

Zeitschrift: IABSE congress report = Rapport du congrès AIPC = IVBH
Kongressbericht

Band: 2 (1936)

Artikel: Le tuyau d'acier et l'usine hydro-électrique de "La Bissorte"

Autor: Bouchayer, J.

DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-2991>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. [Mehr erfahren](#)

Conditions d'utilisation

L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. [En savoir plus](#)

Terms of use

The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. [Find out more](#)

Download PDF: 13.01.2026

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, <https://www.e-periodica.ch>

VII b 2

Le tuyau d'acier et l'usine hydro-électrique de „La Bissorte“.

Stahldruckrohr des Kraftwerkes „La Bissorte“.

Steel Pressure Pipe for the Hydro-electric Plant „La Bissorte“.

J. Bouchayer,

Administrateur-Délégué des Etablissements Bouchayer et Viallet, Grenoble.

Le tuyau d'acier vient de jouer un rôle de premier plan dans l'aménagement de l'Usine Hydro-Electrique de «La Bissorte», dont la canalisation d'aménée aux turbines, entièrement en acier depuis son origine dans la prise d'eau, compte parmi les plus remarquables conduites forcées modernes tant par la hauteur de chute sous laquelle elle fonctionne et qui dépasse 1000 mètres, que par la puissance qu'elle développe et qui est de l'ordre de 100 000 CV.

Il paraît donc opportun de fournir ici des détails substantiels sur l'installation de cette conduite forcée, également remarquable par l'originalité et l'audace de sa conception.

Description de la conduite forcée.

Entièrement métallique, de 3037 mètres de longueur, elle ne comporte pas moins de 3800 Tonnes d'acier. Elle part du Barrage à la cote 2028 et se termine à la cote 936. Le niveau de la retenue étant à 2082, si l'on tient compte des coups de bâlier produits par les turbines, c'est la pression considérable de 132 kg par centimètre carré que les tuyaux de la partie inférieure ont à supporter (fig. 1).

Les diamètres ont été calculés pour réaliser le débit de 7,500 m³ à la seconde.

Elle est formée de deux parties principales:

Une partie à faible pente sur une longueur de 1080 mètres avec un diamètre de 1,800 m, complètement installée à l'intérieur d'une galerie taillée dans le rocher; elle est constituée par des tuyaux soudés à l'arc électrique et munie à son origine de robinetteries et appareils de sécurité.

Une partie à forte pente sur 1957 mètres de longueur qui comporte des tuyaux soudés au gaz à l'eau de 1,400 m de diamètre, puis des tuyaux auto-frettés, diamètres 1,400 m et 1,300 m.

Elle est également munie à son origine de robinetteries et appareils de sécurité.

Ces deux parties principales se réunissent sur une cheminée d'équilibre de 2,500 m de diamètre, 70 mètres de hauteur, placée à l'intérieur d'un puits vertical creusé dans le roc.

L'extrême aval de la conduite forcée qui traverse, avant son arrivée à l'Usine, la ligne de chemin de fer France-Italie par le Mont Cenis, se termine par un collecteur muni de trois branchements alimentant chacun une turbine de 34 700 HP.

Les travaux de montage ont été délicats et difficiles du fait des très fortes pentes du profil et des poids unitaires des tuyaux. Certains atteignent, en effet, le poids de 15 Tonnes.

La puissance d'une conduite est définie par le produit HD^2 (H hauteur de chute, D diamètre caractéristique moyen).

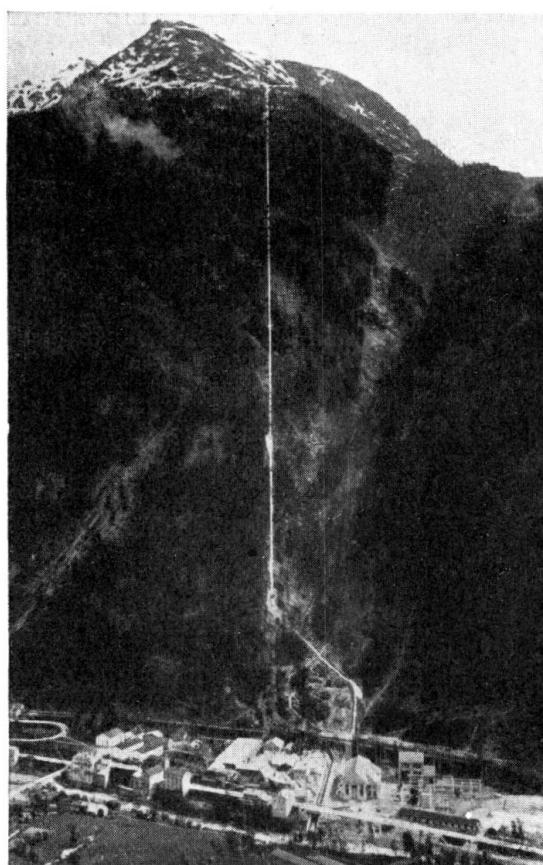


Fig. 1.

La conduite forcée
de «La Bissorte»
Vue d'ensemble.

La conduite de «La Bissorte» est remarquable à ce point de vue et constitue un record avec $HD^2 = 2360$.

Elle a été calculée pour résister au vide atmophérique et à la pression statique correspondant au niveau maximum de l'eau dans le réservoir augmentée soit d'une surpression linéaire de 15 % due aux coups de bâlier de fermeture des turbines, soit d'une surpression due à un coup de bâlier d'onde qui produirait une surcharge uniforme de 55 m et en admettant, en chaque point, la valeur maximum des deux surpressions considérées.

Sous l'effet des pressions maximums ainsi définies, les fatigues sont les suivantes:

8 kg/mm² pour les tôles,

24 kg/mm² pour les frettes,

2 kg/cm² pour la pression sur le sol des maçonneries servant d'ancrage.

Les tôles ayant servi à la construction des tuyaux sont en acier extra-doux *Siemens-Martin* donnant respectivement comme valeurs maximums de la résistance à la traction et de l'allongement 35 kg/mm^2 et 30 %. Les frettes constituant les tuyaux auto-frettés sont en acier spécial *Siemens-Martin* traité, donnant les chiffres minimums de 90 kg/mm^2 , 60 kg/mm^2 et 8 % pour la résistance à la traction, la limite élastique et l'allongement.

Partie à faible pente.

Cette partie comprend:

Un départ d'ancrage et d'étanchéité ø int. 1,800 m, longueur 80 m de la galerie d'aménée (alt. 2028,86) à la chambre des vannes (alt. 2028,78) avec pente de 0,001 m par mètre exécuté en tuyaux soudés à l'arc électrique épaisseur 12 mm, longueur unitaire 9 mètres assemblés sur place par emboîtement et soudure bout à bout à l'arc électrique.

Les tuyaux sont complètement bétonnés dans la galerie pour constituer un bouchon d'ancrage et d'étanchéité. Après bétonnage, des injections sous pression ont été effectuées à travers la paroi de tôle sur toute la longueur du bouchon de béton.

Une conduite ø int. 1,800 m, longueur 1000 mètres, de la chambre des vannes (alt 2028,78) au robinet sphérique situé au départ de la forte pente (alt. 2015,36) avec pente de 0,0134 m par mètre entièrement établie à l'intérieur d'une galerie de section suffisante pour permettre la visite et l'entretien faciles ainsi que l'accès en tout temps à la chambre des papillons.

Elle est exécutée en tuyaux soudés à l'arc électrique, épaisseurs 8 et 9 mm, en longueur unitaire de 9 m, assemblés sur place par emboîtement et rivetage.

Pour résister aux effets accidentels de la pression atmosphérique, des cercles de renfort sont fixés tous les 3 mètres.

Deux massifs d'ancrage intermédiaires, fixant les coude en plan, assurent sa bonne stabilité qui se trouve complétée par des piliers-supports en maçonnerie avec berceaux métalliques répartis tous les 9 mètres.

La conduite ne comporte aucun joint de dilatation malgré que les coude soient ancrés, car les variations de température sont très faibles à l'intérieur de la galerie.

Cheminée d'équilibre.

D'un diamètre de 2,500 m, elle est branchée sur la partie à faible pente et installée immédiatement en amont de sa jonction avec la partie à forte pente.

La cheminée d'équilibre est constituée d'une partie horizontale installée à l'intérieur d'une galerie de 62 mètres de long, et d'une partie de 65 mètres de haut dans un puits vertical.

Elle est exécutée en tuyaux soudés à l'arc épaisseur 8 à 15 mm, en longueur unitaire de 6 m, assemblés sur place par rivetage dans la partie horizontale et par soudure dans la partie verticale. Chaque tuyau de la partie horizontale repose sur un pilier en maçonnerie avec berceau métallique. Les tuyaux de la partie verticale sont entièrement bétonnés entre tôle et rocher.

Partie à forte pente.

Cette partie comprend:

Un tronçon de tuyaux soudés au gaz à l'eau, ø int. 1,400 m, longueur 522 mètres jusqu'à l'altitude 1704 mètres passant successivement en galerie horizontale, en galerie en pente de 0,849 m par mètre sur une longueur de 229 mètres puis à air libre.

Ce tronçon, qui ne comporte pas de joints de dilatation, est exécuté en tuyaux soudés au gaz à l'eau en tôles de 11 à 39 mm d'épaisseur, assemblés sur place par emboîtement et rivetage.

Les coudes sont assemblés avec les tuyaux droits par brides mobiles et boulons.

Des massifs d'ancrage sont répartis le long du profil et fixés dans les parties droites de façon à laisser aux coudes toute leur liberté en leur permettant d'intervenir pour atténuer les efforts longitudinaux résultant des variations de température.

Entre ces ancrages, la conduite repose tous les 12 mètres sur des piliers-supports en maçonnerie avec berceaux métalliques.

Un tronçon de tuyaux auto-frettés, ø intérieur 1,400 m, longueur 152 mètres jusqu'à l'altitude 1632 mètres.

Ce tronçon est établi à air libre.

Il est exécuté avec des tôles de 12 mm d'épaisseur et des frettés de 60×22 à 60×26 ; les tuyaux sont assemblés sur place par manchons rivés et par joints glissants spéciaux tous les trois tuyaux.

Tous les coudes sont ancrés dans des massifs d'ancrage et assemblés aux tuyaux droits par joints glissants.

Les parties droites sont également ancrées dans des massifs intermédiaires tous les 19 mètres; dans l'intervalle, la conduite repose tous les 6,40 m sur des piliers-supports avec berceaux métalliques. Entre chaque ancrage, c'est-à-dire tous les 19 mètres, la libre dilatation de la conduite est assurée par les joints glissants qui forment joints de dilatation à faible course.

Un tronçon de tuyaux auto-frettés, ø intérieur 1,300 m, à manchons rivés, longueur 827 mètres jusqu'à l'altitude 1120. Ce tronçon passe successivement en galeries et à air libre.

Il est exécuté avec des tôles de 12 à 20 mm d'épaisseur et des frettés de 60×24 à 80×48 . Les longueurs des tuyaux, leur mode d'assemblage et les dispositifs d'installation d'ancrage ou d'assise sont identiques à ceux du tronçon précédent.

Un tronçon de tuyaux auto-frettés, ø intérieur 1,300 m, à joints glissants, longueur 451 mètres, jusqu'au collecteur (altitude 936,70 m) installé successivement:

- à air libre,
- sur passerelle métallique (traversée du torrent de «Bissorte»),
- et à l'intérieur d'un blindage métallique sous la ligne de chemin de fer.

Il est exécuté avec des tôles de 22 et 24 mm d'épaisseur et des frettés de 90×48 à 100×54 . Les tuyaux sont assemblés entre eux par joints glissants.

Comme pour les deux tronçons précédents, celui-ci est ancré aux coudes et

dans les parties droites tous les 19 mètres, la libre dilatation entre les ancrages étant assurée par les joints glissants. Il repose, d'autre part, tous les 6,40 m sur des piliers-supports avec berceaux métalliques.

Un collecteur ø int. 1,300 m — 1,100 m — 0,800 m horizontal, longueur 38 mètres comprenant 3 branchements pour raccordement aux turbines.

Entièrement noyé (à l'exception des pièces de bifurcation) dans un massif en maçonnerie faisant corps avec les fondations de l'Usine, il est constitué de tuyaux auto-frettés avec des tôles de 35 mm d'épaisseur assemblés par joints à brides tournantes, et de pièces de branchement en acier coulé.

Mode de construction.

La construction proprement dite comportait principalement l'exécution de tuyaux de longueurs déterminées et de trois types différents :

- Tuyaux soudés à l'arc électrique,
- Tuyaux soudés au gaz à l'eau, et
- Tuyaux auto-frettés.

Les matières premières étaient, tout d'abord, réceptionnées dans les Aciéries par un service de contrôle spécial dépendant directement du Maître de l'oeuvre. A leur arrivée aux Ateliers du Constructeur, elles étaient repérées d'après leur numéro de coulée et leur numéro d'ordre dans chaque coulée, puis classées par catégories dépendant de leur nature et de leurs dimensions.

Des fiches de fabrication étaient ensuite établies sur lesquelles figuraient les dimensions des éléments avec leurs repères respectifs. Toutes les opérations de la fabrication étaient mentionnées sur ces fiches si bien que chaque tuyau possérait une fiche d'identité permettant de le suivre et d'en assurer un contrôle rigoureux pendant tout le cours de sa fabrication.

Tuyaux soudés à l'arc électrique.

La fabrication de ce type s'effectue selon le cycle habituel, rabotage, chanfreinage, cintrage, soudure, épreuve hydraulique, opérations de finition et peinture.

Etant donné l'épaisseur relativement faible des tôles, le cintrage se fit à froid, sur une presse hydraulique verticale. Les opérations de soudure à l'arc électrique furent effectuées avec des électrodes enrobées, fondues dans un chanfrein en «V» avec reprise à la base du «V».

Les soudures longitudinales étaient faites à la machine automatique et les soudures transversales à la main.

Tuyaux soudés au gaz à l'eau.

Pour ce type de tuyau, les opérations de rabotage, chanfreinage et cintrage s'effectuent comme pour le précédent. Les soudures se font au gaz à l'eau, (gaz obtenu en admettant de la vapeur d'eau sur du coke incandescent). Ce gaz, riche en H. et CO, a le pouvoir d'être réducteur et de créer en brûlant un milieu désoxydant. La soudure en elle-même est une soudure par recouvrement des extrémités des tôles métal contre métal sans interposition de métal d'apport, Les extrémités des tôles qui se recouvrent sont amenées au blanc soudant par la

flamme réductrice de chalumeaux fonctionnant au gaz à l'eau et à l'air et martelées.

Ces soudures déforment le tuyau, introduisent des tensions internes importantes et surchauffent le métal. Dans le but de faire disparaître ces tensions et de régénérer le métal dans la zone de soudure, on effectue sur le tuyau constitué un recuit de normalisation à 950° (température contrôlée au pyromètre).

On profite de l'opération de recuit pour transporter dans une machine spéciale le tuyau porté au rouge et l'arrondir. L'opération d'arrondissement se fait très rapidement car il est essentiel qu'elle soit complètement terminée avant que la température du tuyau se soit abaissée en-dessous de 500°. Après les opérations

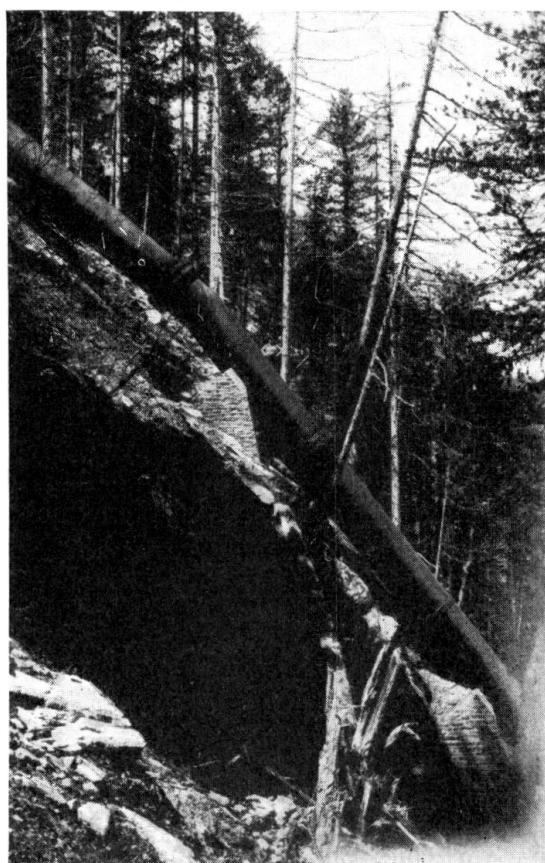


Fig. 2.

Partie de conduite soudée au gaz à l'eau vers la cote 1810.

de recuit et d'arrondissement, on exécute à chaud dans une «machine à border» les renflements aux extrémités des tuyaux permettant leur jonction entre eux.

On fait, ensuite, au tour le dressage des extrémités des tuyaux, puis les épreuves hydrauliques, les opérations de finition et la peinture.

Pour la conduite qui nous intéresse, les soudures longitudinales se firent sur une machine automatique spéciale avec laquelle il est possible de souder des tuyaux de 3,000 m de diamètre et de 6,50 m de longueur, et où le martelage se fait par pilon à air comprimé. Les soudures transversales furent exécutées par martelage à la main avec une équipe comprenant parfois 3 frappeurs pour les tôles épaisses.

Les recuits furent effectués dans un grand four alimenté par un gazogène dont les dimensions sont telles qu'il est possible d'y traiter des tuyaux de 3 m

de diamètre et de 6,50 m de longueur. Un contrôle permanent des températures était assuré par un pyromètre enregistreur placé dans le bureau du chef d'atelier.

Pour les opérations d'arrondissage, on utilisa des machines à cintrer à 4 cylindres disposés de façon à permettre un laminage de la soudure au début de l'opération.

Tuyaux auto-frettés.

Etant donné la nouveauté de ce système dont la première application remonte à 1925, il nous paraît opportun de parler de l'auto-frettage, procédé appliqué couramment en matière d'artillerie pour la fabrication des canons, et de fournir quelques précisions sur les tuyaux auto-frettés.

Le mode opératoire peut se schématiser comme il suit:

Prenons un tube d'une nuance d'acier appropriée et nettement connue, dont les épaisseurs locales ont été calculées de manière à fournir finalement (après auto-frettage) un canon d'un seul bloc (sans adjonction de frettes extérieures).

Tel qu'il est initialement, ce tube ne saurait supporter les conditions de service prévues pour la bouche à feu projetée.

Cette résistance professionnelle, qu'il n'a pas encore atteinte, va lui être garantie par l'auto-frettage, avec une majoration exactement définie et contrôlée par l'opération elle-même.

Mettions un puissant appareillage de compression hydraulique en communication avec l'intérieur du tube, puis obturons chacune des deux extrémités par un joint rigoureusement étanche.

Introduisons dans celui-ci le liquide comprimé, dont nous augmenterons progressivement la pression jusqu'à une valeur déterminée, telle qu'elle surpassé légèrement celle qui correspond à la limite élastique du tube, tout en restant notablement en-dessous de la limite de rupture.

Après avoir maintenu pendant le temps nécessaire et suffisant cette pression, laissons la descendre progressivement jusqu'au taux atmosphérique.

Le tube, dilaté au-delà de sa limite élastique, conserve une déformation permanente; le métal constitutif a subi un certain écrouissage.

Cette sorte de mandrinage hydraulique a pour effet de mettre les couches externes du tube en état de tension, et les couches internes en état de compression.

C'est ce phénomène complexe qui reçoit le nom d'auto-frettage car on est tenté de dire que tout se passe comme si le tube s'était fretté lui-même.

Ne séjournons pas davantage dans ce domaine technique de l'artillerie, en exposant les diverses applications qui y sont faites de ce nouveau procédé.

Retenons seulement deux données essentielles:

1° — Le fait, pour le tube considéré, d'avoir reçu sans rupture une déformation permanente sous une pression connue, supérieure à sa limite élastique primitive, lui confère l'aptitude à supporter désormais le renouvellement de cette même pression, sans qu'il en résulte d'autre déformation permanente. Il vient d'acquérir une limite élastique plus élevée que celle du début.

On se trouve donc en présence d'une modification des caractéristiques mécaniques.

On vérifie, par exemple, qu'un auto-frettage, conduit dans des conditions déterminées, a, pour un tube ainsi écroui, augmenté la limite élastique d'un tiers et la résistance à la traction de 8 %.

A dire vrai, l'auto-frettage offre la possibilité de réaliser un tube d'acier, de dimensions définitives calculables, constitué par un nouveau métal, dont on est en droit de fixer à l'avance les caractéristiques précises, en fonction des exigences prévues d'un service connu.

2°— L'application de ce procédé offre une particularité hautement intéressante : la pression productrice de l'écrouissage recherché représente en même temps l'épreuve de résistance la plus rigoureuse et la plus précise puisqu'elle correspond à la pression de service affectée d'un multiplicateur, non plus empirique, mais exactement défini.

Du même coup, l'on fabrique et l'on contrôle et le produit final comporte des

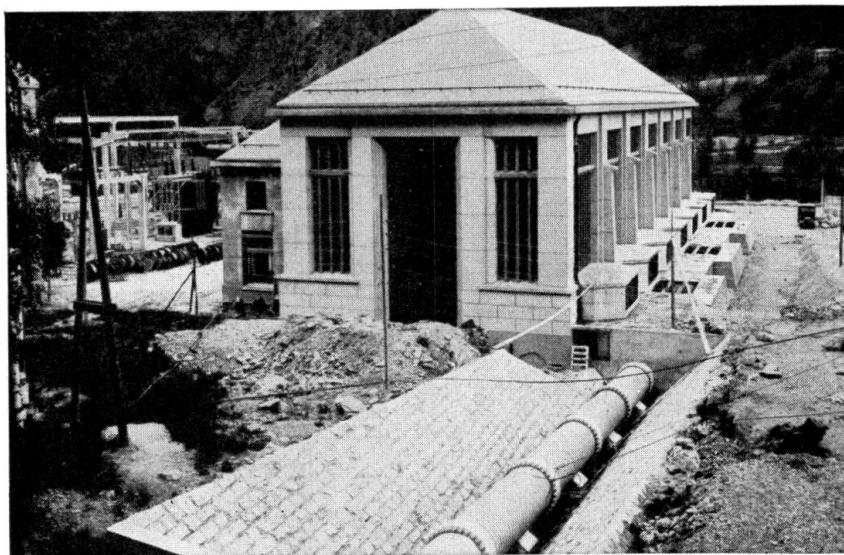


Fig. 3.
Conduite forcée à son arrivée à l'usine génératrice.

garanties réellement scientifiques de résistance et de légèreté, en même temps le procédé s'avère singulièrement économique.

Les conditions de service auxquelles doivent satisfaire les tuyaux des conduites forcées ne sont évidemment pas identiques à celles prévues pour les tubes de canons.

Mais ce qui fut dit précédemment, à l'égard de l'auto-frettage de ces derniers, permettra de saisir plus aisément l'application aux premiers d'un procédé du même ordre.

Le désideratum reste le même : assurer la combinaison optimum, adéquate aux circonstances, de la résistance et de la légèreté avec des garanties scientifiques contrôlées.

Un tuyau auto-fretté pour conduite forcée se compose :

— d'un tuyau généralement en tôle d'acier soudée formant paroi interne, dont l'épaisseur est une fraction de celle qu'aurait un tuyau ordinaire de résistance équivalente à celle du tuyau auto-fretté, et

— d'anneaux de renfort (frettes) régulièrement espacés sur la surface extérieure de la paroi.

Les frettes sont de section rectangulaire, laminées, sans soudure, en acier traité à haute résistance dont la limite élastique est notablement plus élevée que celle de la tôle du tuyau, condition essentielle du frettage par ce procédé.

Voyons maintenant comment le processus de fabrication va permettre à cet ensemble (tuyau-paroi et frettes) une combinaison d'efforts fournissant la solution du problème (résistance et légèreté).

Le diamètre extérieur du tube-paroi est légèrement inférieur au diamètre intérieur des frettes; celles-ci peuvent donc être placées à froid à l'écartement convenable.

L'intérieur du tuyau est mis en communication avec une forte presse hydraulique et les deux extrémités sont obturées de façon étanche.

On donne la pression qui est augmentée progressivement jusqu'à atteindre au moins le double de la pression de marche (pression statique + surpression) prévue pour le service ultérieur.

Cette pression maximum est dite: «pression de frettage».

La pression de frettage, une fois atteinte, on la maintient pendant une minute; on laisse ensuite tomber la pression jusqu'à la pression de marche. On procède alors au martelage du tube et des frettes, aux vérifications et mesures nécessaires, examinant en particulier si la paroi s'est bien comportée pendant sa déformation. On renforce alors la pression jusqu'au taux de la pression de frettage, que l'on maintient pendant cinq minutes au minimum.

Dès lors sont terminées à la fois l'opération du frettage et les épreuves de pression.

A cet exposé sommaire, il convient de joindre quelques remarques soulignant l'intérêt de ce procédé de fabrication:

1^o — Sous l'action progressive croissante, le tube-paroi se dilate et commence par adhérer aux frettes.

La pression continuant à monter, le tube tend à épanouir les frettes, dont le métal se trouve mis en état de tension.

Après chute définitive de la pression: d'une part, le tube-paroi, dont la limite élastique originelle a été dépassée, garde une déformation permanente; il a acquis une nouvelle limite élastique, supérieure à la précédente, et bénéficie du supplément de résistance imputable à l'auto-frettage. D'autre part, les frettes qui, du fait de la haute résistance de leur métal constitutif, n'ont subi qu'une déformation élastique, déterminent sur la paroi externe du tuyau un serrage analogue à celui que produirait la contraction de frettes posées à chaud.

2^o — L'expérience prouve que, à égalité de résistance de service un tuyau auto-fretté de la sorte présente un poids moitié moindre que celui d'un tuyau ordinaire soudé.

3^o — Un avantage notable du procédé consiste dans le fait que, aux diverses étapes de la fabrication, il est possible de suivre, à l'aide d'appareils appropriés, le travail du métal, d'en surveiller l'évolution, et d'agir éventuellement, en temps utile, sur la pression de frettage calculée, pour réaliser exactement les conditions théoriques.

4° — Enfin, la fabrication fournit par elle-même toutes les épreuves de contrôle nécessaires et suffisantes.

L'opération une fois terminée, le tuyau auto-fretté emporte avec lui la garantie d'une résistance au moins égale à deux fois la pression de marche prévue, puisque c'est cette pression de garantie qui a réalisé sa production.

Les épreuves de pression après montage n'interviendront plus que pour vérification de l'étanchéité des assemblages de tuyaux entre eux.

5° — En fait, les tuyaux auto-frettés sont comparables aux tuyaux sans soudure, c'est-à-dire, très résistants.

Par conséquent, leur utilisation dans les conduites forcées se montre fort intéressante lorsque les calibres surpassent ceux que peuvent atteindre les tuyaux sans soudure, ainsi que dans les cas où les tuyaux ordinaires soudés sont insuffisamment résistants ou réclament des épaisseurs entraînant des poids exagérés ou des impossibilités de fabrication.

L'opération principale de la fabrication des tuyaux auto-frettés est donc celle du frettage qui constitue en même temps l'épreuve hydraulique à une pression au moins égale au double de la pression maximum de marche (pression statique + surpression).

Il en résulte que la machine la plus importante pour la construction des tuyaux auto-frettés est la presse hydraulique d'épreuves qui prend de grandes proportions quand il s'agit de fabriquer une conduite comme celle de la «Bissorte».

Un point très important, sur lequel il y a lieu d'insister, concerne le contrôle des efforts dans la matière que le mode de fabrication des tuyaux auto-frettés rend possible.

Avant de commencer la mise en pression, on place sur les flettes un certain nombre de tensomètres que l'on répartit uniformément sur la longueur du tuyau à frettter.

Pendant le cours de l'opération de frettage, on enregistre d'abord la pression de mise en contact de la paroi avec les flettes, puis la tension des flettes sous les pressions croissantes jusqu'à la pression de frettage, ensuite sous les pressions décroissantes jusqu'à la pression de marche, de nouveau sous la pression de frettage et sous la pression de marche; enfin, sous la pression nulle pour vérifier le degré de serrage des flettes sur la paroi.

Au cours de ces opérations, il est possible de corriger, en temps utile, la pression de frettage calculée pour réaliser les tensions théoriques.

Les vérifications faites en cours de fabrication ou à l'occasion d'essais systématiques ont mis en évidence la concordance très satisfaisante des sollicitations réelles et théoriques, et ont permis de vérifier la marge importante qui existe entre la limite élastique des flettes et leur tension maximum sous l'effet de la pression de frettage.

Le tuyau-paroi des tuyaux auto-frettés est généralement constitué soit d'acier extra-doux donnant:

Résistance à la traction	$\geq 34 \text{ kg/mm}^2$
Limite élastique	$\geq 19 \text{ kg/mm}^2$
Allongement	$\geq 30 \%$
Résilience Mesnager	$\geq 7 \text{ kgm/cm}^2$
Taux de fatigue admis	8 kg/mm^2

soit d'acier spécial à haute limite élastique donnant:

Résistance à la traction	$\geq 54 \text{ kg/mm}^2$
Limite élastique	$\geq 36 \text{ kg/mm}^2$
Allongement	$\geq 20 \%$
Résilience Mesnager	$\geq 7 \text{ kgm/cm}^2$
Taux de fatigue admis	12 kg/mm^2

Dans le premier cas, les frettés sont en acier au carbone traité dont les caractéristiques mécaniques sont:

Résistance à la traction	$\geq 90 \text{ kg/mm}^2$
Limite élastique	$\geq 60 \text{ kg/mm}^2$
Allongement	$\geq 8 \%$
Résilience Mesnager	$\geq 4 \text{ kgm/cm}^2$
Taux de fatigue admis	24 kg/mm^2

et dans le second, elles sont en acier spécial traité avec:

Résistance à la traction	$\geq 115 \text{ kg/mm}^2$
Limite élastique	$\geq 95 \text{ kg/mm}^2$
Allongement	$\geq 6 \%$
Résilience Mesnager	$\geq 5 \text{ kgm/cm}^2$
Taux de fatigue admis	36 kg/mm^2

La fatigue moyenne d'un tuyau auto-fretté comptée par rapport à la section totale paroi et frette est de 16 kg/mm^2 dans le premier cas, et de 24 kg/mm^2 dans le second, ce qui veut dire qu'un tuyau ainsi constitué est d'un poids moitié moindre que celui d'un tuyau ordinaire dont les taux de fatigue seraient respectivement de 8 et 12 kg/mm^2 .

L'intérêt d'utilisation des tuyaux auto-frettés n'est pas seulement limité aux conduites forcées de très haute chute car l'expérience a montré qu'il était avantageux, au point de vue économique, de les employer à partir du moment où la pression maximum de marche atteint 320 mètres, mais leur limite d'utilisation est beaucoup plus étendue dans certains cas particuliers et lorsque la question sécurité revêt une importance toute particulière.

En dehors des économies sur les frais de premier établissement que l'emploi des tuyaux auto-frettés permettent de réaliser, et de la grande sécurité qu'ils fournissent, les tuyaux auto-frettés présentent pour les exploitants d'Usines Hydro-Electriques un autre intérêt.

Ce dispositif comporte, en effet, l'avantage de réduire notablement les coups de bélier du fait de la grande dilatation diamétrale des tuyaux sous l'effet de la pression intérieure conséquence du taux de fatigue élevé qu'il est possible d'admettre dans le métal qui les constitue.

En effet, le coup de bélier est fonction de la célérité ou vitesse de propagation des ondes et diminue avec la valeur de celle-ci.

La célérité pour le cas de tuyaux d'acier a pour valeur:

$$a = \frac{9.900}{\sqrt{48,3 + 0,5 \frac{D}{e}}} \text{ or: } \frac{D}{e} = \frac{2R}{P} \text{ donc: } a = \frac{9.900}{\sqrt{48,3 + \frac{R}{P}}}$$

en prenant, par exemple:

- pression intérieure . . . $p = 1000 \text{ m d'eau soit } 1 \text{ kg/mm}^2$
- taux de fatigue . . . $R = 8 \text{ kg/mm}^2$ pour tuyau ordinaire.
- $R = 16 \text{ kg par mm}^2$ pour tuyau auto-fretté.

Dans le premier cas: $a = 1320$ mètres et,

dans le second: $a = 1230$ mètres,

ce qui met en évidence ce qui vient d'être indiqué.

Les tuyaux auto-frettés qui constituent la plus grande partie de la conduite forcée de la «*Bissorte*» ont été construits avec des tuyaux soudés au gaz à l'eau. Dans le but d'obtenir une grande homogénéité au moment de l'auto-frettage, on prenait la précaution de constituer chaque tuyau avec des tôles provenant de la même coulée.

Au cours des opérations d'auto-frettage, on effectuait un martelage énergique des flettes et des soudures.

D'autre part, sur un certain nombre de tuyaux, des mesures sur paroi et flettes étaient effectuées à partir de la pression 0 jusqu'à la pression de frettage et inversement à l'aide de tensomètres *Huggenberger*. Elles ont permis de vérifier la concordance des fatigues réelles et des fatigues théoriques.

Les tuyaux de diamètre 1,300 m soumis à la plus forte charge ont été éprouvés à la pression de 264 kg par cm^2 .

Au moment du frettage des tuyaux de fortes brides de calibrage étaient placées aux extrémités, ce qui permit d'obtenir des éléments parfaitement calibrés et de faire en série l'usinage sans retouche ultérieure des brides ou manchons fixés aux extrémités des tuyaux.

Les brides d'extrémité existant sur un certain nombre de tuyaux ont été soudées sur ceux-ci à l'arc électrique et des essais complémentaires de pression ont été réalisés pour s'assurer de l'étanchéité et de la résistance de ces soudures.

Peinture en atelier.

Avant leur expédition tous les tuyaux étaient brossés, décalaminés et goudronnés à chaud intérieurement et extérieurement.

Pour effectuer l'opération de goudronnage, les tuyaux étaient chauffés avec de grands chalumeaux à gaz à la température de 80° environ puis immersés dans un immense bac à goudron, préalablement chauffé à la même température. Une fois sortis du bac et égouttés, ils se trouvaient imprégnés d'une pellicule protectrice de goudron extrêmement adhérente.

Contrôle.

Le contrôle de la fabrication était assuré d'une part par le service de Contrôle permanent du Constructeur, chargé spécialement d'effectuer en cours de fabrication les prélèvements d'éprouvettes, les essais de vérification des soudures, les essais hydrauliques et les vérifications de dimensions, d'autre part par un contrôle intermittent effectué par un service dépendant du Maître de l'oeuvre.

Chaque tuyau faisait l'objet d'un poinçonnage et d'un procès-verbal de contrôle notamment en ce qui concerne les essais à la pression hydraulique.

Epreuve hydraulique.

L'épreuve hydraulique qui, pour les tuyaux auto-frettés, est l'opération principale de leur fabrication, constitue pour les conduites forcées en général la plus importante des opérations de contrôle puisqu'elle définit un coefficient minimum de sécurité pratique.

Tous les tuyaux de la conduite de la «Bissorte» ont été éprouvés au double de la pression maximum (pression statique + surpression) qu'ils ont à supporter en service.

On utilisait pour cela une «presse hydraulique d'épreuve» de 3500 t,¹ capable d'éprouver des tuyaux jusqu'à 3 m de diamètre et 13 mètres de longueur.



Fig. 4.

Partie de conduite auto-frettée à son entrée dans une galerie inclinée vers la cote 1220.

Pour les tuyaux auto-frettés, nous avons déjà indiqué comment s'effectuait l'épreuve hydraulique en même temps que l'opération d'auto-frettage.

Pour les tuyaux soudés à l'arc électrique ou au gaz à l'eau, la pression était d'abord montée au double de la pression maximum de marche pendant une minute, puis descendue à la pression de marche sous laquelle on effectuait un martelage énergique des soudures et ensuite remontée à la pression d'épreuve tenue pendant 5 minutes au moins.

La fabrication terminée, les tuyaux étaient acheminés sur le chantier par camion automobile au fur et à mesure des besoins du montage.

¹ L'effort de 3500 t est celui qui correspondait à la poussée hydraulique sur les plateaux au cours de l'essai des tuyaux de la partie inférieure à 264 kgs par cm².

Travaux de montage.

Le premier et le plus important des problèmes à résoudre pour mener à bien le travail de montage fut celui du transport des tuyaux à leur emplacement définitif; le poids de ces éléments, les dénivellations à franchir, et la pente très prononcée du profil constituaient des difficultés auxquelles il convient d'ajouter la présence des coudes en plan et celle des galeries inclinées.

La solution choisie fut la suivante:

Transport par *câble aérien* de tous les éléments compris entre la cote 1030 et la cote 2015 avec, en outre, pour chacune des galeries comprises dans cette zone une installation spéciale destinée à la descente des tuyaux.

Transport par *plan incliné* des éléments compris entre la cote 945 et la cote 1030.

Le montage du tronçon situé à l'aval du précédent ne présentait aucune difficulté particulière, étant donné sa faible pente et la facilité d'accès.

Le programme suivi a été conditionné par:

la capacité de transport du câble aérien,

la nécessité de mener de pair la pose de la conduite et les travaux de génie civil, et,

l'impossibilité de multiplier les équipes par crainte d'accidents.

Il dut obligatoirement être réparti sur deux campagnes.

Durant la première, on posa toute la partie comprise entre la cote 1030 et la cote 1650, ainsi que le tronçon allant de la Centrale (collecteur compris) au troisième massif d'ancrage.

La deuxième campagne bien moins chargée, vit l'achèvement du travail avec le raccordement à la conduite à faible pente et le raccordement aux trois turbines.

Quatre «départs de montage» furent utilisés, mais on ne travailla simultanément que sur deux au maximum le montage sur l'un d'eux servant de volant de travail en cas de ralentissement ou d'arrêt sur l'autre. Cette méthode s'imposait notamment chaque fois que l'on entrait dans une galerie où monteurs et maçons devaient, à tour de rôle, se céder la place.

Dès le début du montage, un premier essai eut d'abord lieu à la pression hydraulique sur un des premiers tronçons mis en place de façon à s'assurer de l'étanchéité des premières rivures exécutées sur le chantier, qui supportent en service normal des pressions de l'ordre de 100 kg/cm².

Un deuxième essai, beaucoup plus important celui-là fut effectué après achèvement complet du montage de tous les tuyaux auto-frettés (collecteur compris), c'est-à-dire, toute la partie de conduite depuis l'Usine génératrice (cote 936,70) jusqu'à la cote 1715.

Ces essais avaient d'abord pour but de vérifier l'étanchéité des joints; ensuite de contrôler la stabilité de la conduite et des massifs d'ancrage sous l'effet des pressions maximums que la conduite serait amenée ultérieurement à supporter.

Le remplissage de la conduite ayant été effectué au préalable avec les eaux de ruissellement captées le long du profil, la mise en pression fut obtenue à l'aide d'une électropompe installée à l'intérieur de l'Usine génératrice et refoulant directement sur le collecteur. Des manomètres étaient placés aux deux extrémités du tronçon à éprouver.

Pendant la première journée, la pression fut d'abord montée à 115 kg/cm² au collecteur, puis la deuxième journée à 124 kg et la troisième journée à 132 kg. A ce moment, la pression enregistrée par le manomètre placé à la partie supérieure était de 54 kg/cm².

Par rapport à la pression statique les surpressions introduites au cours de cet essai dans le tronçon éprouvé ont été de 15 % au collecteur et 50 % à la partie supérieure.

Cette épreuve très dure, notamment pour les parties supérieures du tronçon éprouvé, n'ont donné lieu à aucune observation. Ils ont permis de constater la parfaite étanchéité des joints et des rivures, et la parfaite stabilité des massifs d'ancrage sollicités par des efforts considérables.

Dès l'achèvement complet du montage, la conduite fut recouverte après nettoyage d'une peinture bitumineuse.

A l'intérieur, on rétablit les parties de peintures passées en Usine et détériorées en cours de montage, à l'extérieur on passa une couche dans les parties à l'air libre et deux couches dans les parties en galerie.

La partie inférieure voisine de l'Usine génératrice fut, en outre, enduite extérieurement d'une couche supplémentaire de peinture à l'aluminium.

L'installation en ordre de marche de la conduite forcée a été terminée en Octobre 1934 et la mise en service de l'Usine Hydro-Electrique a eu lieu en Mai 1935, date depuis laquelle elle fait ressentir les effets bienfaisants de sa puissance régularisée.

Résumé.

L'Usine Hydro-électrique de *Bissorte*, qui comporte 3 turbines de 34,700 CV 73,5 m sous 1,150 m de chute) est alimentée par une seule conduite forcée d'un diam. variant de 1,800 m (partie haute) à 1,300 m (partie basse), d'une longueur de 3,037 m et d'un poids de 3,800 Tonnes.

C'est grâce aux tuyaux autofrettés, système *G. Ferrand*, que cette conduite unique a pu être réalisée. Elle travaille dans sa partie inférieure en service normal à la pression maximum de 132 kg/cm².

Les tuyaux autofrettés sont composés d'un tube cylindrique et de fretttes dont le diam. intérieur est légèrement supérieur au grand diamètre du tube en question. Le serrage des fretttes sur ce tube est obtenu non point à chaud, ce qui éliminerait la possibilité d'employer pour les fretttes de l'acier traité à haute résistance, mais à froid par extension de la paroi, obtenue par l'application à l'intérieur du tube, d'une pression déterminée, dite pression de frettage. Cette déformation permanente n'enlève rien au tube de ses qualités, elle lui en donne au contraire de nouvelles; la pression d'autofrettage constitue en même temps une sévère épreuve de résistance, pression qui est au moins double de la pression maximum de service.

Le contrôle de la fatigue du métal s'effectue aisément et les coups de bêlier sont sensiblement réduits avec ce type de tuyaux qui, grâce à l'emploi d'acier à haute résistance, permet des prix de revient réduits.

Leere Seite
Blank page
Page vide