A propos du frettage des conduites forcées métalliques modernes⁽¹⁾

Hoop reinforcement of modern steel penstocks

PAR G. FERRAND

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

Ainsi qu'on le sait, la mise en œuvre de la technique de l'auto-frettage a eu, sur la construction des conduites forcées, une influence considérable, non seulement sur le plan technique, mais aussi sur le plan commercial. Elle permet notamment d'utiliser pour le frettage, non plus des aciers demi-durs simplement recuits comme cela se faisait avec la technique du frettage à chaud, mais des aciers extradurs traités par trempe et revenu à très haute limite élastique.

Pour rester compétitifs, les constructeurs de tuyaux frettés à chaud furent amenés à adopter, pour leur fabrication, une structure identique à celle des tuyaux auto-frettés, où la mise en place des frettes se fait à froid sans usinage préalable de celles-ci.

Les frettes des tuyaux frettés à chaud pouvaient jadis être chauffées à très haute température; de ce fait, leur emmanchement sur le tuyau était relativement aisé, tout en permettant la réalisation du serrage désiré.

Il n'en fut plus de même avec des frettes traitées, qui ne peuvent plus être chauffées au-dessus de la température de revenu.

Ne pouvant agir sur la température, on dut agir sur le diamètre des frettes en l'augmentant. L'obtention du serrage devenait, dans ces conditions, impossible sans recourir à l'auto-frettage, ce qui fait qu'en définitive, les tuyaux frettés des conduites forcées modernes sont en réalité des tuyaux auto-frettés, que les frettes soient posées à froid ou à chaud sur le tuyau.

As is well known, the introduction of prestrained hooping techniques has had a considerable effect upon the manufacture of penstocks, not only from the engineering point of view but also from the commercial viewpoint. As a result, extra hard steels which have been quenched and then tempered to give them a very high elastic limit are used instead of the medium hard annealed steels of which sweated-on hoops were made.

In order to meet the new competition, makers of penstocks with sweated-on hoops were forced to go over to designs which were exactly the same as those of prestrained hoop penstocks, for which the hoops are fitted without being preheated or machined.

At one time it was possible to heat the hoops for sweated hoop penstocks to a very high temperature and this made it relatively easy to fit them on the pipe with the required degree of tightness.

This could no longer be done with the heat treated hoops which could not be heated above the tempering temperature.

As it was no longer possible to play on the temperature, the diameter of the hoops became the variable factor. In these circumstances it is impossible to obtain the right degree of tightness without resorting to prestraining techniques and this means that modern hooped penstocks are prestrained regardless of whether the hoops be fitted cold or after being preheated.

Dans l'état de la technique moderne en matière de construction de conduites forcées, est-il possible de fretter un tuyau sans recourir à l'auto-frettage?

Pour répondre à cette question, il est tout

(1) Cela ne vise que le frettage rigide effectué avec des frettes en acier laminé et non le frettage souple fait avec des élingues à fils câblés, de structure toute différente.

d'abord utile de rappeler quelques principes et de faire un retour dans le passé.

Un tuyau fretté est composé de deux parties — le tuyau proprement dit et les frettes — sur lesquelles on a réalisé un état d'équilibre appelé « frettage » tel que, sous pression nulle, la frette est tendue et le tuyau proprement dit, comprimé.

Le frettage évoque l'idée plus commune de

« serrage », qui peut avoir deux définitions, selon qu'il est considéré en fonction des dimensions ou des contraintes.

En fonction des dimensions, le serrage est la différence entre le diamètre extérieur du tuyau proprement dit et celui de la frette supprimée

enlevée. Il s'exprime par unité de longueur. On dit par exemple que le serrage est de 10/10 000, soit 1 mm pour un tuyau de diamètre 1 mètre.

En fonction des contraintes, le serrage est la somme arithmétique, sous pression nulle, de la tension de la frette et de la compression du

Photo d'une virole de la conduite forcée de Roselend, diamètre 3 m, prise avant surpressage et autofrettage.

On reconnaît M. SOUSTELLE, alors ministre de l'Information, avec M. Robert BOUCHAYER à sa droite.

Photopress Grenoble.

Transport de Grenoble à Albertville, d'un tuyau surpressé à 2 % et autocofretté, diamètre 3 m, destinée à la conduite forcée de Roselend,

Photopress Grenoble.

tuyau, valeurs exprimées par unité de section. On dit que le serrage est de 20 kg par mm² si les contraintes sont par exemple +10 kg/mm² sur la frette et — 10 kg/mm² sur le tuyau.

Pratiquement, le serrage doit être au moins égal à 7,5/10 000, soit 15 kg/mm².

Il y a deux manières de réaliser le frettage, soit à chaud, soit à froid.

Dans le premier cas, on construit des tuyaux dits « frettés à chaud »; dans le second, on

construit des tuyaux dits « auto-frettés ».

Pour réaliser les tuyaux frettés à chaud, on construit avec le maximum de précision possible le tuyau proprement dit qui reste cependant brut de chaudronnerie. Les frettes sont alésées mécaniquement à D-S (D est le diamètre extérieur du tuyau et S le serrage). Comme il s'agit d'un tuyau brut, le diamètre extérieur peut ne pas être exactement le même sur toute sa longueur et l'alésage des frettes est fait en

fonction de la place que chacune doit occuper en définitive.

Les frettes sont ensuite chauffées à température convenable pour permettre leur emmanchement sur le tuyau et mises à leurs emplacements respectifs. Le serrage est obtenu à la fin du refroidissement.

Par rapport à la précédente, la fabrication des tuyaux autofrettés est beaucoup plus simple. Le tuyau proprement dit est construit selon les normes de la chaudronnerie courante. Les frettes restent brutes de laminage et sont construites à un diamètre tel qu'elles s'emmanchent à froid, sans aucune difficulté, sur le tuyau. Le serrage est obtenu par auto-frettage. On admet, à l'intérieur du tuyau, une pression telle que le tuyau subisse une déformation plastique jusqu'à prendre contact avec les frettes; la pression à ce moment s'appelle « pression de collage ». On continue ensuite à augmenter la pression jusqu'à obtenir dans les frettes une tension telle qu'à la détente le serrage désiré soit obtenu. La pression ainsi réalisée s'appelle « pression de frettage ».

Le contrôle du serrage est fait par l'observation manométrique de la différence entre la pression de frettage et la pression de collage. Pour des tuyaux de même structure, cette différence est constante, quelle que soit la valeur de la pression de collage. L'obtention du serrage réel est en quelque sorte automatique et correspond au serrage théorique.

**

La construction des tuyaux frettés à chaud est antérieure à celle des tuyaux auto-frettés. Avant l'apparition de ceux-ci, les tuyaux frettés à chaud étaient constitués d'une paroi d'épaisseur égale à la moitié environ de celle qu'aurait eue un tuyau ordinaire, et de frettes en acier simplement recuit dont la température pouvait être portée sans inconvénient à 900°. Leur emmanchement sur le tuyau était de ce fait relativement aisé. A cette époque, on ne construisait pas, comme maintenant, des conduites forcées de grande puissance sous haute chute. Il s'agissait de tuyaux de faible diamètre, très rigides, sur

Photo montrant un tuyau surpressé et autofretté de la conduite de Roselend, diamètre 3 m, au moment de son arrivée sur camion dans la centrale souterraine.

Photo R. Bertrand, Albertville.

Conduite autofrettée de Pragnères en cours de montage; diamètre : 1,800 m.

Photo Alix, Bagnères-de-Bigorre.

lesquels la forme circulaire était facile à réaliser avec une approximation suffisante.

Compte tenu d'un abaissement de température sur les frettes, de l'ordre de 100° entre leur sortie du four et le moment où elles étaient mises à l'emplacement qu'elles devaient occuper sur le tuyau, compte tenu également de la valeur du serrage à réaliser, on pouvait compter sur un

jeu de l'ordre de $10/1\,000$ du diamètre, alors suffisant.

La mise en application industrielle de la technique de l'auto-frettage permit de réaliser d'importantes économies sur le prix de transformation par la simplicité de la fabrication des tuyaux auto-frettés, pour la seule raison que l'emmanchement des frettes restées brutes de

laminage se fait sur un tuyau qui n'a pas besoin d'être construit avec autant de précision dans ses dimensions, que pour un tuyau fretté à chaud, ni nécessiter la même rigidité.

Elle permet ensuite de réaliser d'importantes économies de métal, car les frettes, n'ayant pas besoin d'être chauffées pour être emmanchées, furent élaborées en acier extra-dur traité (trempe et revenu) de limite élastique très élevée. Par ailleurs, on admit sur les premiers tuyaux auto-frettés construits, des épaisseurs égales au quart de l'épaisseur qu'aurait eue un tuyau ordinaire (on est allé plus loin depuis).

On put ainsi construire des tuyaux auto-frettés dont le poids fut la moitié de celui des tuyaux frettés à chaud. Par la suite, la différence devint encore beaucoup plus sensible.

L'apparition des tuyaux auto-frettés sur le marché des conduites forcées amena une diminution considérable dans les prix d'installation de celles-ci par rapport à ceux pratiqués alors.

De ce fait, et pour que les tuyaux frettés à chaud restent, dans une certaine mesure, compétitifs vis-à-vis des tuyaux auto-frettés, les constructeurs durent admettre, pour les tuyaux frettés à chaud, la structure même des tuyaux auto-frettés (épaisseur du tuyau réduite à $1/4$ ou $1/5$, frettes en acier traité à haute limite élastique). Mais pour le frettage à chaud, l'emploi de frettes traitées ne permettant pas — ainsi qu'on le verra plus loin — de réaliser le serrage minimum nécessaire, les constructeurs eurent recours à une astuce qui, sans être apparente, n'est pas moins réelle; ils utilisèrent l'auto-frettage.

**

Si l'on considère un tuyau dont le frettage doit être exécuté à chaud, et en se plaçant dans les conditions les plus favorables (tuyau proprement dit bien construit, frettes alésées en fonction de la place qu'elles doivent occuper), le jeu minimum minimum nécessaire entre la frette et le tuyau pour que l'emmanchement des frettes soit possible est le suivant :

0,004	D pour tuyaux jusqu'à 1,400 m
0,005	D pour tuyaux de 1,400 m à 1,800 m
0,006	D pour tuyaux de 1,800 m à 2,200 m
0,007	D pour tuyaux de 2,200 m à 2,600 m
0,0085	D pour tuyaux de 2,600 m à 3,000 m
0,01	D pour tuyaux au-dessus de 3,000 m

Prenons l'exemple d'un tuyau de 1,800 m de diamètre dont les frettes sont en acier à haute résistance, traitées (le revenu après trempe est de 550° environ). Pour les emmancher sur le tuyau, on ne pourra pas les chauffer à une température supérieure sans diminuer sensiblement leurs caractéristiques mécaniques. Les frettes se

OAS	courbe d'allongement de la paroi;
A	point correspondant à la limite élastique de valeur OA' ;
OA_1S_1	courbe d'allongement de la frette;
A_1	point correspondant à la limite élastique de valeur OA'_1 ;
$OaB_1A_1S_1$	courbe d'allongement de la frette après auto-frettage sous tension OB'_1 ;
DbO_1CS	courbe d'allongement de la paroi après auto-frettage sous tension OC' ;
$a'b'$	serrage.

refroidissent rapidement dès leur extraction du four. En admettant que cette opération soit très vite faite, la température des frettes au moment de leur mise en place ne sera pas supérieure à 450° .

Par définition et pour l'obtention du serrage nécessaire, l'alésage de la frette doit être fait à D-S.

Si l'on observe que, pour le tuyau considéré, le serrage doit être de $7,5/10\,000$ au moins, la valeur de S, qui conditionne l'obtention de contraintes bien déterminées sous pression de service, est de 1,35 mm seulement.

A la température de 450° , le diamètre de la frette subit un allongement de 9,5 mm. La différence entre le diamètre du tuyau et celui de la frette est à ce moment de 8,15 mm, compte tenu du serrage.

Pour permettre l'emmanchement, le jeu minimum nécessaire est de 10,8 mm. L'emmanchement n'est donc pas possible. Pour qu'il le soit, la frette à 450° devrait avoir un diamètre de 1 810,8 mm qui, après refroidissement, deviendrait 1 801,3 mm. Il subsisterait ainsi un jeu de 1,5 mm entre frette et tuyau. Il est ainsi bien évident que, pour obtenir le serrage voulu, l'auto-frettage est inévitable.

En supposant même que l'on puisse réduire le jeu à $5/1\,000$ D, ce qui pratiquement est impossible, ou chauffer les frettes à 650° , ce qui n'est pas possible non plus, on aurait $S=0$. La frette et la tôle seraient simplement en con-

tact, ce qui peut donner l'illusion d'un frettage qui n'existe pas et ne peut être obtenu que par auto-frettage au cours de l'épreuve du tuyau, à la condition cependant que celle-ci soit faite à une pression suffisante.

En regardant le graphique de la page 797, on constate en effet que tant que la pression intérieure n'a pas déterminé, dans la paroi et la frette, une tension supérieure à OA' , aucun serrage n'est obtenu. A la détente et sous pression ramenée à 0, les contraintes dans la tôle et la frette sont revenues à leur état initial, c'est-à-dire qu'elles sont nulles.

Au contraire, si la pression est poussée au-dessus, la frette continue sa déformation dans la zone élastique, alors que la tôle la continue dans la zone plastique; sa déformation est permanente et l'auto-frettage se produit.

Si la pression est par exemple poussée pour atteindre dans la frette une tension OB'_1 , OC' est la tension à ce moment dans la tôle et, à la détente, sous pression ramenée à 0, il subsiste dans la frette une tension Oa' , alors que la tôle subit une compression Ob' .

La position des points a et b est telle que $ac/cb = S_t/S_f$ (S_t = section de la tôle, S_f = section du frettage). $a'b'$ est la valeur du serrage obtenu par auto-frettage.

Quelle est la pression d'épreuve kP , autrement dit la pression de frettage, à mettre en œuvre pour obtenir le serrage minimum minimum nécessaire de 5/10 000 ou 10 kg/mm²?

Soient :

P = pression de service;

b = rapport des sections tôle et frette;

t = limite élastique de la tôle;

R = fatigue tangentielle sous P de la paroi supposée seule, frettes enlevées.

On a :

$$k = \frac{(b+1)t+10}{bR}$$

Pour le cas très courant où $b=0,85$, $R=52$ kg/mm², $t=34$ kg/mm², on a $k=1,65$, valeur supérieure à celle de 1,5, bien souvent employée par les constructeurs étrangers, qui ne permet pas d'obtenir le serrage minimum nécessaire.

Sous l'épreuve rituelle à $2P$ ($k=2$), minimum imposé par le cahier des charges de la Société Hydrotechnique de France, le serrage serait de : 25 kg/mm².

Le cas évoqué ci-dessus correspond à celui des tuyaux autofrettés câblés, où le frettage souple est enroulé sur le tuyau sans tension initiale.

Mais nous avons raisonné sur un diamètre

de 1,800 m et le diamètre des conduites forcées métalliques frettées est très rarement inférieur à cette valeur. Les dimensions ont des tendances à augmenter de plus en plus. On construit en ce moment, en France et en Italie, des conduites frettées de 3,200 m et l'on ira beaucoup plus loin dans un proche avenir. Si l'on avait raisonné sur un diamètre plus grand, l'obligation de recourir à l'auto-frettage serait encore plus apparente. Mais nous avons aussi raisonné en partant de frettes alésées. Or, depuis peu de temps et surtout depuis que le brevet des tuyaux auto-frettés ordinaires, c'est-à-dire non surpressés, est tombé dans le domaine public, il n'y a plus de risque à utiliser l'auto-frettage de façon trop apparente. Dans ces conditions, on n'hésite plus maintenant, pour le frettage à chaud, à utiliser, comme pour le frettage à froid, des frettes brutes de laminage bien calibrées. Mais aussi soigné que ce calibrage soit fait, il n'est plus possible de fabriquer des frettes hors des tolérances $-0+6$ mm par rapport au diamètre théorique. Dans le cas analysé, le diamètre théorique est de 1 800 et l'on sait que le jeu restant est de 1,3 mm; si la frette est construite avec la tolérance maxi de 6 mm, le jeu restant est augmenté de 6 mm et cela ne peut échapper à l'œil. L'auto-frettage ne peut être dissimulé.

Au début de sa mise en œuvre, la technique de l'auto-frettage a été très discutée, mais elle a obtenu très vite le droit de cité. Le Maître de l'Œuvre a très rapidement compris — aussi bien sur le plan économique que sur le plan technique — tout l'intérêt qu'il y avait à l'utiliser. Il en a d'ailleurs largement bénéficié dès l'apparition des tuyaux auto-frettés sur le marché.

Le frettage à chaud est utilisé depuis des siècles au cerclage des roues de brouettes et de voitures; les bandages de roulement sont posés à chaud sur les roues de chemin de fer et sa technique est appliquée depuis une soixantaine d'années au renforcement de corps cylindriques. Si les constructeurs français ne l'ont pas employée, les constructeurs italiens, allemands et polonais l'ont largement utilisée à la fabrication des tuyaux de conduites forcées.

La technique de l'auto-frettage, qui a permis l'évolution que l'on sait dans la construction des conduites forcées modernes, est connue depuis une trentaine d'années seulement; mais elle est spécifiquement française.

Et si l'on construit encore, sous l'appellation de « tuyaux frettés à chaud », des tuyaux qui sont en définitive des « tuyaux auto-frettés »,

redde Caesari quae sunt Caesaris.