Utilisation du principe du relèvement de la limite élastique des aciers par écrouissage et vieillissement artificiel à la construction des conduites forcées et économie en résultant *

The raising of elastic limit of steels by strain hardening and artificial ageing Its application to the construction of penstocks Resulting savings

PAR G. FERRAND

PRÉSIDENT-DIRECTEUR GÉNÉRAL DE LA SOCIÉTÉ DAUPHINOISE D'ÉTUDES ET DE MONTAGES - GRENOBLE

L'écrouissage et le vieillissement artificiel des aciers utilisés à l'échelle industrielle dans la construction des conduites forcées relèvent considérablement la limite élastique initiale des aciers utilisés, sans pour cela les rendre fragiles, et permettent de réaliser des économies importantes de métal et de finances tout en améliorant la qualité des produits.

C'est ainsi que, tout en maintenant l'utilisation des tuyaux auto-frettés bien connus, la tendance actuelle, en France, pour les conduites forcées de hautes chutes à grande puissance, est d'utiliser les tuyaux surpressés, les tuyaux surpressés auto-frettés et les tuyaux auto-frettés surpressés, traités, dont le principe de l'écrouissage par traction, suivi d'un traitement thermique de vieillissement artificiel, est à la base de leur fabrication.

Si, par rapport aux procédés utilisés jusqu'à présent, on peut ainsi réaliser, à coefficient de sécurité égal, de sensibles économies sur les poids et les prix, les procédés de construction de ces systèmes de tuyaux, obtenus par pression hydraulique appliquée au dernier stade de leur fabrication, permettent de vérifier le coefficient de sécurité théorique en lui donnant une valeur réelle et contrôlée, au moins égale.

The strain hardening and the artificial ageing of the steels used in the industrial range in the construction of the penstocks are considerably raising the initial elastic limit of the used steels, without giving them brittle for that, and are allowing to realize important savings of metal and money, and in the same time to improve the quality of the products.

Thus, keeping the use of the well-known self-bended pipes, the actual inclination, in France, for the high power high head penstocks, is in using the over-pressured pipes, the over-pressured self-bended pipes, and the treated self-bended over-pressured pipes, the principle of the strain hardening by tension followed with a heat treatment of artificial ageing of which is the base of their manufacture.

If, as to the process used till now, perceptible savings over the weights and the prices may be so realized, with an equal factor of safety, the processes of construction of these systems of pipes, obtained by hydraulic pressure applied at the last stage of their manufacture, are allowing of checking the theoretical factor of safety, giving at the same a real and controlled value, at least equal.

I. — TUYAUX SURPRESSÉS

1. — Principe et réalisation du surpressage.

Les TUYAUX AUTO-FRETTÉS, ainsi que les TUYAUX SURPRESSÉS, sont de plus en plus utili-

sés sur les conduites forcées alimentant les usines hydro-électriques modernes de grande puissance fonctionnant sous de hautes chutes et l'on envisage maintenant, lorsqu'il s'agit de très hautes chutes, d'utiliser leurs dérivés : les « tuyaux surpressés auto-frettés » et les « tuyaux auto-frettés surpressés ».

* Communication au 4^e Congrès International des Fabrications Mécaniques, à Stockholm (4-10 juin 1952).

(Cliché Bouchayer et Viallet, Grenoble.)

CONDUITE FORCÉE DU POUGET.
Chute : 460 m. — Diamètre moyen : 2,600 m. — Puissance : 160.000 ch.

La construction des « tuyaux surpressés » est basée sur le *principe bien connu du relèvement de la limite élastique d'un acier par écrouissage sous traction à froid*.

D'une manière générale, l'écrouissage se traduit par une augmentation de la charge de rupture et par une élévation plus grande encore de la limite élastique. Cette opération est particulièrement avantageuse, puisqu'elle permet d'élever la charge utile d'une pièce sans rendre pour cela son emploi dangereux, car un acier écroui par traction ne devient ni cassant, ni fragile, ni hétérogène, ainsi que l'ont démontré les nombreuses expériences faites à ce sujet. Au contraire, si l'on compare deux aciers de même type (au carbone par exemple) et de même limite élastique, l'un normalisé de nuance plus dure que l'autre, dont la limite élastique a été relevée par écrouissage, on constate dans ce dernier une résilience et un allongement supérieurs à ceux du premier.

Loin de redouter l'écrouissage, on l'utilise systématiquement, dans beaucoup de cas, pour améliorer les propriétés mécaniques des métaux, par exemple dans le béton armé avec des ronds d'acier tractionnés bien au-dessus de leur limite élastique et parfois même jusqu'à la striction.

L'utilisation de cette propriété et son application à la construction de tuyaux destinés à supporter des pressions intérieures élevées a donné naissance aux « tuyaux surpressés ».

Leur mode de construction est le suivant :

On établit un moule en deux pièces ou davantage, dont les dimensions intérieures correspondent aux dimensions extérieures à donner en définitive au tuyau, puis on construit par les moyens usuels un « tuyau soudé » dont les dimensions extérieures sont sensiblement inférieures aux dimensions intérieures du moule. On place le tuyau à l'intérieur du moule et on le soumet, suivant le processus utilisé à la fabrication des « tuyaux auto-frettés », à une pression hydraulique intérieure croissante.

Sous l'effet de cette pression, le tuyau se dilate jusqu'à prendre contact avec la surface intérieure du moule après que la limite élastique de l'acier du tuyau soit atteinte, puis dépassée. La pression obtenue à ce moment est dite « pression de surpressage » ; elle est maintenue une minute au moins, puis ramenée à la « pression de marche » en vue de procéder aux vérifications nécessaires. La pression est ensuite remontée jusqu'à obtenir de nouveau la « pression de surpressage », qui est maintenue pendant au moins 5 minutes.

L'opération de surpressage est alors termi-

née; elle constitue en même temps ce que l'on appelle l'épreuve hydraulique en usines.

Le tuyau ainsi obtenu est nanti d'une limite élastique plus élevée que celle qu'il possédait avant l'opération. Le rapport entre les limites élastiques finale et initiale est d'autant plus grand que la différence entre les dimensions du moule et du tuyau à son origine est elle-même plus grande. On a ainsi fabriqué un élément de conduite capable de supporter en service normal, à coefficient de sécurité égal, une pression intérieure supérieure à celle qu'il pouvait supporter dans son état initial. Le tuyau ainsi obtenu se trouve, du fait même de sa fabrication, éprouvé jusqu'à la limite élastique définitive, et muni d'un coefficient de sécurité réel et contrôlé au moins égal au coefficient de sécurité théorique d'établissement par ailleurs défini par le rapport P/p où :

P = pression de surpressage

p = pression de marche

2. — L'intérêt du surpressage.

L'intérêt économique et pratique des « tuyaux surpressés » est évident. Mais prenons un exemple et constatons d'abord qu'une tôle d'acier donnant $E = 34 \text{ kg/mm}^2$ à son état initial, donne $E = 50 \text{ kg/mm}^2$ après un allongement de 5 %.

Comparons ensuite des tuyaux construits pour supporter une même pression avec un même coefficient de sécurité. En appelant K le poids d'un tuyau normal, le poids d'un tuyau surpressé à 5 % sera $0,68 K$. Si, d'autre part, comme cela est la règle en France pour les conduites forcées, on a calculé les épaisseurs en partant d'un coefficient de sécurité 2,5 par rapport à la limite élastique, sous l'effet de la pression de marche, on applique aux « tuyaux surpressés », lors de leur fabrication, une pression de surpressage qui sera au minimum de 2,5 fois la pression de marche, et cela constitue en même temps une épreuve finale à 2,5 fois la pression de marche.

Les « tuyaux surpressés » se construisent en France, depuis 1937, avec des tôles en acier demi-dur supérieur soudable, et semi-inoxydable au Cr-Cu, répondant à la spécification « Confor E » du cahier des charges de la Société Hydrotechnique de France, régissant en France les règles de l'art pour la fabrication et le montage des conduites forcées en métal.

Les caractéristiques de cet acier sont indiquées aux tableaux I et II ci-dessous :

TABLEAU I

Caractéristiques chimiques.....	Carbone..... $\leq 0,22$ Soufre + phosphore..... $\leq 0,07$ Silicium..... $\leq 0,25$ Manganèse..... $= 0,90$ env. Chrome..... $= 0,40$ env. Cuivre..... $= 0,50$ env.
Caractéristiques mécaniques garanties par le fournisseur	Etat initial (normalisé) : $R \geq 54$ kg/mm ² $E \geq 34$ kg/mm ² $A \geq 20$ % $KUF \geq 6$ kgm/cm ² Pliage à branches parallèles sur 2 épaisseurs. Après écrouissage à 5 % : $R \geq 61$ kg/mm ² $E \geq 50$ kg/mm ² $A \geq 15$ % $KUF \geq 4$ kgm/cm ² Après écrouissage à 5 % et vieillissement artificiel à 250° pendant une heure : $R \geq 67$ kg/mm ² $E \geq 61$ kg/mm ² $A \geq 12$ % $KUF \geq 4$ kgm/cm ²
Caractéristiques mécaniques garanties sur soudure brute ou recuite à 650°.....	$R \geq 54$ kg/mm ² ; $E \geq 34$ kg/mm ² $KUF \geq 6$ kgm/cm ² en pleine soudure et dans les zones de transition. Pliage à branches parallèles sur 3 épaisseurs.

TABLEAU II

VARIATIONS DE LA RÉSILIENGE EN FONCTION DE L'ÉCROUISSAGE ET DE LA TEMPÉRATURE

ÉTAT DE LA TOLE	KUF kgm/cm ²		
	+ 20°	0°	- 30°
Normalisé	9	8	5,5
Après écrouissage à 5 %	8	6,5	4
Après écrouissage à 5 % et traitement thermique à 250° pendant une heure	7,5	6	3,5

La limite élastique obtenue par surpressage peut encore être élevée sensiblement par un traitement thermique de vieillissement artificiel à 250° pendant une heure, ainsi que le montrent les tableaux.

Pour faire ressortir les économies que permettent de réaliser l'emploi des tuyaux surpressés par rapport aux tuyaux soudés normaux, nous avons établi la comparaison entre deux tuyaux de $\varnothing 1,400$ m, longueur 9,000 m, établis pour supporter une pression normale maximum de marche de 455 m, soit 45,5 kg/cm², avec un coefficient de sécurité $c = 2,5$ par rapport à E. L'un est un tuyau soudé normal en acier au Cr-Cu à 54 kg, limite élastique $E = 34$ kg/mm² après normalisation.

FIG. 1. — CARACTÉRISTIQUES DU TUYAU D'ESSAI TS.54.Sp4.T, soumis à un surpressage de 4 %, puis traité à 250° pendant une heure.

Pression de construction	100 kg/cm ²
Pression de marche	40 kg/cm ²
Coefficient de sécurité garanti	2,5

Le poids de ce tuyau est de 7.640 kg. Son prix est de l'ordre de 1.100.000 francs.

L'autre est un tuyau de mêmes caractéristiques initiales que le précédent, mais surpressé à 5 %, puis traité à 250° pendant une heure,

limite élastique élevée à $E = 61$ kg/mm² par surpressage et traitement.

Le poids de ce tuyau est de 4.430 kg. Son prix est de l'ordre de 770.000 francs.

$$\text{Rapport des poids} \dots\dots \frac{4.430}{7.640} = 0,58$$

$$\text{Rapport des prix} \dots\dots \frac{770.000}{1.100.000} = 0,70$$

Parmi les vérifications effectuées sur prototype, citons à titre d'exemple les essais faits sur un tuyau dont on trouvera les caractéristiques sur les figures 1 et 2.

Ce tuyau est constitué de tôles d'acier au Cr-Cu à 54 kg surpressées à 4 %, puis traitées à 250° pendant une heure.

Les premières déformations permanentes de la paroi se sont produites à la pression de 67 kg/cm²; la limite élastique de la tôle était, à l'état normalisé, de 35 kg/mm².

Les premiers contacts de la paroi et des bagues de calibrage ont été obtenus à la pression de 95 kg/cm² (90 kg/cm² prévus); la limite élastique est ainsi devenue : 52,7 kg/mm².

La pression a été portée à 100 kg/cm² pour donner au tuyau un calibrage convenable.

L'allongement extérieur moyen obtenu est de 3,88 %.

L'épaisseur a diminué de 1,9 %.

FIG. 2. — TUYAU D'ESSAI (TS.54.Sp4.T), avant et après l'épreuve de surpressage.

Tuyau surpressé à	4 %
Diamètre intérieur initial	1.361 mm
Diamètre intérieur final	1.415 mm
Allongement diamétral	54 mm

La diminution relative de longueur rapportée à l'augmentation relative de diamètre donne le coefficient : 0,497.

Après surpressage, le tuyau a été découpé en cinq viroles :

Une virole comportant une soudure de ron-deau a été réservée pour des essais ultérieurs.

Les quatre autres viroles ont été assemblées par trois soudures :

- une soudure main atelier,
- une soudure de montage,
- une soudure unionmelt.

Le tuyau ainsi constitué a été ensuite traité à 250°, une heure, puis soumis à une épreuve à 100 kg/cm². Les mesures faites au moyen de jauges à fil résistant ont indiqué une déformation relative permanente au plus égale à un milliè-mè :

- 0,00036 sur la soudure main atelier,
- 0,00040 sur la soudure de montage,
- 0,001 sur la soudure unionmelt.

Des mesures de développement faites au déca-mètre, de chaque côté des soudures, ont donné les allongements suivants :

- 0,00044 sur la soudure main atelier,
- 0,00044 sur la soudure de montage,
- 0,00077 sur la soudure unionmelt,

comparables à ceux donnés par les jauges.

Ces allongements restent nettement inférieurs à la limite élastique apparente définie par l'allongement 0,002.

En dehors du voisinage immédiat des soudu-res, il n'y eut aucune déformation permanente.

Pour un coefficient de sécurité de 2,5 réel et vérifié aux épreuves finales, ce tuyau est donc

(Cliché Photopress. Grenoble.)

CONDUITE FORCÉE D'AUSOIS.

Chute : 875 m. — Diamètre moyen : 1,650 m. — Puissance : 125.000 ch.

susceptible de fonctionner sous une pression de service de 40 kg/cm² et de 50 kg/cm² si le coefficient de sécurité est réduit à 2.

3. — Normalisation des tensions internes.

Par définition, les tuyaux surpressés comportent un *avantage très important* sous l'angle de la *normalisation des tensions internes* sous l'effet des charges extérieures, notamment pour les tensions consécutives aux soudures, comme nous allons le voir.

Pour obtenir un tuyau « surpressé », on part en effet d'un tuyau soudé « normal ». Les tensions internes provoquées au voisinage des soudures nécessitent en général un recuit à 650° C après soudure; mais ce recuit n'est pas toujours possible à faire, soit que les pièces sont trop minces pour supporter cette opération sans déformation, soit que leurs dimensions ne le permettent pas. On n'est jamais certain, d'autre part, que ce recuit, souvent très délicat à effectuer, donne les résultats attendus.

Or, on sait que les tensions résiduelles appliquées dans les pièces après soudure peuvent atteindre des valeurs voisines de la limite d'élasticité. On a pu se demander si l'action des forces extérieures (charges et surcharges), se composant avec les tensions internes, ne porterait pas la fatigue totale de ces pièces à une valeur inadmissible.

Le docteur ingénieur KOMMERELL en Allemagne, Mr. G. FISCH aux Etats-Unis notamment, ont montré, en raisonnant sur le diagramme des contraintes en fonction de l'allongement, que pareilles craintes n'étaient pas fondées.

Des essais sur éprouvettes ayant pour but de réduire systématiquement les tensions internes d'un assemblage soudé, avec mesures comparatives des forces extérieures et des efforts internes, ont été effectués par M. FAUCONNIER, de la Compagnie du Métropolitain de Paris, à l'occasion du renforcement du pont d'Austerlitz. Ceux-ci ont confirmé entièrement l'hypothèse de la normalisation des tensions suivant un processus dont il est rappelé sommairement ci-après les points principaux.

Il s'agissait en définitive de savoir comment les contraintes dues aux forces extérieures, appliquées à un ensemble soudé, se composent avec les tensions dues aux retraits de soudure (tensions internes). Les tensions et les déformations correspondantes sont d'ailleurs liées entre elles, avec cette différence que, dans le premier cas, la déformation subie est la conséquence de la fatigue ou effort unitaire (force/section) résultant des charges appliquées, tandis que, dans le deuxième cas, le retrait se traduit par

un allongement unitaire (retrait/longueur extensible) provoquant une fatigue déterminée.

La tension interne résultant d'une déformation contrariée doit logiquement disparaître si l'on provoque artificiellement une déformation permanente égale ou supérieure à celle qui a été empêchée. Il suffira donc de procéder à un étirage suffisant produisant une déformation permanente égale au retrait contrarié pour obtenir, à la détente, la suppression de toute tension interne due au retrait (cela ne s'applique pas seulement aux tensions internes provenant des retraits de soudure, mais également à toutes tensions internes produites par une cause quelconque).

Les aciers qui se prêteront le mieux à une telle opération seront évidemment des aciers présentant une période plastique au moins égale à 1 % d'allongement sans augmentation des charges. Les retraits, en effet, dépassent rarement ce chiffre; un faible allongement permanent sur la ligne du palier plastique suffira donc à compenser ces retraits.

Ce processus théorique de la normalisation ou écoulement des tensions sous l'effet des forces extérieures a été expérimentalement vérifié.

Les mesures effectuées (métropolitain) ont entièrement confirmé les considérations théoriques. On a été amené à conclure des essais effectués que le processus de réduction des tensions internes sous l'action d'une force extérieure est général et qu'il s'applique d'autant mieux que la période plastique sans augmentation des charges est plus longue.

Tout assemblage soudé, laissant subsister localement des tensions internes, même importantes, et soumis à des charges extérieures (surcharges roulantes par exemple), ne comportera plus, après détente, que des tensions internes réduites, les zones fatiguées ayant subi un allongement permanent compensateur du retrait. Finalement, les tensions seront distribuées dans l'assemblage de façon homogène.

En particulier, dans le cas du viaduc d'Austerlitz, construit en acier extra-doux, la présence possible de tensions internes locales en certains points de l'assemblage ne présente aucun inconvénient quant à la bonne tenue de l'ouvrage et à l'efficacité de son renforcement.

En matière de conduites forcées, les surcharges roulantes sont remplacées par des surpressions appliquées au moment des essais hydrauliques des tuyaux en usines, faits systématiquement sous une fatigue supérieure à la limite élastique pour les tuyaux auto-frettés et surpressés. Dans ces conditions, les tensions résiduelles qui peuvent subsister sont faibles sur les tuyaux auto-frettés-simples (écrouissage $\leq 1\%$) et insignifiantes pour les tuyaux surpressés (écrouissage $> 1\%$, de 2 à 5 % en général).

II. — APPLICATION DU SURPRESSAGE AUX TUYAUX AUTO-FRETTÉS

Pour définir les tuyaux « *surpressés auto-frettés* », il faut tout d'abord rappeler ce que sont les « *tuyaux auto-frettés* » qui, depuis 1925, ont équipé toutes les hautes chutes françaises à grande puissance, plus anciens et plus connus que les « *tuyaux surpressés* ».

Les « *tuyaux auto-frettés* » sont constitués d'un tuyau soudé formant paroi et de frettes rigides en acier laminé sans soudure, traité (trempe et revenu), à limite élastique élevée

(70-105 kg/mm²) ou de frettes souples en fils d'acier câblés à limite élastique très élevée (150 kg/mm²).

Le tuyau-paroi est construit avec un diamètre extérieur légèrement inférieur au diamètre intérieur des frettes, de façon que celles-ci se placent à froid sans difficulté.

Les frettes étant placées sur le tuyau à un écartement convenable, l'ensemble est introduit entre les plateaux d'une presse hydraulique

FIG. 3. — CONDUITES FORCÉES DE L'USINE DE PRAGNÈRES. — Graphique des pressions.

L'usine de Pragnères (France, Hautes-Pyrénées) peut être alimentée soit par la conduite forcée de Cestrède sous une chute brute de 922,70 m, soit par celle de Cap-de-Long sous 1.252,70 m. Le collecteur commun aux deux conduites et la station de pompage différentiel permettent d'utiliser les apports du bassin supérieur du Gave de Pau au remplissage des réservoirs de Cap-de-Long.

d'épreuve. Après exécution aux deux extrémités des joints d'étanchéité nécessaires, on met progressivement le tuyau en pression jusqu'à atteindre et généralement dépasser le double de la pression de marche (pression statique + surpression). Cette pression maximum est appelée « pression de frettage ».

Sous l'effet de la pression croissante, la paroi s'allonge, commence d'abord par plaquer contre les frettes et détermine dans celles-ci des tensions telles qu'une fois l'opération terminée et la pression ramenée à zéro, les frettes sont tendues et la paroi comprimée. La précontrainte ainsi obtenue est analogue à celle que l'on obtient avec des frettes posées à chaud, comme cela se produit sur les tuyaux dits « frettés à chaud ».

Un « *tuyau surpressé auto-fretté* » comprend un tuyau-paroi constitué d'un « *tuyau surpressé* », comme décrit précédemment. Le tuyau-paroi peut être surpressé au préalable, puis auto-fretté ensuite, ou bien surpressé au cours de l'opération d'auto-frettage. Dans ce cas, les frettes remplacent le moule de surpressage et il suffit de prévoir, comme jeu initial entre le tuyau-paroi et les frettes, celui nécessaire à l'obtention du surpressage désiré.

Les tuyaux « *auto-frettés surpressés* » sont des tuyaux « *auto-frettés* » simples à frettes rigides ou des tuyaux « *surpressés auto-frettés* » à frettes rigides dont la paroi et les frettes sont simultanément surpressées.

Ainsi que pour les tuyaux surpressés simples, on place un moule de même nature autour de l'ensemble tel que le jeu entre l'extérieur des frettes et l'intérieur du moule ait la valeur désirée.

La nouveauté du système est que jusqu'alors on avait systématiquement évité d'atteindre la limite élastique des frettes au cours des opérations d'auto-frettage, alors que maintenant on procède systématiquement à l'écrouissage des frettes par traction à froid.

C'est depuis 1951, après les mises au point nécessaires, que l'on a commencé en France la fabrication des tuyaux « *surpressés auto-frettés* » et des « *tuyaux auto-frettés surpressés* » à l'échelle industrielle. La première conduite ainsi construite sera celle de Cestrède, actuellement en fabrication.

L'usine de Pragnères-France (Hautes-Pyrénées) (fig. 3) peut être alimentée soit par la conduite de Cestrède sous une chute brute de 992,70 m, soit par celle de Cap de Long sous 1.252,70 m. Le collecteur commun aux deux conduites et la station de pompage différentiel de Cap de Long permettent d'utiliser les apports du bassin supérieur du Gave de Pau au remplissage des réservoirs de Cap de Long.

La conduite de Cestrède avait été conçue pour fonctionner sous la pression de marche maximum de 1.061,10 m ($922,70 + 15\%$ de surpression).

Le marché imposait des tôles au chrome-cuivre à 54 kg et des frettes à 100 kg/mm². La mise au point constructive des pompes fut achevée après la mise en exécution de la conduite. Elle montra que cette dernière aurait à supporter des surpressions sensiblement supérieures à la surpression uniforme de calcul de 15 %. Il devenait donc nécessaire, soit de doter la station de pompage d'un aménagement spécial avec cheminée d'équilibre déversante, soit de renforcer la conduite de Cestrède et lui permettre de supporter à la partie inférieure une pression de marche de 1.167,70 m.

La première solution était compliquée, coûteuse, d'une efficacité douteuse et entraînait un supplément de travaux de génie civil important à exécuter au-dessus de la cote 1.700, en terrain très accidenté.

La seconde était impossible sans changer la spécification de la fourniture, dont les commandes étaient passées. Il fallait donc trouver une solution qui n'amène aucune modification dans les commandes de matériel déjà faites, ni dans le coefficient de sécurité par rapport à la limite élastique des matériaux pris égal à 2,5.

C'est le procédé de surpressage qui donna la solution du problème.

C'est ainsi qu'en faisant varier le degré de surpressage jusqu'à 2 % pour les tôles (limite élastique portée de 34 à 43 kg/mm²) et 1 % pour les frettes (limite élastique portée de 70 à 78 kg/mm²), on pourra faire supporter à la conduite de Cestrède, en conservant le coefficient de sécurité 2,5, une charge sensiblement supérieure à celle prévue à l'origine.

Les nuances d'acier utilisées pour les frettes à la fabrication des tuyaux « *auto-frettés surpressés* » et leurs caractéristiques sont indiquées aux tableaux III, IV, V et VI ci-après.

Comme pour les tuyaux simplement surpressés, la *limite élastique* de la tôle et des frettes peut encore être *élevée sensiblement* par un traitement thermique de *vieillessement artificiel* à 250° pendant une heure, ainsi que le montrent les tableaux.

Ainsi que cela a été fait pour les tuyaux simplement surpressés, et en vue de faire ressortir les économies que permettent de réaliser l'emploi des tuyaux « *auto-frettés surpressés* » par rapport aux tuyaux simplement « *auto-frettés* », nous avons établi la comparaison suivante entre deux tuyaux $\varnothing = 1,400$ m, longueur 9,00 m, ayant à supporter une pression normale de marche de 455 m, soit 45,5 kg/cm² avec $c = 2,5$ par rapport à E.

Le premier simplement auto-fretté est consti-

(Cliché Alix.)

CONDUITE FORCÉE DU PORTILLON.

Chute : 1.450 m. — Diamètre moyen : 1 m. — Puissance : 54.000 ch.

TABLEAU III

NUANCE D'ACIER AU CARBONE UTILISÉE POUR LA FABRICATION
DES FRETES MONOBLOC LAMINÉES (TREMPÉES ET REVENUES)
SUIVANT LA SPÉCIFICATION « CONFOR F ».

Analyse chimique....	Carbone..... 0,56 env. Manganèse..... 1,20 env. Silicium..... 0,30 env. Chrome..... 0,25 env. Soufre + phosphore $\leq 0,07$ env.
Caractéristiques mécaniques garanties par le fournisseur	Etat initial :
	R $\geq$ 90 kg/mm ² E $\geq$ 70 kg/mm ² A $\geq$ 8 % KUF $\geq$ 4 kgm/cm ²
	Après écrouissage à 2 % :
	R $\geq$ 95 kg/mm ² E $\geq$ 85 kg/mm ² A $\geq$ 7 % KUF $\geq$ 4 kgm/cm ²
	Après écrouissage à 2 % suivi d'un vieillissement artificiel pendant une heure :
	R $\geq$ 100 kg/mm ² E $\geq$ 100 kg/mm ² A $\geq$ 6 % KUF $\geq$ 3 kgm/cm ²

TABLEAU IV

VARIATIONS DE LA RÉSILIANCE EN FONCTION DE L'ÉCROUISSAGE
ET DE LA TEMPÉRATURE DE L'ACIER « CONFOR F ».

ÉTAT DES FRETES	KUF kgm/cm ²			
	+ 18°	0°	- 18°	- 50°
Etat initial (trempées et revenues)	5,7	5,35	5	4,3
Après écrouissage à 2 % ..	5,9	5	4,65	3,65
Après écrouissage à 2 % suivi d'un vieillissement artificiel à 250° pendant une heure	5,35	4,65	4,65	3,65

tué de tôles en acier au Cr-Cu à 54 kg, limite élastique $E = 34$ kg/mm² après normalisation, et de frettes en acier au carbone traitées, limite élastique $E = 70$ kg/mm² après trempe et revenu.

Le poids de ce tuyau est de 4.700 kg. Son prix est de l'ordre de 820.000 fr.

Le second, de mêmes caractéristiques initiales que le premier, mais dont la paroi a été surpressée à 5 % et les frettes à 2 %, le tout ensuite traité à 250° pendant une heure.

Limite élastique de la tôle élevée à 61 kg/mm².

TABLEAU V

FRETES MONOBLOC LAMINÉES EN ACIER AU Cr-Ni
(TREMPÉES ET REVENUES) « CONFOR G ».

Analyse chimique....	Carbone..... 0,31 env. Manganèse..... 0,60 env. Silicium..... 0,3 env. Chrome..... 0,65 env. Nickel..... 2,80 env. Soufre + phosphore $\leq 0,07$
Caractéristiques mécaniques garanties par le fournisseur	Etat initial :
	R $\geq$ 115 kg/mm ² E $\geq$ 105 kg/mm ² A $\geq$ 6 % KUF $\geq$ 5 kgm/cm ²
	Après écrouissage à 2 % :
	R $\geq$ 120 kg/mm ² E $\geq$ 115 kg/mm ² A $\geq$ 5 % KUF $\geq$ 5 kgm/cm ²
	Après écrouissage à 2 % suivi d'un vieillissement artificiel à 250° pendant une heure :
	R $\geq$ 130 kg/mm ² E $\geq$ 130 kg/mm ² A $\geq$ 4 % KUF $\geq$ 4 kgm/cm ²

TABLEAU VI

VARIATION DE LA RÉSILIANCE EN FONCTION DE L'ÉCROUISSAGE
ET DE LA TEMPÉRATURE DE L'ACIER « CONFOR G ».

ÉTAT DES FRETES	KUF kgm/cm ²			
	+ 18°	0°	- 18°	- 50°
Etat initial	5,7	5,35	5,35	5
Après écrouissage à 2 % ..	5,35	4,65	4,65	4,65
Après écrouissage à 2 % et vieillissement artificiel à 250° pendant une heure	4	4	4	4

Limite élastique des frettes élevée à 100 kg/mm².

Le poids de ce tuyau est de 3.400 kg. Son prix est de l'ordre de 720.000 fr.

$$\text{Rapport des poids} \dots \dots \dots \frac{3.400}{4.700} = 0,72$$

$$\text{Rapport des prix} \dots \dots \dots \frac{720.000}{820.000} = 0,88$$

Parmi les vérifications effectuées sur prototype, citons les essais faits sur un tuyau dont

on trouvera les caractéristiques aux figures 4 et 5.

Le tuyau dont il s'agit est constitué de tôles d'acier au Cr-Cu à $E=34$ surpressées à 4 % et de frettes au carbone trempées et revenues à $E=70$ surpressées à 2 %, le tout traité à 250° une heure.

La première opération de fabrication a été le *frettage* à 175 kg/cm^2 après allongement de la tôle à 2 % environ sans déformation des frettes.

La dernière opération a été un *surpressage* à 350 kg/cm^2 . Après celle-ci, on a mesuré les allongements suivants :

2,02 % pour les frettes, 4,64 % pour la paroi.

FIG. 4. — CARACTÉRISTIQUES DU TUYAU PROTOTYPE AUTO-FRETTÉ (TAF.54.Sp4/90.Sp2.T), soumis à une épreuve de surpressage.
Tuyau auto-fretté; tôle à 54 kg, surpressé à 4 %; frettes à 90 kg, surpressées à 2 %; traité.

Pression de construction	306 kg/cm
Pression de marche	122,5 kg/cm ²
Coefficient de sécurité garanti	2,5

FIG. 5. — Tuyau d'essai (TAF.54.Sp4/90.Sp2.T) avant et après l'épreuve de surpressage.

TUYAU surpressé à 4 %

Diamètre intérieur initial.	1.396 mm
Diamètre intérieur final ..	1.454 mm
Allongement diamétral	58 mm

FRETTES surpressées à 2 %

Diamètre intérieur initial.	1.450 mm
Diamètre intérieur final ..	1.480 mm
Allongement diamétral	30 mm

Les premiers allongements de l'enveloppe ont été perçus à la pression de 67 kg/cm^2 ; la limite élastique de la tôle est, à ce moment, de $35,8 \text{ kg/mm}^2$.

Le collage de la paroi aux frettes a débuté entre les pressions de 80 et 85 kg/cm^2 ; les limites élastiques correspondantes sont respectivement $44,3\text{-}47,2 \text{ kg/mm}^2$.

Le premier contact des frettes du tuyau avec les frettes-calibre a été obtenu à 305 kg/cm². La tôle ayant alors un allongement supérieur à 4 %, on peut fixer sa limite élastique à 52 kg/mm², qui correspond à la pression de 93 kg/cm².

La limite élastique des frettes après allongement de 2 %, déduite de ce qui précède, est au minimum de 85 kg/mm².

Après ces opérations, le tuyau a été traité à 250° une heure, puis éprouvé à 320 kg/cm².

Des mesures faites avant et après épreuve, on

a déduit l'allongement des soudures : 0,17 % ; la paroi entre frettes et les frettes ont subi un allongement maximum de 0,04 %. Ces déformations sont inférieures à la limite élastique apparente 0,2 % et la pression 2,5 P correspond bien à 320 kg/cm².

La pression de marche « P » pourrait être prise à 128 kg/cm² (122,5 kg/cm² prévue), contre 83,5 kg/cm² pour un tuyau auto-fretté de mêmes dimensions.

III. — LES RÉPERCUSSIONS MÉCANIQUES DU SURPRESSAGE

1. — Fragilité. — Capacité du travail de rupture.

Les chiffres mentionnés précédemment sont suffisamment éloquentes pour admettre que les tuyaux « surpressés », « surpressés auto-frettés » et « auto-frettés surpressés » sont *exempts de fragilité* à toutes températures.

Remarquons en passant qu'il s'agit ici de conduites forcées dans lesquelles, lorsqu'elles sont en service normal, la température de l'eau véhiculée ne saurait être inférieure à 0° C.

Des températures inférieures ne peuvent se constater sur les conduites que tout à fait exceptionnellement, lorsqu'elles sont vides au moment de très grands froids.

Les marges d'allongement subsistant après écrouissage et après traitement de vieillissement artificiel sont importantes pour l'acier du tuyau proprement dit, donc la capacité de travail de rupture est elle-même importante. Mais, pour les frettes, la limite élastique E se rapprochant de la charge de rupture R, la capacité de travail de rupture est faible. Si, comme cela arrive fréquemment dans certains ouvrages métalliques, il survenait, en un point des frettes, une tension dépassant la limite élastique, une fissure interne pourrait donc s'y produire, alors que, si (R — E) avait été du même ordre que pour la paroi, il y aurait eu là *accommodation* par *déformation rémanente*.

Pour les parties d'un ouvrage travaillant dans des directions variées et parfois inconnues, cette objection est valable. Aussi le surpressage est-il employé uniquement pour les éléments normaux d'une conduite forcée, à l'exclusion des pièces spéciales telles que culottes de distribution ou bifurcations. Là, chaque élément est ancré ou repose sur des berceaux de forme appropriée. Les seules contraintes pouvant s'y produire sont, pour le tuyau :

— Celles provenant de la flexion longitudinale entre appuis et des efforts de cisaillement au bord de chaque appui;

— Celles provenant de la pression de marche et des coups de bélier exceptionnels et accidentels;

— Celles provenant de dépression interne accidentelle;

Et pour les frettes :

— Celles provenant de la pression de marche et des coups de bélier exceptionnels et accidentels.

Le cisaillement provenant des appuis se calcule par des formules connues depuis longtemps. Les tensions résultant de la flexion entre appuis sont un peu spéciales pour les poutres creuses; depuis les travaux de M. l'Ingénieur du Génie maritime THULOUP, en 1928, on sait les calculer.

La forme et l'ampleur des appuis, ainsi que leurs intervalles, sont donc déterminés de façon telle que ces contraintes soient très faibles; la diminution de (R — E) n'a donc aucun inconvénient à cet égard.

L'épreuve hydraulique de contrôle étant poussée jusqu'à la limite élastique réelle, soit deux fois et demie au moins la pression normale de marche, majorée des surpressions pouvant résulter des ondes de fermeture ou d'ouverture (coups de bélier normaux), il en résulte que les contraintes provenant de la pression interne n'atteindront jamais la limite élastique E.

(R — E) n'a donc pas non plus à intervenir pour les tensions provenant de la pression.

Vis-à-vis des *coups de bélier* exceptionnels et accidentels, on est mieux armé encore que pour les conduites non surpressées, d'abord du fait que les tuyaux non surpressés sont éprouvés à 80 % seulement de leur limite élastique, ensuite parce que les surpressions provenant de fermetures instantanées des distributeurs (accidents) sont moindres pour les conduites surpressées que pour les autres. En effet, la dilatation des tuyaux surpressés étant, du fait de leur moindre épaisseur, plus grande que celle des tuyaux

ordinaires, sous l'effet d'une augmentation de pression déterminée, il s'ensuit une *diminution de la valeur de la célérité*, donc du coup de bélier (voir annexe 1).

Une expérience de plus de quarante années en matière de conduites forcées nous permet d'affirmer qu'en cours d'exploitation les pressions accidentelles exceptionnelles qui peuvent se manifester au cours de la vie d'une conduite forcée n'atteignent jamais, en aucun point, le double de la pression maximum normale de marche (pression statique + surpression maximum normale).

C'est d'ailleurs pourquoi on a établi et mis en pratique, en France, depuis 1918, la « Règle d'Or » suivante :

« *La condition nécessaire et indispensable à la stabilité d'une conduite forcée est que les éléments la constituant subissent, aux usines du constructeur, une épreuve hydraulique au moins égale au double de la pression maximum normale de marche (pression statique + coup de bélier maximum normal).* »

En fait, depuis 1918, il n'a été enregistré aucun accident sur les conduites ayant subi de telles épreuves, alors qu'avant 1918, et même après, des ruptures de conduites, dont certaines se sont transformées en catastrophes, ont été enregistrées sur des conduites forcées dont les éléments avaient été éprouvés seulement à 50 % au-dessus de la pression de marche.

En ce qui concerne les dépressions internes, on démontre, par le calcul, qu'une conduite surpressée résiste mieux aux dépressions que la même conduite à l'état ordinaire et qu'un tuyau ordinaire soumis à une pression extérieure s'écrase bien avant que le même tuyau surpressé flambe (voir annexe 2).

2. — Ecrouissage et vieillissement.

On pourrait aussi objecter que tout écrouissage est une cause de vieillissement, mais, dans les tuyaux surpressés, le traitement de vieillissement artificiel constitue, au contraire, une amélioration.

Si le terme « vieillissement » peut être pris

dans un sens péjoratif lorsqu'il s'agit des fabrications anciennes de conduites forcées en aciers extra-doux (tuyaux rivés et tuyaux soudés au gaz à l'eau), il ne saurait être pris dans ce sens lorsqu'il s'agit de la fabrication des conduites forcées modernes utilisant, grâce à la soudure électrique, des aciers beaucoup moins fragiles après vieillissement, et *a fortiori* de la fabrication des conduites surpressées, où l'on utilise des aciers parfaitement résilients à toutes températures.

Mais encore faudrait-il s'entendre sur les conséquences d'un écrouissage sur un acier vieillissable et voir l'usage auquel il est destiné. L'écrouissage est évidemment à prohiber lorsqu'il s'agit d'appareils fonctionnant sous températures élevées (chaudières à vapeur par exemple), mais pour des appareils destinés à fonctionner aux températures humaines (c'est le cas des conduites forcées), il en est différemment. Nous n'avons jamais entendu dire que des ronds à béton écrouis jusqu'à la striction aient été la cause d'accidents sur les ouvrages où ils sont employés.

Aucune rupture de conduites rivées (nous en avons personnellement installé il y a quarante-cinq ans qui se portent toujours bien) n'est, de même, imputable au vieillissement, et cependant certaines de ces conduites de fortes épaisseurs sont fortement écrouies, du fait de leur cintrage à froid et du rivetage non suivis de recuit.

On pourrait dire aussi que le gain obtenu par surpressage, sur la limite élastique, est factice, car on ignore si, par suite des variations de la température ambiante, ainsi que des vibrations, cette limite élastique n'aura pas tendance à revenir à sa valeur primitive.

Les premiers tuyaux surpressés n'ont actuellement que quatorze années d'existence, et en l'absence de références de plus longue durée, nous pouvons dire que, mettant à profit les résultats d'essais anciens faits dans la marine française, dont le but était d'élever la limite élastique des canons au moyen de cycles thermiques comprenant chacun un écrouissage par traction, nous obtenons des tuyaux surpressés traités thermiquement dont la nouvelle limite élastique est absolument stabilisée.

IV. — UNE ÉPREUVE EXCEPTIONNELLE : L'ACCIDENT DE LA CONDUITE D'IZOURT

Nous ne voudrions pas terminer cette partie de notre communication sans parler de la tenue des tuyaux auto-frettés à l'occasion d'accidents survenus avant leur montage et qui montrent leur aptitude à supporter, sans rupture, les chocs les plus violents amenant de profondes

déformations permanentes tant sur le tuyau proprement dit que sur les frettes. En effet, en cours de stockage ou de transport, certains tuyaux ont eu à subir des chocs très violents, par suite d'éboulement ou de chute, sans pour cela, et malgré les importantes déformations

constatées, que l'on ait eu à enregistrer la moindre fissure sur la tôle ou sur les frettes.

D'autre part, nous croyons intéressant de rappeler avec quelques détails un accident inopiné

survenu à la conduite forcée d'Izourt installée à Auzat-France (Ariège).

Cette conduite, en tôle d'acier au Cr-Cu à 54 kg, entièrement soudée à l'arc électrique à

CONDUITE D'IZOURT. (Cliché S.D.E.M. Grenoble.)

Vue montrant la déformation latérale de la conduite.

l'usine et sur place au montage, a été mise en service le 31 décembre 1938.

Etant donné la nouveauté, à cette époque, de l'emploi de l'acier au Cr-Cu à 54 kg sur les conduites forcées et l'importance de la conduite

d'Izourt, fonctionnant sous 465 m de chute brute, $\varnothing$ 1,180 m, épaisseur 14 à 20 mm dans la zone considérée, entre 1.300 et 1.400 m d'altitude, il est bon de mettre en évidence la résistance exceptionnelle de cette conduite, qui s'est,

(Cliché S.D.E.M. Grenoble.)
CONDUITE D'IZOURT.

Vue montrant la conduite suspendue au-dessus de ses supports.

en la circonstance, comportée d'une façon tout à fait remarquable.

Le 24 mars 1939, une forte avalanche de neige vient frapper la conduite dans une direction presque perpendiculaire à son axe, emportant les piliers qui la supportent, la laissant ainsi sans appui, suspendue sur une portée de plus de 100 m, la déplaçant latéralement de 1,50 m en certains points, en la projetant sur des rochers contre laquelle elle se bosselle, et dont la présence limite l'importance du déplacement latéral. Tout cela se passe sans provoquer ni fissure, ni rupture, malgré une surpression intérieure considérable consécutive au choc et malgré que la conduite ait encore continué à fonctionner

dans sa fâcheuse position pendant plusieurs heures.

L'examen du manomètre enregistreur placé à l'usine de Pradières avait permis de constater qu'au moment du passage de l'avalanche il s'était produit dans la conduite un coup de béliet très violent, puisque la pression était passée brusquement de 42 à 61 kg/cm².

On se rendit compte que ce coup de béliet devait provenir d'une part d'une déformation importante sur les tuyaux qui, au moment du choc, avaient violemment heurté le rocher, et, d'autre part, de l'ovalisation momentanée qui s'était certainement produite sur une grande

(Cliché S.D.E.M. Grenoble.)

CONDUITE D'IZOURT.

Vue montrant les supports emportés par l'avalanche.

longueur de la conduite, sous l'effet de la poussée latérale de l'avalanche. Ces deux genres de déformation avaient déterminé une diminution brusque du volume de l'eau contenue dans la conduite et produit le même effet qu'une coupure instantanée du débit. Etant donné la nature du phénomène, il y a tout lieu de supposer que la surpression de 19 kg/cm² enregistrée à l'usine s'était propagée sensiblement en vraie grandeur tout le long de la conduite, introduisant dans celle-ci des efforts supplémentaires importants s'ajoutant aux efforts de flexion et de torsion dus à la poussée de l'avalanche.

On peut, en passant, remarquer que les formules relatives à la flexion ne sont plus applicables quand il s'agit d'une conduite suspendue.

Pour remettre en état la conduite, on l'a d'abord dégagée de tout ce qui la gênait, notamment de certains matériaux qui exerçaient encore sur elle une poussée dans le sens laté-

ral. Après cette opération, elle est revenue d'elle-même, par son élasticité, de 300 mm environ sur la longueur fléchie. On procéda ensuite à son calage dans la zone où les piliers-supports avaient été emportés ou détériorés, de façon à ramener sa génératrice inférieure à sa position initiale. Enfin, à l'aide de crics et de palans, on l'a ramenée à la position exacte qu'elle occupait avant l'accident.

Les déformations des tuyaux qui ne faisaient pas ressortir sur la tôle de points d'inflexion ont été supprimées à froid, par pression intérieure exercée à l'aide d'un vérin hydraulique.

Ces diverses opérations effectuées, les piliers-supports et les massifs d'ancrage remis en état, on procéda à la remise en marche de la conduite, qui reprit son service et qui fonctionne depuis, comme si rien de fâcheux ne lui était advenu.

V. — CONCLUSION

Les conclusions à tirer de ce qui précède s'inscrivent dans le cadre de l'*économie*, de la *sécurité* et de la *qualité*.

L'*économie* de métal et de finances, que l'emploi des « tuyaux surpressés » — qu'ils soient obtenus en partant de « tuyaux soudés » ou de « tuyaux auto-frettés » — permet de réaliser sur l'aménagement des conduites forcées est importante, particulièrement sur les conduites forcées à grande puissance sous haute chute.

L'épreuve hydraulique finale faite jusqu'à la limite élastique réelle et effective des tuyaux dans leur état définitif, en vérifiant en même temps que le coefficient de sécurité réel et effectif est au moins égal au coefficient de sécurité théorique d'établissement, donne sans aucun doute une exceptionnelle garantie de *sécurité*. Cela doit donner aux exploitants des usines hydro-électriques modernes de grande puissance des assurances et des garanties complémentaires, ainsi que des apaisements.

Quelles seraient, en effet, les conséquences d'une rupture survenant par exemple sur la conduite de l'usine du Pouget-France (Aveyron), actuellement en service, d'une puissance de 160.000 ch, qui véhicule à elle seule 30 m³/s sous 460 m de chute, ou à l'usine de Malgouvet-France (Savoie) en cours d'aménagement, d'une puissance de 400.000 ch, dont les deux conduites véhiculent chacune 25 m³/s sous 750 m de chute?

Quant à la *qualité*, elle est la conséquence de ce qui précède. La construction des conduites

faites de tuyaux surpressés qui subissent de telles épreuves ne saurait évidemment s'accommoder de médiocrité. Les métaux employés sont obligatoirement de toute première qualité et sélectionnés. Leur mise en œuvre ne saurait d'autre part — sans risques de rebuts à l'essai final — se faire sans contrôles très poussés, aux divers stades de la fabrication; il n'est pas jusqu'à la protection des éléments contre la corrosion qui ne soit l'objet d'une attention particulière.

Mais nous pensons qu'il est possible d'aller plus loin encore dans la voie de l'*économie* sans nuire à la *qualité*, tout en conservant la *sécurité* nécessaire et suffisante.

Dans cet exposé, nous avons mentionné que notre expérience nous permet de dire qu'au cours de son existence, la pression dans une conduite n'atteint jamais le double de la pression maximum de marche, même en cas d'accident aux turbines. Cette affirmation est basée non seulement sur les observations faites depuis quarante-cinq ans sur les appareils enregistreurs des usines hydro-électriques, mais aussi parce que nous avons vécu les vicissitudes des conduites construites jadis par soudure au gaz à l'eau. Nous connaissons, en effet, beaucoup de ruptures qui se sont produites sur de telles conduites en service parfois depuis longtemps, et dont les éléments n'étaient éprouvés en usines qu'à 1,5 P. Les ruptures de tuyaux en usines étaient, d'au-

tre part, fréquentes, entre 1,5 P et 2 P sur les tuyaux éprouvés à 2 P. Enfin, nous ne connaissons aucune rupture en service de conduites soudées au gaz à l'eau éprouvées à 2 P, dont certaines fonctionnent depuis trente-quatre ans.

A ce sujet, nous partageons l'avis exprimé par le docteur W. MÜLLER dans un numéro de la *Revue Technique Sulzer*, qui, après avoir mis en évidence l'infériorité de qualité des soudures au gaz à l'eau sur les soudures à l'arc électrique, conseille le remplacement des anciennes conduites soudées au gaz à l'eau, car celles auxquelles le docteur W. MÜLLER fait allusion n'ont été éprouvées qu'à une surpression au plus égale à 50 %.

A l'occasion de ce que nous avons affirmé, il apparaît que nous devrions admettre de réduire

jusqu'à 2 le coefficient de sécurité de 2,5 actuellement admis en France.

Nous l'admettons en effet, mais une conduite forcée ne supporte pas que des efforts statiques; si elle n'a pas à subir d'efforts alternés, elle subit cependant, du fait des coups de bélier, des efforts ondulés qu'il est bon de ne pas négliger.

C'est pourquoi nous pensons qu'il est prudent de prendre une marge de 10 % et que rien ne s'oppose à admettre le *coefficient de sécurité 2,2 par rapport à la limite élastique* des aciers mis en œuvre. Bien entendu, et selon les principes énoncés précédemment, ce coefficient 2,2 doit être contrôlé aux épreuves.

C'est ainsi que, passant du coefficient de sécurité 2,5, admis en France jusqu'à maintenant, au coefficient de sécurité 2,2, on réaliserait de nouvelles et substantielles économies.

ANNEXE I

INFLUENCE DE LA RÉDUCTION DE L'ÉPAISSEUR D'UNE CONDUITE PAR AUGMENTATION DE LA CONTRAINTE SUR LA VALEUR DES COUPS DE BÉLIER ACCIDENTELS

$$(T \leq 2 L/a)$$

La valeur du coup de bélier dans ce cas, avec propagation sensiblement constante le long de la conduite, est :

$$B = \frac{a V_0}{g}$$

Celui-ci est donc proportionnel à a dont la valeur est pour l'acier :

$$a = \frac{9.900}{\sqrt{48,3 + D/(2e)}}$$

Pour une valeur déterminée de D , la valeur de a , et par suite celle de B , diminue avec e dans une proportion qui dépend du rapport D/e loin d'être négligeable, ainsi que nous allons le voir par un exemple.

Prenons $D = 1.500$ mm par exemple et pour e des valeurs courantes pour différents types de tuyaux destinés à fonctionner sous une pression de marche P avec un coefficient de sécurité c .

1° $e = 36$ mm pour un TS.60 (tuyau soudé en acier au Cr-Cu à 54 kg).

2° $e = 20$ mm pour un TSp 5T (tuyau ci-dessus surpressé à 5 % et traité).

3° $e = 15$ mm pour un TAF.54 Sp5/100 Sp2 T (tuyau autofretté surpressé et traité avec paroi comme ci-dessus surpressé à 5 % et frettes surpressées à 2 %).

4° $e = 60$ mm pour TS.G (épaisseur théorique qu'aurait eue jadis un tuyau soudé au gaz à l'eau).

Les valeurs de a sont les suivantes :

4° $a = 1.270$ mètres pour le TS.G.

1° $a = 1.190$ mètres pour le TS.60.

2° $a = 1.050$ mètres pour le TSp5.T.

3° $a = 1.000$ mètres pour le TAF 5 Sp5/100 Sp2 - T.

Considérons maintenant une conduite forcée moderne de haute chute à grande puissance fonctionnant sous 750 mètres par exemple avec un débit tel que la vitesse maximum de l'eau soit de 8 m/s.

On admet que le cas accidentel le plus exceptionnel amène, au moment du fonctionnement en pleine charge, la coupure instantanée du 1/4 du débit.

Les valeurs de B sont les suivantes :

$$\frac{1.270 \times 2}{9,81} = 259 \text{ m pour } 4^{\circ}$$

$$\frac{1.190 \times 2}{9,81} = 243 \text{ m pour } 1^{\circ}$$

$$\frac{1.050 \times 2}{9,81} = 214 \text{ m pour } 2^{\circ}$$

$$\frac{1.000 \times 2}{9,81} = 204 \text{ m pour } 3^{\circ}$$

Une étude complète des coups de bélier par la méthode BERGERON a été faite dernièrement par nos soins sur la conduite de l'Arvan, Saint-Jean-de-Maurienne - France (Savoie). Chute : 575 m; débit : 6 m³/s; $\varphi = 1\,300$ m; constituée de TAF 50/200 C (tuyaux soudés à 48 kg, fretage

souple en fils câblés à 200 kg); contrainte moyenne : 23 kg/mm² sous P.

Pour la coupure instantanée du 1/4 du débit, la surpression calculée est de 107 m au collecteur et 78 m à la partie supérieure de la conduite.

On a établi la comparaison avec une conduite entièrement soudée TS 50 (tuyaux soudés à 48 kg), contrainte moyenne 11 kg/mm², et on a trouvé 118 m au collecteur et 89 m à la partie supérieure.

Le calcul fait sur les bases précédentes aurait donné à la partie moyenne de la conduite :

Pour TS 50 :

$$e = 19 \text{ mm} \quad D/(2e) = 34,2 \quad B = 169,5 \text{ m}$$

Pour TAF 50/200 C :

$$e = 9 \text{ mm} \quad D/(2e) = 72,2 \quad B = 138 \text{ m}$$

ANNEXE II

UNE CONDUITE SURPRESSÉE RÉSISTE MIEUX AUX DÉPRESSIONS QUE LA MÊME CONDUITE A L'ÉTAT ORDINAIRE

Définissons d'abord quelques termes facilitant le langage :

- Un chargement est dit *aplexique*, pour un anneau, quand il ne donne lieu à aucun moment de flexion.
- Il est *semi-aplexique* quand il donne lieu à des moments de flexion extrêmement faibles.

Pour un anneau soumis à une pression extérieure uniforme p , le moment fléchissant en un point s'obtient en prenant la *puissance géométrique* de ce point par rapport à un cercle dit *nodal* et en la multipliant par $p/2$.

Le rayon du cercle nodal et la position de son centre se calculent au moyen des flexibilités locales désignées par ϵ . Pour une section de moment d'inertie I , la flexibilité est :

$$\epsilon = \frac{1}{EI}$$

E est le module d'élasticité.

Une portion de conduite forcée est assimilable à un anneau de flexibilité unique; si sa section transversale est absolument circulaire, elle coïncide donc avec son cercle nodal. Si elle se rapproche de la forme circulaire, elle ne coïncide plus absolument avec lui.

Dans le premier cas, il n'existe donc aucun moment de flexion pour la paroi; la conduite est aplexique.

Dans le deuxième cas, des moments de flexion existent, mais sont faibles; la conduite est semi-aplexique.

Les diverses opérations de fabrication donnent lieu à des petites variations du rayon de courbure d'un tuyau; la surpression les fait disparaître.

Le premier est donc semi-aplexique.

Le second est aplexique.

Un anneau aplexique sous pression extérieure uniforme reste parfaitement circulaire jusqu'à une valeur limite de la pression. Quand cette pression limite p_c est atteinte, la paroi fléchit brusquement, il y a *flambement*.

p_c est donné par la formule :

$$p_c = \frac{3}{\epsilon r^3} = \frac{3EI}{r^3} \text{ (Allievi)}$$

r est le rayon. Cette formule est indépendante de la limite élastique R_e ; si elle correspond à une tension supérieure à R_e , le flambement proprement dit ne peut plus se produire, car il y a écrasement lent à partir du moment où R_e est atteint.

Pour un tuyau surpressé, R_e étant grand, il

n'y aura jamais écrasement, mais il peut y avoir flambement.

Pour un tuyau ordinaire, appelons f la flèche maxima : différence entre le diamètre maximum et le diamètre moyen, rapportée au diamètre moyen.

On démontre que, sous une pression extérieure p , cette flèche devient :

$$f_1 = \frac{f}{1 - p/p_c}$$

La puissance géométrique par rapport au cercle nodal, au point de flèche f , était, en nommant r_0 le rayon du cercle nodal :

$$r_0^2 (1 + f)^2 - r_0^2$$

En négligeant f^2 , la formule du moment de flexion est donc :

$$M = p r_0^2 f \quad \frac{M}{(I/V)} = \frac{6 p r_0^2 f_1}{e^2}$$

La tension interne, qui était $p r_0/e$ pour un tuyau surpressé, devient donc ici :

$$\frac{p r_0}{e} + 6 \frac{p r_0^2}{e^2} f_1$$

Avec $f = 1\%$, elle peut augmenter, pour certaines valeurs de r_0 et de e , jusqu'au 25 %, d'où dépassement de la limite élastique.

Mais faisons la comparaison entre un tuyau soudé TS.60 $\phi = 1$ m, $e = 8$ mm, $E = 34$ kg/mm²,

dont l'ovalisation de fabrication est $f = 1\%$ et un tuyau surpressé TSp 5 de même diamètre et de même épaisseur avec $E = 50$ kg/mm², dont l'ovalisation de fabrication est nulle par définition.

La pression d'écrasement p pour le TS.60 est donnée par la formule :

$$\frac{p r_0}{e} + \frac{6 p r_0^2 f_1}{e^2} = E$$

$$\frac{p \times 50}{0,8} + \frac{6 p \times 50 \times 0,0784}{0,8^2} = 3.400$$

qui donne $p_c = 1,789$ kg/cm².

Pour le TSp 5, on a :

$$p_c = \frac{3 E I}{r^3}$$

$$= \frac{3 \times 2.000.000 \times \frac{0,8^2}{12}}{50^3}$$

qui donne :

$$p_c = 2,05 \text{ kg/cm}^2.$$

Donc :

Un tuyau ordinaire soumis à une pression extérieure s'écrase avant le même tuyau surpressé.