais} \\ &\text{calculées, mais on les obtient immédiatement} \\ &\text{en utilisant l'abaque figure 11.)} \end{aligned}$$

Ceci acquit, il ne reste qu'à fixer la valeur des diamètres :

Il nous reste donc à fixer des valeurs approchées pour les quatre coefficients suivants :

$$\left. \begin{aligned} c &= 60 \\ \mu &= 1,10 \\ \lambda &= 1,10 \\ A &= 0,25 \text{ Francs/kWh} \end{aligned} \right\}$$

Nous calculons ainsi :

$$q = \frac{64 \mu}{\pi^2 c^2} = 0,0019814$$

$$w = \frac{\lambda}{2 k \varphi} = 0,000050926$$

$$s = \frac{0,736 \cdot 1000}{75} a b = 23552$$

$$t = \pi z p = 29,406$$

$$(v - \Lambda i) = 0,0794 - 0,05 = 0,0294$$



La valeur de T s'obtient donc en première approximation :

T = 5 / 2 \* 23552 \* 0,0019184 \* 5,26^3 \* 0,0294 / (0,000050926 \* 29,406 \* 3000 \* 0,20) = 555,32

Avec cette valeur de T, l'on obtient les diamètres :

D0 = sqrt(7 \* 555,32 / 98,18) = 1,2809 m
D1 = sqrt(7 \* 555,32 / 153,80) = 1,2013 m
D2 = sqrt(7 \* 555,32 / 281,49) = 1,1019 m

Examinons maintenant les modifications que nous devons porter aux valeurs évaluées de c, mu, lambda et A.

a) Valeur de c

En utilisant la formule de KUTTER, l'on obtient :

pour D0 = 1,2809 m c = 61,79
pour D1 = 1,2013 m c = 61,02
pour D2 = 1,1019 m c = 60,00

La valeur moyenne de c s'établit pour toute la conduite par :

c = sqrt((138,85 / 1,2809^5 + 157,33 / 1,2013^5 + 203,82 / 1,1019^5) / (138,85 / 61,79^2 + 157,33 / 61,02^2 + 203,82 / 60^2))

donc

c approx 61 (au lieu de 60)

b) Valeur de mu

En ce qui concerne ce rapport, la conduite étant supposée rectiligne, nous ne tiendrons compte que de la perte de charge résultant du changement de diamètres :

de 1,2809 m à 1,2013 m et
de 1,2013 m à 1,1019 m.

Il résulte :

xi2 = (D0^2 / (0,6 D1^2) - 1)^2 = 0,799
xi2 = (D1^2 / (0,6 D2^2) - 1)^2 = 0,960

donc :

Y2 = 0,799 \* (U0^2 / (2 \* g)) = 0,68 m
Y2 = 0,960 \* (U1^2 / (2 \* g)) = 1,06 m

La perte de charge par frottement étant :

Y1 = g \* Q^2 \* (138,85 / 1,2809^5 + 157,33 / 1,2013^5 + 203,82 / 1,1019^5) = 0,0548 (40,27 + 62,89 + 125,47)

Y1 = 12,53 m,

il s'ensuit :

mu = 1 + (0,68 + 1,06) / 12,53 = 1,14 (au lieu de 1,10)

c) Valeur de lambda

Acceptons dans cet exemple comme suffisant le contrôle du temps de fermeture t impliquant lambda = 1,10.

En utilisant la relation d'ALLIEVI :

t = 0,102 \* (L \* U / H) \* (sqrt(lambda) / (lambda - 1)) = 0,102 \* (500 \* 5,54 / 353,55) \* (sqrt(1,10) / 0,10) = 8,4 sec,

valeur que nous voulons juger acceptable et justifiée par les mesures de protection prises. Nous gardons donc lambda = 1,10.

d) Valeur de A

L'énergie produite annuellement est :

E = s \* Q \* (H - Y) = 23552 \* 5,26 \* (353,55 - 14,27) = 42.031.000 kWh.

Le devis de l'aménagement (conduite forcée exclue) se monte à 11.140.000 Francs. La valeur de A s'établit donc :

A = (11.140.000 / 42.031.000) = 0,265 Francs par kWh (au lieu de 0,25)

Avec ces nouvelles valeurs :

c = 61
mu = 1,14
A = 0,265

nous calculons de nouveau :

q = (64 \* mu) / (pi^2 \* c^2) = 0,0019867 au lieu de 0,0019814
(v - Ai) = 0,0264 au lieu de 0,0294

alors que restent identiques les valeurs de

w = 0,000050926
s = 23552
t = 29,406

En utilisant ces valeurs, T s'obtient cette fois-ci :

T = 5 / 2 \* 23552 \* 0,0019867 \* 5,26^3 \* 0,0264 / (0,000050926 \* 29,406 \* 3000 \* 0,20) = 500

L'on pourrait naturellement renouveler une troisième fois le calcul de T, mais la différence pour nos calculs serait tout à fait négligeable. En effet, en comparant les diamètres obtenus avec T = 500, avec ceux calculés pour T = 555,32, l'on voit qu'une variation de 11% dans la valeur de T entraîne une modification insignifiante des diamètres :

D0 = sqrt(7 \* 500 / 98,18) = 1,2618 m au lieu de 1,2809 m

D1 = sqrt(7 \* 500 / 153,80) = 1,1834 m au lieu de 1,2013 m

D2 = sqrt(7 \* 500 / 281,49) = 1,0855 m au lieu de 1,1019 m