A propos d'un accident survenu à une conduite forcée après quarante ans d'exploitation

A 40-year-old penstock bursts

PAR G. FERRAND

PRÉSIDENT DIRECTEUR GÉNÉRAL DE LA SOCIÉTÉ DAUPHINOISE D'ÉTUDES ET DE MONTAGES.

Rupture de la conduite forcée de Champagny installée en 1912. Par contre-coup, la conduite récente voisine de Pralognan subit, sans dommages sérieux, une épreuve tout à fait exceptionnelle. Les leçons de cet accident : insuffisance des marges de sécurité admises il y a quarante ans; justification des règles imposées en France; intérêt incomparable des nouveaux procédés de fabrication qui constituent une vérification expérimentale certaine de la résistance réelle du tuyau.

Bursting of the Champagny penstock, installed in 1912. The nearby Pralognan penstock, recently installed, undergoes an unexpected and exceptional test without any serious damage. The lessons learnt from this accident : insufficiency of the safety margins allowed 40 years ago—justifications of the rules imposed in France—incomparable advantages of the new manufacturing methods which form an unquestionable experimental verification of the true resistance of the pipe

Le 15 novembre 1952, une rupture s'est produite sur un tuyau de la conduite forcée dite du « Doron de Champagny », alimentant les turbines de l'usine de Bozel-Malétra.

Cette conduite, construite en 1912, fonctionne sous une chute brute de 550 m environ, sa longueur totale est de 1.300 m environ, divisée en trois diamètres de 950, 850 et 800 mm (fig. 1).

La partie supérieure, sur 300 m environ, est

FIG. 1. — PROFIL SCHÉMATIQUE DE LA CONDUITE FORCÉE DE CHAMPAGNY ET DE LA PORTION ACCIDENTÉE.

PHOTO N° 1. — RUPTURE DE LA CONDUITE DE CHAMPAGNY.
(Cliché Hotellier-Moûtiers.)

normal de marche, donne une pression de calcul de 195 m environ et une fatigue en pleine tôle de 8 kg/mm² environ.

La rupture semble s'être amorcée sur une soudure longitudinale en partant de l'amont, à la rivure d'emboîtement avec les tuyaux rivés. La conduite s'est ouverte sur 1,600 m de longueur environ, la cassure est nette et rectiligne, sans défauts apparents sur les tranches de la cassure.

Il est à noter que les tuyaux de cette conduite étaient, à l'époque de sa construction, éprouvés en usine à 1,5 fois la pression de marche, alors que depuis 1918 tous les tuyaux sont éprouvés à 2 fois la pression maximum de marche P , condition considérée comme nécessaire et suffisante pour qu'en exploitation aucune rupture consécutive à une surpression exceptionnelle et accidentelle ne se produise. Il est certain que si un tel tuyau avait subi une telle épreuve, la rupture se serait produite en usine et non sur place, entre 1,5 et 2 P .

La vanne de sécurité en tête de la conduite n'a pas fonctionné et l'eau s'est écoulée à l'extérieur pendant deux heures, le long des deux nouvelles conduites de la chute dite de « Pralognan », installées à proximité en 1947-1948 et comprenant une conduite de décharge et une conduite forcée (fig. 2, photo n° 2). Ces condui-

construite en tuyaux rivés de 6 à 15 mm d'épaisseur et le reste en tuyaux soudés au gaz à l'eau de 12 à 30 mm.

La rupture s'est produite sur le tuyau soudé au gaz à l'eau se raccordant avec les tuyaux rivés (photo n° 1). La pression statique à cet endroit est de 175 m environ, ce qui, avec la surpression due au coup de bélier maximum

FIG. 2. — PROFIL SCHÉMATIQUE DE LA CONDUITE DE PRALOGNAN ET DES PORTIONS ACCIDENTÉES.

PHOTO N° 2. — LES CONDUITES DE PRALOGNAN.
Massif n° 12 et vue vers l'aval du ravinement.

(Cliché Hotellier-Moûtiers.)

tes enterrées furent, sur 130 m environ, complètement déchaussées et affouillées entre les massifs d'ancrage n°s 10 à 12, puis sur 50 m à l'aval du massif 10 (photos 3, 4, 5).

Les conduites sont restées suspendues entre ces massifs, tous les piliers supports ayant été emportés; la profondeur du ravinement atteint 8 à 10 m entre les massifs 10-11 et 11-12.

Le massif n° 11 a quelque peu ralenti le flot et limité ainsi les dégâts, mais ses fondations ont été affouillées et il s'est abaissé de près de 20 cm.

Au moment de la rupture, la conduite forcée de la chute de Pralognan était en service. L'agent de service, s'étant rendu compte d'une anomalie, a provoqué l'arrêt des groupes, mais la conduite est restée en pression pendant deux heures environ, uniquement accrochée aux massifs d'ancrage n°s 10 et 12, le massif n° 11 tirant par surcroît sur la conduite (photos n°s 6 et 7).

Les efforts sur les deux conduites ont été considérables, du fait de l'affaissement du massif n° 11 et de la flexion occasionnée par le poids de la conduite forcée en charge et de la conduite de décharge vide, les portées étant de 61 m entre les massifs 10 et 11 et 63 m entre les massifs 11 et 12.

Entre les massifs d'ancrage n°s 10 et 11, il

existe sur la conduite forcée une pièce en acier coulé portant un trou d'homme (visible sur la photo n° 8); cette pièce est assemblée aux tuyaux adjacents au moyen de brides et de tiges filetées qui portent des traces très nettes de déformations permanentes; celles-ci ont provoqué un écartement des brides et des fuites aux joints correspondants (joints plastiques). Cependant, aucune fuite n'était constatée sur les soudures transversales, aussi bien pour celles faites au montage que pour celle faites en atelier, ce qui prouve la bonne qualité de leur exécution et leur exceptionnelle résistance.

Pour remettre en service le plus rapidement possible la conduite forcée de Pralognan, on procéda à son relèvement dans les zones affaissées. Après avoir désolidarisé la conduite du massif n° 11, on a installé des crics et des vérins tout le long des parties à relever, et on l'a ainsi remontée de 25 cm au point le plus affaissé, entre les massifs 10 et 11. L'opération s'est effectuée sans aucun dommage pour la conduite, qui a été calée à sa position définitive sur des calages provisoires constitués par des chevalets en bois, qui seront remplacés par des supports définitifs dès que les conditions climatiques

PHOTO N° 3. — VUE PRISE DU MASSIF N° 9 VERS L'AMONT.

(Cliché Hotellier-Moûtiers.)

le permettront. Le massif d'ancrage n° 11 a été remis en état par des reprises en sous-œuvre, par la réfection de la partie supérieure et par des scellements qui le lient à la conduite.

Les boulons de jonction de la manchette en acier coulé, entre les massifs 10 et 11, ont été changés, et la conduite a été remise en service sur ses calages provisoires le 24 décembre 1952.

Elle fonctionne depuis comme si rien de fâcheux ne lui était survenu.

**

Avant 1910, on ne connaissait en France que les conduites rivées, qui donnèrent lieu jusqu'en 1907 à de graves mécomptes, puisque, pour certaines d'entre elles, des ruptures se produisaient dès la première mise en charge sous la pression statique seulement. A cette époque, en effet, les trous de rivets étaient simplement poinçonnés et cette opération de poinçonnage avait les plus désastreuses conséquences sur la structure de l'acier utilisé. Dès que le poinçonnage fut remplacé par un perçage suivi d'un alésage, tout rentra dans l'ordre et l'on n'eut plus jamais d'accident à constater en cours d'exploitation sur les conduites rivées, qui, du fait de leur structure, ne pouvaient cependant subir au préalable d'épreuve hydraulique sérieuse (défaut

PHOTO N° 4. — RAVINEMENT ENTRE MASSIFS 9 ET 10.

(Cliché Hotellier-Moutiers.)

PHOTO N° 5. — RAVINEMENT ENTRE MASSIFS 9 ET 10.

(Cliché S.D.E.M.)

d'étanchéité des rivures). D'autre part, on savait depuis longtemps que le cintrage à froid ne nuisait pas aux qualités de l'acier et l'on pouvait ainsi compter avec certitude sur la résistance d'une rivure.

En 1910, lorsque l'on commença à utiliser la soudure au gaz à l'eau à l'échelle industrielle et jusqu'au moment où on l'abandonna, vers 1930, au profit de la soudure électrique, on n'avait aucun moyen d'investigation permettant de déceler les défauts et les modifications de structure du métal inhérents à l'opération de soudage, que les traitements thermiques, indispensables à la régénération du métal de la zone de soudure, ne faisaient pas toujours disparaître et que l'arrondissage à chaud du tuyau déformé augmentaient bien souvent. La soudure au gaz à l'eau avait contre elle un préjugé de fragilité.

Un seul moyen de contrôle restait à la disposition des constructeurs : l'épreuve hydraulique en usine.

A l'étranger, en Allemagne notamment, où l'on fabriquait bien avant 1910 des tuyaux soudés au gaz à l'eau, l'épreuve était faite à 1,5 fois la pression de service, prise bien souvent égale à la charge statique. C'est cette base que l'on prit comme point de départ en France.

Malgré cette marge de 50 %, qui paraissait importante, de nombreuses ruptures de conduites soudées au gaz à l'eau étaient constatées aux essais de mise en service ou en cours d'exploitation. Le contrôle à 1,5 s'avérant ainsi insuffisant, dès 1918 on admit en France qu'une conduite forcée devait être établie en tenant compte :

- Des surpressions maximums résultant du fonctionnement normal des turbines ou des pompes qui reçoivent ou refoulent l'eau en pression;
- D'un coefficient de sécurité égal à 2,5 par rapport à la limite élastique du métal qui la constitue;
- De la vérification d'un coefficient de sécurité réel et effectif de 2 par une épreuve hydraulique en usines au double de la pression maximum normale de marche (pression statique + surpression maximum due au fonctionnement normal des turbines ou des pompes) des divers éléments de la conduite forcée considérée.

**

Nous avons eu bien souvent l'occasion de donner les raisons qui nous ont conduits à adopter cette « règle d'or », que nous avons considérée jusqu'à présent comme la condition nécessaire et suffisante à la bonne tenue d'une conduite forcée dans le temps de son exploitation.

Depuis lors, aucune rupture n'a été enregistrée sur des conduites dont les éléments ont ainsi été éprouvés. Est-ce à dire que de telles conduites sont à l'abri de tout accident du genre de celui qui s'est produit sur la conduite du Doron de Champagne? Nous le pensons, car la pression résultant d'un coup de bélier accidentel et exceptionnel à transmission intégrale, qui peut toujours se produire dans l'existence d'une conduite (après quarante ans pour Champagne), n'atteint en aucun point — d'après les constatations que nous avons pu faire depuis près d'un demi-siècle — la pression d'épreuve en usine lorsque celle-ci est faite au double.

Cependant, les constatations faites sur la conduite de Champagne sont assez troublantes :

La rupture ne s'est pas produite sur la ligne des bords soudés, mais dans la partie extrême de la zone de soudure (celle qui a été chauffée au blanc soudant et martelée, et qui peut atteindre plus de 15 cm pour les fortes épaisseurs).

Il n'y a ni décollement ni inclusion; la cassure est nette et sèche, c'est le type même de la rupture de fragilité.

Si une conduite forcée était soumise à des efforts alternés, on pourrait craindre que cette zone, fragile dès l'origine, ait subi dans le temps une transformation structurale avec augmentation considérable de la fragilité. Mais ce n'est pas le cas d'une conduite forcée, qui ne subit que des efforts ondulés de faible amplitude; par ailleurs, les coups de bélier dus au fonctionnement normal des machines n'agissent pas comme un choc, vu le temps non négligeable de leur développement, et nous croyons fermement que la rupture constatée se serait produite en usine en 1912 si le tuyau correspondant avait été éprouvé au double et non à 1,5, et cela mal-

PHOTO N° 6. — RAVINEMENT AU MASSIF 11.

gré les résultats d'un essai de rupture fait sur la partie de ce tuyau restée intacte; car le degré de fragilité d'une soudure au gaz à l'eau est parfois très différent d'un point à un autre de la zone de soudure d'un même tuyau.

Cette rupture s'est en effet produite à une pression supérieure au double de la pression de service, alors que la limite élastique venait seulement d'être atteinte, puisque la déformation permanente mesurée après les essais était de 0,16 %, inférieure à 0,2 %, correspondant à la limite élastique apparente.

Depuis 1930, on a abandonné en France la soudure au gaz à l'eau au profit de la soudure électrique, avec laquelle on dispose de moyens d'investigation et de contrôle que l'on n'avait pas auparavant et qui permettent de déceler avec certitude, avant les épreuves hydrauliques, tous les défauts ou vices tels que inclusions, criques et fissures.

Depuis que nous construisons des tuyaux soudés à l'arc électrique, aucun incident ne s'est jamais produit; cependant, nous connaissons certaines conduites qui, du fait du coup de bélier accidentel et exceptionnel, ont été mises à rude épreuve. Il suffit de rappeler le cas de la conduite

PHOTO N° 7. — RAVINEMENT AU MASSIF 11 VU DE L'AMONT.

(Cliché Hotellier-Moutiers.)

d'Izourt en 1938 (le coup de bélier accidentel était la conséquence du choc produit par une avalanche) et celui de la conduite de Pontcharra-sur-Breda en 1950 (le coup de bélier accidentel s'est produit au moment des essais de mise en service, à la suite d'une fermeture des distributeurs en un temps inférieur à $2 L/a$).

**

Les tuyaux soudés à l'arc électrique constituent le point de départ pour la fabrication des tuyaux auto-frettés et surpressés qui équipent

actuellement les conduites forcées modernes de haute chute à grande puissance.

Ainsi qu'on le sait, lors de la fabrication des tuyaux auto-frettés et des tuyaux surpressés, la limite élastique du métal est largement dépassée.

Au cours de ces fabrications, que nous faisons depuis vingt ans déjà, nous avons été amenés à faire d'importantes constatations, qui sont les suivantes :

1. — Lors des opérations d'auto-frettage et de surpressage, aucune rupture de virole n'a jamais été enregistrée avant que la limite élastique du métal soit atteinte. (Pour un acier au Cr-Cu à 54 kg/mm², limite élastique 34 kg, l'épreuve au double du tuyau soudé correspondant donnerait une fatigue de 27 kg, pour un coefficient de sécurité théorique de 2,5, et 34 kg pour un coefficient de sécurité théorique de 2, qui se trouverait ainsi vérifié expérimentalement).
2. — Au cours de ces mêmes opérations, des ruptures de viroles, très rares il est vrai, se sont produites alors que la limite élastique avait été dépassée, ruptures sur des soudures que le contrôle radiographique avait révélées impeccables. Les viroles correspondantes avaient subi les traitements thermiques habituels avant et après soudure et les tôles qui les constituaient avaient subi chez le fournisseur les essais de réception les plus complets. Par ailleurs, elles avaient subi un recuit de normalisation et des essais de soudabilité concluants.

Les examens, contrôles et essais ultérieurs ont prouvé qu'il s'agissait de ruptures de fragilité dont le point de départ se situait en des zones réduites et localisées devenues fragiles après soudure. L'exécution de la soudure n'avait rien révélé de particulier, mais des modifications de structure impossibles à déceler autrement que par une épreuve hydraulique poussée jusqu'au dépassement de la limite élastique du métal s'étaient produites au soudage. (L'essai du tuyau de la conduite de Champagny dont il est fait mention plus haut confirme ce point de vue.)

3. — La limite élastique dépassée, aucune rupture prématurée ne s'est jamais produite, même pour des déformations plastiques importantes.

Lors de notre communication au 4^e Congrès

International des Fabrications Mécaniques, à Stockholm (juin 1952)* : « Utilisation du principe du relevement de la limite élastique des aciers par écrouissage et vieillissement artificiel à la construction des conduites forcées et économie en résultant », nous avons tiré un certain nombre de conclusions, confirmées par ce qui précède :

On peut tout d'abord affirmer que l'emploi des tuyaux surpressés et des tuyaux auto-frettés surpressés donne à l'exploitant la sécurité la plus complète qu'il soit possible d'obtenir en matière de conduites forcées. Le coefficient de sécurité est vérifié expérimentalement par rapport à la limite élastique réelle du métal utilisé, qui, on le sait, est toujours supérieure au minimum théorique, c'est-à-dire que le coefficient de sécurité réel est toujours supérieur au coefficient de sécurité théorique.

On peut également affirmer que pour les tuyaux surpressés et les tuyaux auto-frettés surpressés, il n'y a aucun inconvénient à réduire le coefficient de sécurité théorique admis jusqu'à maintenant jusqu'au minimum compatible avec l'épreuve au double, c'est-à-dire : 2.

Pour les tuyaux simplement soudés, une sécurité du même genre ne peut être obtenue qu'autant que l'épreuve hydraulique est poussée jusqu'à atteindre une déformation plastique de 0,5 à 1 % en construisant, ainsi que nous avons déjà eu l'occasion de le faire pour une importante conduite forcée en Italie, des tuyaux à « limite élastique et coefficient de sécurité contrôlés ».

Cela permet d'envisager pour les tuyaux soudés la réduction jusqu'à 2 du coefficient de sécurité, comme pour les tuyaux précédents, et de réaliser ainsi de nouvelles et importantes économies de métal.

**

En ce qui concerne les conduites rivées poinçonnées et toutes les conduites soudées au gaz à l'eau éprouvées à moins de 2 fois la pression de service, d'autres conclusions peuvent encore être tirées :

Pour les premières, il faudrait admettre de les remplacer ou de les renforcer dans la proportion de 50 à 100 %. Pour les secondes, on devrait, à notre avis, et selon leur état, procéder à leur renforcement dans la proportion de 30 à 50 %. Ces renforcements sont d'ailleurs faciles à réaliser et peuvent se faire sur une conduite en service par le procédé que nous avons déjà

utilisé, en particulier sur la conduite du Doron de Champagny elle-même, dans sa traversée de la nouvelle centrale de Pralognan. (Voir l'article de M. BEAUMEL : « La conduite forcée de la chute de Pralognan. » *La Houille Blanche*, numéro de mars-avril 1950.)

Ces renforcements effectués, nous croyons indispensable de faire un essai de vérification, à la pression hydraulique, de l'ensemble de la conduite par la méthode utilisée maintenant sur toutes les conduites forcées modernes, dite « d'essai après montage à surpression uniforme ». Cette méthode consiste à introduire au sommet de la conduite une surpression au-des-

PHOTO N° 8. — VUE PRISE DU MASSIF 10 VERS L'AMONT.

(Cliché Hotellier-Moûtiers.)

sus de la charge statique, dont la valeur correspond sensiblement à celle du coup de bélier exceptionnel accidentel envisagé dans chaque cas particulier et limitée à 100 % de la pression maximum normale de marche à la partie inférieure de la portion de conduite comportant la plus faible épaisseur.

**

L'accident survenu à la conduite du Doron de Champagny nous amène à rappeler aux maîtres de l'œuvre la sécurité que présente, pour l'exploitation des conduites forcées, la méthode

* Cette communication fera l'objet d'une publication dans un très prochain numéro de *la Houille Blanche*.

dite « française », c'est-à-dire celle qui ne comporte aucun joint de dilatation. On frémit, en effet, à la pensée de la catastrophe qui se serait produite du fait du déboîtement inévitable des joints de dilatation si la conduite de Pralognan en avait été munie.

La méthode « française » a reçu la sanction de l'expérience de plus d'un demi-siècle, elle est appliquée à toutes les conduites forcées modernes que nous avons installées, tant en France qu'à l'étranger, et en particulier aux conduites de hautes chutes à grande puissance, où tous les coudes sont ancrés.

Lorsque la conduite d'Izourt, composée exclusivement de tuyaux soudés, s'est trouvée sus-

pendue sur une grande longueur, après que ses supports eussent été emportés par une avalanche, et qu'elle eut fonctionné pendant plusieurs heures dans cette position critique sans aucun dommage, on pouvait se demander ce qui se serait passé si elle avait été constituée de tuyaux auto-frettés, dont l'épaisseur peut atteindre, ainsi qu'on le sait, le cinquième de l'épaisseur normale des tuyaux soudés.

L'accident que nous venons de relater en détail a permis de constater la remarquable tenue des tuyaux auto-frettés, même dans les cas les plus imprévus, et cela est aussi de nature à donner tous apaisements aux Exploitants.