

La chute de "La Bissorte" et les tuyaux auto-frettés

par G. FERRAND, Ingénieur A. et M.

Le torrent de Bissorte, affluent de la rive gauche de l'Aïc, descend des glaciers du Mont Thabor, traverse un lit dénommé « Plaine de Bissorte », d'une superficie de 120 hectares environ à 2.030 mètres d'altitude.

C'est la Plaine de Bissorte que la Société hydro-électrique de Savoie (filiale de la Compagnie Alais, Frogès et Camargue) a choisie pour aménager un grand réservoir destiné à emmagasiner les eaux d'un bassin versant de 44 kilomètres carrés environ, constitué par les hautes vallées de Bissorte et de Charmaix et utiliser la réserve d'eau ainsi constituée pour alimenter une puissante usine hydro-électrique installée à La Praz (Savoie) en profitant d'une hauteur de chute de 1.150 mètres.

L'aménagement de cette chute comprend la construction d'un grand barrage qui ferme à l'aval la Plaine de Bissorte et permet l'accumulation de 40 millions de mètres cubes d'eau.

L'eau accumulée sera amenée à l'usine génératrice de La Praz par une conduite forcée alimentant trois turbines d'une puissance unitaire de 34.700 CV, si bien que la puissance totale installée sera de 105.000 CV environ.

BARRAGE

Le barrage est du type gravité rectiligne, de 50 mètres de hauteur et 545 mètres de longueur en crête.

Les fondations sont exécutées en béton et la superstructure en maçonnerie de moellons. Le parement amont est muni d'un masque d'étanchéité en béton vibré de 1m. 50 d'épaisseur, protégé lui-même par un revêtement de pierres de taille.

Le volume total de la maçonnerie constituant le barrage est de 300.000 mètres cubes.

La crête du barrage est à la cote 2084, le niveau de la retenue d'eau à 2082 et la prise de la conduite forcée dans le réservoir à 2028.

L'exécution des travaux a été confiée à la « Compagnie d'Entreprises réunies. »

CONDUITE FORCÉE

La conduite forcée entièrement métallique, de 3.037 mètres de longueur, ne comporte pas moins de 3.500 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 bélier produits par les turbines c'est la pression considérable de 132 kilos par centimètre carré que les tuyaux de la partie inférieure ont à supporter.

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

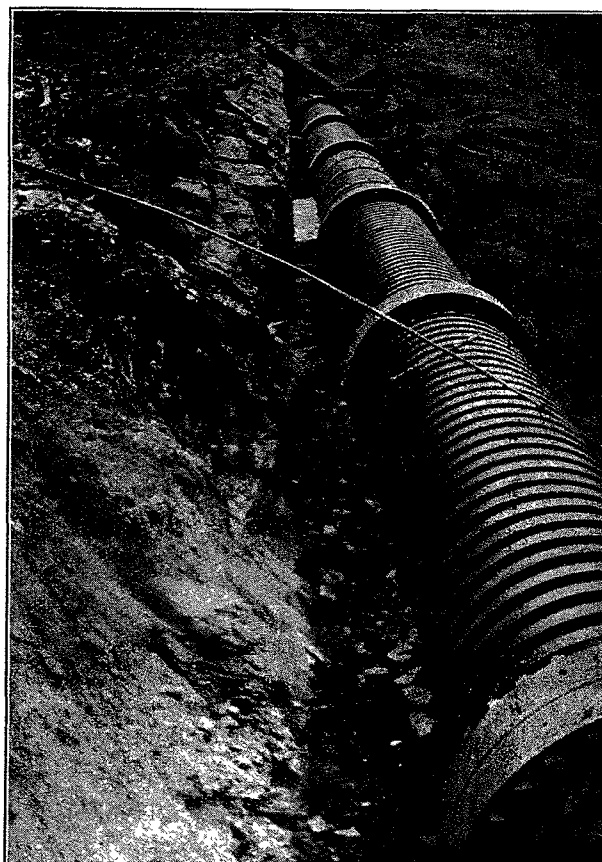
Elle est formée de deux parties principales :

Une partie à faible pente (13^m/_m par mètre) sur une longueur de 1.080 mètres avec un diamètre de 1 m. 800, 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 fortes pentes (en certains points la pente dépasse 45°) sur 1.957 mètres de longueur qui comporte des tuyaux soudés au gaz à l'eau de 1 m. 400 de diamètre, puis des tuyaux auto-frettés, diamètres 1 m. 400 et 1 m. 300. Elle est également munie à son origine de robinetteries et appareils de sécurité.

Ces deux parties principales se réunissent sur une cheminée



« La Bissorte ». — Conduite en montage.

d'équilibre de 2 m. 50 de diamètre, 70 mètres de hauteur, placée à l'intérieur d'un puits vertical creusé dans le roc.

L'extrémité aval de la conduite forcée qui traverse avant son arrivée à l'usine la ligne de chemin de fer Chambéry-Modane se termine par un collecteur muni de trois branchements alimentant chacun une turbine.

Ces turbines du type « Pelton » à double injecteur d'une puissance unitaire de 34.700 CV sont construites par les Ateliers Neyret-Beylier et Piccard-Pictet de Grenoble.

La construction de la conduite forcée a été confiée aux Etablissements Bouchayer et Viallet de Grenoble et son montage à la Société Dauphinoise d'Etudes et de Montages de Grenoble.

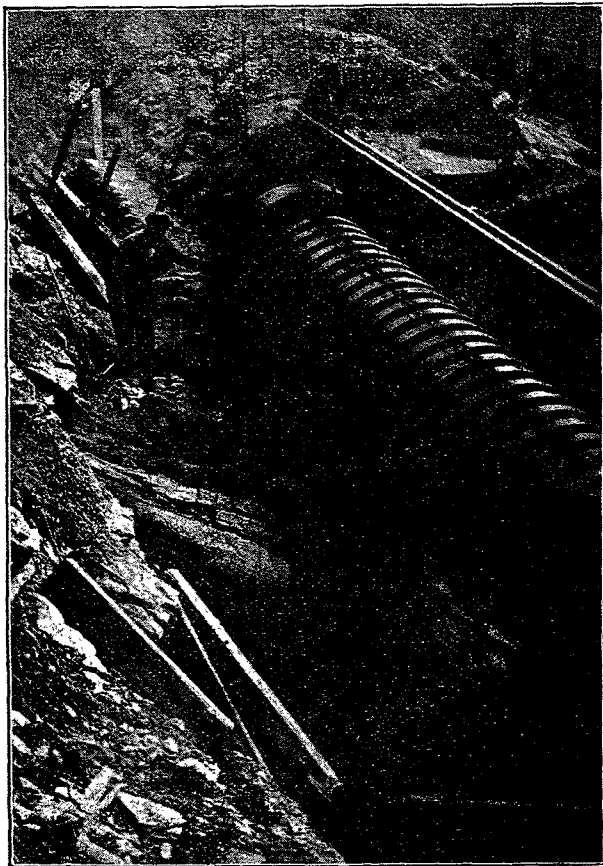
Les travaux de montage sont rendus particulièrement délicats et difficiles du fait des très fortes pentes du profil et des poids unitaires des tuyaux. Certains atteignent en effet le poids respectable de 15 tonnes.

Leur mise en place s'effectue à l'aide d'un téléphérique installé tout le long du tracé.

On caractérise habituellement une conduite par le produit HD (H hauteur de chute, D diamètre caractéristique moyen).

Pour la conduite de « La Bissorte » $H = 1.150$ mètres, $D = 1$ m. 43, $HD = 1645$ qui dépasse largement le record détenu jusqu'à présent par la conduite de Mèse (Italie). ($H = 757$, $D = 1.775$, $HD = 1.345$).

Ce record sera d'ailleurs battu par la conduite de la Dixence



« La Bissorte ». — Mise en place d'un tuyau.

(Suisse) en cours d'aménagement avec ($H = 1748$, $D = 1.100$, $HD = 1925$).

La conduite de « La Bissorte » est remarquable par sa puissance qui dépasse celle de « La Dixence ». La puissance d'une conduite est en effet définie par le produit HD^2 qui est de 2.360 pour l'une et 2.120 pour l'autre.

Pour construire cette importante conduite forcée on a dû utiliser le système de tuyaux auto-frettés (brevets G. Ferrand) dont l'emploi est tout nouveau et dont la fabrication en France est assurée par les Etablissements Bouchayer et Viallet. Il est bon d'ajouter que sans ce dispositif, la construction de cette conduite eût été irréalisable par les moyens de l'industrie française.

LES TUYAUX AUTO-FRETTÉS

Qu'est-ce que les tuyaux auto-frettés ?

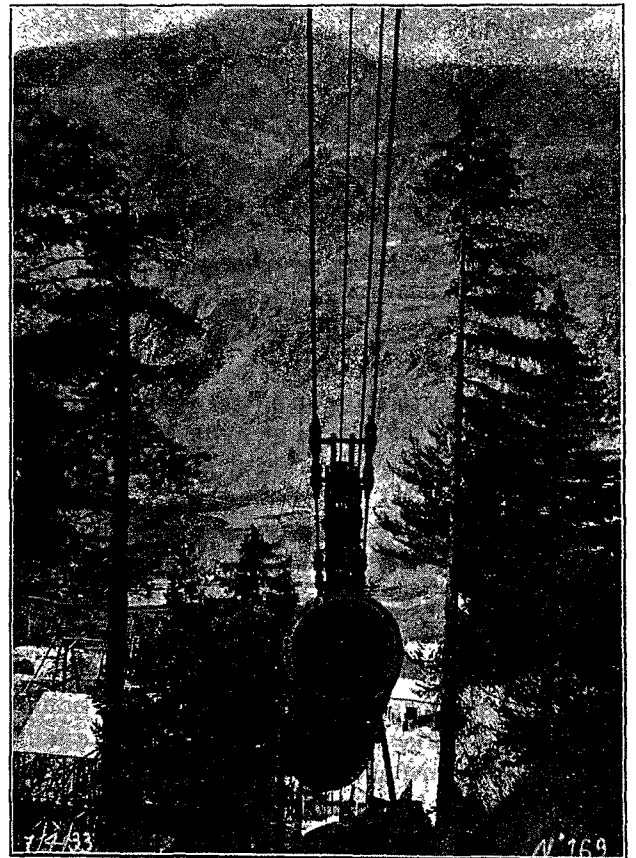
La revue *Tubes et Tuyaux* a fait paraître à ce sujet dans son numéro de janvier 1933 un article de vulgarisation dont nous extrayons les passages suivants :

Frettage et auto-frettage. — A seule fin de mieux éclairer la lanterne, pénétrons un instant dans le domaine de l'artillerie où l'étude prolongée et la mise en œuvre de ces deux procédés successifs provoquèrent de remarquables progrès dans la fabrication des bouches à feu.

Une simple visite au Musée des Invalides, à Paris, montre les tonnages formidables atteints par les pièces des XV^e et XVI^e siècles dont pourtant la puissance balistique nous paraît aujourd'hui bien médiocre.

Aux XVII^e et XVIII^e siècles, les perfectionnements de la métallurgie permirent de notables allègements du matériel.

Mais c'est au XIX^e siècle, surtout après la vulgarisation des bouches à feu en acier, que l'emploi du frettage autorisa des avan-



Transport par téléphérique d'un tuyau de 15 tonnes

ces considérables, du double chef de la puissance et de la légèreté.

Frettage à chaud. — Considérons un tube d'acier cylindrique, dont l'épaisseur soit, en raison des caractéristiques du métal constitutif, reconnue nécessaire et suffisante pour garantir une bonne résistance de service dans la partie avant (volée) du canon, celle que le projectile parcourra avant de s'échapper dans l'air.

Cette épaisseur calculée de manière à réaliser le maximum de légèreté compatible avec la sécurité, ne sera plus suffisante en ce qui concerne la partie arrière (tonnerre) de la bouche à feu, où se produit la déflagration de la poudre assurant le départ du projectile.

Le tonnerre doit être renforcé ; c'est pour ce renforcement qu'intervient le frettage.

A cet effet, on dispose de baques cylindriques, également en acier, nommées frettes, dont le diamètre intérieur est légèrement moindre que le diamètre extérieur du tube à fretter, telles pa-

conséquent qu'elles ne sauraient s'emmancher à froid sur ce tube.

Chauffées à température convenable, ces frettes se dilateront et pourront dès lors être enfilées les unes après les autres sur le tube demeuré froid. Par leur juxtaposition, elles constitueront ainsi une seconde enveloppe d'acier recouvrant le tonnerre qu'on prétend renforcer.

En se refroidissant ces frettes se contractent, et exercent par suite une action énergique, lente et progressive sur le tube intérieur, dont les diverses couches sont mises en état de compression élastique.

Au départ du coup, les gaz de la poudre, en même temps qu'ils lancent le projectile, exercent une pression non moins brutale sur les parois du tube qu'ils tendent à dilater.

Cette action expansive est limitée par trois résistances se superposant.

Elle doit lutter :

1° Contre la compression initiale imposée par le frettage aux couches métalliques du tube ;

2° Contre la résistance élastique des couches du tube ramenées à leur état normal ;

3° Contre la résistance élastique des frettes.

Le total de ces trois résistances est notablement supérieur à celle que présenterait un tube unique, non fretté, d'une épaisseur égale à la somme des épaisseurs du tube et d'une frette.

On enregistre donc un bénéfice notable.

Telle est, en très gros, une théorie rudimentaire du frettage à chaud, sur laquelle il resterait beaucoup à dire.

L'application de ce procédé rendit de remarquables services.

Toutefois, plus on l'étudia de près, plus on dû reconnaître qu'en la matière tout n'était pas calculable, et que l'inévitable persistance d'un certain empirisme opératoire imposait dans la pratique le maintien d'un coefficient de sécurité, de définition assez floue.

Or, le moins qu'on puisse dire c'est que, toutes les fois qu'on est obligé de faire état d'un coefficient de ce genre, témoignant d'une appréhension plus ou moins imprécise, le fait n'est point particulièrement glorieux dans un domaine de science appliquée, surtout dans un siècle à hautes prétentions techniques.

Une nouvelle étape progressive s'imposait : elle fut franchie grâce à l'adoption de l'auto-frettage (1).

(1) On peut découvrir quelques précurseurs historiques plus ou moins empiriques et sporadiques (mandrinage, système Uchatius). Mais c'est l'an 1909 (travaux de l'ingénieur général Malaval de l'artillerie navale française) qui marque l'origine de l'étude réellement scientifique du problème. Celle-ci, poursuivie depuis lors sans interruption en France, aboutit au procédé actuel, dont l'application s'est répandue dans le monde entier.

Auto-frettage. — Le mode opératoire peut se schématiser comme il suit :

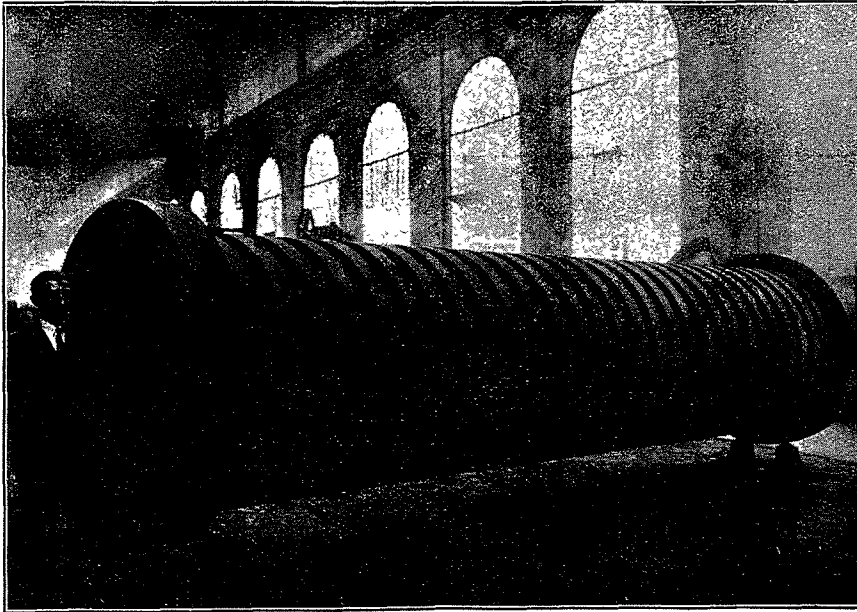
Prenons un tube d'une nuance d'acier appropriée et nettement connue, dont les épaisseurs locales ont été calculées de manière à fournir finalement (après auto-frettage) un canon d'un seul bloc (sans adjonction de frettes extérieures).

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 (1).

A l'intérieur du tube introduisons un cylindre plein, constitué par un acier de caractéristiques mécaniques plus élevées que celles du tube extérieur, et dont le diamètre extérieur est un peu moindre que le diamètre intérieur de celui-ci.

Mettons un puissant appareillage de compression hydraulique en communication avec l'espace annulaire subsistant entre tube et cylindre puis obturons chacune des deux extrémités de cet espace annulaire par un joint rigoureusement étanche (2).



Tuyau auto-fretté $\phi = 1 \text{ m. } 300$

Pression max. de marche 131 Kg./cm². | Pression d'épreuve . 262 Kg./cm².

Introduisons dans ce cylindre annulaire le liquide comprimé, dont nous augmenterons progressivement la pression jusqu'à une valeur déterminée, telle qu'elle surpasse légèrement celle qui correspond à la limite élastique du tube extérieur, tout en restant notablement en dessous de sa limite de rupture.

Cette pression terminale est calculée et réalisée de manière à rester inférieure à la limite élastique du cylindre plein intérieur lequel, nous l'avons dit, présente des caractéristiques mé-

caniques plus élevées que celles du tube extérieur.

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

Le cylindre plein intérieur se retrouve tel qu'il était à l'origine.

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

Cette sorte de mandrinage hydraulique eut 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.

(1) Cette majoration est donc scientifiquement déterminée, et diffère profondément du coefficient de sécurité, d'ordre empirique, évoqué précédemment.

(2) La solution de ce problème réclama de patientes recherches.

Il n'est pas de la compétence de notre petite revue de séjourner plus longtemps dans ce domaine technique de l'artillerie, en exposant les diverses applications qui y sont faites de ce nouveau procédé (1)

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'acquiescer 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 % (2).

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 fonctions 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 garanties réellement scientifiques de résistance et de légèreté (3).

Tuyaux auto-frettés pour conduites forcées. — 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, dans la parenthèse précédente, 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 desideratum reste le même : assurer la combinaison optimum, adéquate aux circonstances, de la résistance et de la légèreté, avec des garanties scientifiquement contrôlées.

(1) En ce qui concerne la fabrication des canons, interviennent également certains traitements thermiques (après auto-frettage) que nous n'avons point à envisager.

(2) Par contre il y a réduction de 3 % pour l'allongement, 1 % pour la struction et 5 % pour la résilience.

(3) En même temps, le procédé se révèle singulièrement économique.

Un tuyau auto-fretté pour conduite forcée se compose : d'un tuyau formant paroi interne, dont l'épaisseur est sensiblement le quart de celle qu'aurait un tuyau ordinaire de résistance équivalente à celle du tuyau auto-fretté ; d'anneaux de renfort (frettes) régulièrement espacés sur la surface extérieure de la paroi.

Les figures réparties dans le texte du présent article montrent divers spécimens du genre.

La tôle en acier Siemens-Martin, qualité extra-doux soudable, constituant la paroi tubulaire, se caractérise comme il suit :

Résistance à la traction.....	≥ 34 Kg./mm ²
Limite élastique.....	≥ 19 Kg./mm ²
Allongement.....	≥ 30 %
Résilience.....	≥ 7 Kg. m/cm ²
Taux de fatigue admis.....	= 8 Kg./mm ²

Les frettes sont des anneaux de section rectangulaire, laminés sans soudure, en acier traité à haute résistance.

La nuance du métal généralement employée pour ces frettes comporte les caractéristiques ci-après :

Résistance à la traction	≥ 90Kg./mm ² .
Limite élastique	≥ 60 Kg./mm ²
Allongement	≥ 8 %.
Résilience	≥ 4 Kg. m/cm ²
Taux de fatigue admis	= 24 Kg./mm ²

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 dia-

mètre intérieur des frettes ; celles-ci peuvent donc être placées à froid, avec écartement convenable.

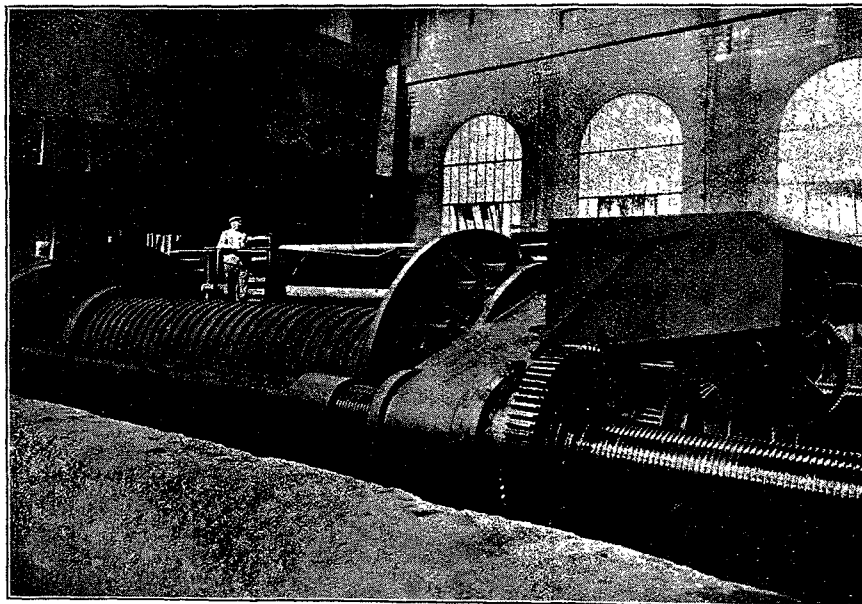
L'intérieur du tuyau est mis en communication avec une forte presse hydraulique et les deux extrémités sont obturées de façon étanche.

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.

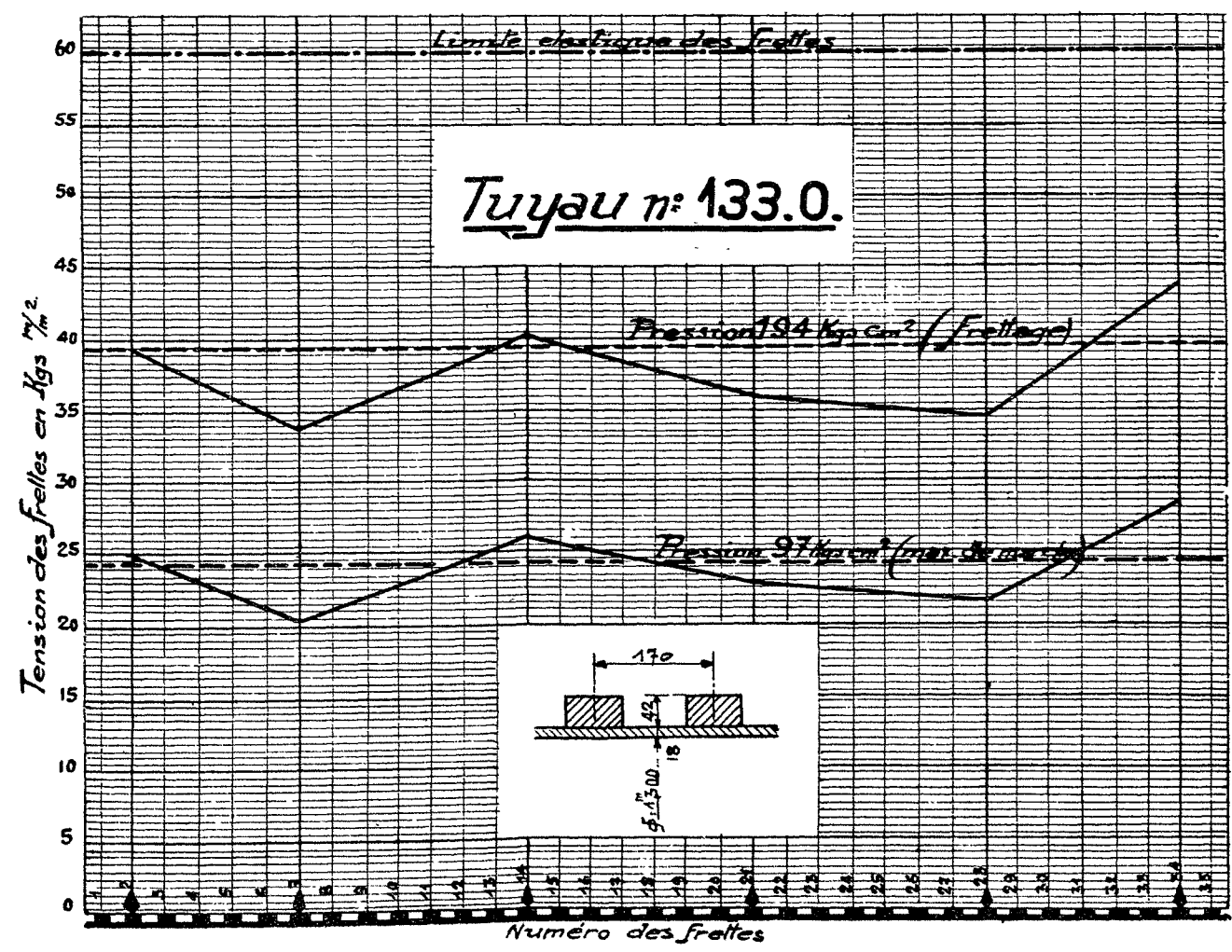
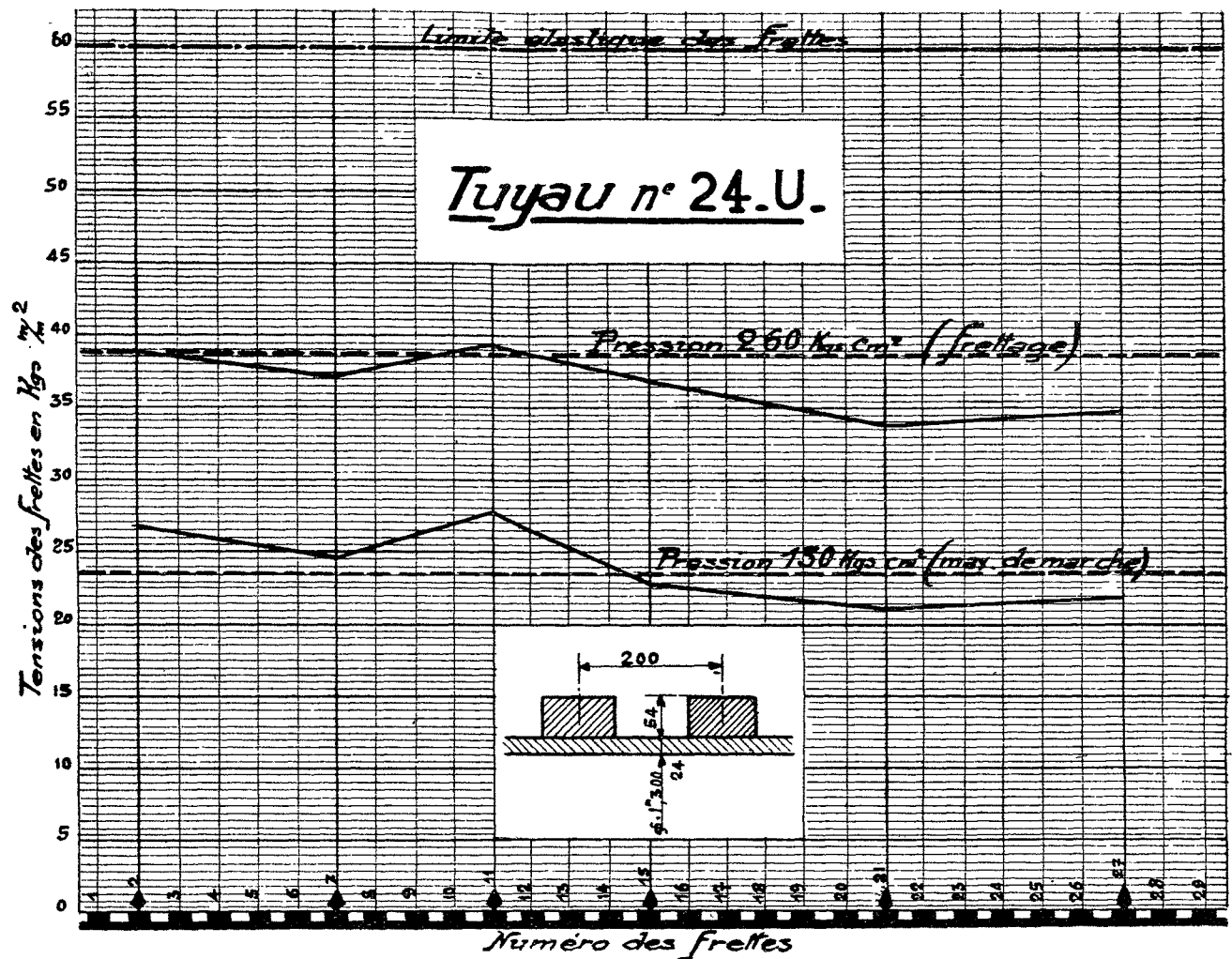
Cette pression de frettage une fois atteinte, on la maintient pendant une minute ; on laisse ensuite tomber la pression jusqu'à la pression de marche. On procède alors aux vérifications et mesures nécessaires, examinant en particulier si la paroi s'est bien comportée pendant sa déformation. On renforce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

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

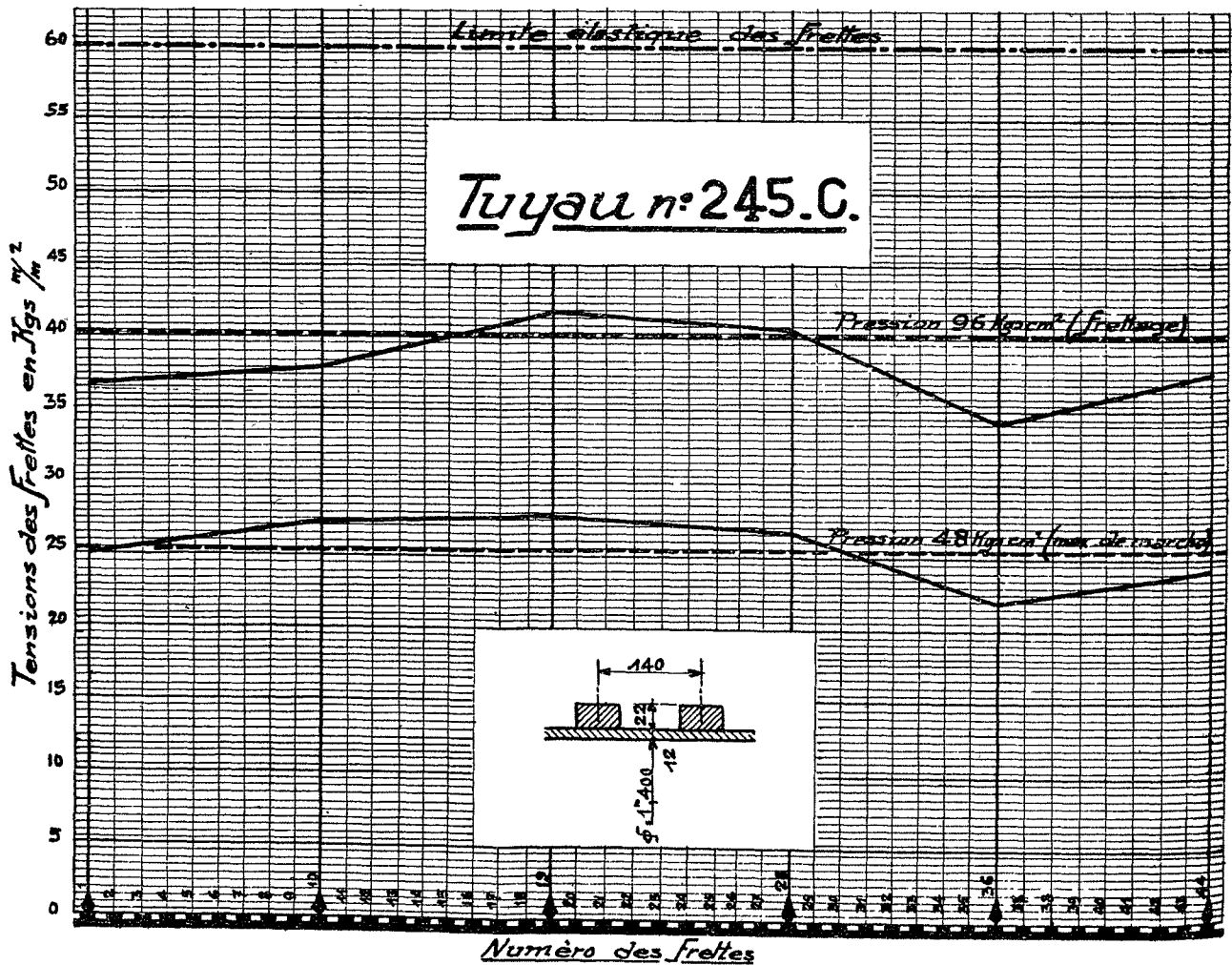
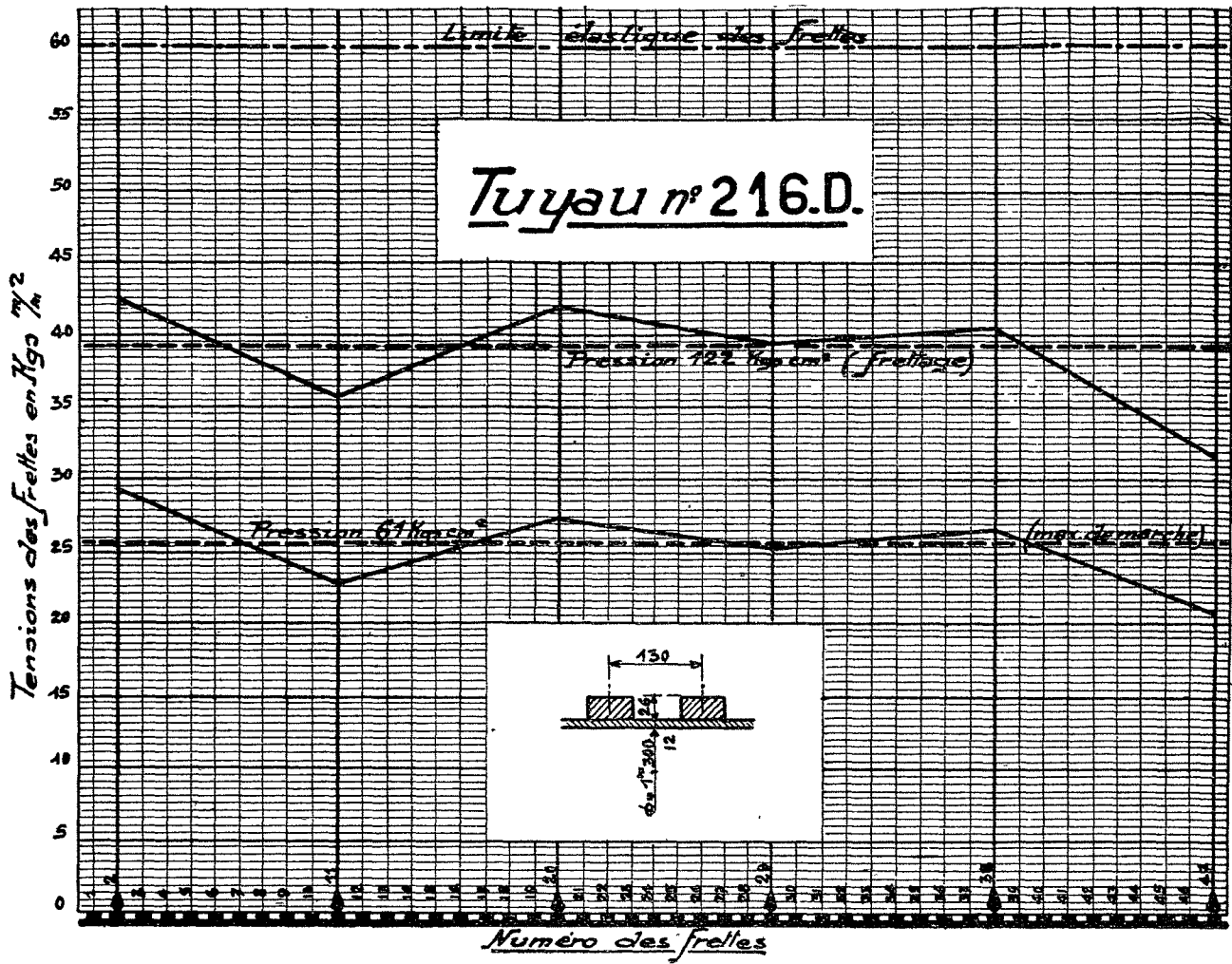
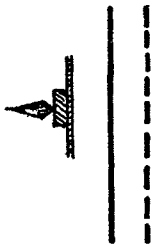


Tuyau auto-fretté en cours de frettage dans la presse « Morane » de 3.500 tonnes.

Position des tensomètres
 Tensions des frettes mesurées avec tensomètre Huggenberger
 Tensions des frettes théoriques calculées



Position des tensomètres
 Tensions des frettes mesurées avec tensomètre Huggenberger
 Tensions des frettes théoriques calculées



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

1° Sous l'action progressive de la pression croissante, le tube se dilate, et commence par adhérer fortement 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, 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° 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 au gaz à l'eau.

3° Un avantage notoire 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 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 presque 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 au gaz à l'eau sont insuffisamment résistants ou réclament des épaisseurs entraînant des poids exagérés.

EPREUVES HYDRAULIQUES ET CONTROLES

Ainsi que nous l'avons vu précédemment, la partie principale de la fabrication des tuyaux auto-frettés est l'opération de 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).

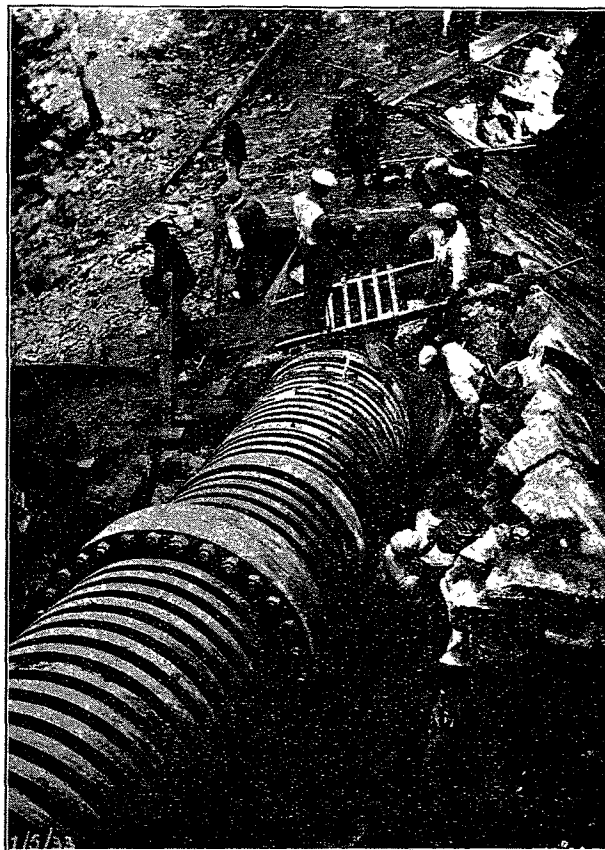
On se rend immédiatement compte que l'outil le plus important pour la construction des tuyaux auto-frettés est la presse hydraulique d'épreuves qui prend de grandes proportions quand il s'agit de fabriquer une conduite comme celle de « La Bissorte » dont les tuyaux de la partie inférieure (1 m. 300) sont frettés à la pression de 264 Kg./cm², ce qui correspond à une poussée de 3.500 tonnes sur les plateaux de la presse.

Disons en passant que la presse hydraulique utilisée pour

construire la conduite de « La Bissorte » est faite pour essayer des tuyaux jusqu'à 3 m. 000 de diamètre et 13 m. 000 de long.

L'expérience a montré que parmi les essais divers effectués en cours de fabrication sur un tuyau, l'essai capital est celui que l'on réalise au cours de l'épreuve hydraulique car il définit le coefficient de sécurité minimum sur lequel on peut vraiment compter en cours d'exploitation sous l'effet des pressions maximums qui peuvent se produire. Or, de la fabrication même des tuyaux auto-frettés il résulte que ce coefficient de sécurité est au moins égal à 2 et cela n'est réalisé avec aucun autre système.

Un point très important signalé plus haut qui mérite quelques explications complémentaires est celui concernant le contrôle



« La Bissorte ». — Tuyaux d'ancrage en cours de scellement.

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 frettes un certain nombre de tensomètres que l'on répartit uniformément sur la longueur du tuyau à fretter. Pendant le cours de l'opération de frettage on enregistre d'abord la pression de mise en contact de la paroi avec les frettes (la mise en contact est effective lorsque les aiguilles des tensomètres accusent un léger déplacement) on enregistre ensuite la tension des frettes sous les pressions croissantes jusqu'à la pression de frettage, puis sous les pressions décroissantes jusqu'à la pression de marche, puis à nouveau sous la pression de frettage, sous la pression de marche et enfin sous la pression nulle pour obtenir le degré de serrage des frettes 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 calculées.

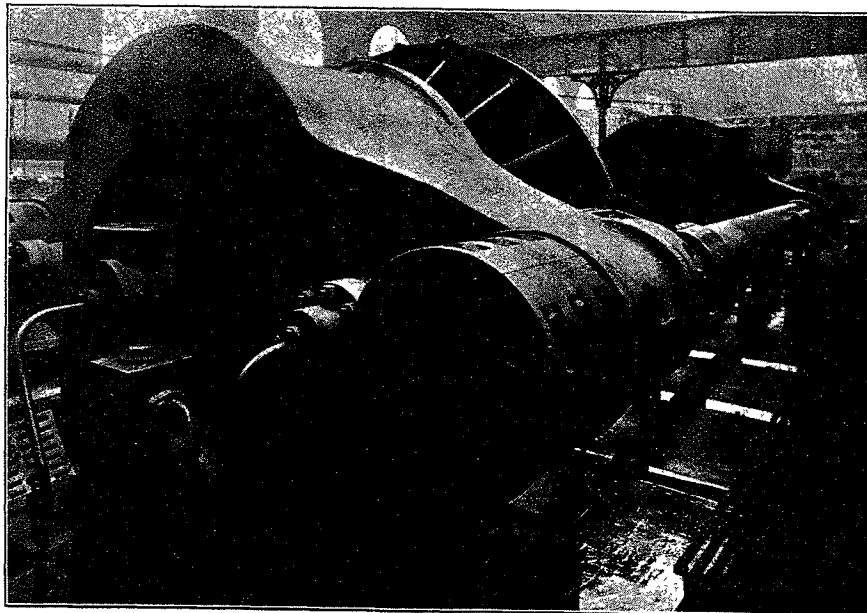
Les graphiques ci-contre permettront de se rendre compte des résultats obtenus sur quelques tuyaux de « La Bissorte » de caractéristiques très différentes. Ces graphiques mettent en évidence la concordance très satisfaisante entre les tensions réelles et les tensions théoriques.

Ils font ressortir également la marge importante qui existe entre la limite élastique des frettes et leur tension maximum.

Il reste encore beaucoup à dire sur la conduite forcée de «La

Bissorte » qui, par son importance exceptionnelle, mérite un examen détaillé ; mais nous aurons l'occasion de revenir ultérieurement sur ce sujet que nous examinerons en détail car l'installation de cette conduite comporte des particularités très intéressantes.

Le rapide exposé que nous avons fait des tuyaux auto-frettés permettra de se rendre compte des avantages incontestables que l'on peut retirer de ce procédé qui a été mis en application avec succès pour la première fois en 1926 sur la conduite des Sept-Laux (hauteur de chute 1.050 mètres).



Presse hydraulique d'épreuves « Morane » de 3.500 tonnes.