

HYDRAULIQUE

Les Tuyaux multiondes frettés

par G. FERRAND, *Administrateur délégué de la Société Dauphinoise d'Etudes et de Montages, Ingénieur aux Etablissements Bouchayer et Viallet.*

1. — GÉNÉRALITÉS

En matière de construction d'usines hydro-électriques de grandes puissances et de hautes chutes, l'établissement des conduites forcées constitue généralement la partie la plus coûteuse de l'installation. Il est donc naturel de rechercher les solutions économiques.

Or, les moyens dont disposent les constructeurs, obligent le plus souvent l'ingénieur maître de l'œuvre à fractionner en plusieurs conduites, la section totale nécessaire.

Ce fractionnement, s'il procure quelquefois une sécurité et une souplesse d'exploitation plus effectives, constitue une dépense supplémentaire extrêmement élevée.

Pour un débit et un rendement déterminés, deux conduites pèsent plus qu'une seule. Le nombre des tuyaux étant deux fois plus grand oblige à des manutentions deux fois plus importantes,

part, de construire des conduites beaucoup plus légères qu'avec les systèmes de tuyaux habituellement employés.

II. — DESCRIPTION

Les tuyaux multiondes frettés sont essentiellement composés d'un tube, par exemple, en tôle d'acier extra doux soudée au gaz à l'eau, ou en acier sans soudure, comme on en emploie dans les installations courantes. Sur ce tuyau formant paroi, des frettes en acier spécial extra résistant, laminées d'une pièce, sans soudure, sont disposées à intervalles réguliers, et entre deux frettes consécutives, la paroi est légèrement ondulée.

La forme courbe de la paroi permet, avec une épaisseur relativement faible, de constituer des conduites extrêmement résistantes. L'influence des ondulations sur le rendement hydraulique d'une conduite ainsi constituée est pratiquement négligeable.

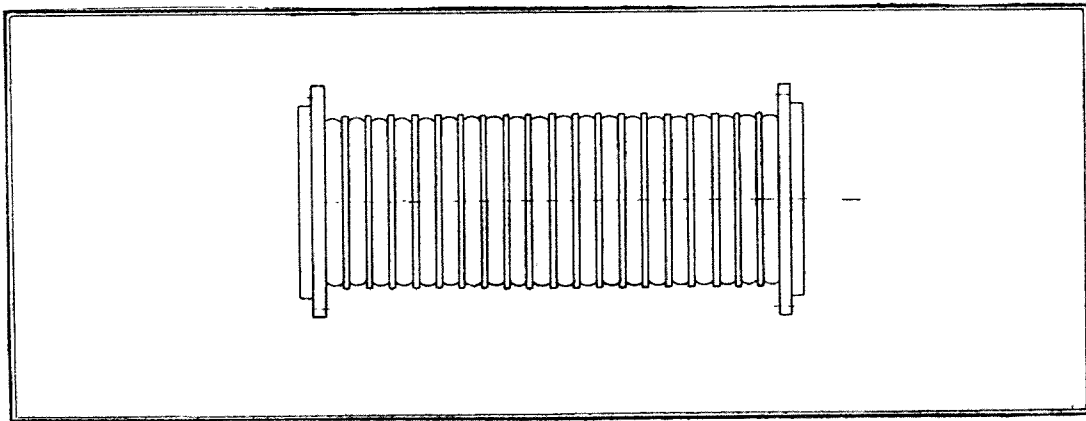


Fig. 1

tant pour le transport que pour le montage. Les travaux accessoires de terrassement et de maçonnerie sont également plus importants.

Pour toutes ces raisons, il est avantageux, au point de vue économique, de réduire au minimum le nombre de conduites d'une installation déterminée.

Les tuyaux multiondes frettés constituent à ce point de vue un perfectionnement extrêmement intéressant.

L'emploi de ce système de tuyaux permet la construction de conduites pratiquement irréalisables avec les moyens actuellement connus et d'obtenir sur les installations courantes, une économie très appréciable. Les tuyaux multiondes frettés, en effet, sont de fabrication très simple et permettent, d'autre

geable. On conçoit, en effet, que le rapport de la profondeur des ondulations au diamètre du tuyau étant très petit par construction, la perturbation apportée par les ondulations dans la circulation normale des filets liquides, n'est pas supérieure à celle résultant des recouvrements des viroles de conduites composées avec des tuyaux rivés.

D'ailleurs, dans le cas où les valeurs relatives de la profondeur des ondulations et du diamètre du tuyau pourraient faire craindre des pertes de charge anormales, il serait toujours possible de disposer à l'intérieur du tuyau une chemise unie en tôle mince.

Des essais effectués en 1926 au laboratoire de la Société Hydro-Technique de France, ont permis de constater que pour les vitesses normalement usitées, les pertes de charge dans un tuyau ondulé étaient de 1,27 fois les pertes de charge dans un tuyau

lisse de même diamètre. Sur les tuyaux essayés, on avait à dessein exagéré la profondeur des ondulations qui était les 54/1000^e environ du diamètre. Des essais comparatifs entre tuyaux rivés et tuyaux lisses ont également fait ressortir que les pertes de charge dans les tuyaux rivés étaient de 1,26 fois celles des tuyaux lisses.

Si, d'autre part, on remarque que la profondeur des ondulations pratiquement admise est voisine de 75/10.000^e du diamètre, on peut en déduire que l'influence des ondulations sur le rendement hydraulique du tuyau multionde est pratiquement négligeable.

III. — CALCUL

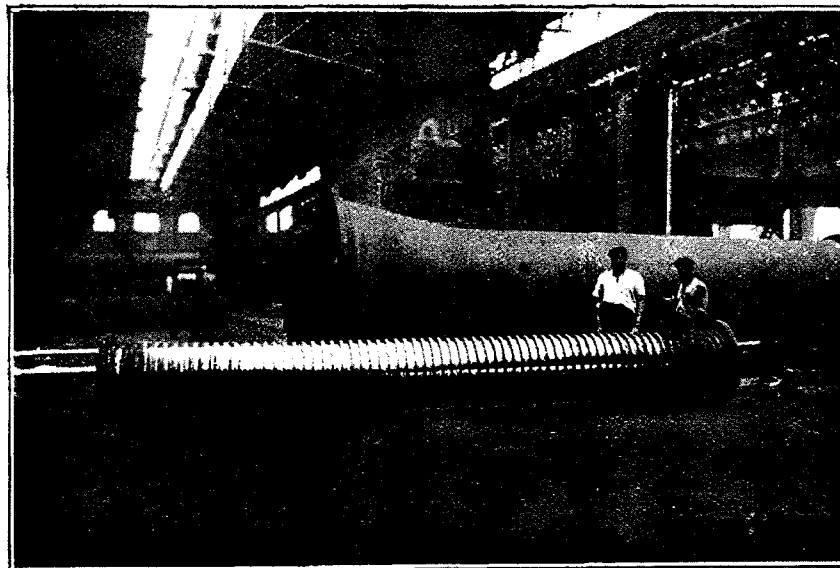
La pratique et les résultats de l'expérience jouent un rôle important dans la détermination de l'écartement à donner aux frettes.

Un autre facteur permet également de fixer la limite supérieure de cet écartement.

Les formules à appliquer sont données ci-après :

Soient :

- D = 2 N le diamètre intérieur du tuyau,
- P la pression intérieure,
- L₁ la distance entre axes de deux frettes consécutives,
- L la longueur de paroi comprise entre deux frettes,
- S la section d'une frette,
- R taux de travail maximum admissible pour la paroi,
- R_f taux de travail maximum admissible pour les frettes,
- r le rayon de courbure méridien de l'ondulation,
- f la flèche de l'ondulation,
- n = N + f le rayon de courbure tangentiel de l'ondulation en son milieu,
- e l'épaisseur de la paroi,
- E épaisseur de la sphère de rayon n capable de la pression P avec une fatigue R,
- R_t le taux de travail tangentiel de la paroi,
- R_m le taux de travail méridien de la paroi,



On se fixe généralement pour la pression normale de marche le taux de travail de la paroi (dans le cas où elle est constituée par un tube soudé au gaz à l'eau, on adopte : R = 8 kg. par m/m²). On connaît P, on connaît e dont la valeur généralement adoptée est :

$$e = \frac{E}{2}$$

On peut donc calculer le rayon de courbure r.

On peut ensuite se fixer la valeur de la flèche ou profondeur de l'ondulation qui, au point de vue du rendement hydraulique, ne doit pas dépasser une certaine fraction du diamètre. De ces valeurs de la flèche et du rayon de courbure, on en déduit la valeur de la corde et, par conséquent, l'écartement des frettes. On vérifie alors que pour ce tracé de l'ondulation, les fatigues correspondant aux allongements, tant méridiens, que tangentiels, ne donnent pas dans la paroi au moment de l'auto-frettage (voir Construction) des valeurs dangereuses.

On a, entre ces diverses constantes, les relations :

$$S = \frac{L_1 (P N - e R)}{R_f}$$

$$P = \frac{1}{N} \left(\frac{S R_f}{L_1} + e R \right)$$

En ce qui concerne la détermination du rayon de courbure méridien, trois cas peuvent se présenter :

Premier cas :

$$e = E \left\{ \begin{array}{l} r = n \\ R_m = R_t = R \end{array} \right.$$

Deuxième cas :

$$e < E; \text{ en posant } M = R e \text{ on a}$$

$$\left\{ \begin{array}{l} r = \frac{p n^2 - n \sqrt{p^2 n^2 - 4 M^2}}{2 M} \\ R_m = R \text{ et } R_m > R_t \end{array} \right.$$

Troisième cas :

$e > E$; en posant $T = R e$ on a :

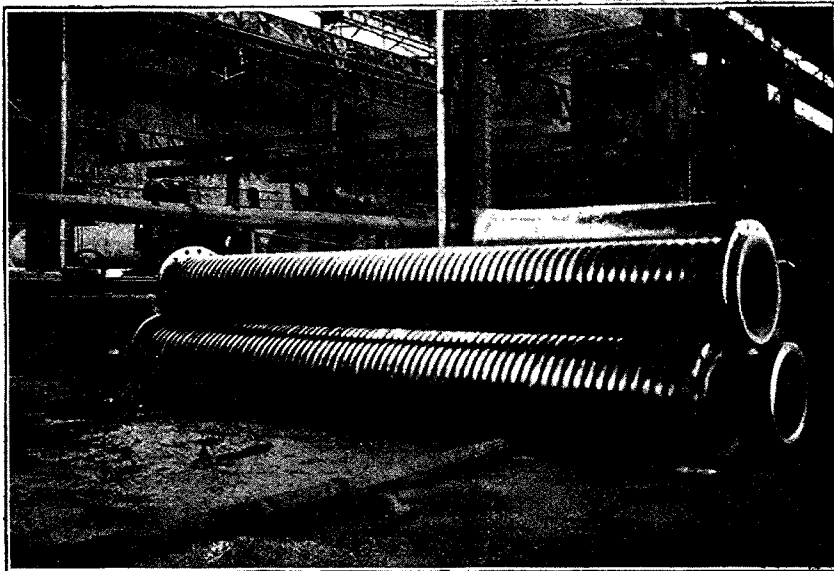
$$\begin{cases} r = n \sqrt{\frac{T}{p n - T}} \\ R_t = R \text{ et } R_m < R_t \end{cases}$$

Les taux des fatigues unitaires méridiennes et tangentielles sont donnés par les formules :

$$R_t = \frac{p}{e} \times \frac{r^2 n}{n^2 + r^2}$$

$$R_m = \frac{p}{e} \times \frac{r n^2}{n^2 + r^2}$$

Les tuyaux multiondes frettés s'emploient dans la construction de toutes tuyauteries, enveloppes et réservoirs cylindriques destinés à être soumis à des pressions intérieures élevées.



Toutefois, l'application la plus intéressante en est faite dans la construction des conduites forcées pour hautes chutes.

Pour l'installation de conduites comportant l'emploi de tuyaux multiondes frettés, on adopte la « méthode suisse » qui consiste, on le sait, à ancrer tous les coudes. Mais, contrairement à ce qui se fait habituellement, l'emploi de joints de dilatation n'est pas nécessaire.

Pour tous les tuyaux d'un même tronçon droit, situé entre deux coudes, on adopte une épaisseur de paroi uniforme et on fait varier, s'il y a lieu, l'écartement des frettes avec la pression. D'après la théorie habituelle de la « méthode française » on sait que la fatigue maximum du métal dans une conduite rectiligne d'épaisseur uniforme ancrée à ses extrémités est de l'ordre de 7 kg. par m^2 pour une variation de température de $\pm 30^\circ C$. Cette valeur limite de la fatigue du métal ne sera jamais atteinte, car les ondulations assurent à la conduite une grande élasticité dans le sens longitudinal et permettent de supprimer, en toute quiétude, les joints de dilatation, organes toujours coûteux et délicats.

IV. — CONSTRUCTION DES TUYAUX MULTIONDES FRETTÉS

La construction des tuyaux multiondes frettés est des plus simple et repose sur le principe de l'auto-frettage.

Le tuyau paroi est exécuté par les méthodes habituelles (soudé au gaz à l'eau, étiré sans soudure, etc...).

Les frettes sont introduites sur celui-ci et placées à l'écartement donné par le calcul. Les diamètres du tuyau et des frettes sont établis de telle façon que les frettes se placent à froid sur le tuyau, sans peine et sans recourir à un dispositif spécial; par conséquent, avec un léger jeu que pratiquement on s'attache à diminuer autant que possible.

L'ensemble est placé entre les deux plateaux d'une presse hydraulique d'épreuve et après exécution, aux extrémités, des joints d'étanchéité nécessaires, on soumet progressivement le tuyau à une pression que l'on arrête généralement à deux fois et demie la pression normale de marche. Cette pression maximum s'appelle « pression de frettage ».

Sous l'action de la pression croissante, la paroi s'allonge,

commence d'abord par plaquer contre les frettes, et prend ensuite entre celles-ci la forme d'un arc.

Pendant cette opération de frettage, la limite élastique de la tôle est dépassée et la déformation de la paroi est une déformation permanente. C'est ce principe même (ainsi que nous le verrons plus loin) qui fait que ce mode de fabrication donne automatiquement sur un tuyau qui a résisté à cette opération, un coefficient de sécurité absolument certain de 2,5 par rapport à la limite élastique du métal, ce qui est énorme.

La pression de frettage est maintenue pendant 5 minutes.

Cette phase de la construction des tuyaux multiondes frettés constitue donc une véritable épreuve hydraulique du tuyau avec une surpression de 150 % par rapport à la pression de marche. Elle fournit donc une garantie extrêmement importante. On peut, en effet, avoir l'assurance qu'un tuyau ayant résisté aux épreuves ci-dessus, ne court aucun risque tant que la pression intérieure n'atteindra pas la pression de frettage.

Cela découle des propriétés de l'auto-frettage qui dérivent elles-mêmes de la théorie du déplacement de la limite élastique.

Nous rappelons succinctement cette théorie.

Considérons un prisme de hauteur et de section égales à l'unité; soumettons-le à un effort F parallèle à son axe longitudinal, on constate un allongement $= \frac{F}{M}$.

M désignant le module d'élasticité.

Tant que F est inférieur à la limite élastique E_0 , les allongements élastiques disparaissent avec F . Si F devient égal à $E_1 > E_0$, il apparaît un allongement permanent ω qui ne disparaît pas avec F . Si on supprime F , le prisme déformé et qui a subi un allongement permanent ω , a pour nouvelle limite élastique E_1 , le module d'élasticité M restant le même.

En conséquence, si l'on soumet à nouveau le prisme à des efforts F inférieurs à E_1 , l'allongement z sera encore

$$z = \frac{F}{M}$$

d'une série de frettes minces, concentriques, emboîtées avec serrage les unes dans les autres.

Cet état spécial constitue ce qu'on appelle l'auto-frettage.

Dans un tuyau de ce genre, la limite élastique de chaque couche, primitivement égale à E_0 , prend une nouvelle valeur, fonction de la déformation permanente de la couche et par conséquent variable d'une couche à l'autre. Cette nouvelle valeur est évidemment fonction de la pression intérieure dite pression d'auto-frettage ou pression de frettage.

Si, la pression de frettage ayant été supprimée, sans qu'il se produise de nouvel allongement permanent, on soumet à nouveau le tube à une pression intérieure inférieure à la pression de frettage, il ne se produira dans le tube que des déformations élastiques. Si cette nouvelle pression est à nouveau ramenée, sans la dépasser, à la valeur de la pression de frettage, les diverses couches de la paroi travailleront à leur limite élastique.

Si cette pression de frettage était dépassée à nouveau, on constituerait un tube dont les couches extérieures auraient une nouvelle limite élastique. Donc, si la puissance élastique d'un

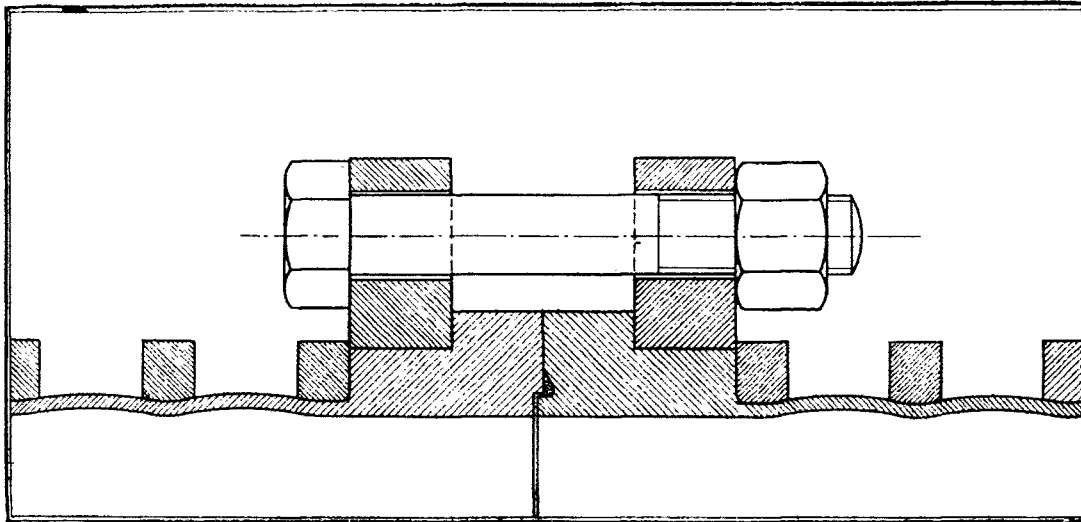


Fig. 2

Principe de l'auto-frettage. — Si dans un tube primitivement homogène, on développe des pressions croissantes, les allongements dans les couches successives, d'abord élastiques, varient en sens inverse du rayon des diverses couches considérées. Ils ont, par suite, leur plus grande valeur à la surface interne du tube.

Pour une valeur suffisante de la pression intérieure, il se produit des déformations permanentes. Elles se produisent au début, dans les couches voisines de la surface interne et progressent vers l'extérieur en même temps que monte la pression intérieure. Pour une valeur encore plus élevée de cette pression, les allongements permanents s'étendent au tube entier.

Ces déformations permanentes vont donc en diminuant de grandeur relative de l'intérieur à l'extérieur. Il s'ensuit qu'après suppression de la pression intérieure, le tube au repos se trouve dans un état d'équilibre tel que chaque couche tend à comprimer celle qui lui est intérieure et à être comprimée par celle qui lui est extérieure.

On obtient donc un tube identique à celui qui serait composé

de tubes est représentée par la pression maximum admissible dans ce tube, on peut dire que :

La puissance d'un tube auto-fretté par pression intérieure est égale à la pression d'auto-frettage.

Assemblage des tuyaux entre eux. — On emploie les moyens habituellement utilisés pour les tuyaux soudés au gaz à l'eau : couvre-joints rivés ou brides. Toutefois, le tuyau fretté étant par destination employé pour les hautes pressions, le deuxième mode d'assemblage est le plus souvent préféré au premier parce que se prêtant plus facilement aux dispositions particulières nécessitées par la valeur élevée de la pression de marche.

A titre d'exemple, la figure 2 indique le joint à bride utilisé pour la construction d'une conduite en tuyaux multiondes frettés de 600 m/m de diamètre intérieur, pour pression normale de marche de 1.050 m.

La paroi en tuyau soudé au gaz à l'eau avait 10 m/m d'épaisseur et les frettes en acier extra dur traité de 30 × 37 étaient

espacées de 100 m/m. Les tuyaux ainsi constitués qui devaient supporter une pression normale de marche de 105 kilos par cm^2 ont été éprouvés en usine à 260 kilos par cm^2 . Une conduite de même diamètre en tuyaux soudés aurait eu 40 m/m d'épaisseur.

La figure 3 indique une jonction à bride étudiée pour une conduite de 1 m. 40 de diamètre et 1.750 mètres de chute.

Possibilité de fabriquer en série. — Ainsi que nous l'avons indiqué plus haut, la fabrication des tuyaux multiondes frettés est d'une grande simplicité.

varier leur résistance avec la hauteur de chute en écartant plus ou moins les frettes.

V. — CONCLUSION

Les indications succinctes qui précèdent permettront au lecteur de se rendre compte des nombreux avantages que l'on trouvera dans l'emploi des tubes de ce système qui jouit également de tous les avantages connus des tuyaux frettés ordinaires à paroi droite.

En dehors de leur faculté de rendre possible la construction

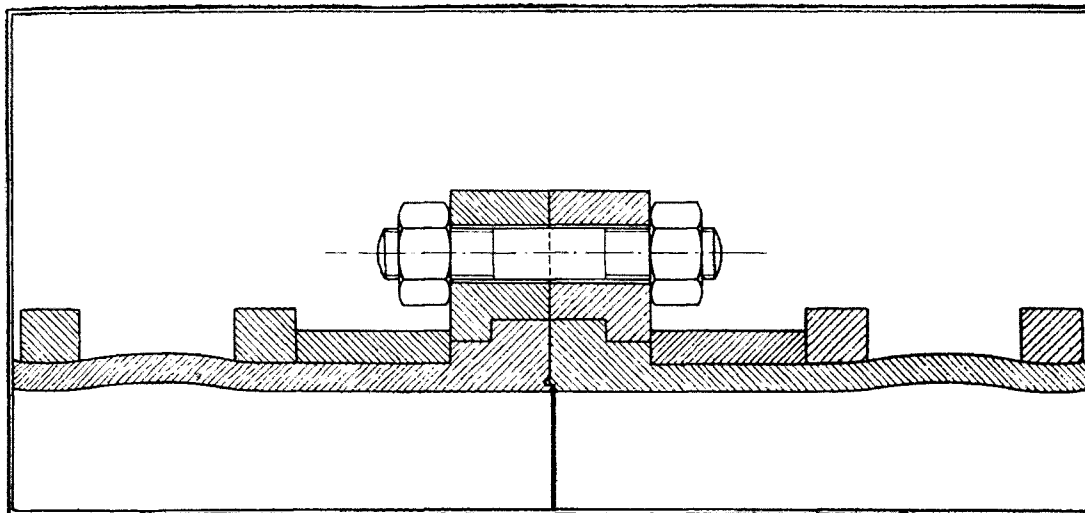


Fig. 3

Un autre avantage du système qui n'apparaît pas immédiatement, c'est qu'il permet la fabrication en série des conduites forcées.

Dans le cas de conduites forcées construites avec des tuyaux ordinaires, les épaisseurs augmentent très rapidement avec la hauteur de chute, si bien que, d'une façon générale, le nombre de tuyaux semblables est insignifiant.

Avec l'emploi de tuyaux multiondes frettés, il est possible d'adopter sur de grandes longueurs de conduites, une même épaisseur de paroi et un même type de frettes. On fait alors

de certaines chutes qui, jusqu'à ce jour, devaient être considérées comme irréalisables, à un prix convenable, par les moyens ordinaires dont disposent les constructeurs, l'emploi de ces tuyaux permet aussi de réaliser une économie importante sur les poids et les prix en usine ainsi que sur les transports, camionnage et montage des conduites forcées courantes ou même, le cas échéant, dans la transformation de canalisations existantes.

A ce double titre, les principes d'utilisation des tuyaux multiondes frettés constituent un progrès réel et marquent une date dans l'évolution de la technique de la Houille blanche.