LA CONDUITE FORCÉE UNIQUE POUR HAUTES CHUTES À GRANDE PUISSANCE

G. FERRAND

Ingénieur A. et M.

Directeur Général de la Société Dauphinoise d'Etudes et de Montages

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 m³, 5 sous 1.150 mètres, puissance sur l'arbre des turbines 105.000 CV), tantôt de frettes souples comme au *Vénéon* (17 m³ sous 400 mètres, puissance sur l'arbre des turbines 75.000 CV). Nous nous proposons d'exposer ici, avec quelques détails, la structure de ces nouvelles conduites.

Mais parlons tout d'abord des efforts accomplis depuis plusieurs années, dans le but d'économiser le métal.

Nous sommes actuellement dans une période d'évolution des matériaux et des constructions, vers la légèreté des ouvrages, et les nécessités elles-mêmes ont contraint les ingénieurs à mettre systématiquement en œuvre des dispositions techniques tendant à réaliser des économies de métal de plus en plus grandes. La phobie du poids qui en sera la conséquence se maintiendra probablement lorsque les choses auront repris leur cours normal et, si la notion du prix doit à l'avenir entrer en ligne de compte, alors qu'elle est un peu éclipsée en ce moment, on ne s'attachera pas moins à réaliser des constructions de plus en plus légères.

Il y a cependant de nombreuses années, et cela bien avant que les circonstances nous obligent à réaliser dans nos installations des économies massives de métal, que nous avons ressenti nous-mêmes la psychose de l'allègement. C'est cette idée fixe qui nous a conduit à alléger les conduites forcées, par l'emploi d'aciers à limite élastique de plus en plus élevée, et qui nous a amenés, d'abord à concevoir les tuyaux auto-frettés et les tuyaux surpressés dont

nous vous parlerons, puis à combiner ces deux systèmes. Nous avons d'abord utilisé pour nos tuyaux auto-frettés des frettes rigides en acier, laminées comme des bandages de chemin de fer. Mais il fallait en arriver aux fils pour obtenir l'allègement maximum, et c'est de là que sont nés les tuyaux auto-frettés à frettage souple, en élingues à fils câblés.

Il est intéressant de constater, en passant, l'importance des économies de matières réalisées en France dans la construction des conduites forcées, découlant de la conception, du mode de fabrication et de la nature du métal adoptés pour ce matériel. De 1900 à 1930, elles avaient déjà atteint 50 %. Dans la dernière décade, elles se sont élevées à 85 %.

Jadis, l'équipement des centrales hydro-électriques importantes comportait l'emploi de plusieurs conduites parallèles, en tuyaux rivés ou soudés au gaz à l'eau, assemblés sur place par rivetage ou par brides boulonnées ; leur diamètre était limité par la résistance de l'acier à l'épaisseur maximum pratiquement usinable. La technique actuelle conduit à équiper les plus hautes chutes avec une conduite unique entraînant une économie supplémentaire, grâce à la réduction des travaux de génie civil et à la simplification des organes de robinetterie et de connexion aux turbines.

En effet, à partir de 1930, la soudure électrique et l'auto-frettagage des tuyaux, en même temps que leur jonction sur place par soudure se sont rapidement généralisés.

Les économies de métal obtenues peuvent être appréciées, lorsque l'on saura que par l'utilisation d'une paroi surpressée et d'un frettage souple, il est actuellement possible d'obtenir un tuyau auto-fretté surpressé câblé, donnant 50 % d'économie de

matière par rapport au tuyau auto-fretté de 1930 ou surpressé 1938.

En quelques 35 ans, l'économie de métal réalisée est telle que le tuyau type 1943 est six fois moins

A ce point de vue, deux exemples sont typiques. Le premier concerne l'installation d'*Eget*, dans les Hautes-Pyrénées (750 mètres de chute, débit 5 m³/seconde, puissance 35.000 CV). Conçue en 1913, elle

VUE D'ENSEMBLE DE LA CONDUITE DE LA BISSORTE.
LA PLUS GRANDE PARTIE EN TUYAUX AUTO-FRETTES.
DIAMETRES : 1 M. 300 ET 1 M. 400. CHUTE : 1.144 METRES.
L'ORIGINE DE LA CONDUITE EST A LA COTE 2.029. PUISSANCE : 105.000 CV.

lourd que le tuyau type 1900, et ce pour une construction de qualité supérieure avec meilleur coefficient de sécurité, donc de classe hautement internationale.

comporte 7 conduites forcées parallèles en tuyaux soudés au gaz à l'eau dont le poids est de 2.450 tonnes.

Conçu en 1941, cet aménagement aurait comporté

une seule conduite exécutée en tuyaux surpressés et en tuyaux auto-frettés soudés à l'arc. Son poids serait de 620 tonnes, soit le quart du poids des conduites existantes.

Le second est relatif à la conduite forcée de *La Bissorte* : envisagé en 1922, son aménagement aurait comporté 4 conduites forcées au départ, D. = 850 $\frac{mm}{mm}$; 8 à l'arrivée, D. 700, 600, 500 $\frac{mm}{mm}$ constituées de tuyaux soudés au gaz à l'eau, d'un poids total de 7.700 tonnes, disposition conditionnée par le fait que les tuyaux soudés au gaz à l'eau de 35 $\frac{mm}{mm}$

l'épaisseur des parois soudés au gaz à l'eau est bien inférieure à 35 $\frac{mm}{mm}$.

Conçue actuellement et grâce à l'emploi des tuyaux en acier à haute limite élastique, de la soudure électrique pour l'assemblage des tuyaux entre eux et des tuyaux auto-frettés surpressés câblés, la « conduite unique » de même diamètre que la conduite existante pèserait 1.350 tonnes, c'est-à-dire moins de la moitié du poids de celle-ci, et le sixième environ de celui des conduites type 1922.

Les modifications de structure qui ont permis de

VUE D'ENSEMBLE DE LA CONDUITE DES SEPT-LAUX. DIAMETRES : 1 M. 100 ET 1 M. 200. CHUTE : 1.050 METRES.
LA PLUS GRANDE PARTIE EN TUYAUX AUTO-FRETTES. L'ORIGINE DE LA CONDUITE EST A LA COTE 2.100.
PUISSANCE : 45.000 CV.

d'épaisseur représentaient les possibilités maxima de cette époque.

Mais c'est en 1930 que cette chute a été conçue, à une époque où l'on avait en mains les possibilités d'installer une seule conduite dont les dimensions ne permettaient pas la mise en œuvre en 1922.

En effet, les tuyaux auto-frettés étaient déjà connus ; avec eux il fut possible d'installer une conduite, D. 1 m. 400-1 m. 300, poids total 2.780 tonnes soit 36 % du poids des conduites type 1922, constituée en grande partie de tuyaux auto-frettés dont

résoudre le problème de la « conduite unique » pour les hautes chutes à grande puissance n'ont pas nécessité d'augmentation notable de la puissance de nos moyens de fabrication, à part cependant l'installation d'une presse hydraulique d'épreuve d'une force de 3.500 tonnes pour l'auto-frettage les tuyaux de la conduite de *La Bissorte*. Etant données les possibilités nouvelles résultant de la mise en œuvre des tuyaux auto-frettés, surpressés ou non, à fretage souple en élingues à fils câblés, on envisage maintenant l'aménagement d'une nouvelle presse

d'épreuve d'une force de 7.000 tonnes pour la mise en œuvre de tuyaux jusqu'à 3 m. 000 de D. destinés à fonctionner sous une hauteur de chute de 400 mètres, la puissance de la conduite correspondante étant de 200.000 CV. Pour une chute de 2.000 mètres on pourra construire, avec l'aide de cette presse, une conduite de 1 m. 400 de D. d'une puissance de 240.000 CV, ce qui représente la limite actuelle de puissance de la « conduite unique ».

Voici des détails sur ces modifications de structure :

1° *La soudure électrique.* — Nous sortirions du cadre de cette communication ou plutôt il ne serait pas assez grand si nous 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 kilos, et 60 S.S., E mini. 34 kilos, ainsi que les tôles en acier demi-dur semi-inoxydable au Cr-Cu, E mini. 34 kilos.

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 kilo de celui-ci n'est pas proportionnel à celle-là ; par exemple le rapport E/E' des limites élastiques d'une tôle au chrome-cuivre ($E = 34$ kilos) et d'une tôle S.M.A. ($E' = 20$ kilos) 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 entièrement 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 de 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.

Le phénomène de 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'écrouissage par traction.

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 considérablement 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 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 fa-

brication 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

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

VUE D'ENSEMBLE DE LA CONDUITE DE PORTILLON. LA PLUS GRANDE PARTIE AUTO-FRETTÉE.
DIAMETRES : 0 M. 850 ET 1 M. 200. CHUTE : 1.413 METRES. LA PRISE D'EAU SE TROUVE A LA COTE 2.562.
PUISSANCE : 55.000 CV.

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 surpression ».

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 :

P_1 = pression de surpressage ;

P = pression de marche.

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

UN ELEMENT DE LA CONDUITE DU PORTILLON EN COURS DE TRANSPORT PAR TELEPHERIQUE.

L'intérêt économique et pratique des « tuyaux surpressés » est évident. Mais prenons un exemple et constatons d'abord qu'une tôle d'acier donnant $E=34$ kilos à son état initial donne $E=40$ kilos après un allongement de 2 % seulement et $E=50$ kilos après un allongement de 5 % ; puis comparons des 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

constitués de tuyaux soudés en tôle d'acier demi-dur dans les nuances à 54 kilos.

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

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* (1.145 m.), *Eglie* (1.040 m.), *Le Portillon* (1413 m.) et les *Sept-Laux* (1.050 m.), pour ne citer que les plus puissantes, les ont largement utilisés.

Leur apparition date de 1925, époque à laquelle quelques tuyaux auto-frettés furent installés en dérivation sur la première conduite des *Sept-Laux*, en vue de réaliser un essai industriel, mais c'est en 1930 seulement que la première conduite forcée comportant des tuyaux auto-frettés en proportion normale fut installée sur la chute du *Lac-Mort* (625 m.).

Rappelons en passant les essais officiels effectués en 1932 au Laboratoire Fédéral de *Zurich*, la consécration internationale donnée ainsi au système de tuyaux auto-frettés, et l'application qui en fut faite à la *Chute de la Bissorte*.

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-frettagage, 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 kilos de limite élastique, respectivement 35-48 et 54 kilos de rupture et de frettes laminées sans soudure en

acier traité à 60 ou 95 kilos de limite élastique, respectivement 90 et 115 kilos 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 kilos (limite élastique 150 kilos). Ce frettage souple peut être également constitué non pas d'élingues individuelles, mais d'un câble enroulé en hélice sur le tuyau. Ce dispositif ne donne cependant pas la même sécurité que le précédent ; on le réserve pour des cas particuliers tels que conduites enterrées, conduites en puits ou en galerie bétonnées, qui se trouvent parfaitement abritées des chocs extérieurs.

Les tuyaux frettés en élingues à fils câblés ont été utilisés pour la première fois sur la conduite forcée de la chute du *Vénéon*, D. = 2 m. 000 sous 46 kilos par cm² (pression maximum de service) et pour la remise en état de la partie inférieure de la conduite forcée de la chute de *La Bissorte*, D. = 1 m. 300 sous 132 kilos par cm² (pression maximum de service), détruite par les Allemands en août 1944.

Étant données les possibilités techniques et économiques qui découlent de l'utilisation de ce dispositif nouveau, nous pensons utile et intéressant d'en parler un peu plus longuement.

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 téléphérique. 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 du 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 devons adapter ce matériel à un usage inédit ; par ailleurs, son montage sur des tuyaux de con-

duites forcées posait des problèmes nouveaux particuliers au frettage souple ; certaines hypothèses que nous avions 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 « anti-corossif » ; 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

être inférieure à celle qu'il faudrait employer pour que le tuyau nu soit capable de résister au vide atmosphérique. Sous pression intérieure nulle la paroi supporte une précontrainte très importante.

Sollicitée par une telle compression exercée par un frettage dépourvu de rigidité, nous nous demandions comment allait se comporter la paroi de notre tuyau, d'abord à vide après les opérations d'auto-frettage, ensuite en cours de transport et de montage et enfin en période d'exploitation, notamment dans le cas accidentel où il se trouverait soumis aux effets du vide atmosphérique.

Nous émettions bien l'hypothèse, qu'à ce point de vue, la réaction de la paroi précontrainte agirait

TUYAU AUTO-FRETTE, FRETTE EN ELINGUES A FILS CABLES, EN COURS DE MONTAGE (VENEON).

nous avons effectué des *essais de corrosion* sur des échantillons de frettes en élingues à fils câblés de la conduite du *Vénéon*. 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 2 ans, alors que des fils témoins en acier ordinaire, traités dans les mêmes conditions avaient été rouillés dès les premiers jours.

Le problème relatif aux *pressions extérieures* a été un des premiers à retenir notre attention. En effet, les tuyaux auto-frettés à frettage souple comprennent une paroi en tôle à 54 kilos surpressée ou non, dont l'épaisseur relativement mince peut

comme une pression fictive, appliquée à l'intérieur du tuyau démunie de ses frettes et tendrait à s'opposer à la déformation de sa section circulaire ainsi qu'à tout flambage sous l'effet d'une pression extérieure inférieure à la précédente. Cela n'était cependant pas évident et une vérification s'imposait.

Nous avons donc procédé à divers essais dont certains ont porté sur un modèle réduit de tuyau auto-fretté grandeur naturelle du type de ceux de la conduite forcée du *Vénéon*, mais d'épaisseur beaucoup plus mince.

Après l'opération d'auto-frettage, la paroi comprimée de ces tuyaux était parfaitement stable.

Pour obtenir le flambage des parois on a exercé,

dans un plan diamétral, des efforts progressifs jusqu'à obtenir l'ovalisation nécessaire ; le flambage s'est produit dès la production d'un plat vers les points de serrage et pour une très grande ovalisation.

C'est ensuite des essais comparatifs de résistance aux pressions et aux charges extérieures qui ont été réalisés sur différents tuyaux d'abord nus, ensuite auto-frettés.

Ces divers essais ont confirmé notre hypothèse. Ils ont montré que le dispositif paroi mince et frettage souple est parfaitement stable à tout moment de son utilisation.

Ils ont permis, d'autre part, de mettre en relief

extérieures. C'est en particulier le cas de conduites installées et bétonnées à l'intérieur de puits ou de galeries, de conduites destinées à l'utilisation thermique des mers et de conduites minces, soumises à des dépressions internes.

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 avions donc envisagé d'entreprendre des *essais au choc*, mais ceux-ci se sont trouvés réali-

COUDE DE LA PARTIE AUTO-FRETTEE DE LA CONDUITE DU VENEON
EN COURS DE FABRICATION.

une qualité insoupçonnée de ce type de tuyaux, à savoir : son aptitude à supporter les pressions extérieures dans des conditions de légèreté et d'économie analogues à celles qu'il réalise pour supporter les pressions intérieures. Selon la constitution de nos tuyaux d'essai et de leur frettage, nous avons en effet constaté le flambage de la paroi des tuyaux auto-frettés sous des pressions extérieures très supérieures à celles ayant produit le flambage des mêmes tuyaux démunis de leur frettage souple.

Il est ainsi possible de prévoir les répercussions intéressantes que cette faculté peut avoir sur la construction des conduites susceptibles de supporter normalement ou accidentellement des pressions

sées par suite d'un important éboulement avec chute de gros blocs qui se produisit sur la conduite du *Vénéon*. 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 fils de 2 à 3 mm, le toron central comportant une solution de continuité (joint de jonction). Dans le calcul de résistance on ne compte 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

PONT-ESCOFFIER
VUE AERIEENNE DE LA CENTRALE ET DU TRACE DE LA
CONDUITE FORCEE. PUISSANCE : 70.000 CV.

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.

Malgré cela il n'était pas indiqué de laisser subsister des frettes avariées sur la conduite, et les 4 frettes ci-dessus ont été remplacées individuellement, très facilement d'ailleurs à l'aide d'un collier de même composition que les frettes.

Avec chacune des frettes détériorées, on a constitué une éprouvette de traction comportant en son

milieu la partie abîmée, 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.

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 2.500 kilos par cm. de longueur d'appui et 200 kilos 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 m/m.

Pression de marche : 23 k. 1 par cm^2 .

Frettes en élingues sans fin, composées de 7 torens de 7 fils de 3 m/m, espacées de 120 m/m.

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 kgs par cm^2 . En adoptant comme résistance théorique des frettes le produit de leur section nette par la résistance des fils à la rupture, on calcula 78 kgs par cm^2 au lieu de 70 kgs.

Après avoir placé le tuyau à essayer entre les plateaux de la presse hydraulique d'épreuve, la pression fut montée progressivement jusqu'à 76 kgs 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 vingt 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 classes 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 que la réalisation simultanée de ces trois conditions apparaisse comme une gageure.

Dès 1922 on ne séparait pas du problème des hautes chutes à grande puissance, celui des économies de métal, car on savait que de tels aménagements n'étaient réalisables qu'à la condition que le prix du cheval installé ne soit point prohibitif. On envisageait déjà l'utilisation de la conduite unique qui constituait la clef du problème ; mais la puissance de celle-ci était limitée à cette époque au maximum de 30.000 CV. Dix ans après, en 1932, cette limite de puissance était portée à 120.000 CV ; elle est actuellement de 240.000 CV.

Les questions examinées au cours de cet exposé l'ont été sur le plan national ; nous savons cependant que les possibilités étrangères de réalisation de hautes chutes à grandes puissances sont inférieures aux nôtres malgré la supériorité de leurs moyens de fabrication et de leur outillage. Et si en définitive l'avantage, sur ce terrain, reste à l'Industrie française du fait de pouvoir utiliser des systèmes et dispositions techniques nouveaux et spécifiquement français, elle le doit à l'esprit d'initiative, aux recherches, essais et mises au point de ses ingénieurs.