CHUTE D'AUSSOIS

ESSAIS SUR

TUYAUX AUTO-FRETTES A FRETTAGE SOUPLE

G. FERRAND

Directeur de la S.D.E.N.

A la mort de M. Colomb, cet article était déjà composé.

Qu'il me soit donc permis de rendre ici hommage à la mémoire de ce grand Ingénieur, homme de bon sens à l'esprit clairvoyant, technicien averti et expérimenté, réalisateur d'une activité et d'un esprit de décision remarquables, et de lui dédier cet article.

Il m'honorait, en effet, de sa confiance et de son amitié et, après La Bissorte, Le Vénéon, l'Aston et tant d'autres aménagements hydroélectriques, celui d'Aussois sera son œuvre.

L'Electricité de France perd en lui un de ses plus éminents Collaborateurs.

G. FERRAND.

Bien avant le début des dernières hostilités alors qu'il venait de terminer la chute de La Bissorte, M. COLOMB, à ce moment Directeur général de la Société Hydroélectrique de Savoie, avec sa clairvoyance et son esprit de décision habituels, décidait l'aménagement de la Chute d'Aussois située dans la vallée de l'Arc en Haute-Maurienne, à l'amont de Modane, susceptible de produire une puissance de l'ordre de 100.000 cv.

Cette chute reçut un commencement d'exécution avant la guerre, le décret de concession a été pris en 1939, mais les hostilités arrêterent tous les travaux et l'occupation supprima la presque totalité des installations déjà en place.

En 1944, lorsqu'il s'agit de reprendre les travaux, le Ministère de l'Air qui cherchait à ce moment-là une chute capable de fournir au moins 100.000 cv, disposant autant que possible

d'un réservoir important, jeta son dévolu sur la Chute d'Aussois pour y greffer les installations d'une importante soufflerie sur laquelle, sans trahir les secrets de la défense nationale, il nous a paru intéressant de donner quelques détails tirés des indications qui nous ont été fournies aimablement par l'O.N.E.R.A.

En provenance d'Etztal (Tyrol autrichien) cette soufflerie doit servir aux essais et recherches jusqu'à la vitesse du son, entrepris pour accroître les performances en vol des avions avec ou sans hélices :

soit qu'on exécute des recherches aérodynamiques sur des éléments d'avions en grandeur naturelle ou en maquette ;

soit qu'on essaie des perfectionnements sur des moteurs à pistons avec leurs hélices normales et les problèmes qui en découlent ou sur les propulseurs spéciaux (réacteurs, fusées...).

Pour essayer les groupes propulseurs en vraie grandeur et avoir pour les dimensions de maquettes un rapport de réduction permettant de conserver la précision indispensable à leur construction et leur similitude rigoureuse avec la réalité, on a donné à la veine d'essais un diamètre de 8 mètres.

Cette soufflerie est constituée par un tube fermé sur lui-même, à axe horizontal entière-

ment en tôles soudées et présentant en plan la forme d'un rectangle.

Le courant d'air est produit par une soufflante composée de deux ventilateurs tournant en sens inverse à 250 tours/minute et munis, l'un d'une hélice à 12 pales, l'autre d'une hélice à 14 pales de 15 m. de diamètre, chacun étant actionné directement par une turbine Pelton d'une puissance de 55.000 cv dont le diamètre de la roue est de 6 m. et le poids de 30 tonnes.

Pour effectuer des recherches sur les groupes propulseurs et maintenir une température normale dans le tube, un important échange d'air pouvant aller jusqu'à 20 % a été prévu, l'évacuation des gaz brûlés ou d'air chaud se faisant à l'entrée du convergent.

Aux quatre coudes de la soufflerie on a posé des aubes de déviation des filets d'air qui seront prolongées par des queues orientables.

Les variations de longueur du tube, qui accompagnent les changements de température, sont rendues possibles par l'emploi de joints de dilatation et de cadres oscillants.

La balance de mesures se monte à l'intérieur de la chambre d'expériences formant un tout avec la chambre de mesures. Cet ensemble est relié rigidement à un chariot pouvant se déplacer à l'intérieur d'un grand bâtiment où se fait la préparation et le montage des essais.

Il est en outre annexé au bâtiment un banc d'essais fixe pour la préparation et la mise au point des essais des groupes propulseurs.

Pour que la vitesse de l'air dans la chambre d'expériences atteigne la vitesse du son (330 m/sec) la puissance nécessaire est de 110.000 cv, puissance ne pouvant être demandée à un réseau électrique, étant données son importance et ses variations, d'où l'utilisation directe de la force hydraulique et l'installation en Savoie de cette soufflerie. Elle est à retour simple. Entièrement en acier soudé, son poids est de 4.500 tonnes et ses principales dimensions sont :

Longueur développée sur l'axe	390 m.
Plus petit diamètre (chambre d'expériences)	8 m.
Plus grand diamètre	24 m.
Longueur	175 m.
Largeur	65 m.

Elle occupera sur le terrain un emplacement approximatif de 200 m. de longueur par 140 m. de largeur.

Mais l'Office National d'Etudes et de Recherches Aéronautiques chargé de l'installation de cette première soufflerie n'en restera pas là et prévoit déjà l'installation d'une deuxième soufflerie qui permettra des essais à deux fois la vitesse du son (près de 2.500 km. à l'heure) ; puis d'une troisième soufflerie pour huit fois la vitesse du son (près de 10.000 km. à l'heure).

Toutes ces souffleries seront actionnées par des turbines hydrauliques directement alimentées par des collecteurs prolongeant la conduite forcée de la Chute d'Aussois.

On conçoit dans ces conditions que les travaux d'aménagement de la Chute d'Aussois repris depuis le début de 1946 soient exécutés sur les bases d'un projet sensiblement modifié par rapport à celui de 1939, et cela d'autant plus que l'on a tenu à profiter des progrès techniques réalisés dans cet intervalle de sept ans et dont nous parlerons plus loin en détail au sujet de la conduite forcée puisque le but de cette communication se rapporte à celle-ci.

Mais avant de le faire, jetons un coup d'œil sur l'ensemble de l'aménagement de la chute d'Aussois en nous reportant aux deux dessins ci-contre (plan d'ensemble et profil en long schématique extraits de documents mis aimablement à notre disposition par l'E.D.F. ex-S.H.E.S.).

La surface du bassin versant intéressé est de 163 km² et la réserve totale prévue, de 20 millions de m³.

L'aménagement est établi pour un débit moyen de 6 m³/seconde : 5 m³ 340 durant 8.010 heures seront pris par la centrale E.D.F.

TUYAU N° B2

APRÈS ESSAI DE RUPTURE

A la pression de 167 kg rupture du câble.
La pression est remontée ensuite à 110 kg et l'épreuve
arrêtée après le gonflement de la paroi.

DIMENSIONS RÉELLES DU TUYAU

Repères	a	b	c	d	e	f	g	h
φ tirés de la mesure des circonférences	1226,1	1444,6	1245,5	1241,1	1267,5	1303,2	1297,4	1225,8

PLANCHE N°2

TUYAU N° B2

TUYAU AUTO-FRETTÉ à frettage souple à câble et enrou-
lement hélicoïdal. Type 50/200 C.

Pression maximum de marche 55 kg par cm^2

Pression de frettage 110 kg par cm^2

Système breveté d'arrêt du câble
sans fixation sur la paroi

QUALITÉ DU MÉTAL

Paroi: tôle d'acier demi-doux Marine SS.50 donnant.

$R \geq 48 \text{ kg}$. $E \geq 28 \text{ kg}$. $A \geq 23\%$ de 11 mm d'épaisseur

Cable: composé de 4 torons de 12 fils de 2,4 mm en acier anti-
corrosif à 200 kg. R après cablage $\geq 180 \text{ kgmm}^2$

$E \geq 150 \text{ kgmm}^2$. $\varnothing = 25 \text{ mm}$

DIMENSIONS RÉELLES DU TUYAU

Repères	1	2	3	4	5	6	7	Longueurs.
Avant frettage φ	1215,8	1215,9	1216,9	1217,2	1217,0	1216,2	1216,1	2974
Après frettage φ	1226,7	1223,2	1223,6	1223,6	1223,7	1223,9	1224,8	2969,5

Nota: les φ sont tirés de la mesure des circonférences

PLANCHE N°1

et 12 m³ qui constituent le débit maximum durant 750 heures par la soufflerie.

La prise d'eau se fait sur le Doron de Termignon, affluent de la rive droite de l'Arc à la cote 1.965,00 au lieu dit « Entre deux eaux ». De celle-ci part un tunnel d'amenée en rocher à section non revêtue, entièrement situé sur la rive droite du Doron, captant au passage tous ses affluents rive droite, pour aboutir après plus de 16 km. de parcours à un premier barrage-réservoir d'une capacité de 8 millions de mètres cubes dit du « plan d'aval » situé à la cote 1.965,00 sur le ruisseau d'Avrieux. Le complément de la réserve, soit 12 millions de m³ est fourni par un second barrage-réservoir dit du « plan d'amont » situé sur le même ruisseau, au-dessus du premier à la cote 2.088,00 m.

Du réservoir de « Plan d'Aval » part une conduite d'amenée souterraine, longueur 2.100 mètres, diamètre 3,00 m. sur 1.950 mètres revêtue de gunite et 2,600 m. de diamètre sur une longueur de 150 m. revêtue de tôle. Elle aboutit à la chambre des vannes de la conduite forcée et à une cheminée d'équilibre en tôle diamètre 2,600 m., longueur 188 m. installée le long de la pente du terrain, prolongeant en quelque sorte la conduite forcée. La cheminée

d'équilibre débouche à sa partie haute dans une chambre d'expansion souterraine.

De la chambre des vannes part la conduite forcée qui, après une descente rapide sur une longueur de 1.810 mètres le long des pentes du village d'Aussois qu'elle laisse à sa gauche, aboutit après avoir franchi l'Arc sur une passerelle métallique, à la centrale E.D.F. placée sur la rive gauche de l'Arc, ainsi d'ailleurs que la Soufflerie, à 1 km. environ à l'aval du village d'Avrieux.

L'axe du collecteur de la centrale E.D.F. est à la cote 1.091,00.

C'est donc d'une chute brute de 874 m. dont on dispose.

La conduite forcée proprement dite, enterrée à sa partie supérieure jusqu'à la cote 1500, aérienne ensuite, est constituée :

- 1°) de tuyaux auto-frettés à frettage souple en câbles à enroulement hélicoïdal de 1,700 m. de diamètre sur une longueur de 450 m.
- 2°) de tuyaux auto-frettés à frettage souple en élingues individuelles à fils câblés de 1,700 m. de diamètre, sur une longueur de 385 mètres.
- 3°) de tuyaux auto-frettés à frettes rigides laminées de 1,600 m. de diamètre sur une longueur de 975 m.

A son extrémité aval, la conduite forcée se bifurque en deux collecteurs de distribution.

Le premier pour alimenter la centrale E.D.F. comprenant trois turbo-alternateurs de 41.000 cv - 30.000 kva, le deuxième pour alimenter la soufflerie comprenant 2 turbo-ventilateurs de 55.000 cv.

La centrale E.D.F. et la Soufflerie ne sont pas destinées à fonctionner simultanément et dans ce but, des robinets-vannes placés à la bifurcation permettent d'isoler l'un ou l'autre des deux collecteurs.

La conduite forcée telle qu'elle était prévue en 1939 avait été établie pour un débit maximum de 9 m³ et comprenait, à la partie supérieure des tuyaux soudés en acier au chrome-cuivre à 54 kgs en Φ 1,500 m., dans les parties moyennes et inférieures des tuyaux auto-frettés à frettage rigide à paroi en tôle à 40 kgs et frettes en acier laminé traité à 90 kgs Φ 1,500-1,400 m.

Au moment où la question fut reprise dans les conditions indiquées, la conduite forcée était prévue pour alimenter simultanément la centrale E.D.F. et la Soufflerie, pour un débit de 24 m³ avec 2,100 m. et 2,200 m. de diamètre.

Au cours des années précédentes, on avait mis

TUYAU N° B1

APRÈS ESSAI DE RUPTURE

A la pression de 176 kg rupture du câble.
La pression est remontée ensuite à 110 kg après gonflement de la paroi.

DIMENSIONS REELLES DU TUYAU

Repères	a	b	c	d	e	f	g	h	i
φ tirés de la mesure des circonférences	1226,4	1351,3	1318,1	1330,9	1260,5	1246,8	1244,3	1317,1	1226,4

PLANCHE N°4

TUYAU N° B1

TUYAU AUTO-FRETTÉ à frettage souple à câble et enroulement hélicoïdal Type 50/200 C, comportant un enrobage de 120 mm de béton dosé à 250 kg.

Pression maximum de marche 55 kg par cm²

Pression de frettage 110 kg par cm²
Système breveté d'arrêt du câble
sans fixation sur la paroi

QUALITE DU METAL

Paroi : tôle d'acier demi-doux type Marine SS50 donnant

R > 48 kg E > 28 kg A > 23% de 11 mm d'épaisseur

Câble : composé de 4 torons de 12 fils de 2,4 mm en acier anti-corrosif à 200 kg. R après câblage > 180 kg/mm², E > 150 kg/mm²

Ø = 25 mm

DIMENSIONS REELLES DU TUYAU

Repères	1	2	3	4	5	6	7	Longueurs
Avant frettage φ	1216,9	1215,9	1216,9	1217,2	1216,2	1215,6	1215,3	29 74,5
Après frettage φ	1226,4	1224,4	1224,7	1225,2	1224,4	1223,4	1226,7	29 69

Nota : les φ sont tirés de la mesure des circonférences

PLANCHE N° 3

au point la fabrication des tuyaux auto-frettés à frettage souple, et appliqué ce nouveau dispositif à l'aménagement de l'importante conduite forcée de la Chute du Vénéon qui fut en grande

TUYAU B. 2. DANS LA PRESSE D'ÉPREUVE AU MOMENT DE L'AUTO-FRETTAGE

partie construite en tuyaux auto-frettés à frettes individuelles en élingues à fils câblés en acier anti-corrosif à 200 kgs. Il était donc tout indiqué de profiter des progrès réalisés et de prévoir ce système sur la nouvelle conduite forcée d'Aussois. C'est ce qui fut fait. Cependant, pour des raisons de délai, on dut limiter l'utilisation du frettage souple à la moitié supérieure de la conduite, la moitié inférieure étant construite en tuyaux auto-frettés à frettage rigide.

Malgré l'expérience du Vénéon, et vu l'importance de la nouvelle conduite d'Aussois dont l'aménagement tel qu'il se présentait comportait une seule conduite forcée d'une puissance de plus de 200.000 cv (La Bissorte 105.000 cv), des

TUYAU B. 2. DANS LA PRESSE D'ÉPREUVE APRÈS ESSAIS.

essais spéciaux sur les tuyaux auto-frettés à frettage souple furent jugés opportuns. Ils furent exécutés, en septembre 1946, et nous allons maintenant donner d'intéressants détails à leur sujet.

Avant de le faire, disons cependant (alors que ces essais avaient reçu un commencement d'exécution) — que le projet d'installation de la conduite forcée de la chute d'Aussois fut profondément modifié :

Pour le moment en effet, on va installer une seule conduite forcée pour 12 m³ avec des diamètres de 1,700 m. et 1,600 m. qui alimentera tantôt la centrale E.D.F. et tantôt la Soufflerie. Le canal d'amenée ne subira pas de changement : il sera aménagé pour 24 m³ et les dispositions prises permettront l'installation éventuelle d'une deuxième conduite semblable à la première.

Les ETABLISSEMENTS BOUCHAYER ET VIALLET et la SOCIÉTÉ DAUPHINOISE D'ÉTUDES ET DE MONTAGES avaient proposé pour la moitié supérieure de la Chute d'Aussois l'emploi de tuyaux frettés à frettage souple suivant deux procédés :

- a) frettage à élingues individuelles à fils câblés
- b) frettage à câble à enroulement hélicoïdal.

Des tuyaux frettés (a) à frettage souple à élingues individuelles équipent la chute du Vénéon ainsi que nous l'avons déjà indiqué, en service depuis le début de 1944, et des tuyaux à frettage souple hélicoïdal sont prévus pour des aménagements en cours.

Pour parer aux inconvénients d'une rupture de frettage pour une cause accidentelle et exceptionnelle, on a établi un système dit « de sécurité » appliqué quelquefois pour le premier type et toujours pour le second, pour lequel les dimensions de la tôle et du frettage sont telles que la première puisse résister seule à la pression maximum de marche (surpression comprise) sans qu'il soit nécessaire d'interrompre l'exploitation pour remettre en état la conduite.

Après rupture du frettage, le coefficient de sécurité pour la tôle est égal à 1 par rapport à la limite élastique de l'acier utilisé.

Les essais entrepris avaient pour but de constater par l'expérience, les résultats intéressants donnés par le calcul, c'est-à-dire :

- 1) Vérifier le coefficient de sécurité des tuyaux auto-frettés prévu et calculé égal à 3 par rapport à la rupture.
- 2) Constater le coefficient de sécurité des tuyaux démunis de frettes. Cette constatation ne pouvait se faire que par rapport

TUYAU N° A2

APRÈS LE L'ESSAI DE RUPTURE

Rupture à 162 kg de la 2 & 3 élingue à une extrémité du tuyau.

DIMENSIONS RÉELLES DU TUYAU

Repères	a	b	c	d	e	f	g	h
φ tirés de la mesure des circonférences	1233,1	1325,5	1230,9	1230,9	1230,2	1230,6	1232,2	1231,2

PLANCHE N°6

TUYAU N° A2

TUYAU AUTO-FRETTÉ à frettage souple à élingues individuelles à fils cablés. Type 50/200E

Pression maxima de marche: 55 kg par cm²

Pression de frettage: 110 kg par cm²

QUALITÉ DU MÉTAL.

Parci: toiz acier demi-doux type Marine S.S. 50 donnant:

R > 48 kg E > 28 kg A > 23 % de 11mm. d'épaisseur

Elingues: composées de 6+1 torons de 12 fils de 2,4mm acier anti-corrosif à 200kg. R après câblage > 180kg_{mt}, E > 150kg_{mt}, Ø 30, 2^m/m

DIMENSIONS RÉELLES DU TUYAU

Repères	1	2	3	4	5	6	7	Longueurs
Avant frettage φ	1212,4	1212,7	1213,4	1214,3	1214,0	1212,7	1212,4	295,9
Après frettage φ	1228,2	1227,7	1226,7	1224,8	1225,1	1225,8	1227,5	294,9

Noté: les φ sont tirés de la mesure des circonférences

PLANCHE N°5

TUYAU B. 1. DANS LA PRESSE D'ÉPREUVE AVANT LES ESSAIS.

à la rupture et non par rapport à la limite élastique du métal. Il devait donc être supérieur à 1.

- 3) Etudier, en outre, la tenue d'une couche de béton coulé sur les tuyaux frettés et comparer le comportement des tuyaux ordinaires à celui de ces tuyaux enrobés.

Au programme des essais, il fut donc décidé de construire des tuyaux de dimensions industrielles, les uns à frettage souple à élingues individuelles, les autres à frettage souple à câble à enroulement hélicoïdal.

Deux tuyaux de chaque sorte ont été prévus, le second étant destiné à recevoir avant épreuve une couche épaisse de béton.

Sur les quatre tuyaux, des mesures et constatations diverses devaient être faites au cours du frettage et immédiatement avant l'essai de rupture, pour faire apparaître éventuellement les différences de comportement des différents modèles. Ces mesures sont consignées plus loin.

Le diamètre des tuyaux prévus pour équiper la chute d'Aussois était d'abord de :

Φ 2.100 m/m intérieur

il est maintenant prévu à un diamètre inférieur :

Φ 1.700 m/m intérieur.

Les tuyaux d'essais, construits par les ETABLISSEMENTS BOUCHAYER ET VIALLET, suivant leurs procédés courants, ont un diamètre intérieur de 1200 m/m.

Leurs caractéristiques sont indiquées sur les planches ci-contre :

- Tuyau A1 à frettage souple à élingues individuelles à fil câblé enrobé de béton.
- Tuyau A2 identique au précédent, mais sans enrobage.

- Tuyau B1 à frettage souple à câble à enroulement hélicoïdal, enrobé de béton.
- Tuyau B2 identique au précédent, mais sans enrobage.

Le diamètre intérieur de ces tuyaux est de Φ 1.200, comme cela a déjà été dit, leur épaisseur est de 11 m/m en tôle d'acier demi-doux nuance Martin 50 s.s. donnant :

R 48 Kg/m/m² - E 28 Kg/m/m² - A 23 %

Les câbles et élingues sont composés de (n) torons de 12 fils de 2,4 m/m en acier anticorrosif à 200 kgs ayant une limite élastique de 150 kg/m/m² avec :

$n = 4$ pour les câbles.

$n = 7$ pour les élingues.

En réalité, les calculs sont faits en adoptant $n = 6$ pour les élingues, car il y a une solution de continuité entre le 7° et le 1° toron au droit de leur jonction bout à bout.

Soudure à l'arc électrique à la main par la méthode des cordons multiples. Electrodes « Sarazin » Marine 55.

Ces caractéristiques ont été déterminées pour que les tuyaux supportent la pression intérieure de marche de 55 kg/cm² avec le coefficient de sécurité généralement admis : 2,5 par rapport à la limite élastique, c'est-à-dire que sous une pression égale à 2,5 fois la pression de marche, les contraintes correspondent à la limite élastique de l'acier.

Les tuyaux correspondants de la Chute d'Aussois, partie la plus chargée du tronçon supérieur, travailleraient sous la même pression intérieure (chute 478 m. + surpression 15 %).

La pression de frettage est, comme à l'ordinaire, égale à deux fois la pression maximum de marche, soit 110 kgs/cm², et la pression de

TUYAU B. 1. DANS LA PRESSE D'ÉPREUVE APRÈS LES ESSAIS.

rupture du frettage égale à 3 fois la pression maximum de marche, soit 165 kg/cm².

La vérification des caractéristiques des matériaux fournit les indications suivantes :

L'épaisseur des tôles, vérifiée, tout au moins sur les bords, a été trouvée égale à :

$$11,26 \pm 1,41 \text{ m/m}$$

$$1,41 = \text{écart quadratique moyen}$$

pour la tôle A2, pour laquelle l'écart quadratique moyen avait la plus grande valeur.

Le contrôle des caractéristiques mécaniques a donné pour les tôles :

$$R \neq 50 \text{ kg/mm}^2$$

$$31 \leq R \leq 34 \text{ kg/mm}^2$$

$$A \% \neq 29$$

Dans l'ensemble, les caractéristiques ont une valeur un peu supérieure à celle portée au cahier des charges.

Pour les câbles, les essais furent faits à la « TRÉFILERIE ET CABLERIE DE BOURG » et au Laboratoire des E.B.V.

Les câbles et élingues employés à la fabrication étant anti-corrosifs, il fallait tenir compte au cours de ces essais de l'épaisseur de zinc réduisant la section nette du câble. Compte tenu de cette correction, la rupture du toron s'est produite pour une fatigue égale à :

$$R = 182 \text{ kg/mm}^2$$

La limite de rupture des fils est bien de 200 kg/mm², mais cette limite est abaissée de 10 % par l'« effet de câblage ». Le résultat obtenu est donc bien conforme à celui garanti par le fournisseur.

D'autre part, des essais qu'il importe de souligner ici, ont été entrepris en 1942 à Bourg, en vue de déterminer le modèle d'élasticité des câbles.

Sans entrer dans le détail de ces essais, les résultats furent les suivants :

$$\text{module d'élasticité } E = 20.435 \text{ sur fil}$$

$$\text{module d'élasticité } E = 17.830 \text{ sur toron}$$

$$\text{module d'élasticité } E = 16.680 \text{ sur élingue}$$

Sur « mariage » ou sur « jonction » les modules d'élasticité s'abaissent jusqu'à 15.540 et 14.580.

Les valeurs adoptées pour E dans le calcul des tuyaux auto-frettés à frettage souple :

$$E = 16.500 \text{ pour les élingues}$$

$$E = 17.500 \text{ pour les câbles}$$

sont bien conformes aux valeurs précédentes.

Les tuyaux A sont frettés avec des élingues tandis que les tuyaux B le sont avec des câbles.

Les tuyaux A1 et A2 se sont comportés de façon absolument identique. La limite élas-

tique de la tôle est atteinte pour une pression de 50 kg/cm² au manomètre de la presse hydraulique. A 65 kg/cm², le « collage » est effectif. Ces pressions correspondent à des fatigues de la tôle égales à :

$$R = \frac{P D}{2^0} \quad \begin{matrix} R' = 27 \text{ kg/mm}^2 \\ R'' = 35 \text{ kg/mm}^2 \end{matrix}$$

Les elongations de la tôle ont été mesurées à l'aide de deux extensomètres Huggenberger, ces mesures étant doublées par des mesures de développement circonférentiel qui donnent sur ce diamètre une excellente précision $\left(\frac{1^e}{2000}\right)$.

La déformation permanente de la tôle après frettage est sensible, puisque le diamètre passe de 1211 m/m à 1226 m/m, dans une section voisine du bord.

Dans une section voisine du milieu, l'allongement de la tôle est légèrement moindre.

Les mesures de raccourcissement longitudinal indiquent une diminution de 8 m/m, le coefficient de Poisson se trouve être ainsi vérifié et égal en moyenne à 0,30.

TUYAU A. 2. DANS LA PRESSE D'ÉPREUVE AVANT LES ESSAIS.

Les tuyaux B1 et B2 se sont comportés de façon identique, eux aussi. Cependant on n'a pas pu apprécier les pressions pour lesquelles étaient atteints la limite élastique et le collage, le câble étant déjà adhérent au tuyau.

Pour le tuyau B1, elle a été néanmoins estimée à 55 kg/cm², ce qui correspond à une fatigue de 30 kg/mm² pour la tôle.

Toujours pour la même raison, à savoir que le câble adhère à la tôle, la déformation des tuyaux B comparée à celle des tuyaux A est minima.

Les mesures prises au cours du frettage des

quatre tuyaux l'ont été par tensomètres Hugenberg, cordes vibrantes Coyne.

Après frettage, on a fait subir à chacun des tuyaux plusieurs mises en pression consécutives jusqu'à 110 kg/cm². A chaque cycle, le développement du tuyau éprouvé était mesuré.

On a constaté que les tuyaux A et B se comportent de la même façon et que leurs dimensions à 0 et 110 kg/cm² restaient parfaitement comparables à elles-mêmes.

Après frettage, on peut donc dire que les tuyaux sont « stabilisés ».

Les résultats des mesures sont consignés au tableau ci-dessous :

STABILISATION

Pression	0	110	0	110	0	110	0	110	0	110	0
Tuyau A2 repère 4	3.846	3.854	3.846	3.855	3.846	3.855	3.847	3.855	3.846	3.855	3.846
Tuyau B2 repère 4	3.842	3.851	3.842	3.851	3.842	3.851	3.842	3.851	3.842	3.851	3.842

Pendant les essais de stabilisation, les deux tuyaux A1 et B1 étaient recouverts de béton sur une épaisseur de 120 m/m. Le béton était dosé à 250 kg/m³ pour le tuyau A1 et 300 kg/m³ pour le tuyau B1. Ces conditions sont celles pratiquées ordinairement sur les chantiers où le dosage du béton n'est pas rigoureusement constant.

Une fois le béton séché, ces tuyaux furent mis en pression et l'on a mesuré les elongations, donc les tensions superficielles du béton au cours de la mise en pression.

Au voisinage de 50 kg/cm² de pression intérieure, pour le tuyau A1 et 35 kg/cm² pour le tuyau B1, de petites fissures cependant visibles à l'œil nu, commencent à apparaître.

De ce fait, les tensions dans le béton n'augmentent plus, même lorsque la pression intérieure est portée à 55 kg/cm² pression de service.

On remarque encore que jusqu'à 25 kg/cm² la surface extérieure du béton semble demeurer sans tension dans le sens transversal.

Il y a lieu de remarquer que pratiquement, l'enrobage de béton se ferait sur une conduite en pression de façon à ce que le béton ne travaille jamais à la traction à un taux de fatigue entraînant des fissures même capillaires.

Les essais de rupture se sont déroulés à Grenoble le 19 septembre 1946, trois semaines après le dernier des essais précédents, aux ETABLISSEMENTS BOUCHAYER ET VIALLET en présence de nombreuses et hautes personnalités de l'Electricité de France et de l'Office National d'Etudes

TUYAU A. 2. DANS LA PRESSE D'ÉPREUVE APRÈS LES ESSAIS.

et de Recherches Aéronautiques, parmi lesquelles MM. COLOMB, GIRARD et HAEGELEN.

Les tuyaux d'essais furent introduits, après exécution des joints d'étanchéité à leurs extrémités, entre les deux plateaux d'une presse hydraulique de 3 500 tonnes.

Pour compenser les raccourcissements longitudinaux, l'un des plateaux de la presse est muni d'un dispositif hydraulique de compensation automatique. La pression exercée sur les joints par ce dispositif maintient leur étanchéité.

Les frettes d'extrémité travaillent un peu plus du fait de cette compression suivant l'axe du tuyau. Le diamètre des bagues d'extrémité est plus grand que celui des frettes ; ces deux raisons expliquent pourquoi la rupture du frettage se fait en bout de tuyau et non pas au centre ou en n'importe quel endroit, comme sur les tuyaux à frettage hélicoïdal dont l'extrémité est renforcée par le système d'arrêt du câble.

Les plateaux de la presse jouent le rôle de fonds d'obturation. La pression est contrôlée par plusieurs manomètres étalonnés. Elle est produite par une pompe électro-mécanique à débit constant. Le débit à l'intérieur du tuyau est réglé par un dispositif spécial.

Lors des essais, on faisait monter progressivement la pression jusqu'à la rupture du frettage, en visitant les tuyaux à intervalles réguliers jusqu'à la pression de 137 kg/cm² déterminant théoriquement une tension de frettage égale à sa limite élastique (2,5 fois la pression maximum de marche).

La rupture du frettage obtenue, la pression était ramenée immédiatement à 55 kg/cm² c'est-à-dire à la pression maximum de marche. L'opération était répétée jusqu'à ce que les manomètres indiquent une pression sensiblement stationnaire sous un débit constant de la pompe,

TUYAU N° A1

APRÈS LE 1^{er} ESSAI DE RUPTURE

A la pression de 165 kg rupture de la 1^{re} & 2^{de} frette à une extrémité du tuyau.

DIMENSIONS RÉELLES DU TUYAU après essai

Repères	a	b	c	d	e	f	g	h	i
φ tirés de la mesure des circonférences	1217,2	1293	1236,3	1232,5	1232,5	1232	1231	1231,6	1230

PLANCHE N° 9

TUYAU N° A1

TUYAU AUTO-FRETTÉ à frettage souple à élingues individuelles à fils cablés. Type 50/200E comportant un enrobage de 120 mm de béton dosé à 250 kg.

Pression maximum de marche : 55 kg par cm^2

Pression de frettage : 110 kg par cm^2

QUALITÉ DU METAL

Paroi: tole acier demi-doux type Marine SS.50 dominant.

R ≥ 48 kg E ≥ 28 kg A ≥ 23 % de 11 mm d'épaisseur

Elingues: composees de 6+1 torons de 12 fils de 2,4 mm en acier anti-corrosif à 200 kg. R après cablage ≥ 180 kg/mm². E ≥ 150 kg/mm². Ø 30,27.

DIMENSIONS RÉELLES DU TUYAU

Repères	1	2	3	4	5	6	7	Longueurs
Avant frettage	Ø 1211,7	1212,1	1212,4	1213,0	1213,0	1212,4	1212,1	2959
Après frettage	Ø 1226,7	1226,4	1225,4	1225,1	1225,3	1225,9	1227,7	2948

Nota: les φ sont tirés de la mesure des circonférences

PLANCHE : 8

TUYAU A. 1. APRÈS ESSAIS

TUYAU A. 1. APRÈS LES ESSAIS COMPLÉMENTAIRES
(FRETTES ROMPUES ENLEVÉES)

ce qui indique que le gonflement de la paroi est tel que son allongement correspond à la striction qui précède la rupture.

Pendant toutes ces opérations, un capot de protection entourait la presse d'épreuve. Il était enlevé chaque fois qu'une photo était nécessaire, mais était agencé de façon à permettre à tout moment les mesures ou les observations visuelles.

Les photos et les planches ci-contre montrent les tuyaux avant et après rupture du frettage et font ressortir l'amplitude des déformations.

Les soudures se sont comportées absolument comme la tôle pleine sur laquelle on n'a relevé aucune fissure ni crique quelconque, même dans les parties les plus déformées.

Les résultats des essais sont rapportés dans leur ordre chronologique.

Tuyau B. 2. — Frettage hélicoïdal, non bétonné.

Jusqu'à 165 kg/cm^2 (3 fois la pression de marche) aucune observation. Les mesures de développement circonférentiel jusqu'à 110 kg/cm^2 sont consignées au tableau ci-après :

Pressions	D E V E L O P P E M E N T S						
	1	2	3	4	5	6	7
0	3.852	3.845	3.846	3.845	3.846	3.847	3.846
60		3.847	3.847	3.846	3.847	3.847	
70		3.850	3.847	3.847	3.847	3.848	
80		3.849	3.849	3.848	3.848	3.849	
110		3.852	3.853	3.852	3.852	3.853	

A la pression de 167 kg/cm^2 rupture du frettage vers la quatrième ou cinquième spire, gonflement immédiat du tuyau qui s'accroît encore lorsque la pression est montée de 55 à 110 kg/cm^2 ; en certains points l'allongement de la paroi atteint 20 %.

Au moment de la rupture, le chevauchement de certains brins a stoppé le déroulement du câble et un nouveau frettage s'est produit. Cette constatation a pu être faite de nouveau sur le tuyau B. 1.

Tuyau B. 1. — Frettage hélicoïdal, bétonné.

A la pression de 35 kg/cm^2 apparition de quelques fissures capillaires de faible longueur à la surface du béton.

De 35 à 55 kg/cm^2 ces fissures augmentent en nombre et s'étendent en longueur. Elles deviennent plus apparentes à l'œil nu, mais restent capillaires.

A 110 kg/cm^2 les fissures sont plus épaisses et sont nettement visibles. On peut y introduire une lame de couteau.

A 120 kg/cm^2 , elles deviennent plus importantes, le béton se disloque jusqu'à 140 kg/cm^2 où il tombe par plaques sous son propre poids (partie inférieure).

A 176 kg/cm^2 , rupture du frettage avec important gonflement de la paroi du tuyau.

La pression est abaissée immédiatement à 55 kg/cm^2 , puis remontée jusqu'à 110 kg/cm^2 , le gonflement s'accroît de plus en plus jusqu'à la limite de striction.

Comme précédemment, l'étanchéité est parfaite.

Tuyau A. 2. — A élingues, non bétonné.

Jusqu'à 110 kg/cm^2 , les résultats sont consignés au tableau ci-après :

TUYAU N° A1

APRÈS LE 2^e ESSAI DE RUPTURE

- 1^{re} rupture de la frette 1 (recuite) à 100 kg
- 2^{re} rupture de la frette 2 à 135 kg
- 3^{re} rupture de la frette 3 à 120 kg
- 4^{re} rupture de la frette 4 à 110 kg
- 5^{re} rupture de la frette 5 à 115 kg

- 6^{re} rupture de la frette 6 à 120 kg
- 7^{re} rupture de la frette 7 à 115 kg
- 8^{re} rupture de la frette 8 à 110 kg
- 9^{re} rupture de la frette 9 à 110 kg

DIMENSIONS RÉELLES DU TUYAU après essai

Repères	a	b	c	d	e	f	g	h
φ tirés de la mesure des circonférences	1232,1	1232,1	1236,3	1264,6	1231,2	1232,1	1233,1	1230,9

PLANCHE N° 10

TUYAU N° A2

APRÈS LE 2^e ESSAI DE RUPTURE

- A la pression de 150 kg rupture de la 1^{re}, 2^e & 3^e élingue
- A 110 kg rupture de la 4^e élingue
- A 110 kg rupture de la 5^e élingue

DIMENSIONS RÉELLES DU TUYAU

Repères	a	b	c	d	e	f	g	h
φ tirés de la mesure des circonférences	1231	1231,2	1230,6	1231,5	1234,4	1240,8	1336,3	1231

PLANCHE N° 7

Pressions	DÉVELOPPEMENTS CIRCONFÉRENTIELS						
	1	2	3	4	5	6	7
0	3.851	3.849	3.847	3.846	3.847	3.849	3.854
55	3.853	3.853	3.851	3.850	3.850	3.851	3.857
80	3.856	3.855	3.854	3.851	3.853	3.856	3.859
110	3.859	3.860	3.857	3.855	3.857	3.860	3.862

A 162 kg/cm², rupture de deux frettes avec gonflement important de la paroi.

La pression est abaissée à 55 kg/cm², puis remonée comme précédemment jusqu'à 110 kg/cm² sans que les frettes adjacentes se rompent. L'opération est donc arrêtée.

Tuyau A. 1. — A élingues, bétonné.

Les premières fissures capillaires à la surface du béton apparaissent à la pression intérieure de 45 kg/cm².

L'expérience se déroule comme précédemment pour le tuyau B. 1., en ce qui concerne le béton et comme pour le tuyau A. 2., en ce qui concerne la rupture des frettes, sauf que la rupture s'est produite à 165 kg/cm² au lieu de 162 kg/cm².

L'étanchéité de ces tuyaux est restée parfaite. L'examen ultérieur des soudures n'a révélé ni crique, ni fissure quelconque.

La valeur des pressions de rupture observées est égale à moins de 2 % près à celle prévue par l'adoption du coefficient de sécurité 3 (par rapport à la rupture) sauf pour le tuyau B. 1 où elle est légèrement supérieure (176 au lieu de 165 kg/cm²).

Au cours des essais de rupture, on a essayé de déterminer la limite élastique de l'ensemble tôle-câble, sans toutefois y parvenir. En effet, un câble n'a pas de limite élastique nette en ce sens que les effets du toronnage donnent à la courbe $T = f(\Delta)$ tensions en fonction des déformations, une allure très régulière sans aucune discontinuité.

Ainsi les cordes vibrantes disposées sur les tuyaux A. 2 et B. 2 se sont tendues de plus en plus pour les mêmes intervalles de pression et la courbe obtenue avait une allure de parabole sans cassure.

DES ESSAIS COMPLÉMENTAIRES ont eu lieu les 20 et 24 septembre 1946 sur les tuyaux A. 1 et A. 2, l'extrémité déformée ayant été tronçonnée. Il était en effet intéressant de connaître le coefficient de sécurité après rupture de ces frettes.

Tuyau A. 2. — Après sectionnement de l'extré-

TUYAU A. 2. DANS LA PRESSE D'ÉPREUVE APRÈS LES ESSAIS COMPLÉMENTAIRES.

TUYAU A. 1. APRÈS LES ESSAIS COMPLÉMENTAIRES (4 FRETTE)

mité, la première rupture a eu lieu à 150 kg/cm² (lors du premier essai, 2 frettes s'étaient rompues à 162 kg/cm²).

Deuxième rupture 110 kg/cm²

Troisième rupture 110 kg/cm²

Ces trois frettes étant situées à l'extrémité du tuyau.

Tuyau A. 1. — Pour être certain d'obtenir la rupture d'une frette située au milieu du tuyau, on a affaibli une frette médiane en la chauffant au chalumeau.

1^{re} rupture : 100 kg/cm², frette affaiblie.

2^e rupture : 135 kg/cm², frette adjac^{te} à la 1^{re}

3^e rupture : 120 kg/cm² — — 1^{re}

4^e rupture : 110 kg/cm² — — 3^e

5^e rupture : 115 kg/cm² — — 4^e

6^e rupture : 120 kg/cm² — — 2^e

7^e rupture : 115 kg/cm² — — 6^e

8^e rupture : 110 kg/cm² — — 5^e

9^e rupture : 110 kg/cm² — — 8^e

On remarque le gonflement du tuyau correspondant à un allongement maximum de 20 % environ.

Les essais du 19 septembre et les essais complémentaires qui les ont suivis ont parfaitement démontré la bonne tenue des freitages souples aussi bien à élingues qu'à enroulement hélicoïdal.

Pour chaque tuyau d'essai le coefficient de sécurité par rapport à la rupture a été vérifié égal à 3.

On a pu constater, suivant le but que l'on s'était proposé, que ces tuyaux du type « de sécurité » répondaient bien à leur appellation, puisqu'une fois le freitage rompu le coefficient de sécurité par rapport à la rupture était encore égal à 2.

On pourrait dire cependant, que les résultats aussi probants qu'ils soient n'ont pas été complets, puisqu'on n'a pas obtenu l'éclatement de la tôle. Cette rupture de tôle n'aurait apporté aucun enseignement nouveau puisque l'on savait, au moment où chaque essai fut interrompu qu'elle se serait produite sans augmentation de la pression, la limite de striction étant atteinte.

A défaut de rupture, les essais ont mis en évidence une capacité de déformation avant rupture considérable, aussi bien pour la tôle que

pour la soudure : plus de 20 %. Il était plus intéressant de montrer les tuyaux ainsi déformés avant rupture.

L'allongement % de la tôle est bien celui garanti par le cahier des charges des Forges, en ce sens que les observations concordent avec les courbes d'allongements établies lors des essais de réception des tôles.

Cependant, l'œil n'est pas accoutumé à de telles déformations et l'expérience a permis de constater qu'une petite déformation prenant naissance accidentellement sur un tuyau n'entraîne aucun danger pour l'exploitation, vu les possibilités de déformation de la tôle.

Ces essais ont non seulement confirmé la bonne tenue du système breveté d'arrêt du câble à enroulement hélicoïdal, mais ils ont démontré que, loin de constituer un point faible, cet arrêt renforçait l'extrémité des tuyaux.

Enfin, on a constaté que l'enrobage de béton peut être appliqué avec succès, la fissuration ne se produisant qu'à partir d'une tension relativement élevée. Les relevés de mesures montrent aussi que les tuyaux enrobés ont une capacité de résistance de 2 à 5 % supérieure à celle des tuyaux nus.

Sans attacher d'importance à ce résultat, on peut affirmer que l'enrobage placé sur les conduites, sous pression, pour éviter qu'elles travaillent à la traction, constitue une excellente protection des conduites à freitage souple.

TUYAU A. 1. APRÈS LES ESSAIS COMPLÉMENTAIRES
(8 FRETTES)