HYDRAULIQUE

Les conduites forcées pour la plus haute chute du monde

Expériences effectuées sur les tuyaux frettés

par G. SIROVICH, Professeur à l'Ecole d'Ingénieurs de Rome

La Société anonyme « La Dixence », de Lausanne, effectue, en ce moment, de grands travaux sur le versant gauche de la

L'usine, située sur la rive gauche du Rhône, au lieu dit : « Chandoline », près de Sion (chemin de fer Brigue-Lausanne).

Un canal de fuite d'environ 640 mètres de longueur, ramenant les eaux au Rhône.

Les principales caractéristiques de l'installation sont les suivantes :

Débit maximum.....	10.250 lit./sec.
Chute, mesurée entre le plan de retenue normale et l'axe du collecteur	1.748 mètres
Puissance installée (5 groupes de : 31.300 kW. chacun) ..	156.500 kW.

Les conduites forcées se composent :

a) D'un tronçon à conduit unique de 2.000 mm. de diamètre sur 400 m. environ de longueur.

b) De deux conduites jumelées (se raccordant au tronçon précédent au moyen d'une culotte de bifurcation) à diamètres intérieurs variables de 1.420 à 985 mm., répartis de façon telle que la perte de charge résultera l'équivalente à celle d'une

FIG. 1.— Vue de la presse à essayer et du tuyau fretté pendant les essais d'élasticité.

vallée du Rhône (Valais) pour la création d'une usine hydroélectrique grandiose, qui exploite une chute de 1.750 mètres, véritable record, dépassant de loin les plus hautes chutes captées à ce jour dans le monde entier.

L'installation est constituée de :

Un réservoir d'accumulation de 50.000.000 m³, créé dans la localité « Val des Dix » (commune d'Hérémence), au moyen d'un barrage qui retient les eaux de la Dixence : le plan d'eau de la retenue maximum sera à la cote 2.240,50.

Un canal d'amenée, sous pression, de 11.500 mètres de longueur, à section circulaire, variant de 2,75 à 2,25 m. de diamètre, aboutissant à une cheminée d'équilibre.

Deux conduites forcées, ayant leur origine à la cote 2.152,83 et aboutissant à la cote 493,50, couvrant une longueur — mesurée sur l'axe — de 5.900 m. environ.

FIG. 2.— Tuyau fretté d'essai A.

conduite de 1.100 mm. de diamètre constant; longueur développée de chaque conduite environ 5.500 m.

On comprend que la Société qui construit l'installation ait porté une attention toute particulière sur les conduites forcées, soit à cause de l'importance de la construction (il s'agit d'un

sont caractérisées par un produit HD (H étant la chute) de $1748 \times 1,10 = 1.920$ environ, qui dépasse de beaucoup le record que détient encore l'usine de Mese de la « Società Elettrica Interregionale Cisalpina » de Milan avec 1.340 (H = 756,78; D = 1,775).

La Société « La Dixence », après avoir étudié à fond la ques-

FIG. 2.— Essai de pliage sur soudure (virole du tuyau A).

FIG. 4. — Acier de la virole du tuyau A.

poids global d'environ 16.000 tonnes de métal), soit en raison de la pression très élevée, jamais atteinte de nos jours, qui impose des dimensions exceptionnelles aux tuyaux de la partie inférieure, d'un mètre environ de diamètre.

Faut-il remarquer, à ce propos, que les conduites en discours

tion, se basant aussi sur les diverses propositions avancées par des firmes de renommée mondiale appelées en concours, décida d'adopter des tuyaux soudés lisses depuis l'origine jusqu'à la pression de 490 mètres et des tuyaux frettés pour la restante partie en aval jusqu'à l'usine.

FIG. 6. — Essai de pliage sur soudure (virole du tuyau A).

FIG. 5. — Acier des frettes du tuyau A.

La fourniture de la partie en amont et le montage des conduites complètes furent réservés à l'industrie suisse et précisément à la maison Sulzer Frères, de Winterthur,

Avant de passer à l'attribution de la fourniture de la partie frettée des conduites, qui est celle de caractère vraiment exceptionnel en raison de l'altitude de la chute, il fut décidé de procéder à une série de contrôles et essais propres à déterminer de façon certaine le comportement de la construction vis-à-

Il fut décidé d'effectuer deux ordres d'essais, que nous appellerons tout court : *essais A* et *essais B*.

Les essais A visaient un double but :

1^o Contrôler le comportement d'un tuyau semblable pour dimensions, construction et qualités de matériel à ceux envisagés pour la partie plus basse des conduites, cherchant à déterminer l'effort réel évoqué dans la virole et dans les frettes par

Les essais furent effectués sur éprouvettes "Mesnager", de $10 \times 10 \times 55$ mm. L'entaille fut pratiquée sur la face de l'éprouvette correspondant à la section droite de la virole
S = Zone de soudure

— Indice de résilience sur éprouvettes prélevées vers la surface extérieure de la virole
- - - - - Indice de résilience sur éprouvettes prélevées dans la zone moyenne de l'épaisseur de la virole
- - - - - Indice de résilience sur éprouvettes prélevées vers la surface intérieure de la virole
- - - - - Indice moyen de résilience

FIG. 7.— Diagramme polaire de la résilience de la virole du tuyau A.

vis de toutes les sollicitations possibles et à fournir tous les éléments susceptibles de permettre une vérification rigoureuse du bien-fondé des hypothèses et méthodes de calcul adoptées pour les éléments divers des conduites.

Les essais en discours furent dirigés par une Commission formée de M. le Professeur Landry, directeur de l'Ecole d'Ingénieurs de l'Université de Lausanne, président et administrateur délégué de la Société anonyme « La Dixence », et de MM. Neeser et Dumas, professeurs à l'Université de Lausanne.

A la suite des résultats de ces essais, la fourniture fut attribuée à la Maison Tubitogni, de Brescia, qui garde ainsi sa primauté mondiale non seulement en ce qui concerne le nombre de kilowatts hydro-électriques installés mais aussi dans la construction des conduites forcées pour les plus hautes chutes exploitées de nos jours.

En raison du caractère exceptionnel des essais effectués, et sans préjudice de l'exposé plus complet et détaillé que pourront en donner les éminents expérimentateurs, nous croyons intéressant de reporter ici les résultats plus marquants obtenus,

des pressions intérieures variables de zéro à une fois et demie la pression de service; par quoi on serait resté largement en dedans de la période élastique;

2^o Contrôler si le joint à manchon de la maison, avec dispositif d'étanchéité sous fortes pressions, donnait satisfaction aussi dans le cas en discours.

Les essais B auraient dû être effectués sur des tuyaux calculés pour une pression de service de 60 kg./cm², sur lesquels on aurait dû répéter la détermination des efforts évoqués pendant toute la période élastique, poussant ensuite la pression intérieure jusqu'à la rupture des tuyaux; ce qui n'était, évidemment, pas possible de faire avec le tuyau des essais A, à cause des formidables pressions qu'il aurait fallu atteindre, non consenties par les moyens d'essai disponibles et non concevables autrement qu'à la condition de prédisposer expressément un outillage ad hoc très onéreux.

Essais A. — Les matériaux employés dans la construction du tuyau pour les essais A avaient les caractéristiques indiquées dans les tableaux suivants :

TABLEAU I

Tôle employée pour la construction de la virole du tuyau A (1).

Analyse chimique : C = 0,085 % Mn = 0,492 % Si = nul S = 0,044 % Ph = 0,016 %								
Essais mécaniques	Position de prélèvement de barreaux	Sens du prélèvement	Traction sur barreau normal de longueur L = 11,3 $\sqrt{S}$				Résilience sur barreau Mesnager φ	Pliage
	A une extrémité de la tôle	Transversal	R	E	A	Σ	14,8 11,6 18,7	Bon
			34,6	22,7	9,0	64,0		
	A l'autre extrémité de la tôle	Transversal	34,5	23,6	23,8	66,0	14,7 13,3 13,9	Bon
						Rupture hors repères		

R = Résistance à la rupture en kg./mm².
E = Limite apparente d'élasticité en kg./mm².
A = Allongement en pour cent de la longueur entre repères.
 Σ = Striction en pour cent de la section résistante primitive.
 φ = Travail absorbé en kg./cm².

Les essais furent effectués sur éprouvettes coupées transversalement au sens du laminage de la tôle, car les efforts évoqués

FIG. 8. — Tuyau fretté B₂ sur la presse pendant les essais d'élasticité, avec tous les instruments de mesure employés simultanément au cours de l'expérience.

dans la virole, lorsque la conduite est en service, se vérifient dans ce sens.

La virole fut examinée aussi au point de vue structure micrographique, qui résulta être celle d'un bon acier extra-doux.

La fig. 2 donne l'aspect micrographique de la tôle (agrandissement 50 diamètres); on remarque la texture à base ferritique avec zones de perlite limitées en quantité et extension.

Les essais des frettes furent effectués sur éprouvettes coupées longitudinalement, car c'est dans ce sens que la fatigue du métal se manifeste lorsque la conduite est en service.

(1) Toutes les tôles employées sont de fabrication nationale, en partie fournies par Acciaierie e Ferriere Lombarda Falck et en partie par Ansaldo,

TABLEAU II

Frette choisie au hasard parmi celles provenant d'une unique coulée, effectuée expressément pour la fabrication de toutes les frettes du tuyau A.

Analyse chimique : C = 0,24 % Mn = 0,83 % Si = 0,23 % S = 0,022 % Ph = 0,030 %							
Essais mécaniques	N°	Sens du prélèvement	Traction sur barreau normal de longueur L = 11,3 $\sqrt{S}$				Résilience sur barreau Mesnager φ
			R	E	A	Σ	
	1	Longitudinal	54,8	36,5	23,25	59,0	9,3 10,6 8,5 12,2 11,6 9,5
	2		55,2	36,9	22,30	3,5	
	3						
	4						
	5						
	6						
	7						
8							

La fig. 3 donne la structure du métal de la frette soumise à essai (agrandissement 50 diamètres); structure qui apparaît homogène, exempte de scories et caractéristique des aciers semi-durs.

Ayant ainsi déterminé l'idonéité des matériaux, on procéda à la construction d'un tuyau de 1086 mm. de diamètre intérieur. Les dimensions de ce tuyau correspondaient à celles calculées pour la partie plus basse des conduites, mais dans l'hypothèse d'une solution — abandonnée depuis, — comportant des plus grands diamètres que ceux adoptés définitivement, et précisément le tuyau en discours fut calculé pour un produit HD d'environ 1900.

Pour s'assurer que le procédé de construction en usage auprès de la Société Tubitogni ne causait aucun préjudice aux propriétés intrinsèques du matériel, il fut décidé de soumettre à nouvel examen, après les essais de pression, le matériel lui-même, et particulièrement celui de la virole, qui semblait devoir être le plus tourmenté. Cet examen devait aussi déterminer quel degré de confiance pouvait être attribué à la soudure, que les constructeurs garantissaient devoir donner au moins le 0,90 de la résistance de la tôle environnante.

Pour ce faire, on décida d'effectuer une série d'essais de résilience, couvrant toute une directrice de la virole, à l'aide d'éprouvettes tirées de la zone intérieure, extérieure et moyenne de la paroi.

Comme on sait, l'essai de résilience est le plus sensible aux dégradations éventuelles de la matière sous espèce de modifications de structure, imputables à traitement mécanique ou thermique impropre subi à travers les différentes phases de la fabrication.

Il serait trop long et peu utile de donner ici en chiffres toutes les valeurs obtenues; nous croyons préférable de donner à la fig. 4 ci-après, un diagramme polaire qui résume ces valeurs. Le dit diagramme est tracé à l'intérieur d'un cercle représentant la directrice de la virole d'où furent tirés les éprouvettes; dans la figure apparaît aussi la position respective de chaque éprouvette soumise à essai.

Il ressort clairement du diagramme que l'état de résilience était parfait dans toutes les parties de la virole, et on voit en outre que dans la zone de soudure, le matériel présente les plus

FIG. 9. — Autre vue du tuyau fretté A pendant les essais d'élasticité.

FIG. 13. — Acier des frettes des tuyaux B_1 et B_2 .

FIG. 12. — Acier des viroles des tuyaux B_1 et B_2 .

FIG. 10. — Tuyau fretté B_1 au cours de l'expérience de rupture.

hautes valeurs de la résilience, ce qui prouve l'efficacité du recuit effectué sur la virole entière après soudure; recuit qui, comme tout le monde le sait, est effectué précisément pour régénérer le métal dans cette zone.

Pour vérifier, en outre, le rendement effectif de la zone soudée, on prélève en travers de la soudure sept éprouvettes dont cinq soumises à essai de traction et les deux autres à essai de flexion.

Les essais de traction donnèrent les résultats suivants :

TABLEAU III

Numéro du barreau	Sens du prélèvement	R	E	A	Σ	Emplacement de la rupture
1	Transversal	33,4	22,1	18,7	4,3	Près de la soudure
2		32,9	20,9	23,3	—	A une extrémité de la soudure
3		32,8	21,15	27,1	61,2	Au centre de la soudure
4		32,4	22,0	25,0	63,9	A peine en dehors de la soudure
5		32,0	20,8	17,8	—	Sur la ligne de soudure

Fig. 11. — Disposition du tuyau sur la presse à essayer.

Allongements périphériques moyens de la paroi du tuyau en %

- Valeurs de déformation périphérique relevées pendant les essais
- ... Courbe théorique de déformation tracée en composant les courbes élémentaires de déformation de l'acier des frettes et de la tôle
- R Point théorique de rupture du tuyau en adoptant pour la soudure un rendement de 0.9

Fig. 14. — Déformation périphérique en fonction de la pression intérieure dans le tuyau B₁.

Allongements périphériques moyens de la paroi du tuyau en %

- Valeurs de déformation périphérique relevées pendant les essais
- ... Courbe théorique de déformation tracée en composant les courbes élémentaires de déformation de l'acier des frettes et de la tôle
- R Point théorique de rupture du tuyau en adoptant pour la soudure un rendement de 0.9

Fig. 15. — Déformation périphérique en fonction de la pression intérieure, dans le tuyau B₂.

Les essais furent effectués sur éprouvettes "Mesnager", de $10 \times 10 \times 55$ mm.
L'entaille fut pratiquée sur la face de l'éprouvette correspondant à la section droite de la virole.
S = Zone de soudure

FIG. 16. — Diagramme de la résilience du tuyau B₁.

Les essais furent effectués sur éprouvettes "Mesnager", de $10 \times 10 \times 55$ mm.
L'entaille fut pratiquée sur la face de l'éprouvette correspondant à la section droite de la virole.
S = Zone de soudure

FIG. 17. — Diagramme de la résilience du tuyau B₂.

Les essais de pliage furent entièrement satisfaisants, aucune crique ne fut relevée.

En vue de surveiller la façon de se comporter de la sou- dure pendant les essais de flexion, les éprouvettes — conve- nablement polies sur les faces latérales — furent attaquées par un réactif approprié rendant ainsi visible la ligne de jonc- tion.

Les fig. 5 et 6 représentent les éprouvettes après pliage ; nous les reproduisons car, dans ce cas, l'image vaut mieux que tout discours.

Au tuyau parachevé fut appliqué le manchon spécial de jonc- tion, dont on a parlé plus haut, qui le joignait à un segment de tuyau ayant les mêmes caractéristiques de celui en discours.

L'élément d'essai a été reproduit dans son ensemble dans la fig. 1 ci-dessus ; la fig. 7 le montre placé dans la puissante presse hydraulique dont disposent les constructeurs, presse dont les plateaux peuvent supporter jusqu'à 3.000 tonnes de pression.

Il fut ainsi facile de faire varier à plusieurs reprises la pres-

Essais B. — Comme dans le cas précédent, les matériaux furent essayés préalablement à la construction des tuyaux (dans ce cas, deux tuyaux furent apprêtés au lieu d'un seul) et les résultats de ces essais sont reportés dans les tableaux IV et V ci-après :

TABLEAU IV

Tôle employée pour la construction de la virole du tuyau B1.

Analyse chimique : C=0,098 % Mn=0,427 % Si=nul S=0,053 % Ph=0,012 %									
Essais mécaniques	Position de prélèvement de barreaux	Sens du prélèvement	Traction sur barreau normal de longueur L = 11,3 $\sqrt{S}$				Résilience sur barreau Mesnager φ	Pliage	
			R	E	A	Σ			
	A une extrémité de la tôle	Transversal	35,4	24,8	25,2	6,8	Rupture hors rejets	20,7 18,7 16,9	Bon
	A l'autre extrémité de la tôle	Transversal	35,2	23,3	29,4	59,5	—	—	Bon

FIG. 18. — Tuyau fretté B₂ après rupture.

sion intérieure par séries de valeurs croissantes et décroissantes entre zéro et 265 kg./cm², pression cette dernière qui correspond, comme il a été dit, à une fois et demie environ la pression de service.

Pendant les variations répétées de pression, il fut aisé de sui- vre minutieusement, à l'aide de tensimètres convenablement placés, ayant un rapport d'amplification d'environ 1.200, les déformations élémentaires sur plusieurs frettes (voir fig. 7) et sur différentes directrices de la virole (voir fig. 8), surveillant tout particulièrement celles naissant dans la soudure ; avec les données ainsi déduites, il fut possible non seulement d'étu- dier le système élastique représenté par le tuyau fretté, mais aussi de contrôler les hypothèses avancées qui résultèrent par- faitement admissibles.

Le joint à manchon ne donna lieu au moindre suintement, prouvant ainsi qu'il peut être adopté avec toute tranquillité, même pour des pressions de service aussi élevées que celles atteintes pendant les essais.

TABLEAU V

Tôle employée pour la construction de la virole du tuyau B2.

Analyse chimique : C=0,095 % Mn=0,417 % Si=nul S=0,033 % Ph=0,014 %									
Essais mécaniques	Position de prélèvement de barreaux	Sens du prélèvement	Traction sur barreau normal de longueur L = 11,3 $\sqrt{S}$				Résilience sur barreau Mesnager φ	Pliage	
			R	E	A	Σ			
	A une extrémité de la tôle	Transversal	36,0	24,2	28,6	62,6	—	15,9 12,8 12,3	Bon
	A l'autre extrémité de la tôle	Transversal	35,4	22,9	29,8	64,8	—	13,7 12,4 12,2	Bon

Les tôles provenaient du même lingot ; leur structure molé- culaire était, par suite, la même.

Elle est représentée dans la micrographie fig. 9, et ne donne lieu à aucune objection.

TABLEAU VI

Frette choisie au hasard parmi celles provenant de l'unique conûe effectuée expressément pour la fabrication de toutes les frettes des tuyaux B1 et B2.

Analyse chimique : C = 0,34 % Mn = 0,78 % Si = 0,185 % S = 0,028 % Ph = 0,017 %							
Essais mécaniques	N°	Sens du prélèvement	Traction sur barreau normal de longueur L = 11,3 $\sqrt{S}$				Résilience sur barreau Mesnager
			R	E	A	Σ	φ
	1	Longitudinal	59,0	41,8	23,0	37,7	10,8 8,5 10,7 10,9 10,3 10,8
2	57,0		38,4	18,7	42,7		
3	58,3		41,0	18,5	37,8		
4							
5							
6							
7							
8							
9							

La fig. 10 est une micrographie de l'acier des frettes ; comme on voit, sa structure moléculaire est parfaitement homogène.

Avec ces matériaux furent construits deux tuyaux de 1.218 mm. de diamètre intérieur, calculés pour un produit HD d'environ 740.

Afin d'éliminer, pendant les essais, les efforts axiaux et mettre ainsi les tuyaux dans des conditions de travail aussi semblables que possible à celles des éléments constituant les conduites forcées, on eut recours au dispositif représenté dans la fig. 11.

Et pour garantir l'étanchéité de presses-étoupe, solidaires des plateaux de la presse, même lorsque la pression intérieure eut atteint des valeurs telles à produire des déformations plastiques dans les tuyaux en essai, il fallut les munir de deux grosses frettes à chaque extrémité.

L'application de ces dernières frettes ne modifie en rien la valeur des essais attendu que l'influence de ce double fort fret-

tage ne s'étend pas, comme on peut démontrer, au delà d'une zone d'extension bien limitée, proche des extrémités.

Les viroles des deux tuyaux furent essayées, au point de vue résilience, sur les deux directrices d'extrémité, d'où furent prélevés les éprouvettes.

Les valeurs obtenues sont données sous forme de diagrammes polaires dans les fig. 12 et 13 ; on voit que le matériel était en tous points satisfaisant.

Des essais de traction furent effectués sur des éprouvettes prélevées à travers la soudure ; les résultats en sont donnés dans les tableaux VII et VIII ci-après.

TABLEAU VII

Essais de traction effectués sur barreaux coupés à travers la soudure du tuyau B1.

Numéro du barreau	Sens du prélèvement	R	E	A	Σ	Emplacement de la rupture
1	Transversal	33,0	22,0	17,7	40,0	A une extrémité de la soudure
2		33,1	22,9	20,0	39,1	A une extrémité de la soudure

TABLEAU VIII

Essais de traction effectués sur barreaux coupés à travers la soudure du tuyau B2.

Numéro du barreau	Sens du prélèvement	R	E	A	Σ	Emplacement de la rupture
1		33,8	23,2	32,2	73,6	En dehors de la soudure
2		33,7	22,9	23,9	60,4	Près d'un repère
3		32,9	22,7	24,5	71,6	Près d'un repère
4		33,9	22,8	27,4	71,0	Près d'un repère
5		34,1	23,5	22,4	59,0	A une extrémité de la soudure

Déformations, en pourcent de la circonférence extérieure, mesurées en correspondance des flèches.

Déformation de la section longitudinale du tuyau.

— Tuyau avant l'essai.
— Tuyau déformé, après rupture de la virole sur la ligne de soudure, dans l'intervalle 6-7 (point R) à la pression de 245 Kg/cm.²

18. La rupture a donné lieu à un jet d'eau pulvérisée filtrant à travers une petite fracture.

FIG. 19.— Diagramme des déformations diamétrales dans le tuyau B1.

L'essai hydraulique des deux tuyaux fut d'abord limité au domaine des déformations élastiques, en faisant varier la pression, par séries de valeurs croissantes et décroissantes, depuis zéro jusqu'à la sollicitation d'écoulement du matériel et relevant, entre temps, à l'aide des tensimètres employés déjà pour les essais A, les déformations élémentaires, soit sur les frettes, soit sur différentes directrices de la virole, comme le montre la fig. 14.

Les conclusions tirées des essais précédents, quant au parfait comportement des divers éléments et à la légitimité des hypothèses admises dans le calcul, furent ici encore complètement confirmées. On continua alors dans les expériences en augmentant la pression jusqu'à la rupture.

La fig. 15 représente le tuyau B1, avant rupture, mais déjà considérablement déformé. Les dimensions des tuyaux, résultant des calculs susdits, basés sur les caractéristiques minima des matériaux et sur le rendement minimum de 0,9 garanti pour la soudure, correspondaient à un coefficient de sûreté de 4 ; cette valeur étant celle résultant du rapport :

$$\frac{H_r \times D_r}{HD}$$

dans lequel H_r et H sont respectivement la pression ayant amené la rupture et celle de service, D_r et D les diamètres intérieurs à la rupture et avant l'essai.

Sur la base des courbes élémentaires de déformation des tôles et des frettes, il avait été

possible de tracer préalablement le diagramme théorique des déformations périphériques que les deux tuyaux auraient dû suivre pendant la période des déformations permanentes et de fixer sur celui-ci le point de rupture, qui aurait dû correspondre à la pression de 236 kg/cm², dans l'hypothèse que le rendement de la soudure fut réellement de 0,9.

Pendant la période des déformations plastiques, les allongements périphériques furent soigneusement relevés sur plusieurs directrices de sorte à pouvoir comparer, sur le diagramme susdit, le comportement réel des tuyaux par rapport à celui théorique.

Les fig. 16 et 17 donnent ces diagrammes respectivement pour le tuyau B₁ et B₂ ; on voit que le comportement réel ne diffère pas sensiblement du théorique et que l'écoulement du métal se vérifia, comme il était prévu, à 2,5 fois environ la pression de service.

La pression de rupture, au contraire, dépassa sensiblement celle prévue sur la base du rendement de 0,9 admis pour la soudure, atteignant 245 kg/cm² pour le tuyau B₁ et 252 kg/cm² pour le tuyau B₂ ; ce qui dénote un rendement de la soudure bien supérieur au minimum garanti.

Et comme les diamètres intérieurs déformés résultèrent, en correspondance de la section de rupture, respectivement de 1.323 et 1.401 mm., il s'ensuit que le coefficient de sûreté, au contrôle de l'expérience, était :

Pour le tuyau B₁ $\frac{245 \times 1323}{60 \times 1218} = 4,4$

Pour le tuyau B₂ $\frac{252 \times 1401}{60 \times 1218} = 4,8$

La rupture du tuyau B₁ se manifesta sous aspect d'une modeste zone poreuse en correspon-

FIG. 21. — Diagramme des déformations diamétrales dans le tuyau B₂.

FIG. 20. — Tuyau fretté B₁ après rupture.

dance de la soudure (voir fig. 18; la zone est comprise entre les deux traits blancs) et donna lieu simplement à un jaillissement d'eau pulvérisée.

Dans le tuyau B_2 , on n'eut pas de lésions de la virole, à la pression de 252 kg/cm^2 , la frette n. 6 sauta. La virole eut un brusque regonflement dans la zone jadis contrainte par la frette sautée, mais supporta la déformation sans fractures.

La fig. 19 représente le tuyau B_2 après l'essai.

Afin de rendre plus évidents les résultats de ces essais, on a tracé les graphiques fig. 20 et 21 se rapportant respectivement aux tuyaux B_1 et B_2 ; on voit les coupes en long avant et après rupture et la courbe des déformations, en pour cent, de la circonférence extérieure, mesurées sur les divers parallèles.

Dans la fig. 21, on a tracé aussi la coupe du tuyau B_2 un instant avant la rupture de la frette; on voit que, dans le brusque regonflement, suivi à la rupture de la frette, il s'est vérifié une véritable inversion de l'ondulation de la virole; la déformation maxima de la tôle, qui eut lieu à cet endroit, atteignit le 19 % et probablement pouvait dépasser cette valeur si l'admission de l'eau eût été continuée.

Vraisemblablement, la frette sautée aurait donné aussi un résultat meilleur si sa texture n'avait pas été amoindrie localement par une goutte de soudure électrique fixant une attache d'un des tensimètres employés pour la détermination des déformations élémentaires pendant la période élastique; la rupture s'est, en effet, vérifiée dans le dit point comme on voit clairement sur la photo fig. 22.

La section de rupture, reportée dans la fig. 23, montre à l'évidence la zone altérée.

Le fait que, dans les deux expériences effectuées, sur deux tuyaux identiques, la rupture se soit vérifiée une fois dans la virole et une fois dans la frette, démontre que ces deux parties

FIG. 23.— Section de rupture de la frette n. 6 du tuyau B_2 .

interviennent en juste proportion dans la résistance de l'ensemble et que les matériaux sont employés de la façon la plus rationnelle.

Les expériences faites attestent que la technique suivie dans le calcul et dans la construction des tuyaux frettés répond parfaitement aux exigences des installations hydro-électriques, même les plus hardies.

FIG. 22. — Zone de rupture de la frette n. 6 du tuyau B_2 .