Zeitschrift: Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria
Herausgeber: Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband
Band: 91 (1999)
Heft: 11-12

Artikel: Confortement de l'appui gauche du barrage de Montsalvens
Autor: Lazaro, Philippe / Golliard, Daniel
DOI: https://doi.org/10.5169/seals-940093

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: 25.12.2025

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

Confortement de l'appui gauche du barrage de Montsalvens

Philippe Lazaro, Daniel Golliard

1. Résumé

De mai 1997 à novembre 1998, le barrage voûte de Montsalvens, situé dans la vallée de la Jogne et propriété des Entreprises Electriques Fribourgeoises (EEF), a fait l'objet d'importants travaux de réhabilitation pour permettre son adaptation aux exigences actuelles en matière de sécurité.

La révision à la hausse des débits de crues extrêmes par rapport à ceux considérés lors de la construction de l'aménagement associée à la vétusté des équipements hydromécaniques du barrage ont rendu nécessaire le renouvellement des évacuateurs de surface. La persistance des déplacements irréversibles de l'appui gauche du barrage, relevés en 1937 déjà, a conduit à retenir nécessaire le confortement de l'appui pour garantir la sécurité à long terme du barrage.

Enfin, l'installation d'instruments complémentaires pour l'auscultation du barrage et de l'appui gauche s'inscrit dans le cadre d'une amélioration de leur surveillance.

La première partie de l'article présente l'aménagement et fait l'historique du comportement de l'appui en rive gauche. Dans sa seconde partie, il illustre les caractéristiques essentielles du projet de réhabilitation et décrit en détail les solutions constructives retenues pour le confortement de l'appui gauche.

2. Barrage de Montsalvens

Le barrage de Montsalvens est implanté à l'entrée des gorges de la Jogne situées à environ 6 km à l'est de la ville de Bulle. L'ouvrage, de type voûte, s'élève sur une hauteur de 52 m et présente une longueur au couronnement de 110 m. Construit durant les années 1919/20, il s'appuie sur un massif préalpin constitué de couches plissées essentiellement calcaires. Les eaux de la retenue, d'un volume utile de 11,0 mio. m^3, sont recueillies sur un bassin versant de quelque 173 km^2 pour être acheminées à l'usine de Broc au travers d'une galerie d'amenée longue de 1680 m puis d'une conduite forcée longue de 438 m, tel qu'illustré à la figure 1. La chute brute de l'aménagement varie entre 96 m et 122 m et le débit d'équipement s'élève à 25 m^3/s. La production d'énergie, assurée par cinq groupes équipés de turbines de type Francis d'une puissance de 5,5 MW chacune, s'élève en moyenne à 67 GWh par année.

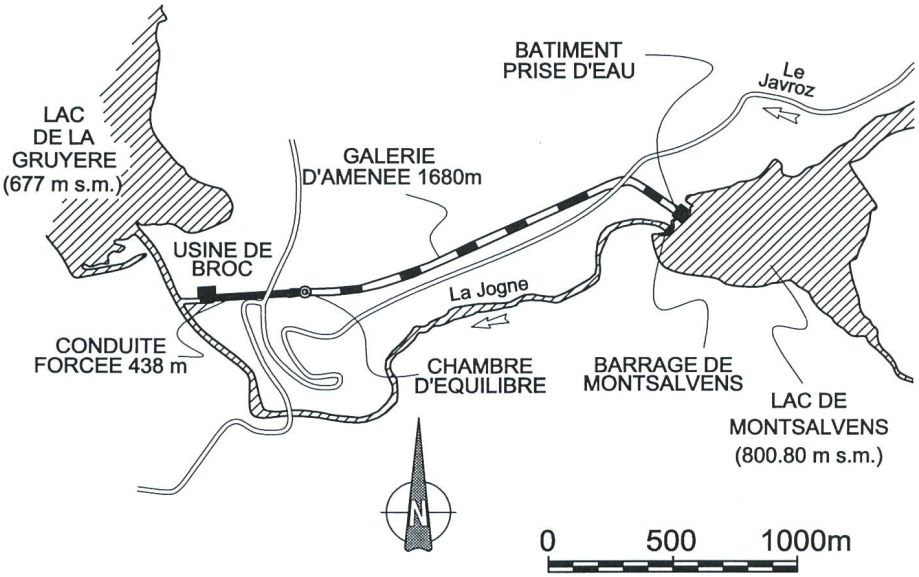


Figure 1. Schéma de l'aménagement de Montsalvens.

Le barrage de Montsalvens, projeté par l'ingénieur H. E. Gruner, représente le premier barrage voûte à double courbure de Suisse. Sa réalisation marque également en Europe le début de la construction de ce type de barrage, avec des arcs à rayons variables et d'épaisseur croissante en direction des appuis. Dans le cas présent, l'épaisseur de la voûte au niveau du couronnement atteint 2,0 m en correspondance de la clé; elle croît jusqu'à 3,0 m aux appuis et jusqu'à 22 m au pied du barrage.

Le barrage est fondé sur des calcaires du Malm qui appartiennent au flanc nord d'un anticlinal du massif du Montsalvens. Ce dernier représente une unité tectonique repliée sur elle-même en une suite d'anticlinaux très étroits et synclinaux larges orientés SW–NE. L'éperon rocheux qui constitue l'appui gauche du barrage est illustré à la figure 2. Il se présente sous la forme d'une arête quasi rectiligne orientée NEE–SWW et constituée par des bancs de faible épaisseur qui se redressent subverticalement. Le rocher de

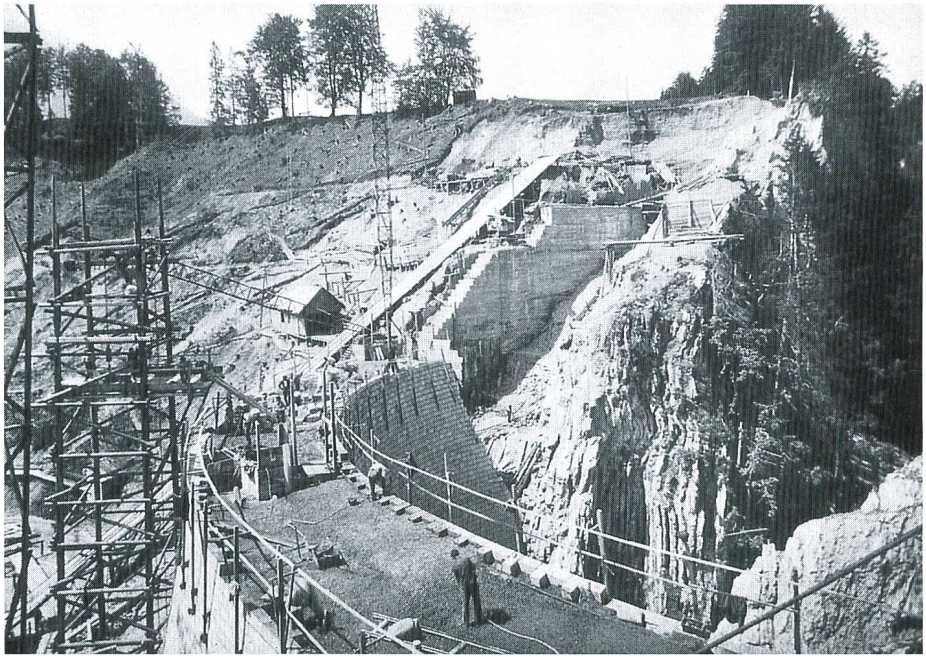


Figure 2. Vue du barrage de Montsalvens durant sa construction en 1919.

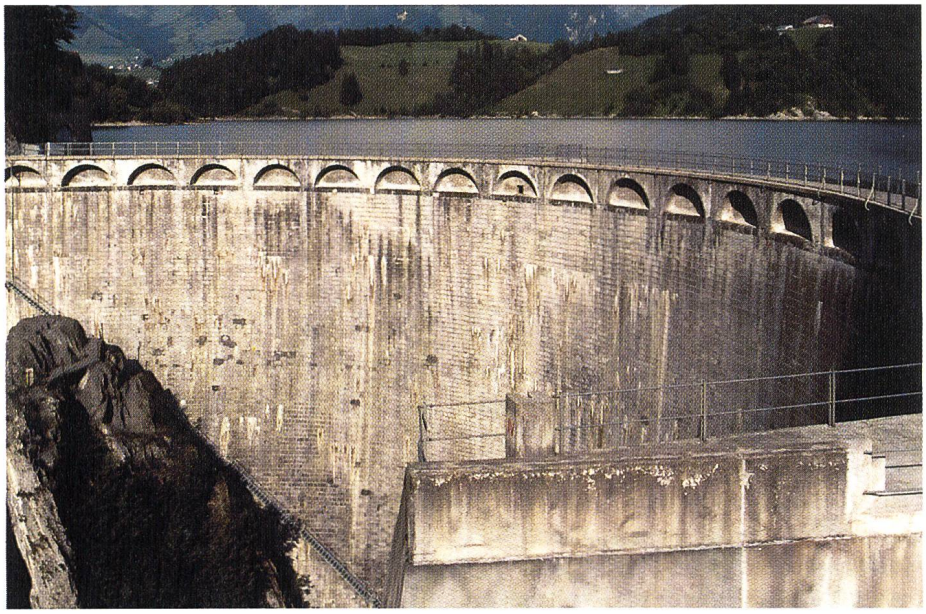


Figure 3. Vue aval du barrage de Montsalvens avant les travaux de réhabilitation.

l'éperon est apparent uniquement sur le flanc nord en correspondance de la gorge, alors que sur le flanc sud il disparaît rapidement sous une épaisse couche d'alluvions; cette dernière marque la présence d'une ancienne vallée préglaciaire de la Jogne dont l'éperon constitue le flanc droit. La faible étendue du rocher sur le flanc sud de l'éperon, relevée lors de l'exécution de la première fouille, a rendu nécessaire une modification du projet de construction alors que les travaux de bétonnage des fondations avaient déjà débuté.

Le barrage, avec un volume total de béton de 26000 m^3, a été érigé en cinq consoles indépendantes pour permettre la libre contraction du béton lors de sa prise. Des ouvertures de 1,0 m aménagées entre les différents blocs ont été munies de redans et bétonnées six semaines après l'achèvement des consoles de manière à conférer à l'ouvrage son caractère monolithique. L'étanchéité des joints est assurée par des plaques de cuivre scellées dans les consoles. Le béton, acheminé par des goulottes, a été déversé entre les deux murs en moellons qui constituent les deux parements du barrage et damé au moyen de fouleuses pneumatiques. Les moellons en béton préfabriqué ont été utilisés comme coffrage perdu, tel qu'illustré à la figure 2, et recouverts sur leur face extérieure d'un enduit à base de mortier. En 1926, après le murage des arches du pont qui surmonte le barrage, le niveau normal d'exploitation a été surélevé de 80 cm pour le porter à la cote 880,80 m s.m. (voir figure 3).

Lors de la mise en service, l'évacuation des crues était essentiellement assurée par un déversoir muni d'un clapet basculant d'une largeur de 16 m. L'ouvrage, situé en rive gauche, restituait les eaux à la Jogne par une chute de l'ordre de 40 m. En raison de l'érosion de la falaise, imputable à la lame déversante, le déversoir a été condamné et substitué par un nouvel ouvrage. Le nouveau seuil déversant, d'une largeur totale de 10,3 m, a été équipé avec deux vannes identiques de type segment, d'une capacité hydraulique de 75 m^3/s chacune.

Un éboulement survenu en 1944 sur la falaise rive gauche en correspondance de l'ouvrage de décharge emporta la partie terminale de l'évacuateur. Cet incident a conduit à retenir nécessaire la réalisation d'un nouvel évacuateur en rive droite. L'ouvrage, construit en 1945 à proximité du bâtiment de la prise d'eau, tel qu'illustré sur la figure 4a, a été équipé de la vanne segment de l'une des passes condamnée en rive gauche; l'ouvrage a été prolongé par une galerie longue de 370 m pour restituer les eaux à la Jogne en aval du barrage.

La vidange de fond avec une capacité hydraulique de 57 m^3/s est implantée au pied du barrage, tel qu'illustré sur la figure 4b. Cet ouvrage, non concerné par les récents travaux de réhabilitation de l'aménagement, a fait l'objet d'une intervention en 1968 pour le remplacement des organes mobiles.

Enfin, il est à relever que le barrage de Montsalvens est également le premier ouvrage en Suisse à avoir été équipé d'un réseau de triangulation pour le suivi de ses déformations. Des visées d'alignement sur les cibles du barrage et un nivellement de précision de son couronnement complètent alors les mesures. Ce système a fait l'objet d'une mise à jour en 1969 qui a consisté dans l'exécution d'un pendule inversé et de deux extensomètres en rive gauche de manière à mieux appréhender le comportement anormal de l'appui.

3. Analyse du comportement du barrage et de son appui en rive gauche

Dans son ensemble le comportement du barrage peut être considéré comme satisfaisant depuis sa mise en eau durant l'hiver 1920/21. De faibles mouvements plastiques de l'appui rive gauche, selon une direction perpendiculaire au litage moyen du massif (voir figure 4a), ont cependant déjà été décelés lors des premières campagnes de mesures géodésiques réalisées durant la période 1921 à 1937. Bien que les observations aient mis en évidence des déplacements permanents de quelques millimètres, il n'a pas été jugé nécessaire d'entreprendre un confortement de l'appui. La persistance de ces déplacements a été observée par la suite avec notamment pour la période 1937 à 1946 une moyenne de 0,5 mm/an, ce qui représente un accroissement par rapport à la période de mesures précédente. Cet accroissement des déplacements observés a été attribué à l'affaiblissement de l'appui résultant de l'éboulement survenu sur la falaise en 1944 en correspondance de l'évacuateur de crue. Suite à cet événement ont été entrepris en 1945 des travaux de protection de la falaise avec le gunitage de la paroi rocheuse, à proximité immédiate du barrage et le remplissage systématique des fissures avec un coulis de ciment. Enfin, dans l'histoire du comportement de l'appui gauche, il convient encore de relever les déplacements irréversibles de l'ordre de 4 mm mesurés lors du cycle de vidange et remplissage complet de la retenue opéré en 1968 pour l'assainissement de la vidange de fond.

Il faut attendre l'année 1969 et l'installation du système d'auscultation complémentaire pour avoir un relevé plus systématique du comportement de l'appui gauche du barrage. Les premières informations fournies par le pendule inversé et les deux extensomètres confirment la persistance des déformations permanentes de l'appui gauche selon une direction moyenne perpendiculaire au litage du rocher. Ces déformations atteignent en moyenne à 0,1 mm par année pour la période s'étendant de 1970 à 1989, soit au total 2 mm. La réduction de ces déformations par rapport aux années précédentes est probablement liée aux faibles variations du niveau dans la retenue.

L'identification des raisons du comportement plastique de l'éperon rocheux sous l'effet de la poussée du barrage a été entreprise vers la fin des années 70 par M.O. Gicot, responsable de la surveillance du barrage. Une campagne de reconnaissance géologique du massif d'appui et la détermination théorique de ses conditions de stabi-

lité ont abouti à une première proposition de confortement. L'éperon rocheux, essentiellement constitué de calcaires de l'âge du Malm, se caractérise par une structure en couches d'épaisseur comprise entre 10 et 30 cm. Le relevé des discontinuités effectué dans l'ancienne galerie de dérivation en rive gauche, a permis d'identifier quatre systèmes principaux selon la stratigraphie et la nature de la roche. Le massif, qui se révèle peu perméable, n'est cependant pas le siège d'une nappe aquifère; quelques circulations d'eau ont été observées le long de certaines cassures. La stabilité d'ensemble de l'appui a été évaluée satisfaisante et les déformations de nature plastique ont été attribuées à un mouvement relatif entre les couches de plus faible résistance. La géométrie de l'appui et en particulier son extension limitée en aval semblent expliquer la persistance des mouvements de fluage. La modélisation numérique du comportement de l'appui a permis d'évaluer les contraintes dans le massif par ajustement du calcul aux déformations réelles relevées par le système d'auscultation en place. L'interprétation des résultats de cette simulation s'est cependant révélée délicate. Enfin, l'étude a abouti à une proposition qui comprenait la mise en place d'une instrumentation complémentaire en rive gauche pour identifier d'une part les zones du massif de moindre résistance et pour orienter d'autre part d'éventuels travaux de confortement de l'éperon.

4. Projet d'assainissement du barrage

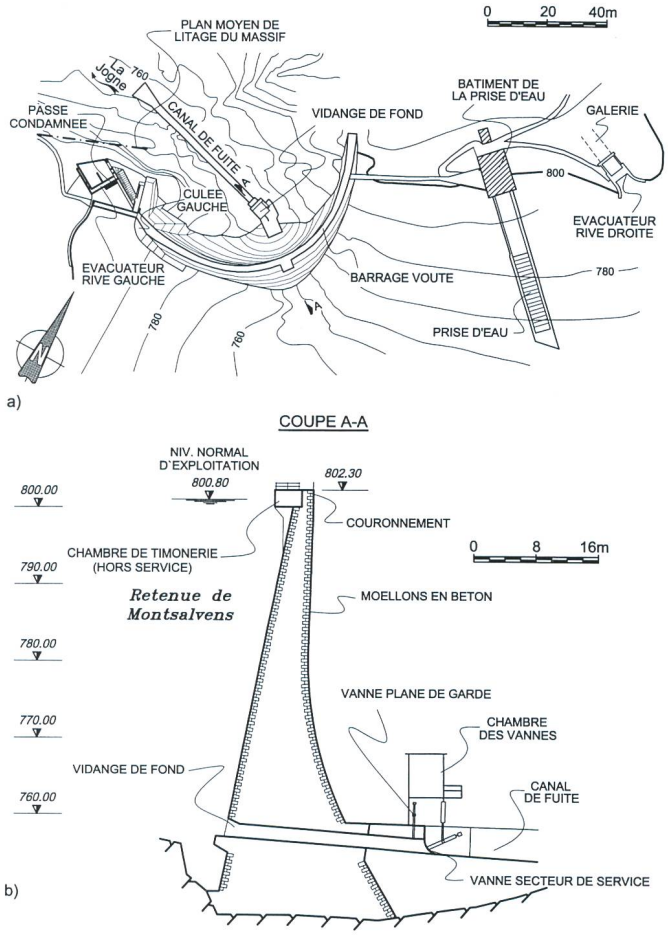
4.1 Généralités

Le bureau d'ingénieurs Lombardi SA a été mandaté en 1994 par les Entreprises Electriques Fribourgeoises pour compléter les études précédentes de manière à mieux cerner les conditions de sécurité du barrage et de ses appuis. Les nouvelles analyses démontrent que l'état d'équilibre de l'appui rive gauche du barrage se situe à la limite du comportement élastique; il y a lieu notamment de craindre que les déformations du massif d'appui puissent subitement s'intensifier à la suite d'un nouvel éboulement au droit de la falaise ou d'infiltrations d'eau dans le massif d'appui, provoquées par une secousse sismique. La capacité de décharge de l'aménagement est également jugée insuffisante. Ces conclusions ont conduit à définir les interventions retenues nécessaires pour assurer un comportement satisfaisant de l'aménagement conformément aux directives de l'Office fédéral de l'économie des eaux. Les principaux aspects de ces interventions sont contenus dans un avant-projet qui traite du renforcement de la stabilité de l'appui en rive gauche, de l'amélioration du système d'auscultation du barrage et de son appui ainsi que du renouvellement des évacuateurs de surface situés sur les deux rives.

Le projet d'assainissement du barrage, présenté ci-après, a été établi en 1997. Son élaboration et le suivi des travaux qui ont débuté la même année ont été confiés au Groupement d'ingénieurs pour la réhabilitation du barrage de Montsalvens (GIREHMON) constitué des bureaux d'ingénieurs: Lombardi SA (Minusio), Barras Ingénieurs-Conseils SA (Bulle) et Gicot Géotechnique (Fribourg).

4.2 Renouvellement des évacuateurs

L'évolution des critères de sécurité en matière d'évacuation des crues a conduit en 1994 à une vérification des caractéristiques hydrologiques et hydrauliques de l'aménagement de Montsalvens. Cet examen, qui visait notamment à définir le comportement de la retenue lors d'événements extrêmes, a mis en évidence l'insuffisance de la capacité de décharge disponible. Cette situation associée



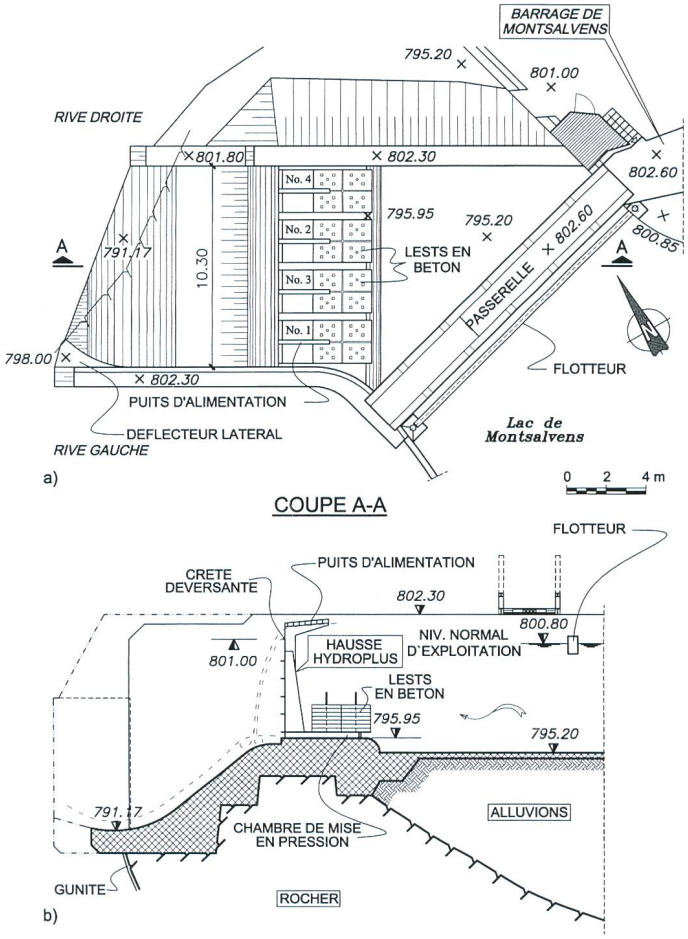


Figure 4. Barrage de Montsalvens tel qu'il se présentait avant les travaux d'assainissement, a) vue en plan, b) section en clef de voûte. Figure 5. Evacuateur en rive gauche après les travaux de renouvellement a) situation, b) coupe.

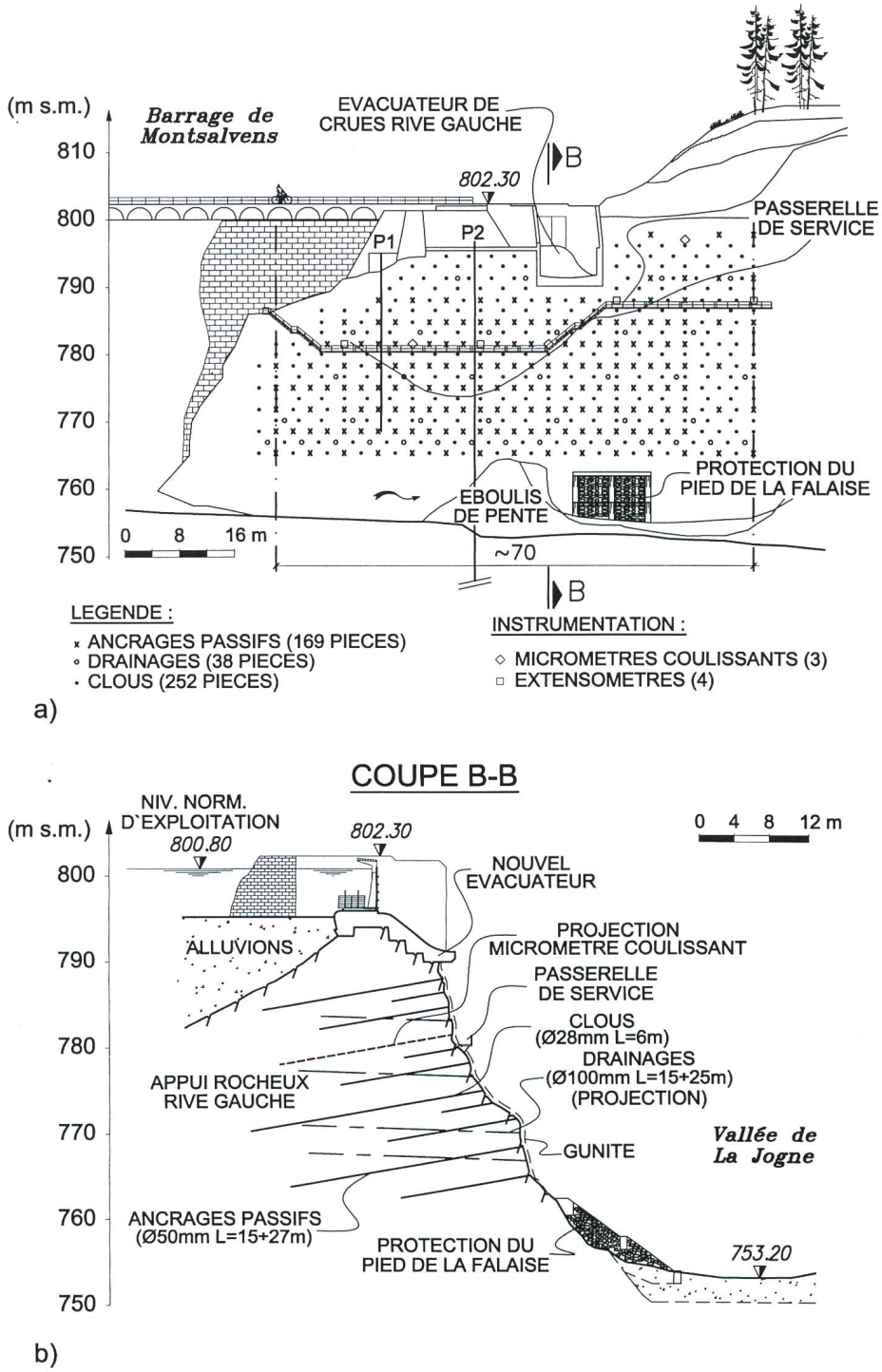


Figure 6. Appui en rive gauche, mesures de confortement a) vue générale, b) coupe.

à la vétusté des équipements hydromécaniques ont rendu nécessaire l'assainissement des évacuateurs de crues situés sur les deux rives.

Les caractéristiques des crues extrêmes pour la Jogne au droit du barrage de Montsalvens ont été définies sur la base des résultats de l'étude hydrologique réalisée à la fin des années 1980. La détermination du débit de pointe des crues exceptionnelles pour l'aménagement résulte d'estimations des débits spécifiques applicables dans la région des Préalpes fribourgeoises pour des bassins versants similaires. Pour la crue millénale, définie comme crue de projet, le débit spécifique de pointe est fixé à 2 $m^3/s/km^2$ et conduit à un débit de pointe dans la Jogne au droit de la retenue de 346 m^3/s. Pour le déluge, le débit de pointe est admis 1,5 fois la valeur de celui de la crue millénale, soit 519 m^3/s.

Pour ce qui concerne l'évacuateur en rive droite les travaux ont consisté essentiellement dans le remplacement de la vanne segment par une vanne glissière aux dimensions identiques, manœuvrée localement ou à distance depuis la centrale de Broc. Les caractéristiques hydrauliques de l'ouvrage en rive droite n'ont été de ce fait que peu modifiées par le projet.

Pour l'évacuateur en rive gauche, tel qu'illustré à la figure 5, les travaux ont intéressé non seulement le renouvellement des organes mobiles mais également un accroissement de la capacité de décharge afin d'assurer le passage de la crue millénale sans débordement par dessus le couronnement du barrage. Un abaissement du seuil et une optimisation de ses formes hydrauliques ont élevé la capacité de décharge de l'ouvrage jusqu'à 300 m^3/s. L'ouvrage d'une largeur totale de 10,3 m est équipé de quatre hausses fusibles du type Hydroplus [2, 3], d'une hauteur de 5,05 m, posées sur un seuil à la cote 795,95 m s.m. Le fait de pouvoir considérer l'évacuateur en rive gauche comme ouvrage auxiliaire pour le passage des crues a contribué favorablement à la mise en œuvre des hausses. Cette solution originale permet, en comparaison avec un ouvrage conventionnel, une significative réduction des coûts de construction, d'exploitation et de maintenance. La crête déversante des hausses est rectiligne et se situe à la cote 801,00 m s.m., soit 0,20 m au-dessus du niveau normal d'exploitation de la retenue. Chaque hausse est munie d'un puits d'alimentation vertical relié à la chambre de mise en pression et de lests en béton dimensionnés pour permettre son basculement à la cote de retenue voulue. Les basculements successifs des hausses avec un niveau de retenue croissant libèrent progressivement de nouvelles sections pour l'évacuation des crues. Les essais conduits en 1997 sur les modèles hydrauliques du déversoir ont permis de fixer de manière définitive la cote du puits de chacune des hausses ainsi que la cote de basculement qui lui est associée. A l'aval du seuil, l'eau est accélérée sur le coursier avant de rejoindre la Jogne par une chute de 40 m. Le coursier se termine en saut de ski de manière à éloigner le jet de la falaise et favoriser sa diffusion dans l'air. Pour prévenir toute déstabilisation du pied de la falaise au droit de la zone d'impact du jet, un ouvrage de protection y a été réalisé. Cet ouvrage est constitué d'une enceinte de confinement en béton armé remplie de blocs prélevés sur le site et scellés avec du béton.

4.3 Confortement de l'éperon

Les travaux de confortement de l'appui gauche du barrage, illustrés schématiquement à la figure 6, visent d'une part à protéger la falaise contre tout risque d'éboulement superficiel et à augmenter la résistance au cisaillement le long des plans de litage d'autre part.

Pour ce qui concerne la protection superficielle contre l'effet du gel et de la végé-

tation, les travaux ont comporté le clouage de la paroi rocheuse sur une surface totale supérieure à 1900 m² à l'aide de 252 boulons d'un diamètre de 28 mm et d'une longueur de 6 m ainsi que l'application en surface d'un béton projeté. Les boulons ont été scellés au coulis de ciment et disposés à raison d'un élément pour environ 7,5 m² de falaise.

L'augmentation de la résistance au cisaillement le long des plans de litage du massif est assurée mécaniquement au moyen de 169 barres d'armature entièrement scellées dans le rocher au moyen de coulis de ciment. Les barres, d'un diamètre de 50 mm, présentent une longueur atteignant 27 m de manière à assurer le monolithisme de l'ensemble du massif. Les ancrages ont été exécutés depuis la falaise et orientés selon une perpendiculaire au litage moyen du massif avec une inclinaison de 10° sous l'horizontale. La détermination du nombre de barres ainsi que leur disposition sur la paroi se sont basées sur les résultats d'une évaluation des conditions de stabilité du massif avant et après la mise en place des ancrages. Cette analyse du comportement structurel de l'éperon a été réalisée par un calcul numérique bidimensionnel aux éléments finis qui prend en considération la stratigraphie du massif. Le calcul élastique des contraintes normales et tangentielles au plan de stratification moyen permet en application du critère de rupture de Mohr-Coulomb d'évaluer le coefficient de sécurité au glissement pour chaque élément de la discrétisation du massif. La mise en œuvre des ancrages a été modélisée par une augmentation de la cohésion le long des plans de litage du rocher. Pour permettre l'optimisation des mesures de confortement, les calculs de stabilité ont été conduits avec deux modèles du massif. Le premier modèle (modèle I), tel qu'illustré à la figure 7, présente une hauteur de 32,5 m et une largeur maximale au pied de 35 m; il reproduit la section type de l'éperon au droit de l'appui du barrage selon une perpendiculaire à la direction moyenne des plans de litage. Le second modèle (modèle II), d'une hauteur de 40 m et une largeur maximale à la base de 35 m, représente la section type du massif en aval de l'appui. A relever que les parois amont des deux modèles ne correspondent pas aux limites effectives du rocher. Il a été retenu prudent pour le calcul statique de ne considérer que la partie du massif rocheux conforté avec des ancrages passifs. La limite amont du modèle est donnée par une fissure parallèle à la stratification du rocher avec un pendage de 80°, dans laquelle une pression d'eau peut s'installer. Enfin, le pied du modèle situé à la cote 755 m s.m. est admis encastré alors que les autres bords sont considérés libres.

Les charges considérées pour la simulation comprennent le poids propre du massif, la pression hydrostatique amont, la poussée du barrage pour le modèle I et les charges sismiques. Ces dernières sont intro-

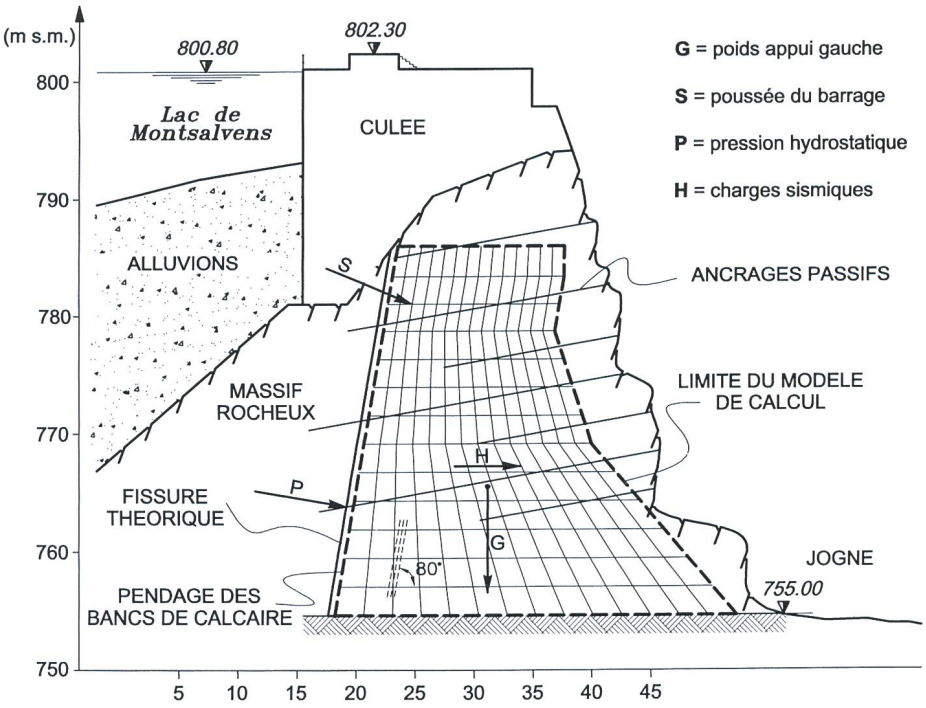


Figure 7. Appui rive gauche, section type au droit de la culée en rive gauche avec sa modélisation pour les calculs numériques (modèle I).

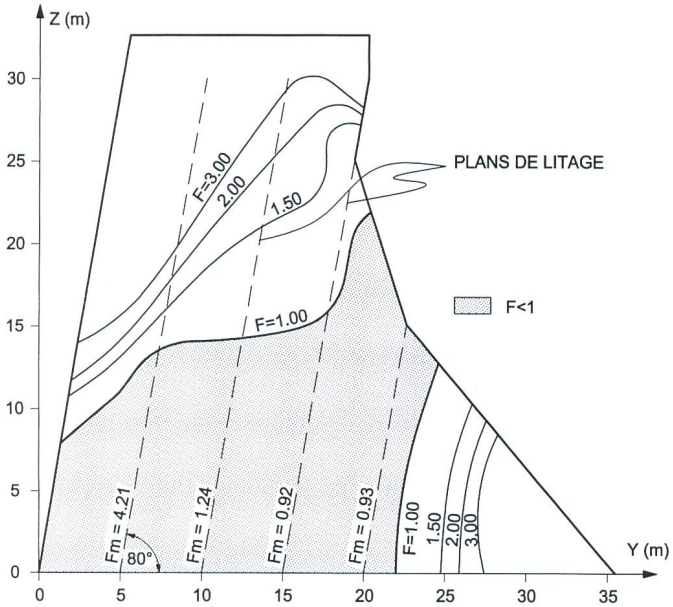


Figure 8. Résultats de l'analyse de la stabilité du massif rocheux non conforté (modèle I) pour le cas de charge sismique maximale (accélération horizontale 0,29 g).

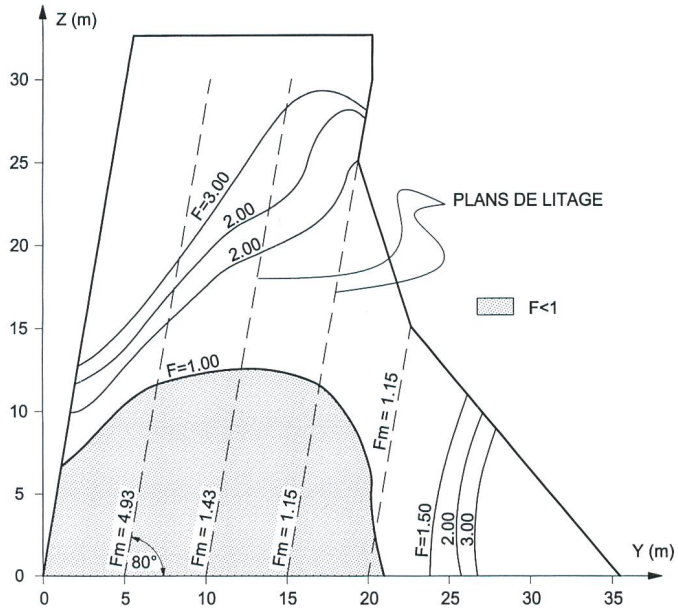


Figure 9. Résultats de l'analyse de la stabilité du massif rocheux conforté (modèle I) pour le cas de charge sismique maximale (accélération horizontale 0,29 g).

duites dans les modèles sous la forme de forces pseudostatiques équivalentes aux forces d'inertie des masses en présence. L'accélération horizontale, qui correspond au séisme de projet, est fixée à 0,1 g alors que pour la situation extrême, le séisme maximal est défini par une accélération de 0,29 g.

Les caractéristiques géomécaniques du rocher considérées le long des bancs ont été évaluées sur la base des résultats des essais en laboratoire effectués en 1977. Le poids propre est fixé à 2,7 t/m^3 et l'angle de frottement interne retenu s'élève à 20°. La cohésion a été déterminée en admettant que le massif non conforté se trouve proche d'un état d'équilibre limite. Ainsi selon les résultats des simulations numériques pour la situation du massif non confortée qui considère une secousse sismique de 0,1 g, l'équilibre limite le long d'un des bancs est atteint avec une cohésion de 40 t/m^2. Cette valeur a été admise pour l'ensemble des simulations. Il est à relever que dans la configuration précédente, avec une secousse sismique de 0,29 g, la stabilité du massif n'est alors plus assurée. La figure 8 illustre, pour le modèle I et la situation décrite ci-dessus, les courbes le long desquelles le coefficient de sécurité F au glissement entre les différents bancs reste constant et les valeurs des coefficients de sécurité moyens F_m le long de quatre plans de stratification représentatifs.

L'amélioration de la cohésion liée à la mise en place d'un ancrage passif de diamètre 50 mm a été évaluée à 1130 kN. En considérant un coefficient de sécurité de l'ancrage fixé à 1,8 pour le cas de dimensionnement, l'accroissement de la cohésion par la mise en œuvre d'une barre d'armature pour 13 m^2 de falaise s'élève à 4,8 t/m^2, soit une augmentation de 12 %. Pour le cas de charge extrême, qui considère le séisme maximal, le coefficient de sécurité de l'ancrage est fixé à 1 et l'accroissement de la cohésion pour cette configuration s'élève à 8,7 t/m^2, soit une augmentation de 22 %.

Les simulations conduites pour le massif conforté ont abouti à une élévation générale d'environ 20 % des coefficients de sécurité F et F_m. Le facteur de sécurité moyen dans le plan critique s'élève à 1,33 pour le cas de dimensionnement et atteint 1,15 pour le cas de charge extrême.

La figure 9 illustre l'influence du confortement pour le modèle I et le cas de charge extrême qui considère la secousse sismique maximale (accélération horizontale 0,29 g). A relever la persistance d'une zone à la base amont du massif où le facteur F reste inférieur ou équivalent à 1. Toutefois la sécurité moyenne F_m le long d'un plan de litage reste supérieure à l'unité pour l'ensemble du massif.

L'exécution de 38 forages de drainage a pour but de réduire au minimum la pression d'eau dans le massif rocheux. Etant donné que la perméabilité du massif est fortement favorisée dans le sens subvertical par la stratification du massif, une disposition subhorizontale des drains a été retenue judicieuse pour optimiser leur efficacité. Les drains, d'un diamètre de 100 mm pour une longueur comprise entre 15 m et 25 m, sont répartis sur l'ensemble de la paroi et équipés de résistances électriques pour éviter l'obturation de leur tête par formation de glace en hiver.

4.4 Mise à jour du système d'auscultation

Compte tenu de la singularité du comportement du barrage de Montsalvens, le système d'auscultation doit intéresser la surveillance du barrage et de son appui en rive gauche. L'instrumentation en place a été jugée insuffisante pour une évaluation satisfaisante du comportement des ouvrages et en particulier non appropriée pour vérifier l'efficacité des travaux entrepris sur l'éperon.

L'instrumentation d'auscultation complémentaire, illustrée schématiquement à la figure 10, intéresse le barrage et son appui gauche.

Les déformations du barrage sont relevées par le pendule inversé (P3), d'une longueur totale de 80 m, placé en clé de voûte (voir figure 10). Comme le corps du barrage n'est pas accessible par des galeries, la mesure des déplacements est effectuée au moyen du système «Hydro-Québec», qui permet la détermination des déplacements horizontaux à différents niveaux au moyen d'un appareil dit «autocentreur». La mise en place de neuf capteurs de température (T1 à T9) dans le corps de l'ouvrage complète les interventions sur le barrage.

Pour l'éperon rocheux, l'instrumentation complémentaire est plus conséquente. Les déformations d'ensemble du massif sont relevées par le pendule inversé (P2) d'une longueur totale de 66 m, placé sur la plate-forme de l'appui gauche du barrage (voir figure 6). Les déplacements différentiels du massif rocheux sont relevés par les trois micromètres coulissants et les quatre extensomètres qui sont répartis dans le massif d'appui et accessibles par une passerelle fixée à la paroi rocheuse. Les extensomètres E1 et E2 sont également munis de thermomètres pour le suivi des températures du rocher à proximité de la surface. Enfin, l'exécution de sept piézomètres en rive gauche, placés dans cinq forages distincts, complète l'instrumentation de l'appui.

4.5 Déroulement des travaux

Les travaux d'assainissement de l'aménagement ont débuté au mois de mai 1997 par le montage, au moyen d'une grue installée au voisinage de l'évacuateur de crues en rive gauche, de l'échafaudage en correspondance de la zone déjà gunitée de la paroi, tel qu'illustré à la figure 11. Le montage du reste de l'échafaudage a été précédé du nettoyage de la falaise de toute végétation et blocs ins-

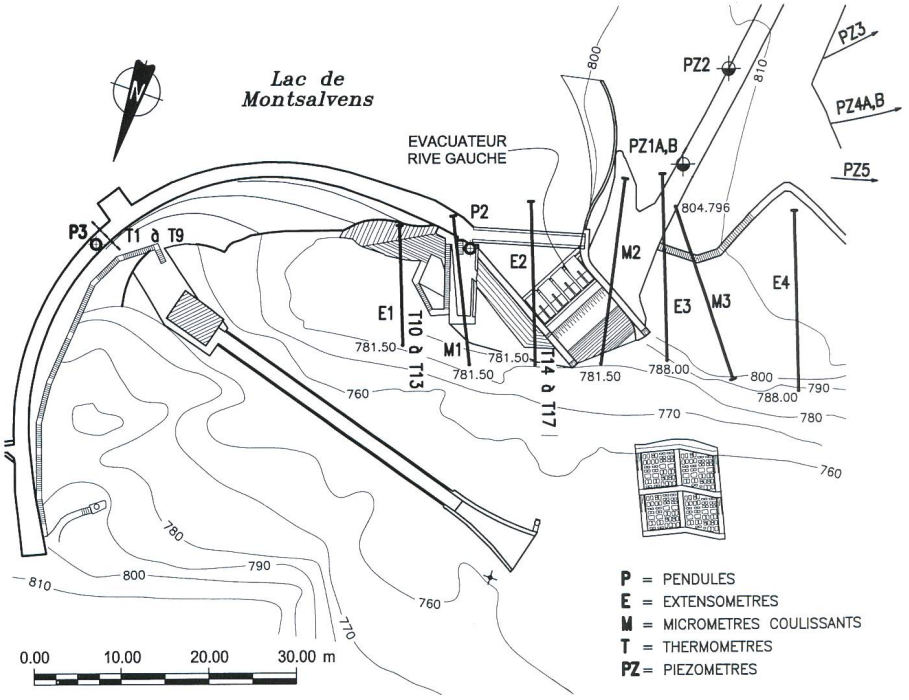


Figure 10. Mise à jour du système d'auscultation du barrage de Montsalvens.

tables. Ces travaux acrobatiques ont été réalisés essentiellement à partir d'une nacelle suspendue à la grue.

La roche ainsi mise à nue s'est révélée très fracturée en surface et marquée parfois de discontinuités plus ou moins importantes (voir figure 11). La pose d'un treillis d'armature et l'application d'une première couche de gunite en correspondance de cette zone ont permis de se protéger contre tout risque de chute de blocs sur la falaise.

Les perforations pour les ancrages, les drainages et les instruments de mesures ont été exécutées par niveaux en progressant du bas vers le haut. La mise en œuvre des ancrages a été précédée d'un contrôle de la perméabilité des forages et éventuellement de leur étanchement au moyen d'un coulis de ciment. La reperforation, exécutée quelques heures après l'injection, a fait l'objet d'un nouveau contrôle pour sa réception définitive. Les barres d'armature, munies d'écarteurs pour garantir un enrobage suffisant, ont été mises en place au moyen de la grue puis scellées sur toute leur longueur avec un coulis de ciment. L'application d'une deuxième couche de gunite étendue à toute la paroi a complété les travaux sur la falaise. Les forages des deux pendules et des piézomètres ont pu être réalisés indépendamment de l'avancement des travaux sur la falaise. Cette première phase des travaux a été achevée en décembre 1997.

La réalisation du nouvel évacuateur en rive gauche a débuté en mars 1998 avec le montage d'un batardeau provisoire en amont de l'ouvrage. La démolition puis la reconstruction du nouvel ouvrage s'est exécutée jusqu'à la fin juillet 1998. L'abaissement de la retenue et le démontage du batardeau en août 1998 a permis d'aménager la zone d'approche au déversoir et de débuter les travaux de l'ouvrage de protection en pied de falaise. Les travaux d'assainissement de l'évacuateur en rive droite ont débuté en septembre 1998 avec le démontage de la vanne en place et se sont achevés avec la mise en service de la nouvelle vanne glissière au mois de novembre 1998. Le montage des hausses fusibles sur le seuil de l'évacuateur de crues en rive gauche et le contrôle du bon fonctionnement du système d'auscultation à la fin novembre 1998 ont achevé les travaux de réhabilitation du barrage de Montsalvens.

Figure 11. Appui rive gauche du barrage de Montsalvens: montage de l'échafaudage et travaux de nettoyage de la falaise.

5. Conclusions

Les importants travaux de réhabilitation entrepris au barrage de Montsalvens durant la période s'étendant de mai 1997 à novembre 1998 ont permis d'adapter l'aménagement, âgé de plus de 75 ans, aux exigences actuelles en matière de surveillance et de sécurité des barrages.

La réalisation d'un nouvel évacuateur de crues en rive gauche, d'une capacité hydraulique d'environ 300 m^3/s, assure l'évacuation des crues extrêmes dans le respect des directives en vigueur. Pour l'événement millénal, caractérisé par un débit de pointe de 346 m^3/s, la crue peut être évacuée sans débordement par dessus le barrage tout en garantissant un débit total évacué inférieur ou équivalent au débit de pointe de la crue incidente. A relever finalement que le barrage de Montsalvens est le premier ouvrage en Suisse à être équipé de hausses fusibles du type Hydroplus pour le contrôle des crues.

Les importants travaux engagés en rive gauche pour le confortement du massif d'appui du barrage au moyen d'ancrages passifs et de drains, d'une protection superficielle à l'aide de boulons et de gunite doivent empêcher ou tout au moins limiter l'accroissement des déplacements plastiques de l'appui observés depuis la mise en eau de l'ouvrage en 1921. Les travaux mis en œuvre accroissent la stabilité du massif et empêchent notamment un nouvel éboulement, tel que celui survenu en 1944, qui serait préjudiciable à la sécurité de l'aménagement.

Finalement l'installation d'une instrumentation complémentaire pour la surveillance du barrage assure un meilleur suivi non seulement du barrage mais également de son appui gauche. Ce nouveau système fournira les données pour vérifier l'efficacité des travaux de stabilisation réalisés.

Références, Bibliographie

[1] Entreprises Electriques Fribourgeoises: «L'usine de Broc et son bassin d'accumulation (lac de Montsalvens)», Bulletin technique de la Suisse romande, 1928.

[2] Colloque: «Réhabilitation des barrages du canton de Fribourg», 100e anniversaire de l'Ecole d'ingénieurs de Fribourg, Fribourg 1998.

[3] *D. Golliard, R. Bremen, S. Chevalier*: «Réhabilitation of the Montsalvens dam», International Congress of Large Dams, Barcelona 1998, pp. 1419 – 1426.

[4] *R. Oberlé, R. Portier, M. Wenger*: «Modernisation de la vidange de fond du lac de Montsalvens», Bulletin technique de la Suisse romande N° 21, 1969.

[5] *O. Gicot*: «Montsalvens», Barrages suisses – surveillance et entretien, ouvrage publié à l'occasion du XVe Congrès International des Grands Barrages, Lausanne 1985.

[6] *H. Gicot*: «Une méthode d'analyse des déformations des barrages», comptes rendus du XIIe Congrès International des Grands Barrages, Mexico 1976, vol. IV, C1.

[7] *A. Barras, R. Clément, B. Comte, C. Dubas, D. Golliard:* «La nouvelle conduite forcée et les organes de fermeture de sécurité de l'aménagement hydro-électrique de Montsalvens-Broc des Entreprises Electriques Fribourgeoises EEF», eau, énergie, air, Heft 9, 1988.

Adresses des auteurs

Philippe Lazaro, bureau d'ingénieurs Lombardi SA, CH-6648 Minusio.

Daniel Golliard, Entreprises Electriques Fribourgeoises, CH-1636 Broc.