Zeitschrift: Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria
Herausgeber: Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband
Band: 80 (1988)
Heft: 9

Artikel: La nouvelle conduite forcée et les organes de fermeture de sécurité
Autor: Barras, Auguste / Clément, René / Comte, Bernard
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-940737

Nutzungsbedingungen
Die ETH-Bibliothek ist die Anbieterin der digitalisierten Zeitschriften auf E-Periodica. Sie besitzt keine Urheberrechte an den Zeitschriften und ist nicht verantwortlich für deren Inhalte. Die Rechte liegen in der Regel bei den Herausgebern beziehungsweise den externen Rechteinhabern. Das Veröffentlichen von Bildern in Print- und Online-Publikationen sowie auf Social Media-Kanälen oder Webseiten ist nur mit vorheriger Genehmigung der Rechteinhaber erlaubt. Mehr erfahren

Conditions d'utilisation
L'ETH Library est le fournisseur des revues numérisées. Elle ne détient aucun droit d'auteur sur les revues et n'est pas responsable de leur contenu. En règle générale, les droits sont détenus par les éditeurs ou les détenteurs de droits externes. La reproduction d'images dans des publications imprimées ou en ligne ainsi que sur des canaux de médias sociaux ou des sites web n'est autorisée qu'avec l'accord préalable des détenteurs des droits. En savoir plus

Terms of use
The ETH Library is the provider of the digitised journals. It does not own any copyrights to the journals and is not responsible for their content. The rights usually lie with the publishers or the external rights holders. Publishing images in print and online publications, as well as on social media channels or websites, is only permitted with the prior consent of the rights holders. Find out more

Download PDF: 12.07.2025

ETH-Bibliothek Zürich, E-Periodica, https://www.e-periodica.ch

La nouvelle conduite forcée et les organes de fermeture de sécurité

de l'aménagement hydro-électrique de Montsalvens-Broc des Entreprises Electriques Fribourgeoises EEF

Auguste Barras, René Clément, Bernard Comte, Charles Dubas et Daniel Golliard

Introduction

En vue d'installer un dispositif permanent de mesure par ultra-sons des débits turbinés à l'usine hydro-électrique de Broc (figure 1), ainsi que deux nouvelles soupapes d'aération (reniflards) immédiatement à l'aval des vannes de sécurité en tête des deux conduites forcées de 1,80 m de diamètre intérieur, les Entreprises Electriques Fribourgeoises ont consulté, à fin 1982, le constructeur de l'époque, pour la livraison, le soudage et le montage des pièces de raccordement nécessaires sur les deux tubes d'origine livrés juste après la Première Guerre mondiale, il y a près de soixante-dix ans.

En réponse, le constructeur interpelé a immédiatement attiré l'attention des Entreprises Electriques Fribourgeoises sur la question capitale de la soudabilité des conduites d'origine entièrement rivées (à l'exception du répartiteur partiellement soudé à l'autogène), ainsi que sur la fiabilité, c'est-à-dire la sécurité réelle, lors d'une fermeture sous le débit de gueule-bée faisant suite à une rupture de conduite, des deux vannes-papillons de tête fournies par un autre fabricant et datant de la construction de l'aménagement.

Compte tenu de la réfection indispensable de la peinture des conduites en question, les Entreprises Electriques Fribourgeoises ont demandé peu après, en mai 1983, à M. *Ch. Dubas,* ancien vice-président et ancien administrateur-délégué des Ateliers de Constructions Mécaniques de Vevey S.A. à Vevey, de se charger de l'étude de la modernisation des conduites forcées de Broc, en tenant compte au mieux des possibilités de réduction des pertes de charge particulièrement élevées avec l'usine de Broc à pleine puissance, soit une vingtaine de mètres sous la chute brute maximale d'environ cent vingt mètres (retenue maximale de 800,80 m moins niveau minimal dans le canal de fuite de 678,50 m).

Après une première inspection et la lecture attentive des documents à disposition, notamment de l'extrait du «Bulletin Technique de la Suisse Romande», année 1928, intitulé «L'usine de Broc et son bassin d'accumulation (Lac de Montsalvens)», la question s'est très vite posée de la résistance au vide du tronçon supérieur des deux conduites forcées de 1,80 m de diamètre, au cas où le reniflard à l'aval de chaque papillon ne fonctionnerait pas lors d'une fermeture des papillons de tête. De même, il a fallu très rapidement se demander s'il était judicieux de remplacer les papillons d'origine par des papillons modernes, compte tenu des problèmes délicats de raccordement avec les conduites forcées existantes rivées à recouvrement, engendrant en conséquence une forte excentricité des coutures, ou s'il n'était pas préférable de remplacer les deux vannes de sécurité d'origine, en tête de la galerie d'amenée, à la prise d'eau de Montsalvens, par des vannes planes modernes très étanches, à loger dans les rainures existantes et fonctionnant par la seule gravité en cas de manque du courant de maintien. Il fallait en outre connaître l'état des tôles des conduites forcées, qui paraissait à priori excellent sur toutes les parties visibles, étant cependant entendu que la peinture était à refaire sans trop tarder. Il fallait en particulier s'assurer qu'au droit des appuis glissants, la tôle des conduites forcées n'était pas attaquée de manière inadmissible par la rouille, vu les berceaux de soutien très larges et dépourvus du fer carré intermédiaire devenu classique par la suite. Il était dès lors indispensable de dégager quelques-uns de ces appuis, le béton des sellettes, d'assez piètre qualité, ayant par ailleurs été rénové il y a quelques années.

Ceci dit, il fallait se demander quelles étaient les solutions entrant véritablement en considération pour une rénovation d'une certaine importance. On pouvait naturellement penser à une conduite forcée unique de grand diamètre réduisant très fortement les pertes de charge et résistant bien sûr au vide. On pouvait également penser à conserver telles quelles les conduites existantes, en les enrobant de béton pour résister au vide et protéger du même coup la tôle de la corrosion, notamment dans la galerie d'environ cent trente mètres à l'aval de la cheminée d'équilibre. Des solutions intermédiaires pouvaient présenter aussi des avantages, notamment en permettant de poursuivre partiellement l'exploitation de la centrale durant les travaux.

Pour y voir plus clair, il était nécessaire de procéder à la mesure des débits réels et des pertes de charge effectives, les uns et les autres mal connus ou sujets à caution, notamment à cause des changements survenus depuis l'époque de la construction de l'aménagement, à commencer par le surhaussement de 80 cm de la retenue effectué en 1926, l'installation d'un cinquième groupe hydro-électrique en 1927 et le remplacement progressif des roues d'origine des turbines par des roues nouvelles en acier inoxydable de rendement beaucoup plus favorable, quoiqu'il n'ait jamais été mesuré, ni même chiffré.

Finalement, compte tenu du coût des transformations, y compris la perte de production provoquée par la mise hors service de l'aménagement durant les travaux, il s'est avéré que la seule solution à retenir était une nouvelle conduite forcée unique entièrement soudée de trois mètres de diamètre intérieur et fortement raidie au vide, avec un répartiteur aux formes hydrauliques particulièrement soignées, ainsi que des organes de fermeture modernes très robustes, d'une part à la prise d'eau de Montsalvens, d'autre part en tête de conduite, juste à l'aval de la chambre d'équilibre et immédiatement à l'amont des turbines existantes, dont seuls les aspirateurs seraient améliorés pour récupérer le maximum d'énergie possible sans risquer pour autant les phénomènes de cavitation toujours à craindre en pareil cas.

Enfin, un nettoyage des parois de la galerie d'amenée pa-

Figure 1. La centrale EEF de Broc avec la conduite forcée double de 1,8 m de diamètre intérieur, avant son remplacement en 1987 par une conduite unique de 3 m.

raissait aussi souhaitable que peu coûteux, bien que l'on ignorât tout du gain de chute possible.

Grâce à un projet très complet étudié bien à l'avance dans ses moindres détails, grâce à un programme journalier méticuleux de tous les travaux, grâce aussi, il faut le souligner, à la volonté de tous les participants et exécutants d'obtenir un meilleur résultat qu'escompté, l'installation rénovée a pu être remise en service avec une quinzaine de jours d'avance par rapport au délai prévu. Quant au résultat obtenu, le gain de chute et le débit turbiné sont très supérieurs aux prévisions très prudentes à la base de l'étude.

Disons d'emblée que le nettoyage des parois de la galerie d'amenée a provoqué un gain de chute aussi bénéfique que surprenant, avec possibilité d'en suivre désormais l'évolution sans difficultés et sans frais.

Les nouveaux organes de fermeture et la nouvelle conduite forcée de l'aménagement de Montsalvens-Broc

La nécessité de nouvelles vannes de sécurité modernes tout à l'amont de l'aménagement, à la prise d'eau de Montsalvens, s'imposa très vite à l'esprit. Aussi, les Entreprises Electriques Fribourgeoises commandèrent-elles, le 3 novembre 1983 déjà, avec délai de livraison à fin février 1984, deux nouveaux batardeaux très simples avec vantail en tôle épaisse, by-pass incorporé manœuvré par les treuils de suspension faisant également partie de la fourniture, étanchéité caoutchouc en note de musique, aux Ateliers de Constructions Mécaniques de Vevey, en abrégé Vevey, conformément à la proposition et au devis du constructeur. Il s'agissait de remplacer rapidement et de compléter l'unique batardeau d'origine, qui servait alternativement à chacune des deux passes de la prise d'eau de Montsalvens.

Quelques jours après, le 29 novembre 1983, les Entreprises Electriques Fribourgeoises chargèrent également Vevey de l'étude complète, y compris les plans d'exécution en atelier, des deux nouvelles vannes de sécurité immédiatement à l'aval des batardeaux de la prise d'eau de Montsalvens. Chacun des deux vantaux, suspendu dans la chambre des vannes d'origine à son vérin (servo-moteur) de commande à haute pression, devait s'appuyer sur deux bogies, avec galets de roulement sur aiguilles toujours en eau, mieux à même de répartir correctement la pression du tablier dans les rainures existantes assez étroites, que les cinq galets primitifs par côté.

Les batardeaux, amenés sur place par le barrage très étroit de Montsalvens, furent installés en juin 1984, prêts à fonctionner. Leur étanchéité, qui suscitait des craintes justifiées vu les rainures d'origine, se révéla d'emblée excellente et les joints gonflables, déjà approvisionnés, s'avérèrent superflus.

Les vannes planes d'origine de la prise d'eau de Montsalvens étaient munies d'un système très ingénieux, mais probablement peu efficace, d'aération de la nappe d'eau s'échappant à l'aval, grâce à une suspension tubulaire avec dérivation à travers le tablier. Outre la complication du démontage et du remontage de cette suspension, la descente dans le puits était malcommode et dangereuse à cause du peu de place disponible. Un reniflard vertical fut dès lors creusé en automne 1984, juste à l'aval de la prise d'eau, ce qui permettait une descente facile et sans danger au moyen d'un treuil et d'une nacelle pour les hommes devant travailler dans la galerie d'amenée et pour leur matériel. Le problème de l'aération de la nappe et surtout celui de l'évacuation de la bulle d'air, fortement comprimée lors du remplissage de la galerie d'amenée et explosant d'un coup à son arrivée à l'air libre, se trouvaient résolus du même coup. Les vannes de sécurité, fermant par simple gravité en coupant le courant du dispositif de maintien toujours sous tension, étaient suspendues juste au-dessus des pertuis à obturer en septembre 1985, prêtes à fonctionner.

La question des batardeaux et vannes planes de la prise d'eau de Montsalvens une fois au point, il fallait aborder sans tarder le problème des conduites forcées d'origine et de leurs organes de fermeture, notamment au vu des pertes de charge importantes mesurées le 14 février 1984 par les Entreprises Electriques Fribourgeoises à l'aide de manomètres de précision et de relevés des niveaux à l'air libre, ainsi que du jaugeage postérieur du 7 avril 1984 dans le canal de fuite par le Service hydrologique national de la Confédération.

En ce qui concerne la résistance au vide des conduites forcées d'origine, il fallait descendre jusqu'au voisinage de la centrale de Broc, où l'épaisseur des tôles atteignait 13 mm, si l'on ne voulait pas dépasser la limite usuelle de 70 pour le rapport R/e du rayon divisé par l'épaisseur de la conduite. Or, si le vide s'était produit en cas de fermeture en eau vive des papillons de Broc et que les soupapes d'aération n'aient pas fonctionné, comme cela était à craindre, les conduites d'origine risquaient leur destruction par voilement sur une grande distance, avec une longue interruption d'exploitation de la centrale et des frais de reconstruction très élevés. On peut se faire une bonne idée d'un tel accident au vu de la figure 2. Pour l'éviter à coup sûr, il aurait fallu des raidisseurs assez onéreux et difficiles à mettre en place sur une conduite rivée ancienne à recouvrement excentrique des tôles, et cela *sans aucune amélioration des pertes de charge très élevées* que l'on venait de mesurer avec la centrale presque à pleine puissance.

Il faut enfin remarquer qu'une nouvelle conduite forcée de trois mètres ne nécessitait pas de travaux d'aménagement importants du tracé, mais permettait, après un démontage rapide et sans ménagement des conduites d'origine, sur un chantier bien dégagé et sans contraintes, la démolition et la reconstruction aisées du bouchon en béton juste à l'aval de la cheminée d'équilibre, ainsi que des divers massifs d'ancrage et selles d'appui. Le montage de la nouvelle conduite unique, de son répartiteur et des différentes vannes de sécurité pouvait alors se faire très vite, en limitant au minimum l'arrêt de l'usine de Broc.

Un relevé très exact des divers obstacles du parcours, ainsi qu'un piquetage soigné, étaient bien sûr indispensables pour éviter des surprises désagréables et des retards coûteux, compte tenu des colliers d'appui et des raidisseurs intermédiaires empêchant le voilement, ainsi que d'un espace suffisant pour le renouvellement de la peinture. M. *Michel Ducrest,* ingénieur géomètre à Bulle, fut dès lors chargé de ce travail important et délicat, ainsi que de divers autres travaux complémentaires.

L'estimation des pertes de charge, effectuée en se basant sur les mesures déjà signalées des 14 février et 24 avril 1984, montra, sans avoir à manipuler les coefficients classiques, malheureusement encore très mal connus aujourd'hui, après plus d'un demi-siècle de construction de grands aménagements hydro-électriques dans le monde entier, le gain considérable qu'apporterait sans aucun doute la conduite forcée unique de trois mètres de diamètre, complètement soudée et lisse, avec des coudes formés d'un nombre suffisant de viroles, ainsi que d'un répartiteur à l'hydraulique bien étudiée (figures 3 et 4).

On remarquera que la section circulaire de trois mètres de diamètre est plus grande que la section théorique de la galerie d'amenée, formée d'un demi-cercle supérieur de

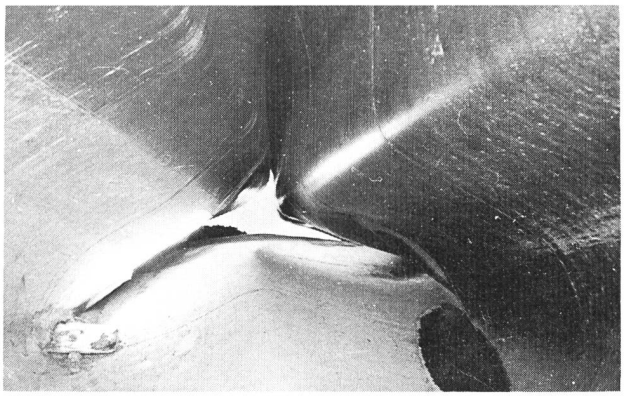


Figure 2. Conduite d'amenée voilée en trois lobes, conformément à la théorie, à la suite d'une erreur au moment de la vidange après l'essai en surpression sur place (portée entre anneaux de raidissement des appuis: 19 m; diamètre 3 m; épaisseur de la tôle: 9,5 mm).

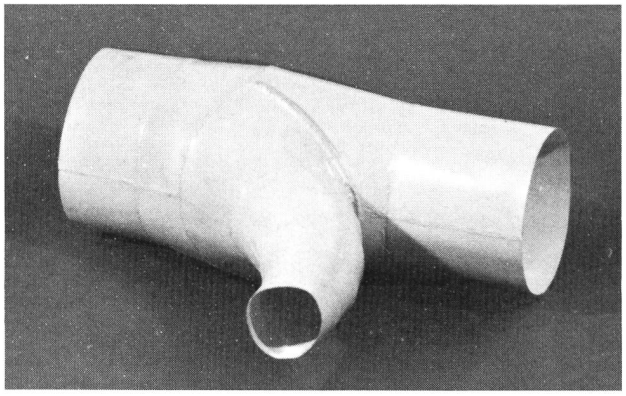


Figure 3. Maquette Vevey de la culotte amont du nouveau répartiteur de la centrale de Broc (diamètre amont: 3 m; diamètres aval: 1,2 m et 2,65 m).

1,40 m de rayon et de trois portions de cercle de 2,80 m de rayon partant de la voûte et de la naissance des piédroits pour former la partie inférieure de la section, d'usage courant à l'époque et aux propriétés géométriques bien spéciales. Une galerie d'amenée de section plus petite (6,502 m²) que celle de la conduite forcée (7,069 m²) lui faisant suite est anormale, de sorte que le diamètre de trois mètres[1] peut paraître exagéré à première vue. Il ne faut cependant pas oublier qu'à Montsalvens-Broc, la galerie d'amenée est particulièrement courte, 1614 m, et la conduite forcée, particulièrement longue, environ 418 m horizontalement depuis la cheminée d'équilibre jusqu'à l'entrée de la turbine centrale n° 3.

On ne doit par ailleurs pas oublier qu'en réduisant quelque peu le diamètre d'une nouvelle conduite forcée, on n'aurait pas diminué du tout dans la même proportion, et de loin pas, les dépenses à engager, ni pour la conduite forcée proprement dite, ni pour les travaux de génie civil.

En tenant compte de la forte augmentation du diamètre et, dans une mesure raisonnable, de l'amélioration de la rugosité due à une conduite lisse unique de grand diamètre avec des coudes modernes formés d'une série suffisante de viroles, un répartiteur hydrauliquement favorable, ainsi que de vannes d'arrêt aux formes soignées, on pouvait s'attendre à un gain de chute de l'ordre de six mètres au moins en ce qui concerne le tronçon où les pertes de charge avaient été mesurées le 14 février 1984, depuis la chambre d'équilibre jusqu'au milieu du répartiteur, juste avant le tuyau d'alimentation à la turbine centrale n° 3, sans parler d'un meilleur entonnement sous la cheminée d'équilibre. Compte tenu des nouveaux aspirateurs récupérant plus d'énergie à la sortie des turbines, ainsi que de leurs nouveaux tuyaux d'alimentation, on pouvait escompter un gain de chute de l'ordre de sept mètres au moins, ce qui justifiait une dépense de l'ordre de quatre millions pour une nouvelle conduite avec son génie civil.

[1] Le rayon hydraulique passe quant à lui de 0,719 m à 0,75 m.

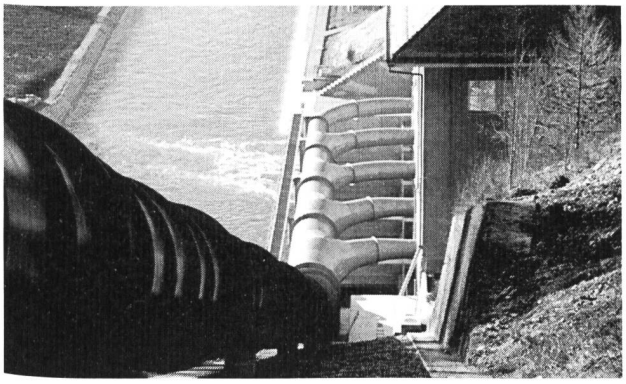


Figure 4. Vue de la partie à l'air libre de la nouvelle conduite forcée de Broc avec son répartiteur et la centrale d'origine.

En effet, le montant de la production annuelle de l'usine de Broc atteint *six millions* de francs en moyenne pour une chute brute de l'ordre de *cent mètres,* essentiellement du *courant de pointe.* De la sorte, chaque centimètre de gain de chute réalisé produira une recette complémentaire d'exploitation de 600 francs et justifie un investissement complémentaire de *six mille francs.*

Le remplacement des conduites existantes de Broc étant inévitables dans quelques années, même après une réfection assez coûteuse de la peinture et divers travaux complémentaires indispensables, les Entreprises Electriques Fribourgeoises chargèrent à nouveau Vevey, en date du 24 août 1984, d'un mandat d'études pour une conduite forcée moderne[2] de trois mètres de diamètre, dont l'axe venait d'être définitivement fixé, avec de grandes portées entre les appuis, des viroles d'appui plus épaisses à colliers et des raidisseurs en mesure de garantir la tenue au vide absolu. Ce mandat d'études comprenait une fois de plus tous les calculs et l'établissement de l'ensemble des dessins d'atelier avec les spécifications des matières à commander, de manière à réduire au minimum la durée de remplacement des conduites d'origine, si cela devenait nécessaire.

Par ailleurs, les conduites forcées d'origine étaient menacées, d'une part par une falaise en surplomb au-dessus de la sortie de la galerie (figure 5) en provenance de la chambre d'équilibre, qui avait déjà endommagé en la perforant une des deux conduites en 1953 et exigé une galerie de protection, d'autre part par les véhicules, parfois lourdement chargés, qui descendent la route dite de «Bataille», déjà redoutée par les charretiers de l'époque hippomobile; cette route en provenance du col du Bruch (Jaunpass) et de Charmey, est parfois verglacée, d'où une glissade dans le dernier virage en épingle à cheveux surplombant les con-

[2] Voir notamment à ce sujet le «Bulletin Technique VeVeY» de 1958 («Récentes réalisations Vevey en matière de conduites forcées») et de 1961 («Le problème de la conduite forcée d'égale résistance, compte tenu des sollicitations dites locales et sa solution à la Lizerne»).
En ce qui concerne plus particulièrement le problème du renforcement autour des trous d'homme, on consultera la page 290 de l'article «Quelques aspects de l'influence exercée par la grosse chaudronnerie sur la construction métallique soudée en Suisse», paru dans la «Publication préliminaire du congrès de Stockholm 1960» de l'Association internationale des ponts et charpentes AIPC.

duites et l'atterrissage des véhicules sur les tuyaux, jusqu'alors sans dommage pour eux.

Aussi, après avoir installé une glissière de sécurité renforcée à l'extérieur du virage en question, fut-il décidé de protéger la future conduite de trois mètres, aussi bien contre les chutes de rocher que contre la circulation, à l'aide d'une longue buse en tôles Armco, surmontée d'un épais remblai depuis la sortie de la galerie en provenance de la chambre d'équilibre jusqu'au massif n° 3 dominant la centrale de Broc (figure 5), vu les frais considérables pouvant résulter d'une rupture de conduite.

Ceci dit, de nouvelles vannes s'imposèrent devant les turbines existantes pour remplacer les vannes à carter d'origine, qui n'étaient pas destinées à fermer en eau vive, notamment en cas de blocage accidentel de la tige d'un orifice compensateur, solidaire du distributeur de sa turbine, ce qui avait provoqué il y a quelques années l'emballement de la turbine et la destruction des glissières en bronze de la vanne à carter qu'il avait fallu manœuvrer.

Pour diminuer les pertes de charge relativement élevées dues à la lentille et limiter les perturbations en découlant jusqu'à la turbine, on choisit finalement un diamètre d'un mètre vingt pour le papillon, soit dix centimètres de plus que les vannes d'origine à carter. En ce qui concerne la lentille entièrement soudée comme le corps de la vanne, elle forme une poutre triangulée à barres en tôles épaisses ne s'opposant plus au passage de l'eau (conception «treillis»). On renonça finalement aux vannes sphériques de 1,1 m de diamètre, pratiquement sans pertes de charge, vu leur coût double de celui des papillons.

Bien qu'on aurait pu en toute rigueur s'en passer, le papillon de tête juste à l'aval de la cheminée d'équilibre fut finalement maintenu[3] et conçu de manière à permettre en cas de nécessité le changement de la lentille en utilisant le puits de la chambre d'équilibre. La conception de cette grande vanne papillon de 2,80 m est la même que celle des vannes de 1,2 m devant les turbines.

Dès lors, après divers avant-projets et devis des Ateliers de Constructions Mécaniques de Vevey, un mandat d'études analogue à celui de la conduite forcée leur fut-il confié, pour l'ensemble des nouvelles vannes de sécurité, en date du 23 janvier 1985, pour les mêmes raisons que précédemment, avec tous les dessins d'atelier, y compris tous les by-pass et la ventouse d'aération du grand papillon, les contre-poids de fermeture, organes de commande et accessoires, pour pouvoir couper le débit de gueule-bée par manque du courant de maintien; la vanne ne s'ouvre cependant qu'à la moitié de la pression de service.

En ce qui concerne la conduite forcée, un renforcement s'est imposé pour résister au vide absolu demandé par les Entreprises Electriques Fribourgeoises, afin de prévenir tout risque aux conséquences financières très graves pour elles. Il a finalement fallu doubler approximativement le nombre des raidisseurs prévus primitivement selon les «Recommandations» du Comité européen de la chaudronnerie et de la tôlerie CECT, qui ne prennent pas l'excentricité en compte. Au contraire, les «European Recommandations for Steel Constructions: Buckling of Shells, Second Edition 1983», postérieures de quatre ans, mais basées sur les mêmes considérations, le font avec raison.

Comme prévu, l'essai au vide a été effectué lors de la vidange de la conduite forcée, après l'essai en surpression, avec un vide mesuré de moins d'un mètre de colonne d'eau.

Le niveau hydrostatique lors de l'essai en surpression a été

[3] Les papillons primitifs avaient pu être fermés en 1954, lors de la perforation de la conduite forcée par un rocher, comme dit tout à l'heure.

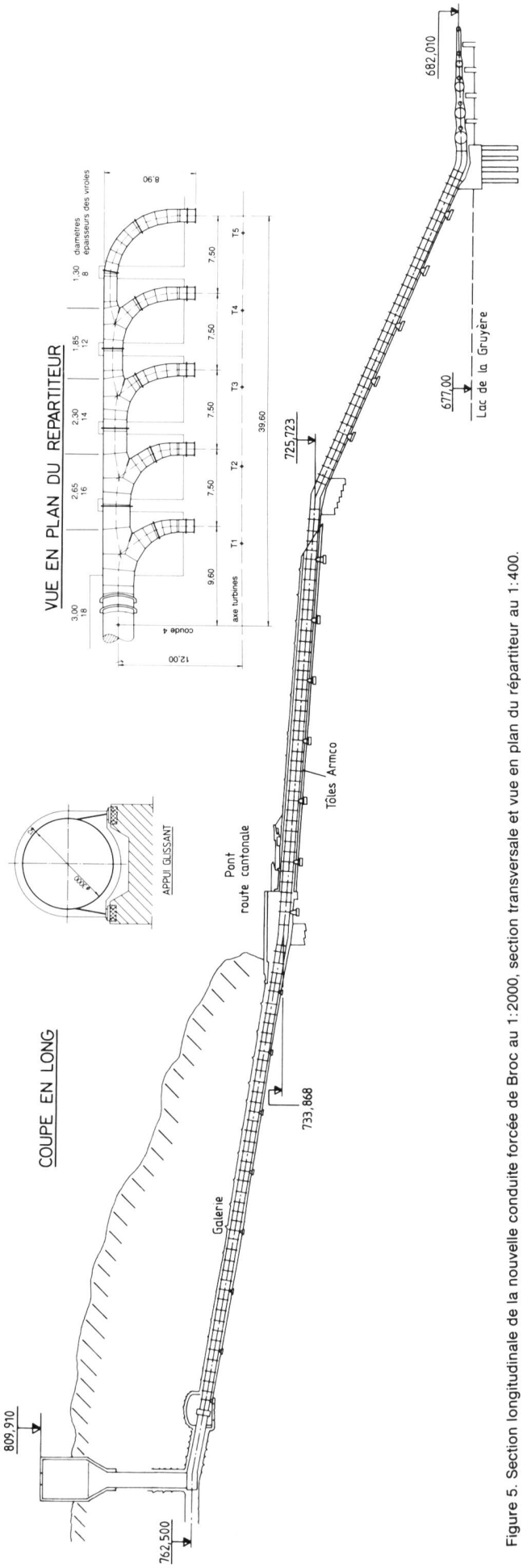
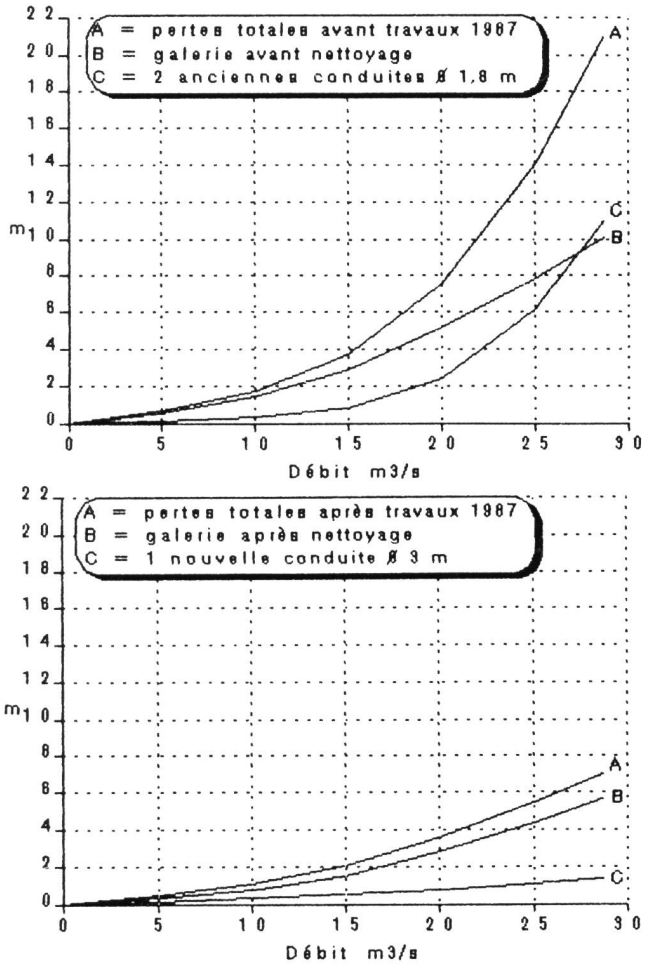


Figure 5. Section longitudinale de la nouvelle conduite forcée de Broc au 1:2000, section transversale et vue en plan du répartiteur au 1:400.



Comparaison des pertes de charge avec le débit nominal

	Avant les travaux	Après les travaux
En galerie	10,0 m	5,65 m
En conduite	10,9 m	1,35 m
Pertes totales	20,9 m	7,00 m

Figure 6. Pertes de charge en fonction des débits, avant et après les travaux de 1987.

finalement fixé à l'altitude de 847 m (figure 5), ce qui donne une hauteur de 165 m de colonne d'eau au-dessus de l'axe du répartiteur à 682,0 m. La question de la surpression a été examinée très à fond; on a malheureusement constaté à ce propos une absence complète de doctrine et des prescriptions aussi hétérogènes qu'incompréhensibles suivant les matériels, les ouvrages, les pays, les autorités de surveillance et associations s'occupant de la question. Finalement, la valeur de 165 m a été adoptée pour éviter un renforcement coûteux et difficile à justifier du génie civil des blocs d'ancrage. Précisons qu'en service, le niveau hydrostatique ne dépasse jamais le sommet de la cheminée d'équilibre, en cas de déclenchement de l'usine à pleine puissance, comme l'ont montré les calculs effectués par les Ateliers de Constructions Mécaniques de Vevey et les mesures de contrôle (y compris le coup de bélier).

En collaboration avec le Service hydrologique national, un contrôle des pertes de charge a été réalisé après les premiers mois d'exploitation. La comparaison des mesures effectuées avant et après les travaux de réfection a montré une *diminution de plus de 66 % des pertes totales,* ce qui est absolument remarquable. Avec un débit nominal de 28,7 m^3/s, les pertes en conduite ont été réduites de 10,9 m à 1,35 m et celles de la galerie de 10 m à 5,65 m. Il est à noter que seul un nettoyage avec de l'eau sous haute pression a été entrepris dans la galerie, afin de retrouver la surface d'origine de 1921, c'est-à-dire un glaçage revêtu d'une couche d'Inertol, qui sont restés en parfait état après 66 ans d'exploitation (figure 6).

Vu leur importance, le coude n° 4, la grande culotte qui le suit en direction aval (figure 4), ainsi que le trou d'homme très spacieux de soixante centimètres situé entre les deux, ont fait l'objet d'une *auscultation tensométrique de grande envergure*[4] demandée par les Entreprises Electriques Fribourgeoises. Le coude 4, par exemple, entièrement à l'air libre, doit transmettre à son massif d'ancrage, par l'intermédiaire de tirants précontraints, une réaction de l'ordre de mille tonnes en provenance du répartiteur. Faute de pouvoir résoudre le problème par le calcul et se rendre compte de la façon dont les efforts sont déviés jusqu'au béton et au sol de fondation, l'auscultation tensométrique, qui n'a rien révélé d'anormal au premier abord, permettra sans doute une approche correcte d'un problème particulièrement difficile et compliqué, qu'il est impossible de laisser sans solution.

En ce qui concerne la nervure centrale intérieure de la grande culotte amont, la théorie Atrops utilisée dans le calcul des Ateliers de Constructions Mécaniques de Vevey s'est révélée correcte. On lira à ce propos la toute récente publication du professeur EPFZ *Pierre Dubas,* qui a examiné le problème et simplifié les formules de *Atrops,* trop compliquées pour le praticien normal: «Formelmässige Berechnung des Verstärkungskragens eines Hosenrohres», Publikation Nr. 87–2, Baustatik und Stahlbau, Eidg. Technische Hochschule, Hönggerberg, CH-8093 Zürich.

L'auscultation tensométrique de Broc permettra sans doute également une approche correcte du problème du renforcement autour d'un trou d'homme, où l'on se contente aujourd'hui encore, comme pour les plis des coudes et des culottes[5], de règles assez empiriques, telles que l'indique la prescription n° 316 du 5 mai 1981 des «Règlements techniques de l'Association suisse de contrôle des installations sous pression» ASCP, autrefois ASPC (Association suisse des propriétaires de chaudières).

Il vaut la peine d'attirer l'attention sur les mesures inhabituelles prises pour raccourcir la durée des travaux, compte tenu du gain possible d'énergie à produire par l'usine de Broc (blindage au bas de la cheminée d'équilibre, gabarits de pose et coffrages métalliques, voie de roulement enrobée pour le chariot de montage des tuyaux, etc.). Signalons aussi le corridor ménagé dans le bouchon en béton pour accéder commodément à la porte latérale de la galerie d'amenée depuis la chambre du papillon de tête.

Les travaux de génie civil

Une fois attribuées aux Ateliers de Constructions Mécaniques de Vevey les études détaillées de la nouvelle conduite forcée de trois mètres, des nouveaux organes de fermeture la protégant, ainsi que des cinq nouveaux aspirateurs coniques en acier inoxydable avec leurs charpentes d'appui dans les murs latéraux à la sortie des turbines, il fallait évidemment entreprendre sans tarder l'étude détaillée des ou-

[4] Voir à ce sujet le «Bulletin Technique VeVeY 1988», qui vient de paraître: Rénovation de l'aménagement de Broc. Les vannes papillon et la conduite forcée (*P. Aasheim,* ing. dipl. NTH, *E. Moritz,* ing. TGM, *P. Settimi,* phys. EPFL). L'article contient toutes les indications nécessaires concernant l'auscultation tensométrique de Broc effectuée par les Ateliers de Constructions Mécaniques de Vevey, ainsi que de nombreux renseignements et photographies sur les vannes de sécurité et la conduite forcée.

[5] Une publication ultérieure traitera le difficile et délicat problème des plis des coudes et des culottes, pour lesquels on se contentait jusqu'ici de surépaisseurs arbitraires. L'auscultation tensométrique de Broc permettra d'y voir enfin plus clair.

vrages de génie civil avec tous les plans d'exécution, en commençant naturellement par les sondages nécessaires dans le terrain, que l'on savait déjà formé d'alluvions.
Les Entreprises Electriques Fribourgeoises chargèrent de ce mandat d'étude, en mai 1985, le bureau *Auguste Barras,* ingénieur-conseil ASIC, dipl. EPFZ, à Bulle.
L'ingénieur mandaté était soumis à des contraintes impératives, d'une part celles des structures existantes et de la géométrie déjà définie de la nouvelle conduite forcée, d'autre part, les exigences du maître de l'ouvrage en matière de sécurité d'exécution et le délai très court de sept mois pour l'ensemble des travaux. Il s'agissait de nettoyer la galerie d'amenée (1600 m), de surélever et de renforcer par frettage la chambre d'équilibre, de démolir les conduites existantes, le bouchon et les socles d'appui, puis d'abaisser le fond de la galerie en rocher, d'établir un couloir d'accès à la galerie d'amenée depuis la nouvelle conduite forcée, de construire les vingt et un nouveaux socles d'appui et les massifs d'ancrage des trois coudes, de protéger la partie supérieure à l'air libre de la conduite forcée avec une buse «Armco», de démolir, de rénover ou de reconstruire les guideaux de sortie et les fosses des cinq turbines, ainsi que le canal de fuite.
Certes ces travaux sont classiques, la difficulté résidant surtout dans la détermination très exacte de leur durée minimale, afin d'établir en toute sécurité un programme PERT avec son chemin critique et de le suivre pas à pas.
La construction des selles d'appui dans la forte pente du tronçon inférieur de la conduite forcée et du massif d'ancrage aval (figure 5) mérite à vrai dire quelques remarques. En effet, vu la qualité du terrain, des pieux injectés s'imposaient pour respecter les délais. Leur liaison était dès lors inévitable jusqu'au massif inférieur au droit de l'usine de Broc, d'où la poutre de butée de 1,50 m de largeur et de 0,60 m d'épaisseur, qui reprend les efforts horizontaux des selles d'appui et enrobe en même temps la voie métrique de montage des tuyaux, ainsi que les tubes PE d'alimentation et de télécommande jusqu'au papillon de tête. Compte tenu du gain de production journalier de l'usine de Broc, soit seize mille francs en moyenne, la voie métrique est d'ailleurs tenue dans le béton sur tout le parcours pour accélérer le montage de la conduite forcée.
Quant au massif d'ancrage inférieur, qui subit une poussée horizontale de l'ordre de mille tonnes, il devait être logé dans un espace restreint, entre le talus amont et l'usine. C'est en exécutant à l'abri d'une paroi berlinoise un bloc de 800 m³ posé sur dix pieux forés de 1,30 m de diamètre et 12 m de profondeur que le problème a été résolu. Cependant, comme la position peu favorable du coude par rapport à l'axe du massif engendrait des contraintes trop élevées de traction et de cisaillement, il a fallu les compenser par une précontrainte horizontale et verticale.

Conclusion

L'exemple à vrai dire assez spécial de Broc incite à penser que des améliorations devraient être possibles en Suisse pour augmenter la production hydro-électrique, à condition bien sûr que les débits de dotation des rivières ne soient pas augmentés trop fortement, comme certains le voudraient. Pour arriver à ce résultat, il faudrait évidemment réétudier à fond les nombreuses usines construites en leur temps selon des principes s'écartant fortement de la réalité d'aujourd'hui, soit en ce qui concerne la production escomptée, soit en ce qui concerne la puissance installée. En plus, il faut être conscient qu'il en découlerait dans bien des cas une augmentation parfois assez importante du coût de l'énergie livrée, particulièrement aux heures de pointe.

Adresses des auteurs:
Auguste Barras, ing. civil dipl. EPFZ-SIA, route de la Gruyère 9B, CH-1630 Bulle.

Charles Dubas, ing. civil dipl. EPFZ, dr ès sc.techn., Au Sichoz 39, CH-1814 La Tour-de-Peilz.

René Clément, ing. él. dipl. EPFZ, sous-directeur des Entreprises Electriques Fribourgeoises, Pérolles 25, CH-1701 Fribourg.

Bernard Comte, ing. ETS, chef des usines EEF de la Gruyère, Usine électrique de Broc, CH-1636 Broc.

Daniel Golliard, ing. civil EPFZ, chef du Service immeubles et génie civil, Entreprises Electriques Fribourgeoises, Pérolles 25, CH-1701 Fribourg.

Ein berühmtes Überdruckventil

Daniel Vischer

Zu den Wahrzeichen von Genf gehört der hohe Springbrunnen im See vor der Stadt. Nur wenigen ist bekannt, dass es sich dabei um das Relikt eines Überdruckventils handelt.
Die Chroniken berichten folgendes: Beim Anbruch des industriellen Zeitalters in der Schweiz standen für die Erzeugung mechanischer Kraft grundsätzlich nur zwei Energiequellen zur Verfügung: die Dampfkraft und die Wasserkraft. Weil die Kohle von weit her importiert werden musste, war die Dampfkraft teuer und blieb deshalb meist auf Reserveeinheiten sowie auf Dampflokomotiven und Dampfschiffe beschränkt. Das Primat kam deshalb der Wasserkraft zu, die in der Schweiz unter verhältnismässig günstigen Bedingungen gewonnen werden konnte und deren Rohstoff, das Wasser, praktisch nichts kostete. Allerdings hatte diese Wasserkraft einen schwerwiegenden Nachteil: Sie war an ein Fliessgewässer gebunden! Wer sie also nutzen wollte, musste seinen Gewerbebetrieb oder seine Fabrik zwangsläufig unmittelbar an einen Fluss, Bach oder zumindest an einen Kanal stellen. Das führte dazu, dass sich die Industrie an den Flüssen und Bächen niederliess und der Platz dort allmählich eng wurde. Daher sann man in der zweiten Hälfte des letzten Jahrhunderts nach Mitteln, die mechanische Kraft über Land zu transportieren.
Eine von mehreren Lösungen, die verwirklicht wurde, war jene der Druckwasserversorgung. Sie beruhte darauf, dass die von einem Fluss angetriebenen Turbinen direkt mit Pumpen gekuppelt wurden, die Flusswasser in ein Versorgungsnetz förderten. Wer diese Energie nutzen wollte, brauchte also nur irgendwo dieses Versorgungsnetz anzuzapfen, um seine Hausturbine anzuschliessen. Eine solche Hausturbine bestand entweder aus einer Miniturbine oder einem sogenannten Wassermotor, das heisst einer wassergetriebenen Kolbenmaschine. Die Druckwasserversorgung ermöglichte somit gleichsam eine Verlängerung der Wasserkraftnutzung von den Fliessgewässern bis zu mehreren Kilometer entfernten Nutzungsstellen.
Auch Genf wählte diese Lösung, um die aus der Rhone gewonnene Wasserkraft in der Stadt zu verteilen. Es kombinierte das Druckwassernetz aber ähnlich wie mehrere andere Städte mit dem Trink- und Bruchwassernetz und förderte deshalb nicht Rhone- sondern Seewasser. Nachdem ein erstes System bereits 1872 in Betrieb genommen wurde, folgte bald ein zweites. Es handelte sich um das Rhonekraftwerk la Coulouvrenière, das ab 1886 mit sechs Turbinen anlief und und bis 1896 sukzessive auf 18 Turbinen erweitert wurde. Jede Turbine war vom Typ Jonval und trieb zwei Kolbenpumpen an. Das Pumpwasser stammte aus einer vom nahen See herangeführten Leitung und wurde mit 14 bar in ein Hochdruck- und mit 4 bar in ein Nieder-