

Zeitschrift: IABSE publications = Mémoires AIPC = IVBH Abhandlungen
Band: 8 (1947)

Artikel: Structure de la conduite forcée unique pour hautes chutes à grande puissance
Autor: Ferrand, G.
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-8886>

Nutzungsbedingungen

Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften. 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. [Siehe Rechtliche Hinweise.](#)

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. [Voir Informations légales.](#)

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. [See Legal notice.](#)

Download PDF: 17.11.2024

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

STRUCTURE DE LA CONDUITE FORCÉE UNIQUE POUR HAUTES CHUTES A GRANDE PUISSANCE

AUSBILDUNG DER DRUCKLEITUNG FÜR HOHE GEFÄLLSSTUFEN MIT GROSSER LEISTUNGSFÄHIGKEIT

CONSTRUCTION OF THE HIGH-PRESSURE PIPE LINE FOR HIGH FALLS WITH GREAT CAPACITY

G. FERRAND,

Président Directeur Général de la Société dauphinoise d'études et de montages, Grenoble.

L'une des caractéristiques des hautes chutes modernes françaises de grande puissance réside dans le fait qu'elles sont alimentées par une conduite unique, composée en grande partie de tuyaux auto-frettés dont le frettage est constitué tantôt de frettes rigides, comme à La Bissorte (7 m 3,5 sous 1150 m, puissance sur l'arbre des turbines 105 000 CV) tantôt de frettes souples comme au Venéon (17 m 3 sous 499 m, puissance sur l'arbre des turbines 75 000 CV). Nous nous proposons d'exposer ici avec quelques détails la structure de ces nouvelles conduites.

1° La soudure électrique

Nous sortirions du cadre de cette communication ou plutôt il ne serait pas assez grand si nous vous parlions de la propre technique de la soudure électrique, maintenant bien connue; mais nous devons dire que l'influence de la soudure électrique a été très grande sur la technique de la chaudronnerie soudée en général et sur celle des conduites forcées en particulier.

La construction soudée à l'arc électrique nécessite des soins particuliers qui n'étaient pas indispensables pour la construction soudée au gaz à l'eau. Les pièces à souder doivent subir une préparation et un calibrage parfaits; dans la plupart des cas, un recuit est nécessaire et les soudures électriques se prêtent facilement à un contrôle radiographique. Cet ensemble d'opérations a contribué automatiquement à l'amélioration de la qualité, du fini et de la présentation des pièces.

Pour la construction des tuyaux soudés à l'arc électrique, on n'utilise plus guère les tôles d'acier extra-doux qui étaient auparavant les seules employées. Par contre, on utilise couramment les tôles en acier demi-dur qualité Marine 50 S. S., E mini 28 kg, et 60 S. S. E mini 34 kg, ainsi que les tôles en acier demi-dur semi-inoxydable au $Cr-Cu$, E mini 34 kg.

L'intérêt d'utiliser des aciers à limite élastique de plus en plus élevée est évident, car à coefficient de sécurité égal, le poids d'un élément de conduite forcée est inversement proportionnel à la limite élastique du métal utilisé, alors que le prix au kg de celui-ci n'est pas proportionnel à celle-là;

par exemple le rapport $\frac{E}{E'}$ des limites élastiques d'une tôle au chrome-cuivre, ($E = 34$ kg) et d'une tôle S. M. A. ($E' = 20$ kg) est de 1,7 alors que le rapport des prix est de l'ordre de 1,2.

L'utilisation systématique de la soudure à l'arc électrique comme mode de construction des tuyaux et pour leur assemblage entre eux a permis d'améliorer sensiblement le rendement hydraulique des conduites forcées. Une conduite soudée ne présente à l'intérieur aucune solution de continuité et pour un même diamètre on a vérifié que la perte de charge linéaire dans une conduite soudée est le 75 % environ de celle d'une conduite entièrement rivée.

2° Les tuyaux surpressés

S'il n'est pas indiqué d'utiliser actuellement pour la soudure des nuances d'acier à limite élastique plus élevée que celles dont nous avons fait mention, on obtient le même résultat en partant d'une nuance d'acier parfaitement soudable, avec laquelle on constitue un tuyau que l'on soumet ensuite à un traitement convenable basé sur le relèvement de la limite élastique par traction à froid.

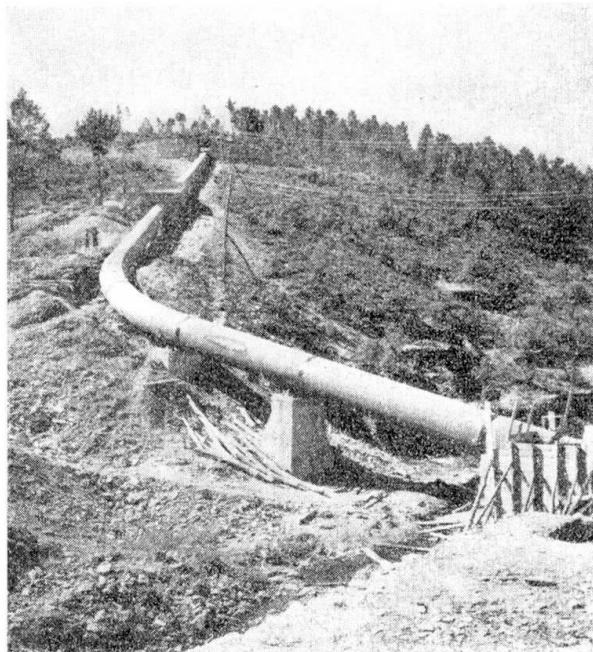


Fig. 1.

Conduite forcée de la Chute du Vénéon (Isère-France) — Druckleitung Vénéon (Isère-Frankreich) — Vénéon high-pressure pipe line (Isère, France).

Le phénomène du relèvement de la limite élastique d'un barreau d'acier par un effort de traction, suffisant pour produire une déformation permanente est bien connu, c'est l'érouissage par traction.

D'une manière générale, l'érouissage 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 considérablement la charge utile d'une pièce sans rendre pour cela son emploi dangereux, car un acier éroui par traction ne devient ni cassant, ni fragile, ni hétérogène ainsi que l'ont démontré les nombreuses expériences qui ont été faites à ce sujet. Au contraire, si l'on compare deux aciers de même consistance (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 plus élevés que dans le premier.

Loin de redouter l'écrouissage, on l'utilise systématiquement dans un certain nombre de cas pour améliorer les propriétés mécaniques des métaux, par exemple dans le béton armé avec des ronds d'acier tractionnés jusqu'au voisinage de leur limite de rupture et par conséquent fortement écrouis.

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 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 ainsi construit, à l'intérieur du moule et on le soumet, suivant le processus utilisé dans la fabrication des tuyaux auto-frettés, à une pression hydraulique intérieure croissante.

Sous l'effet de cette pression la pièce se dilate après que la limite élastique initiale du métal la constituant a été atteinte, jusqu'à arriver en contact avec la surface intérieure du moule. La pression obtenue à ce moment est dite „pression de surpressage“.

On obtient ainsi un „tuyau soudé“ muni d'une limite élastique beaucoup plus élevée que celle du même „tuyau soudé“ 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 était elle-même plus grande.

D'autre part, on a établi un élément de conduite capable de supporter en service normal, avec le même coefficient de sécurité, des pressions intérieures beaucoup plus élevées qu'à son état initial et le tuyau ainsi construit se trouve du fait même de sa fabrication, éprouvé et muni d'un coefficient de sécurité parfaitement défini par le rapport $\frac{P_1}{P}$ dans lequel:

$$\begin{aligned} P_1 &= \text{pression de surpressage} \\ P &= \text{pression de marche} \end{aligned}$$

L'intérêt économique et pratique des „tuyaux surpressés“ est évident. Mais prenons un exemple et constatons d'abord qu'une tôle d'acier donnant $E = 34$ kg à son état initial donne $E = 40$ kg après un allongement de 2 % seulement et $E = 50$ kg après un allongement de 5 %; puis comparons les tuyaux construits pour supporter une certaine pression avec le même coefficient de sécurité. En appelant K le poids d'un tuyau normal, le poids d'un tuyau surpressé à 2 % sera $0,85 K$ et $0,68 K$ s'il est surpressé à 5 %. Si d'autre part, comme cela est la règle pour les conduites forcées, on calcule les épaisseurs en partant d'un coefficient de sécurité de 2,5 par rapport à la limite élastique sous l'effet de la pression de service; on applique aux „tuyaux surpressés“ lors de leur fabrication, une pression de surpressage qui est au minimum égale à 2,5 fois la pression de service, ce qui constitue en même temps une pression d'épreuve égale à 2,5 fois la pression de service.

Les „tuyaux surpressés“ sont à leur origine constitués de tuyaux soudés en tôle d'acier demi-dur dans les nuances à 54 kg.

On construit actuellement des tuyaux surpressés à 2 % dont la limite élastique est relevée à 40 kg, et on envisage la construction de tuyaux surpressés à 3,4 et même 5 % avec limites élastiques relevées respectivement à 44, 47 et 50 kg.

3° Les tuyaux auto-frettés

Les tuyaux auto-frettés sont plus connus que les précédents. Ils ont pris une place considérable dans l'aménagement hydro-électrique de la France depuis 1925, et les hautes chutes telles que La Bissorte (1146 m), Eylie (1040 m), le Portillon (1413 m) et les Sept-Laux (1050 m) pour ne citer que les plus puissantes, les ont largement utilisés.

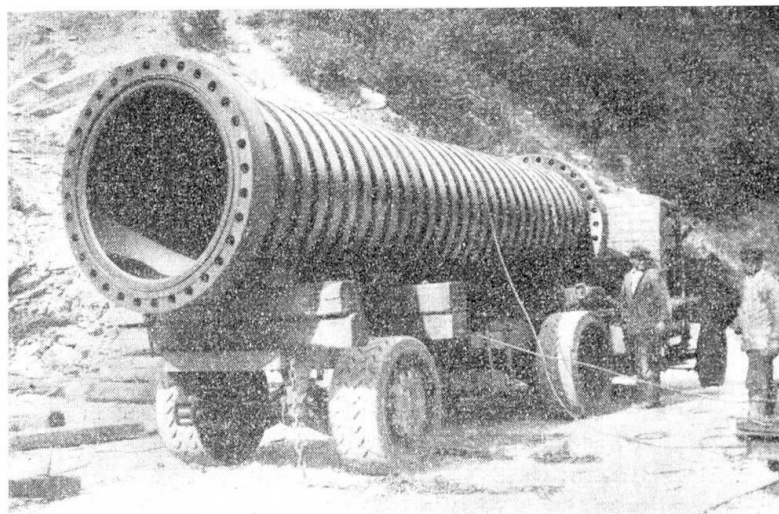


Fig. 2.

Tuyau de la conduite forcée de la Chute de „La Bissorte“ — Rohr der Druckleitung „La Bissorte“ — Pipe of the „La Bissorte“ high-pressure pipe line.

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 avec un écartement convenable, l'ensemble est introduit entre les plateaux d'une presse hydraulique d'épreuve, puis on met progressivement le tuyau en pression jusqu'à atteindre et parfois 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, d'abord jusqu'à plaquer contre les frettes, puis la pression continuant à monter produit dans celles-ci des tensions telles qu'une fois l'opération terminée et la pression ramenée à zéro, les frettes sont encore en état de tension; la paroi par contre sous leur influence se trouve en état de compression. Cet état de „précontrainte“ s'appelle aussi „frettage“ quel que soit le procédé utilisé (auto-frettage, frettes emmanchées à chaud, frettes enroulées sous tension initiale etc. ...).

Pendant cette opération, la limite élastique du métal de la paroi est dépassée, et l'on sait qu'après avoir dépassé sa limite d'élasticité, le métal

conserve un allongement permanent après la suppression de la charge et possède une nouvelle limite d'élasticité égale à la fatigue maximum supportée.

Les frettes, par contre, ne sont soumises qu'à des allongements élastiques.

Jusqu'en 1942 les tuyaux auto-frettés étaient constitués de tôles en acier à 20—28 ou 34 kg de limite élastique respectivement 35—48 et 54 kg de rupture et de frettes laminées sans soudure en acier traité à 60 ou 95 kg de limite élastique respectivement 90 et 115 kg de rupture.

Pour les hautes chutes de très grande puissance on prévoit maintenant un type de tuyau auto-fretté surpressé, câblé, dont la paroi est constituée d'un tuyau surpressé et dont le frettage souple comprend des frettes individuelles en élingues à fils câblés en acier anti-corrosif à 200 kg (limite élastique 150 kg). Ce frettage souple peut être également constitué non pas d'élingues individuelles, mais d'un câble enroulé en hélice sur le tuyau.

Les tuyaux frettés en élingues à fils câblés ont été utilisés pour la première fois sur la conduite forcée de la chute du Vénéon $\varnothing = 2\text{ m } 000$ sous 46 kg par cm^2 (pression max. de service) et pour la remise en état de la partie inférieure de la conduite forcée de la Chute de la Bissorte $\varnothing 1\text{ m } 300$ sous 132 kg par cm^2 (pression max. de service) détruite par les Allemands en août 1944.

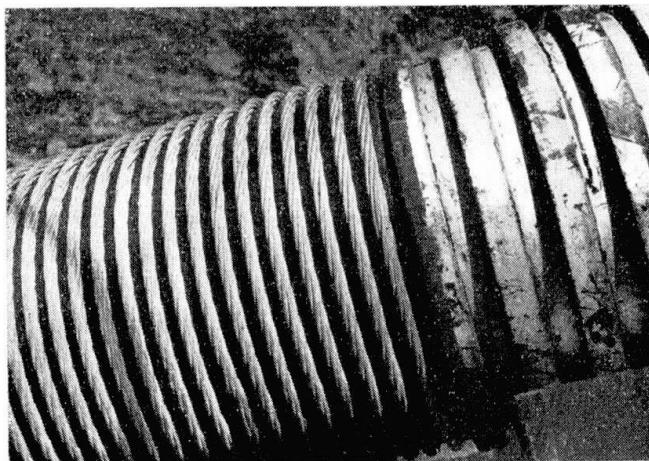


Fig. 3.

Conduite forcée de „La Bissorte“ — Druckleitung „La Bissorte“ — „La Bissorte“ high-pressure pipe line.

La conception nouvelle qui consiste à prendre des frettes souples au lieu de frettes rigides, découle de la nécessité d'utiliser le fil d'acier en vue de l'obtention du poids minimum.

Nous avons tout d'abord pensé au système de frettage employé en artillerie, constitué par un fil enroulé en hélice, par spires jointives, en plusieurs couches superposées. La fragilité de ce dispositif nous a vite fait renoncer à son emploi et nous nous sommes orientés vers l'utilisation des fils sous forme de câbles tels qu'on les emploie sur les ponts suspendus, dans les mines et sur les installations de funiculaires ou de téléphériques. On connaît, en effet, les services rendus par les câbles d'acier depuis de longues années, leur aptitude à supporter les efforts les plus rudes et les plus désordonnés, leur facilité à résister aux influences extérieures, grâce aux effets

de câblage. Les câbles tracteurs par exemple qui fonctionnent dans des conditions particulièrement sévères assurent sans inconvénient leur service avec des fils cassés.

Les garanties correspondant à ces références étaient, certes, de la plus grande importance, mais nous devions adapter ce matériel à un usage inédit; par ailleurs, son montage sur des tuyaux de conduites forcées posait des problèmes nouveaux particuliers au frottement souple; certaines hypothèses que nous avons émises avaient besoin d'être vérifiées, et tout cela nous a conduit à entreprendre divers essais des plus intéressants.

Les fils utilisés sont en acier dit „anticorrosif“; ce sont des fils galvanisés par un procédé spécial: la galvanisation est faite à chaud lors des premières passes de tréfilage; les autres passes, nécessaires à l'obtention de la résistance désirée, sont ainsi faites sur des fils galvanisés. Cela donne à la couche de zinc déposée sur l'acier une adhérence, une régularité et une résistance remarquables; c'est comme s'il y avait interpénétration moléculaire. En fait, nous avons effectué des essais de corrosion sur des échantillons de frettes en élingues à fils câblés de la conduite du V é n é o n. Ces essais barbares ont consisté à les frotter, les marteler, les serrer jusqu'à déformer la surface des fils, puis à les exposer aux intempéries. Aucune trace d'oxydation n'a été constatée après plus de deux ans alors que des fils témoins en acier ordinaire, traités dans les mêmes conditions avaient été rouillés dès les premiers jours.

Malgré l'expérience qu'on avait des câbles on pouvait penser que des frettes constituées avec des fils même de très grande dureté ne supporteraient pas, comme les frettes rigides, les effets d'un éboulement ou du choc d'un corps dur, qui peuvent se produire dans la vie d'une conduite aérienne malgré toutes les précautions prises à ce point de vue.

Nous avons donc envisagé d'entreprendre des essais au choc; mais ceux-ci se sont trouvés réalisés par suite d'un important éboulement avec chute de gros blocs qui se produisit sur la conduite du V é n é o n. Des blocs de roche dure (gneiss) provenant des déblais de la déviation d'une route, ont été précipités sur la conduite en cours de montage.

Malgré la violence des chocs, le nombre et le poids des blocs, la conduite forcée s'est particulièrement bien comportée; les frettes élingues ont protégé la paroi des tuyaux qui n'a subi aucune déformation ni détérioration quelconque. Les frettes elles-mêmes ont parfaitement bien résisté dans l'ensemble et 4 seulement ont souffert.

Ces frettes ont eu des fils coupés et d'autres écrasés; mais les détériorations correspondantes n'intéressaient qu'un seul toron parmi les 7 composant l'élingue; et comme le toron avarié se trouvait éloigné du point de jonction du toron central, il devait en résulter que le coefficient de sécurité de la frette ne serait pas altéré. En effet, une frette élingue est en général constituée de 7 torons de n fils de 2 à 3 mm, le toron central comportant une solution de continuité (point de jonction). Dans le calcul de résistance on ne compte donc que 6 torons (section nette). Il s'ensuit qu'à ce point de vue et lorsque l'on considère une section de l'élingue en dehors du point de jonction du toron central, il y a 7 torons résistants au lieu de 6 nécessaires et l'on peut en éliminer un sans nuire à la sécurité.

Avec chacune des frettes détériorées, on a constitué une éprouvette de traction comportant en son milieu la partie abimée, et dans le but de vérifier leur résistance et de la comparer à celle imposée pour l'élingue intacte,

on a procédé à des essais de rupture des éprouvettes ainsi constituées, dont les résultats ont apporté la vérification de ce que nous venons d'indiquer.

Une autre question que nous avons eue à examiner se rapporte à l'influence sur la limite de rupture des fils, torons et câbles de pressions latérales d'appui exercées sur ceux-ci, soumis en même temps à des tensions longitudinales.

Lorsqu'on examine un tuyau de ce type, on a l'impression visuelle que l'appui des frettes sur la paroi est constitué d'une succession de points; la surface n'apparaît pas, et lorsque l'on connaît l'importance des pressions d'appui qui peuvent être atteintes, on peut se demander si l'effort de compression transversale exercée sur les fils qui, tour à tour viennent en contact avec la paroi, ne tend pas à réduire sensiblement leur résistance à la traction et dans une proportion évidemment moindre, celle de la section totale de la frette.



Fig. 4.

Chute de Santa-Luzia (Portugal) — Druckleitung Santa-Luzia (Portugal) —
Santa-Luzia pipe line (Portugal).

C'est ainsi que nous avons exécuté plusieurs séries d'essais, sur des frettes souples en élingues à fils câblés, prises parmi celles destinées à la conduite forcée de la Chute du Vénéon. Ils ont été réalisés en exerçant sur des éprouvettes en câble, torons et fils tractionnées sur une machine d'essai des compressions transversales, obtenues par pression hydraulique contrôlée manométriquement, agissant sur des pièces d'appui en acier identique à celui utilisé dans la construction des tuyaux auto-frettés de la conduite du Vénéon.

Il a été exercé sur les fils, torons et câbles essayés, des pressions latérales considérables atteignant jusqu'à 2500 kg par cm de longueur d'appui et 200 kg par mm² de surface d'empreinte obtenue.

Les résultats de ces essais, leur interprétation et leur extrapolation au cas des pressions latérales les plus fortes qui peuvent être envisagées sur les frettes souples d'une conduite forcée auto-frettée câblée, nous ont permis de conclure en toute certitude que l'influence de la pression normale à la section d'une frette, appliquée en même temps que la tension longitudinale, est faible et sans danger. La réduction du coefficient de sécurité est au maximum de 10 % dans les conditions les plus défavorables et n'est pas apparente lorsqu'il s'agit de pressions latérales faibles ou moyennes comme c'est le cas de la conduite forcée du Vénéon. Par ailleurs, partant de cette conclusion, on peut agir en conséquence pour maintenir le coefficient de sécurité habituel.

Malgré les conclusions tirées des essais précédents, nous avons voulu les vérifier expérimentalement. C'est ainsi que nous avons effectué un essai de rupture sur un tuyau type Vénéon.

Diamètre extérieur 1 m, 940, épaisseur 7 mm

Pression de marche 23 kg, 1 par cm²

Frettes en élingues sans fin, composées de 7 torons de 7 fils de 3 mm, espacées de 120 mm.

En faisant le calcul d'après les caractéristiques minima garanties pour les frettes par le fournisseur, on calcula la pression de rupture qui fut trouvée égale à 70 kg par cm². En adoptant comme résistance théorique des frettes le produit de leur section nette par la résistance des fils à la rupture, on calcula 78 kg par cm² au lieu de 70 kg.

Après avoir placé le tuyau à essayer entre les plateaux de la presse hydraulique d'épreuve, la pression fut montée progressivement jusqu'à 76 kg, 5 sous laquelle une frette se rompit.

L'examen intérieur et extérieur du tuyau après l'essai ne révéla aucune cassure, déchirure ou fissure sur la tôle ou sur la soudure. D'autre part, toutes les autres frettes étaient absolument intactes et ne présentaient aucune rupture de fils.

La pression de rupture de 76 kg, 5 réalisée fut supérieure à la pression de calcul déterminée d'après les caractéristiques d'établissement du tuyau, et sensiblement égale à la pression de rupture calculée en prenant comme base la charge de rupture des fils constituant l'élingue et la section de celle-ci.

Cet essai a permis de constater que le type de rupture sur tuyau auto-fretté à frettage souple est identique à celui d'un tuyau auto-fretté à frettage rigide et de vérifier que dans ce cas la pression exercée sur la faible surface d'appui des frettes était sans influence apparente sur le coefficient de sécurité, ce qui confirmait nos précédentes conclusions.

Les perfectionnements apportés à la technique et à la construction des conduites forcées au cours des 20 dernières années ont rendu possible l'équipement des hautes chutes à grande puissance dans des conditions économiques, grâce d'une part à la conduite unique et aux économies directes qui sont la conséquence de son utilisation; d'autre part, en raison des économies massives de métal dues à l'emploi des tuyaux et systèmes modernes.

La technique des conduites forcées a de son côté suivi l'évolution générale des matériaux et des constructions vers la légèreté des ouvrages, mais il est bon de dire que ces allègements n'ont pas été faits au détriment de

la qualité, et ce que nous avons dit à ce sujet de la soudure électrique, s'applique aux systèmes de tuyaux surpressés et auto-frettés — sur lesquels elle est d'ailleurs utilisée, — dont l'exécution ne s'accommode pas de médiocrité, ce qui en fait des produits de classe hautement internationale.

D'autre part, du fait de leur mode de fabrication, des essais et des épreuves qui s'y rapportent, ils portent en eux un coefficient de sécurité pratique parfaitement déterminé et élevé.

Et c'est ainsi qu'a été réalisé le tour de force de construire des ouvrages sous le triple signe de la Qualité, de l'Economie et de la Sécurité, bien que la réalisation simultanée de ces trois conditions apparaisse comme une gageure.

Résumé

Les conduites forcées qui alimentent les hautes chutes modernes françaises à grande puissance sont caractérisées par la mise en oeuvre de matériaux de qualité et de procédés spéciaux assurant une grande sécurité d'exploitation, en particulier:

Tuyaux surpressés en tôle d'acier à limite élastique spécialement relevée par expansion à froid sous 2,5 fois la pression de service.

Tuyaux auto-frettés avec frettes en câble d'acier inoxydable à 200 kg/mm², équipant les plus hautes chutes.

On a pu ainsi réaliser la „conduite unique“ qui permet l'installation dans les conditions les plus favorables de sécurité et d'économie.

Zusammenfassung

Die Druckleitungen der modernen französischen Hochdruckanlagen mit großer Leistungsfähigkeit sind durch die Verwendung von hochwertigen Materialien sowie durch die Anwendung von Spezialverfahren, die eine große Betriebssicherheit aufweisen, gekennzeichnet. Im Besonderen: Im voraus unter Druck gesetzte Rohre aus Stahlblech mit durch Kaltreckung erhöhter Streckgrenze, wobei der Überdruck den wirklichen Druck im Betrieb um das 2,5fache übersteigt.

Selbsttätig umschnürte Rohre, deren Umschnürungen aus rostfreien Stahlkabeln mit einer Festigkeit von 200 kg/mm² bestehen; diese Rohre wurden für die höchsten Gefällsstufen eingebaut.

So wurde die Einrohrleitung verwirklicht, welche den Ausbau unter Bedingungen ermöglicht, die in bezug auf Sicherheit und Wirtschaftlichkeit besonders günstig wirken.

Summary

The high-pressure pipe lines of modern French high-pressure installations of great capacity are characterised by the adoption of high-quality materials and also by the adoption of special methods which ensure great reliability in service. In particular: Tubes of steel plate, set under preliminary pressure, with increased yield point through cold stretching, the overpressure exceeding the actual pressure in service 2.5 times.

Automatically wound tubes, the windings consisting of stainless steel cables, with a tensile strength of 200 kg/mm²; these tubes have been used for the highest fall stages.

In this way the single-tube pipe line has been realised, which makes possible construction under conditions which act particularly favourable with regard to safety and economy.

Leere Seite
Blank page
Page vide