

Zeitschrift: Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria
Herausgeber: Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband
Band: 90 (1998)
Heft: 3-4

Artikel: Conception et réalisation des ouvrages de génie civil
Autor: Jaccard, M. Alain
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-939384>

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: 10.02.2026

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

Aménagement Cleuson-Dixence

Conception et réalisation des ouvrages de génie civil

M. Alain Jaccard

1. Introduction

L'usine souterraine de Bieudron, avec ses 150 000 m³ de roche excavée et ses 1200 MW de puissance installée est l'usine électrique la plus puissante de Suisse. Elle comprend trois groupes Pelton à axe vertical d'une puissance nominale de 400 MW.

La disposition en souterrain de trois unités de cette puissance a conduit les projeteurs à concevoir des cavernes de grandes dimensions dont la stabilité a nécessité des investigations, études et calculs poussés, ceci compte tenu d'un rocher de qualité médiocre.

La réalisation des excavations en moins de deux ans de travaux a également été un défi relevé avec brio par les directions générales et locales des travaux, les ingénieurs de projet et de la planification, du consortium d'entrepreneurs et finalement de tous les travailleurs engagés dans cette réalisation.¹

Les travaux d'excavation proprement dits commencés en juillet 1993 se sont terminés en grande majorité en juin 1995.

Ils ont dès lors laissé la place au bétonnage du gros œuvre et au montage des pièces principales des fondations des machines. Ces travaux se sont terminés au printemps 1997 et ont cédé définitivement la place aux montages électro- et hydromécaniques ainsi qu'aux travaux du second œuvre et de finition.

Il est donc maintenant possible de tirer un premier bilan de ces travaux de génie civil et d'analyser les difficultés rencontrées et les moyens mis en œuvre pour les surmonter.

2. Situation générale de l'usine de Bieudron

La nouvelle usine souterraine de Bieudron est implantée à l'intérieur de la falaise constituant la rive gauche du Rhône, entre les villages de Riddes et d'Aproz, directement à l'amont de l'usine souterraine existante de Nendaz (figure 1).

Cette usine est composée de trois cavernes principales et d'un grand nombre de galeries d'accès, de connexion, de fuite, de sécurité, etc.

Les trois cavernes principales ont été implantées selon trois axes parallèles, orientés à travers banc, afin d'avoir l'orientation de la schistosité la plus favorable possible pour la stabilité des grandes cavités.

Nous trouvons de l'aval vers l'amont (par rapport au Rhône) mais de l'amont vers l'aval, par rapport au sens d'écoulement de l'eau dans la centrale (figures 2 à 4):

¹ Direction générale des travaux et représentant du Maître de l'ouvrage:
Energie Ouest Suisse (EOS), Service Cleuson-Dixence, Sion

Projet et direction locale des travaux:
Communauté Valaisanne d'Ingénieurs et Bonnard & Gardel Ingénieurs Conseils SA (CVI-BG)

Consortium Usines de Bieudron:
(CUB) pour les travaux de génie civil comprenant: Walo Bertschinger SA, Sion, Schmalz SA, Sion, Kopp AG, Brig, Theiler + Kalbermatten AG, Brig, Liebhauser & Délèze SA, Nendaz, F. Michelet & Cie SA, Nendaz.

- la galerie d'accès au répartiteur et du répartiteur qui constitue le prolongement horizontal du puits blindé amenant l'eau depuis le barrage de Grande Dixence. Ce répartiteur distribue l'eau dans les trois groupes de la centrale de Bieudron. Précédemment, cette galerie (section 35 m²) a servi d'accès à la caverne de montage du tunnelier (figures 2 à 4, n^{os} 15, 7, 2);
- la chambre des vannes, caverne de 80 m de long, 9 m de large et 12 m de haut, où seront montées prochainement les trois vannes sphériques, séparées de la caverne principale afin d'éviter une inondation en cas d'accident sur les vannes (n^o 8);
- la caverne des machines, cavité principale, de 100 m de long, 25 m de large et 39 m de hauteur maximale. Elle accueille les trois groupes turbo-alternateurs et les locaux des auxiliaires (n^o 3);
- une galerie de grandes dimensions pour le passage des câbles et des transformateurs; ces derniers étant situés dans trois cavernes (cellules) de 15×15 m en plan pour une hauteur de 13 m, situées en bordure de la galerie d'accès et au droit des groupes turbo-alternateur. Ces cellules sont isolées du reste de l'aménagement pour des raisons de protection incendie (n^{os} 14, 19);
- la galerie de fuite reliant les trois rameaux de fuite à l'ouvrage de restitution des débits turbinés au Rhône (n^o 20);
- perpendiculairement à ces cavernes, à l'amont des turbines se trouvent les trois rameaux répartiteurs reliant le répartiteur aux vannes sphériques, puis, à l'aval de ces dernières, aux bâches spirales. Les rameaux se transforment ensuite en rameaux de fuite à l'aval des turbines en passant sous les cellules des transformateurs et la galerie des barres pour venir rejoindre la galerie de fuite (n^{os} 4, 5, 6).

Il s'est avéré économiquement et techniquement plus avantageux de placer le canal de fuite, la galerie des câbles et les cellules des transformateurs, côté amont du Rhône, afin de réduire la longueur de ces ouvrages au maximum. En effet, le canal de fuite et la galerie des câbles sont des ouvrages beaucoup plus onéreux que la galerie d'accès au répartiteur. Cette disposition a permis également de réduire la distance à parcourir avec les câbles 380 kV coûtant environ fr. 7000.- le mètre linéaire. La galerie des câbles se situe ainsi juste en face du nouveau poste électrique 380/220 kV de Chamason.

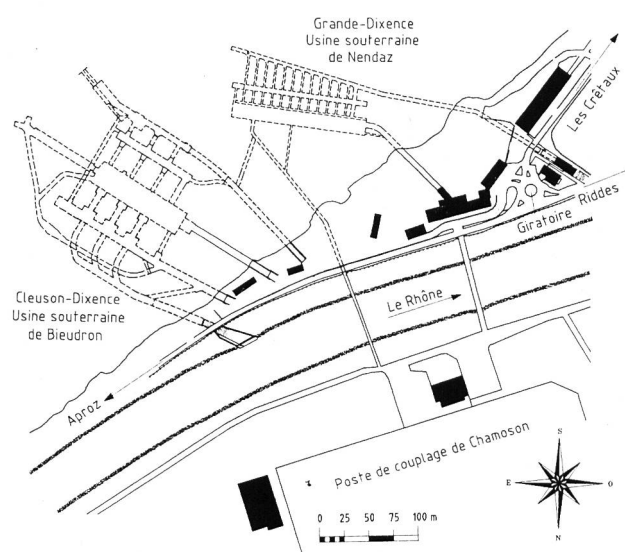


Figure 1. Usine de Bieudron – Situation.

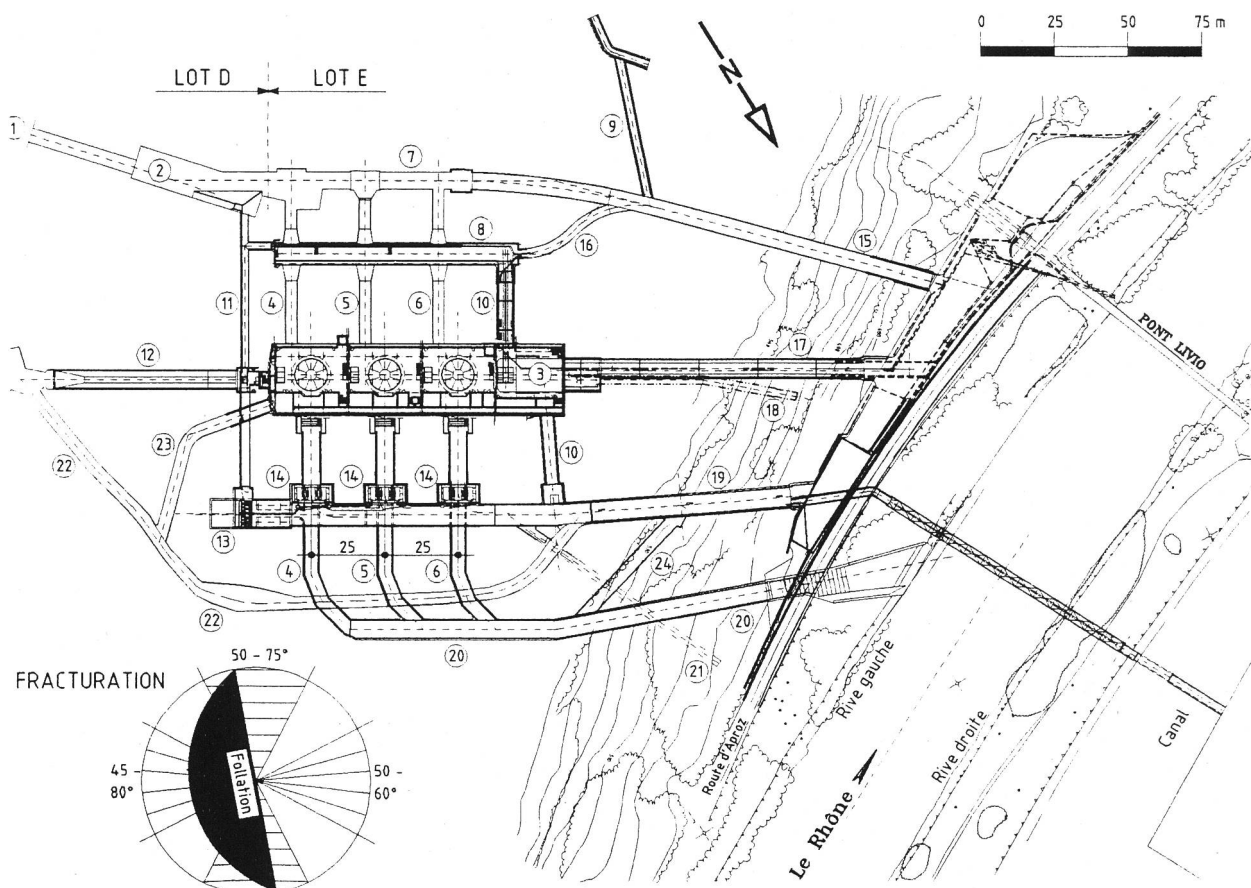


Figure 2. Usine de Bieudron – Vue en plan.

- | | | |
|-----------------------------------|---|---|
| 1 Puits blindé | 9 Galerie de liaison avec l'usine de Nendaz | 17 Galerie d'accès principale |
| 2 Chambre de montage | 10 Galerie de liaison | 18 Galerie d'extraction d'air |
| 3 Caverne principale des machines | 11 Galerie de sécurité | 19 Galerie des transformateurs et des câbles 400 kV |
| 4 Groupe 1 | 12 Réservoir d'eau de réfrigération | 20 Canal de fuite |
| 5 Groupe 2 | 13 Local décuvage | 21 Galerie d'aspiration d'air |
| 6 Groupe 3 | 14 Cellules des transformateurs | 22 Galerie cub (galerie d'accès) |
| 7 Répartiteur | 15 Galerie d'accès au répartiteur | 23 Galerie d'accès au fond de l'usine |
| 8 Chambre des vannes sphériques | 16 Galerie d'accès chambre des vannes | 24 Galerie d'accès au canal de fuite |

Cette disposition procure trois accès indépendants, donnant une grande flexibilité durant la construction. Ces trois accès indépendants peuvent également servir de sorties de secours indépendantes pendant la construction et l'exploitation de cette usine. A noter encore qu'une galerie de sécurité relie perpendiculairement les trois cavernes principales entre elles au fond de l'usine, côté montagne.

Les galeries d'accès (n°s 15, 17 et 19) ont une longueur d'environ 100 m, ce qui place les cavités principales sous une couverture rocheuse variant entre 120 et 210 m.

Les trois accès sont encore complétés par une galerie de contournement permettant d'accéder au fond de l'usine, au niveau de la salle des machines ainsi qu'à l'extrémité sud du réservoir de réfrigération (figures 2 et 4, n°s 22, 23).

Deux galeries de connexion supplémentaires relient perpendiculairement la caverne principale des machines à la chambre des vannes, d'une part et à la galerie des câbles, d'autre part (n° 10). Le volume total des excavations souterraines pour l'usine de Bieudron, sans compter le puits blindé, est de l'ordre de 150 000 m³ de roche en place.

Les ouvrages extérieurs se limitent aux trois portails des galeries d'accès, à l'ouvrage de restitution du débit turbiné et à la passerelle à câbles 380 kV pour la liaison avec le poste de couplage situé en rive droite du Rhône.

3. Equipements électromécaniques: principales caractéristiques

L'usine de Bieudron sera équipée pour chacune des trois unités de production (figure 3) de:

- groupe turbo-alternateur à axe vertical, d'une puissance de 423 MW, chute brute 1883 m;
- vanne sphérique, d'un diamètre de 1,4 m et d'un poids de 200 t, dimensionnée afin d'opérer sa fermeture en 150 s en cas d'urgence;
- turbine Pelton à cinq injecteurs, avec une roue d'un diamètre de 4,65 m pour un poids de 28 t. Elle tournera à une vitesse de 428 tours/min avec un débit maximum de 25 m³/s;
- alternateur 465 MVA (puissance nominale) refroidi à l'eau. Le stator et le rotor seront montés sur place. Le poids total de la masse tournante (rotor de l'alternateur avec l'arbre turbine et la roue Pelton) atteint 530 t;
- transformateur triphasé de 465 MVA transformant le courant de 20 à 400 kV et pesant 380 t;
- trois câbles 400 kV d'environ 500 m de long qui relieront le transformateur à la nouvelle sous-station SF6 située en rive droite du Rhône, et qui passeront sur le Rhône au moyen d'une passerelle métallique.

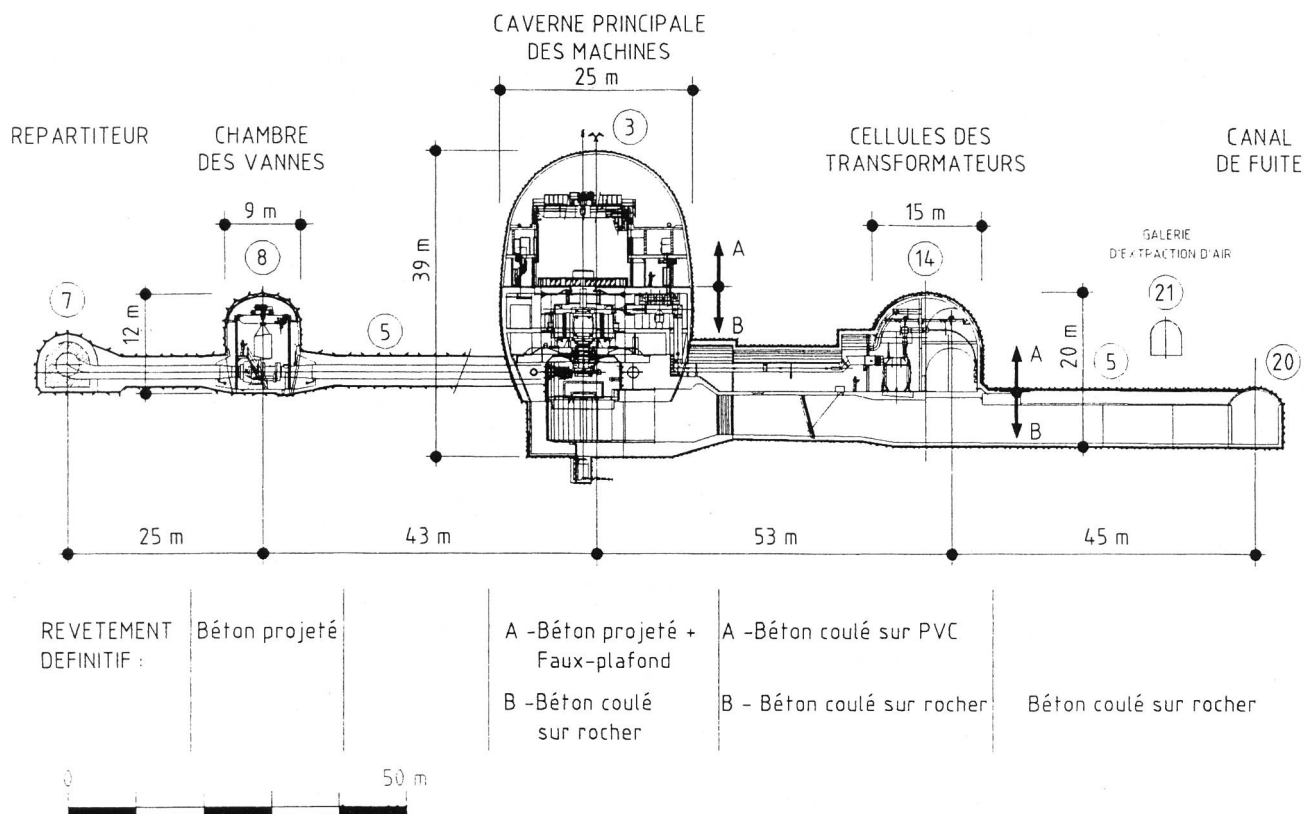


Figure 3. Usine de Bieudron – Coupe transversale.

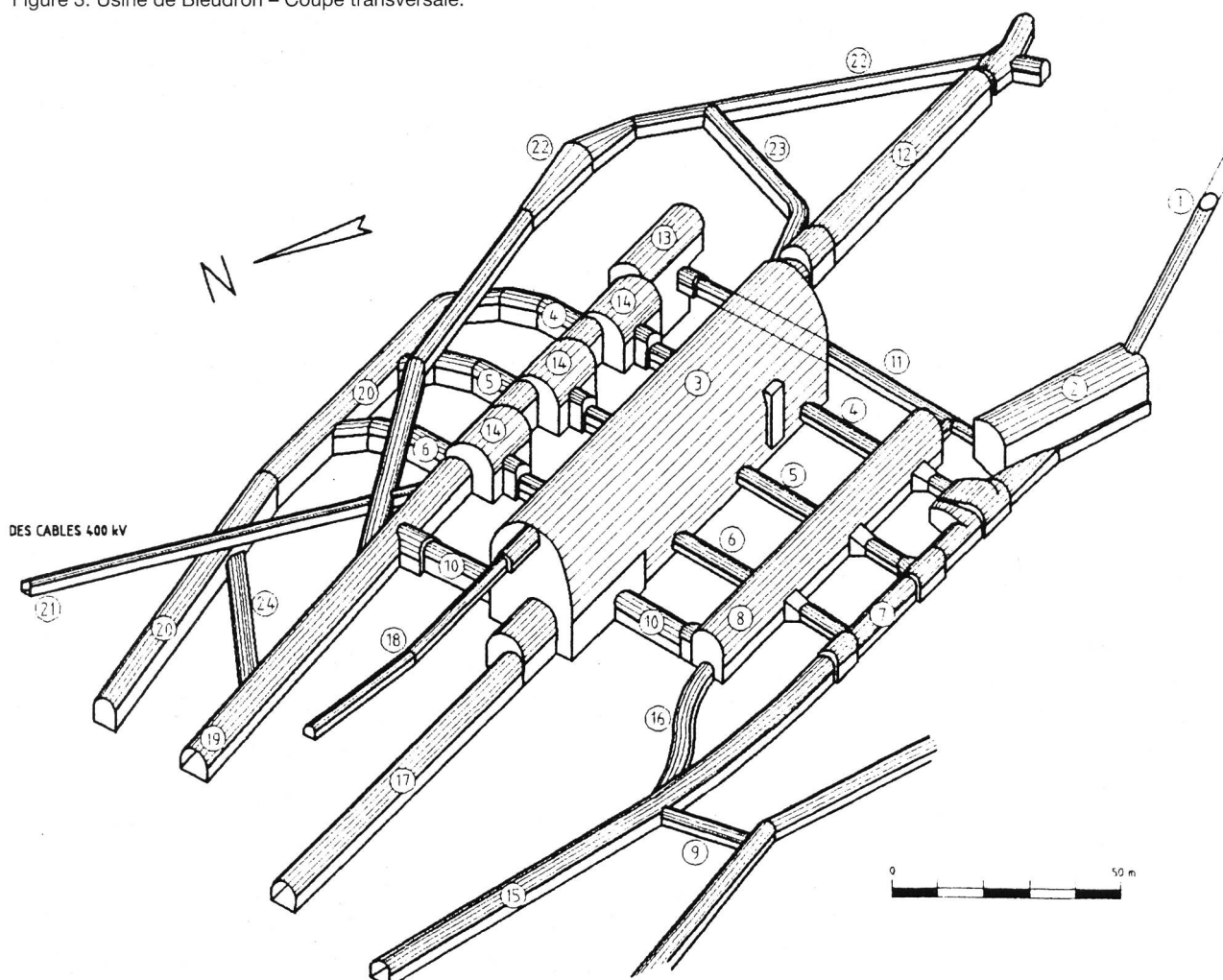


Figure 4. Usine de Bieudron – Perspective axionométrique. Légende voir figure 2.

4. Dimensionnement des cavernes

4.1 Géologie et géotechnique

Les conditions géologiques et géotechniques ont été définies sur la base de relevés et d'essais effectués dans une galerie de reconnaissance réalisée en 1989 et sur les relevés de l'usine existante de Nendaz (1955).

Le massif rocheux est constitué de grès plaquetés durs, en fine alternance avec des schistes grésos-calcaires mi-durs à durs (formation Grès et Schiste de St-Christophe) avec intercalations localisées d'écaillies triasiques d'épaisseur métrique à décimétrique, constituées de quartzite ou d'anhydrite. Le pendage des couches est de 45° E. Le massif est diaclasé selon plusieurs systèmes dispersés de fractures généralement fermées et parcouru localement de failles persistantes. L'orientation relative des principales discontinuités est reportée sur la figure 2. Les venues d'eau sont généralement très faibles mais fortement séléniteuses.

Le massif est géologiquement assez homogène mais mécaniquement anisotrope et fragile. Sa résistance dépend de l'orientation des contraintes et de l'état de perturbation de la roche (pic et résiduel). Les différents essais réalisés ont fourni les valeurs résumées par le tableau 1.

Tableau 1. Caractéristiques mécaniques.

Valeurs de pic			
σ_c [Mpa]	min. 11	max. 100	moy. < 60
σ_t [Mpa]	perp. 7 à 13	paral. 0,5 à 1	
E [Mpa]	perp. 3000	paral. 10 000	
φ [degrés]	35		
Cisaillement résiduel sur schistosité ou joints			
$\varphi = 25^\circ$	$C_r = 2 \text{ kPa} = 0,2 \text{ t/m}^2$		

On constate alors que les valeurs résiduelles sur joints ouverts ou failles sont très basses.

La qualité très moyenne de ce rocher doit donc être préservée et nécessite des précautions particulières à l'excavation, consistant, entre autres, à éviter des déformations et décompressions excessives et à limiter les ébranlements lors des minages.

4.2 Conception générale

Compte tenu de la chute exceptionnelle (1883 m de pression d'eau), de la fiabilité et de la sécurité voulue pour cet aménagement, il a été décidé d'opter pour un concept à cavernes séparées. La chambre des vannes, où des pressions exceptionnelles sont développées à l'intérieur des équipements (vannes et tuyauterie), doit être totalement séparée du reste de l'aménagement pour des raisons de risque d'inondation, alors que les transformateurs sont également séparés pour des raisons de risque d'incendie.

L'implantation des ouvrages résulte de la nécessité de se tenir à distance de l'usine existante, de faire déboucher les galeries d'accès sur l'étroite plate-forme comprise entre le pied de falaise et le Rhône et d'orienter les cavités principales perpendiculairement à la foliation. Compte tenu des dimensions des excavations et de la forte dispersion des fractures et failles, aucune orientation ne permettait d'éviter à coup sûr des diaclases subparallèles aux parements. Les différentes cavernes et galeries d'accès sont implantées en alignements pour simplifier le transport des pièces de grandes dimensions.

La conception des soutènements et revêtements est différenciée selon l'utilisation de la cavité (figure 3).

Tous les soutènements provisoires font appel à la technique du béton projeté avec adjonction de fibres métalliques et d'ancrages passifs à scellement continu.

Le soutènement définitif et le revêtement sont assurés:

- par une coque de béton projeté et des ancrages passifs et actifs permanents pour les cavernes de la chambre des vannes et la partie supérieure de la caverne principale des machines. Cette conception permet une large participation du rocher à la résistance du soutènement définitif, réduisant d'autant l'épaisseur du béton projeté et le nombre d'ancrages.
- A l'état définitif, les locaux d'exploitation sont isolés par un faux-plafond léger décollé du rocher;
- par un revêtement bétonné contre rocher pour les parties «hydrauliques», soit rameaux et canal de fuite ainsi que pour la partie inférieure de la caverne de l'usine;
- par un revêtement bétonné sur un lé d'étanchéité PVC pour les parties «électriques», soit galerie des barres et des câbles, caverne des transformateurs ainsi que pour la galerie d'accès à l'usine.

Tous les bétons en contact avec la roche sont résistants aux sulfates par utilisation de CPHS et de fumée de silice pour le béton projeté.

4.3 Caverne principale des machines

La caverne des machines est l'excavation majeure de l'ouvrage; elle représente un volume de 75 000 m³.

Le soutènement et le revêtement définitif de la caverne des machines est constitué d'une coque de béton projeté armé d'un double treillis K 335 (diamètre 8 mm et maillage de 150 mm) et d'ancrages passifs et actifs (figure 5).

La coque de béton projeté, d'une épaisseur totale minimale de 37 cm, est mise en place par voie humide et par couches successives en parallèle à l'excavation. Sa qualité est celle d'un BP 40/30 résistant aux sulfates.

L'ancrage systématique de la roche est assuré par:

- des boulons d'ancrages passifs permanents constitués d'une barre en acier (φ 30 à 40 mm) protégés contre la corrosion par une gaine ondulée PE et scellés au rocher sur toute la longueur par injection (système AVT). Ces ancrages, de 5 à 8 m de longueur, sont placés sur une maille régulière de 1,75×1,75 m;
- des tirants d'ancrages précontraints permanents classe 6 SIA, tendus à 750 kN ($V_z = 1500$ kN), d'une longueur libre de 15 et 18 m plus 7 m de scellement, placés sur une maille d'environ 25 à 35 m². Ces tirants sont mis en tension sur une tête spéciale permettant son enrobage complet dans la coque de béton projeté réalisée postérieurement.

La réalisation de ce type de soutènement permet de profiter au mieux des caractéristiques du massif d'accueil et de le faire participer au soutènement, mais elle nécessite une exécution parfaite de l'excavation (profilage) et une organisation sans faille du phasage des différents travaux. Elle est en ce sens particulièrement exigeante.

La partie inférieure de la caverne est soutenue provisoirement par un système béton projeté et ancrages à caractère provisoire. Les soutènements et revêtements définitifs étant assurés par les bétons de masse de fondation des groupes.

4.4 Cellules des transformateurs

Le soutènement et le revêtement définitif des cellules des transformateurs est constitué d'une voûte en béton non armé, coulé sur place contre le rocher d'une épaisseur de 40 cm.

L'étanchéité est assurée par un lé en PVC posé entre le rocher et le béton.

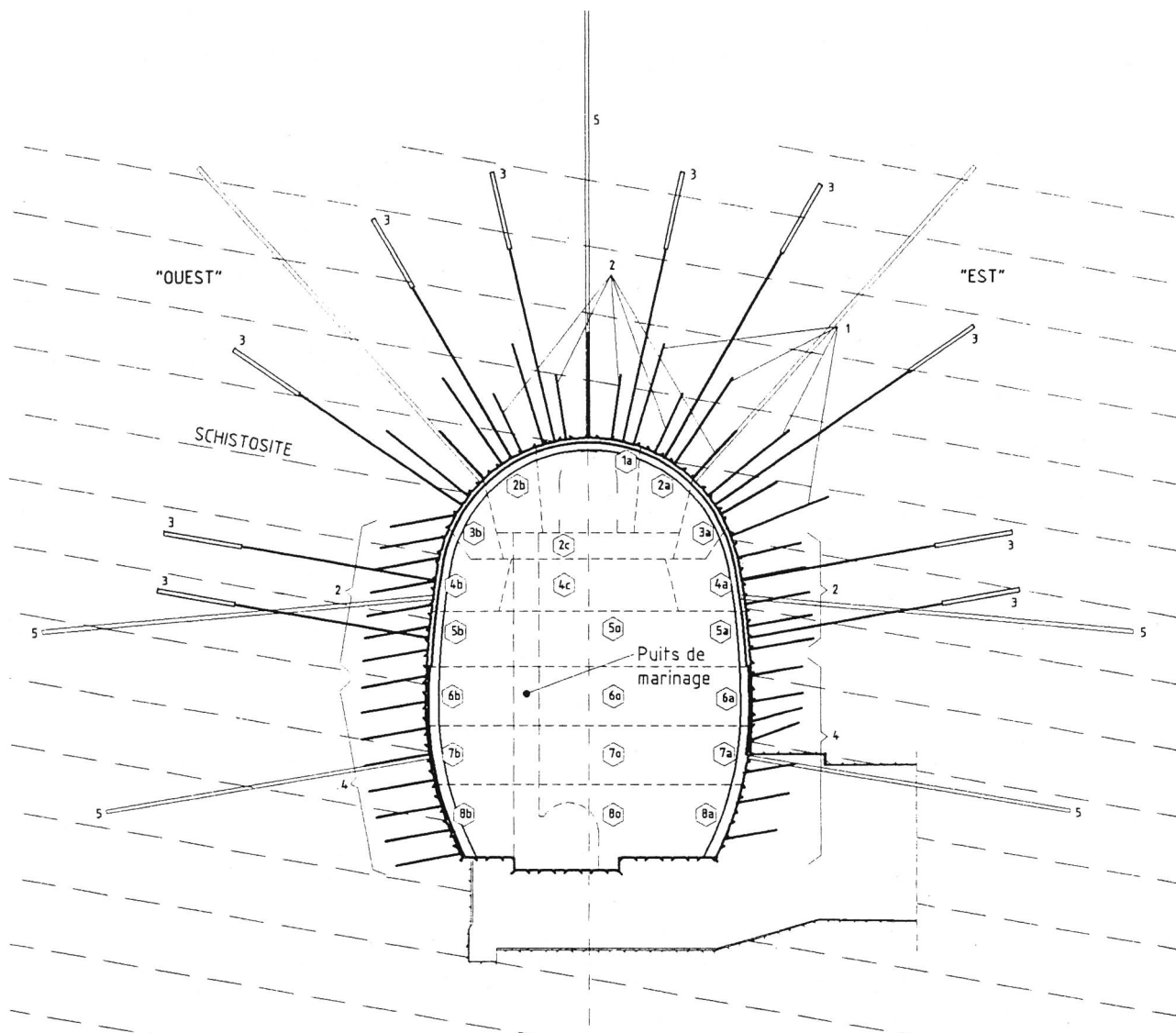


Figure 5. Caverne principale des machines, excavation et soutènement. 1 et 2 ancrages passifs permanents, 3 tirants précontraints, 4 ancrages passifs provisoires, 5 extensomètres.

4.5 Chambre des vannes

Le soutènement et le revêtement définitif de la chambre des vannes sont constitués d'une coque en béton projeté et d'ancrages passifs de 4 m de long en calotte et de 3 m en parement.

La coque en béton projeté, armé d'un double treillis, diamètre 8/8×150, d'une épaisseur totale minimale de 20 cm, est mise en place par voie humide et par couches successives en parallèle à l'excavation. Sa qualité est celle d'un BP 40/30 résistant aux sulfates.

4.6 Instrumentation

Le suivi régulier du comportement du massif rocheux par la mesure in situ des déformations en cours d'excavation a été planifié dès la conception des excavations. Ce suivi a pour objectif de s'assurer de la bonne adéquation entre le soutènement projeté et la mobilisation maximale de la résistance du rocher. Un programme d'auscultation a été mis en place dès le début des excavations, aussi bien pour les galeries que pour les cavernes principales.

Pour les cavernes de l'usine et de la chambre des vannes, l'instrumentation est composée pour l'essentiel d'extensomètres et de cellules de mesure de la tension des ancrages précontraints.

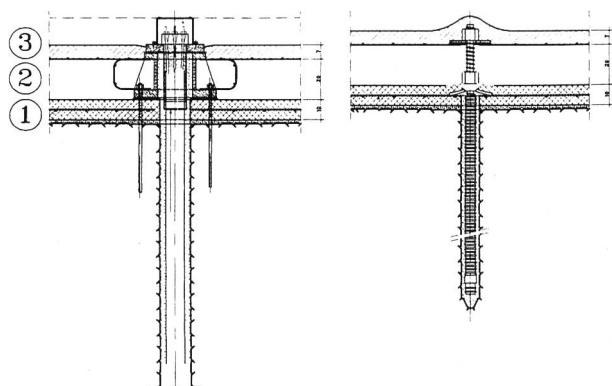


Figure 6. Tirant précontraint (à gauche), ancrage passif (à droite).
Couche 1: Profilage et soutènement, béton projeté BP 40/30: D_{max} 8 mm, CPHS 425 kg/m³: FS ~8 %, fibres Dramix 30/0,5 40 kg/m³.
Couche 2: Revêtement béton projeté BP 40/30: D_{max} 16 mm.
Couche 3: Finition, gunite CPHS 425 kg/m³: FS ~8 %.
Les couches 1, 2 et 3 sont résistantes aux sulfates.

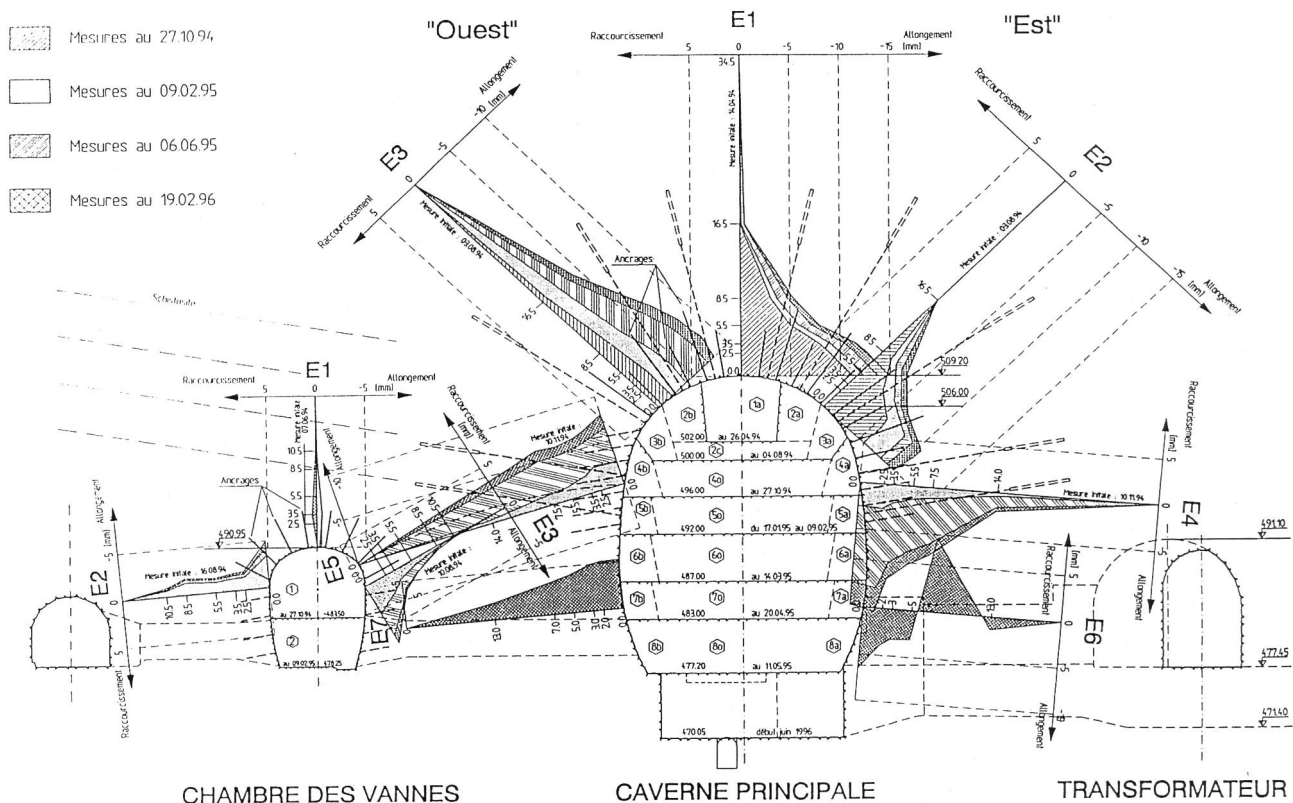


Figure 7. Usine de Bieudron – Mesures extensiométriques in situ. Section A.

Ainsi, 23 extensomètres multibarres de 25 à 35 m de longueur sont répartis selon trois sections sur la longueur des cavernes. Chaque section comporte sept extensomètres placés en calotte et systématiquement à différents niveaux en parement de la caverne principale. Un extensomètre équipe également chaque tympan.

Quant à la chambre des vannes, elle est équipée de six extensomètres répartis dans deux sections (figures 5 à 7).

Vingt tirants précontraints, répartis sur la voûte et les parements de la caverne principale, sont équipés de cellules de mesure de la tension d'ancrage. L'ensemble de l'instrumentation est équipé de capteurs électriques permettant l'acquisition des données en temps réel et à distance depuis les locaux de la direction locale des travaux.

Pour les autres galeries, des mesures de convergence ont été régulièrement réalisées dès le front de taille.

4.7 Résultats et interprétation des mesures in situ

La mise en place et le relevé progressif de l'instrumentation en cours de travaux ont permis de mesurer les déformations du parement des cavernes et leur répartition dans le massif. Il est clair qu'une partie importante des déformations mesurées sont dues aux effets des excavations subséquentes à la pose de l'instrumentation. Elles sont donc différentes pour chaque niveau de mise en place.

L'interprétation est réalisée par comparaison des valeurs absolues mesurées aux valeurs calculées par un modèle d'éléments finis intégrant les principales phases d'excavation et de mise en place du soutènement, ainsi que par le contrôle de la stabilisation des déformations dans le temps.

La figure 7 donne les résultats des mesures pour une section en fonction de la progression des excavations dans la caverne de l'usine. La figure 8 montre, pour un extensomètre de calotte, l'évolution des déformations dans le temps.

Sur l'ensemble des mesures, les déformations stabilisées mesurées des voûtes-parements de la caverne des machines sont de l'ordre de 10 à 15 mm à la fin des excavations. Des déformations plus importantes (jusqu'à 25 mm) ont été mesurées localement en parement vertical, le supplément de déformation affectant alors les 5 à 6 m de rocher situés immédiatement derrière la cavité.

La comparaison avec les valeurs déduites du calcul (de 8 à 12 mm) montre une bonne corrélation, sauf localement pour la zone de rocher située à la périphérie immédiate de l'excavation. Les mesures montrent que l'essentiel des grandes déformations est limité à cette zone, ce qui correspond à une dilatance de la roche due à la plastification par cisaillement des joints et diaclases, dilatance difficile à apprécier par le calcul.

Ces mesures ont permis de confirmer le choix du soutènement prévu basé principalement sur le renforcement par ancrages passifs relativement courts (6 à 8 m). Elles ont conduit également à un renforcement local de la densité et de la longueur des ancrages sur deux zones du parement est de la caverne de l'usine.

L'ensemble des mesures de déformation et de tension d'ancrages montre une situation parfaitement stable des excavations.

Pour les autres galeries, les mesures systématiques des convergences ont permis de mettre en évidence une instabilité locale d'un pilier, situé entre les cellules de transformateur, qui a été stabilisée par le bétonnage de buttons intégrés au revêtement définitif. Cette instabilité a également influencé un changement de projet important (cf § 6.2 et 6.3).

L'ensemble du programme d'auscultation planifié dès le début des travaux a constitué une aide précieuse à la décision sur la planification et le déroulement général des travaux ainsi qu'une sûreté de jugement des conditions de stabilité essentielle à la sécurité des travaux et de l'ouvrage. Il a par ailleurs confirmé l'appréciation initiale du

comportement du massif et la conception des soutènements définitifs prévus.

5. Réalisation des excavations

5.1 Méthodes d'excavation

Généralités

Dès la conception du projet, l'excavation de la calotte et le profilage des parements de la caverne étaient prévus à la machine à attaque ponctuelle (MAP), le noyau étant abattu à l'explosif; cela compte tenu de la qualité très moyenne et du comportement mécanique très fragile du rocher. Cette technique permet de ménager le rocher en provoquant un minimum d'ébranlements et en assure un profil excavé régulier et continu, pratiquement sans hors profil. La machine proposée par l'entreprise Eickhoff (ET 250) a été utilisée et testée sur les premiers mètres d'excavation des galeries d'accès. Les rendements obtenus (environ 10 m³/h) et l'usure des outils, notamment due aux fillonets de quartz intercalés dans la masse schisteuse, ont démontré que l'utilisation de la MAP ne serait pas économique malgré la forte schistosité et la résistance très moyenne de la roche.

A la suite de ces essais, seules les méthodes d'excavation à l'explosif ont été utilisées, en élaborant avec soin les plans de minage avec post-découpage, afin de limiter les ébranlements et préserver ainsi au mieux l'intégrité de la roche et éviter des dégâts aux machines hydroélectriques en service à l'usine de Nendaz toute proche.

Les limites d'ébranlement imposées par la présence de l'usine existante ont été fixées ($V_{res} \leq 10$ mm/s: mesuré dans l'usine de Nendaz) sur la base d'essais de tir réalisés en phase de reconnaissance. Ces limites ont toujours pu être respectées sans limitation de rendement.

Les grès et schistes de St-Christophe dans lesquels l'usine de Bieudron est creusée ont une tenue permettant un avancement à l'explosif avec des volées jusqu'à 3 à 4 m suivies d'un soutènement souvent réduit à la mise en place de quelques ancrages de sécurité et d'une couche de béton projeté de sécurité. Les soutènements systématiques sont nécessaires lors d'élargissements d'ouverture dépassant 10 m.

Ainsi, toutes les galeries principales ont été excavées à pleine section avec des volées de 3,5 m de longueur environ. Le soutènement de sécurité a été mis en place après chaque tir par la pose de boulons «swellex» et après deux ou trois tirs par l'application d'une couche de béton projeté fibré.

La caverne principale des machines, les cellules de transformateur, le décuvage, la chambre des vannes et le réservoir de réfrigération ont été réalisés en plusieurs phases avec élargissement et/ou agrandissement successifs (figure 4). La dimension des étapes d'élargissement a été adaptée en fonction du soutènement à mettre en place. La hauteur des galeries d'avancement ou de calotte était fixée par les possibilités de l'équipement et le gabarit nécessaire à la mise en place des ancrages. En général, la hauteur maximale était de 8 m.

A l'exception des fosses des turbines, les travaux d'avancement d'élargissement et d'approfondissement ont été réalisés par des tirs de mine horizontaux.

5.2 Phasages des excavations

Caverne principale des machines

C'est dans la caverne des machines que l'excavation a nécessité le phasage le plus élaboré.

L'excavation a débuté par le forage d'une galerie de chantier permettant l'accès en calotte en contournant

l'excavation par l'est. Cette galerie débouche à l'arrière du réservoir de réfrigération après une dénivelée de 24 m (figure 4, n° 22). Après la traversée de la caverne par une galerie pilote percée jusqu'à sa sortie dans la falaise pour établir une ventilation efficace, la caverne a été réalisée en phases successives comportant chacune les travaux d'excavation, de profilage, de soutènement puis de revêtement.

La calotte a été réalisée en cinq étapes:

- galerie pilote
- galerie de faite de 8 m de large, soit l'élargissement de la galerie pilote des deux côtés, avec reprofilage de la voûte sur 1 m d'épaisseur environ (figure 5, étape 1a)
- élargissement de 8 à 16 m par abattements latéraux de 2 x 4 m (figure 5, étapes 2a et 2b) avec reprofilage de la voûte comme ci-dessus
- approfondissement central de 2 m pour permettre la mise en place des barres d'ancrage de 8 m et les premiers ancrages précontraints en calotte (figure 5, étape 2c)
- élargissement à la largeur finale de 25 m par abattement latéral de 2 x 4,5 m (figure 5, étapes 3a et 3b) avec reprofilage de la voûte-parement comme les étapes précédentes.

La partie basse de la caverne (stross) a été divisée en cinq étages horizontaux successifs de 4 m de hauteur environ (figure 5, étapes 4 à 8). Après le minage de la partie centrale par volée de 3,5 m de longueur, les parements ont été réalisés avec soin par abattement de 1,50 m d'épaisseur environ, par volée réduite d'environ 2 m de longueur.

Un accès intermédiaire à mi-hauteur du tympan sud reliant la galerie d'accès en calotte à la caverne (figure 4, n° 23) et décidé en cours de travaux a permis l'accès aux différents niveaux de travail.

Le marinage a été réalisé depuis le bas par l'intermédiaire de deux puits verticaux et de la galerie d'accès inférieure (figure 5). Les deux puits de marinage ont été mis en service dès l'élargissement de la galerie pilote.

Chambre des vannes

La chambre des vannes de 9,3 m de large et 13 m de haut a été réalisée en deux phases avec un avancement en pleine section en calotte, puis après la mise en place du soutènement et du revêtement, en excavant le stross par minage horizontal.

Cellules des transformateurs et décuvage

Les cellules ont été excavées par la réalisation préalable d'une galerie de faite située au-dessus du corridor d'accès puis par l'élargissement latéral des calottes, pour mettre en place le soutènement. Le stross a été excavé en parallèle avec l'abaissement de la galerie des câbles toujours par des tirs horizontaux.

5.3 Equipements de l'entrepreneur

Généralités

L'ensemble des excavations de l'usine de Bieudron a été réalisé par minages à de rares exceptions près pour des profilages ou des excavations de roches altérées, à l'aide de marteaux hydrauliques brise-roche.

Le parc des engins mis en œuvre par le Consortium d'Entreprise de l'Usine de Bieudron (CUB) comporte des engins classiques pour la réalisation des travaux souterrains à l'explosif.

Excavations

Le forage des trous de mine a été réalisé à l'aide de deux «Jumbos» Atlas Copco de deux ou trois bras, tant pour les

forages horizontaux que pour les verticaux des fosses de turbines. Ces «Jumbos» ont aussi été utilisés pour les forages des ancrages temporaires de soutènement (forage jusqu'à 45 mm de diamètre). L'évacuation des déblais depuis le front d'attaque jusqu'au concasseur, situé à l'air libre, proche du portail de la galerie d'accès à la caverne principale des machines, a été assurée par cinq chargeuses sur pneus, soit plus précisément:

- un gros charge et roule GHH MAN de 7 m³
- deux Toro de 3 m³ chacun
- deux chargeuses traditionnelles.

Depuis le concasseur, les déblais ont été transportés à l'aide d'un ruban jusqu'à un stock tampon situé à l'ouest du chantier et depuis là, par camions jusqu'à la gravière des Epines située à 6 km du chantier.

Soutènement et revêtement

Le soutènement et une part importante du revêtement sont composés de béton projeté armé de treillis et d'ancrages.

Les ancrages et treillis d'armature ont été posés à l'aide de diverses plate-formes de travail, montées sur châssis de camion ou portées par une pelle sur pneus ou sur chenille.

Le béton projeté a été mis en place sous forme de mélange mouillé à l'aide de deux pompes à béton à piston et deux «robots» de mise en place avec bras télécommandés supportant la lance de projection.

Ancrages permanents

Les ancrages permanents de la caverne principale ainsi que les extensomètres, ont nécessité des forages de 100 mm de diamètre réalisés avec des chariots de forage avec glissières équipées d'un marteau perforateur «fond de trou».

La mise en place des ancrages proprement dits dans les forages s'est faite manuellement avec l'aide de nacelles de travail et d'un treuil combiné avec une glissière de guidage fabriquée spécialement pour ce travail.

Mise en place du béton

Dans les ouvrages souterrains, l'ensemble des bétons de structure et de revêtement ont été mis en place à l'aide de pompes à béton «Schwing».

Une pompe automobile avec bras de mise en place a été utilisée là où l'accès par camion était possible.

Une autre pompe sur remorque a été utilisée lorsque le béton a été transporté sur une plus longue distance à l'aide de conduites fixes et finalement mis en place avec un bras de distribution rotatif et articulé. Cette technique a été utilisée le plus souvent dans la caverne principale des machines.

Une troisième pompe montée sur un petit véhicule tracteur tout terrain a été utilisée le plus souvent dans les galeries étroites et pour les petites quantités de béton.

Tous les bétons (béton et béton projeté) ont été élaborés par une centrale à béton foraine, équipée de deux malaxeurs de 0,75 m³ puis transportés par quatre camions malaxeur à trois essieux de 6 m³ de capacité.

Engins de manutention

Pour la manutention des coffrages et de l'armature, une grue mobile télescopique SIG a été utilisée. Deux camions équipés de bras télescopiques ont été employés pour les charges réduites.

Dans la caverne de l'usine, deux ponts roulants provisoires de 6,3 t de capacité chacun ont été montés en calotte sur des voies de roulement ancrées aux parois de la ca-

verne. Ces ponts ont été installés avant l'achèvement des excavations et ont pu être maintenus jusqu'à la mise en service des deux ponts définitifs de 250 t de capacité.

Au niveau inférieur, un autre pont roulant de 32 t de capacité circulant sur des voies appuyées sur colonnes métalliques a été mis en service pour les montages des pièces de chaudronnerie des turbines et des appuis des générateurs.

5.4 Principaux problèmes rencontrés lors de l'avancement à l'explosif

Pendant l'exécution des forages du plan de tirs, effectués en diamètre 42 mm avec un jumbo multibras, nous avons pu constater de très fortes déviations de leur axe théorique.

Cette déviation, encore raisonnable sur les deux premiers mètres, devenait très importante (plus de 10 cm) au-delà. L'orientation de la foliation du rocher déviait le forage vers le bas quand celui-ci était effectué dans la direction sud-nord et vers le haut quand le forage était effectué dans le sens opposé.

Grâce à un équilibrage entre la vitesse de rotation, la pression sur le train de tige, le diamètre du train de tige, la forme des fleurets, ces déviations ont pu être fortement atténuées, voire même supprimées.

On peut déplorer un seul gros hors profil de 60 m³ situé à la naissance de la voûte. Il a été créé par la conjonction de la schistosité, d'une fracture subparallèle à l'axe de la caverne et d'une faille perpendiculaire.

Un renforcement des ancrages planifiés dans cette zone ainsi qu'un pilier ancré et bétonné a rétabli la continuité de la voûte et a permis l'installation d'un des appuis du rail supportant les ponts roulants de calotte.

De très fortes convergences de plus de 10 cm ont été mesurées dans les piliers séparant les cellules des transformateurs. Ces piliers ont été renforcés par une série d'ancrages passifs de 8 m de long. Une modification de projet a été entreprise afin de ne pas creuser le canal de fuite au pied de ces piliers (cf § 6.2 et 6.3 ci-après).

6. Programme des travaux

6.1 Programme général des travaux de l'usine de Bieudron

Pour les excavations, le programme des travaux avait deux priorités distinctes, se trouvant chacune sur un chemin critique pour la réalisation de l'aménagement Cleuson-Dixence:

1. Excaver la galerie d'accès au répartiteur et le répartiteur le plus rapidement possible afin de donner l'accès à l'entreprise responsable de la foration du puits blindé (figure 4, n^{os} 17 et 2)
2. Commencer le plus rapidement possible l'excavation de la caverne principale des machines de l'usine de Bieudron, d'un volume de 75 000 m³, et pour ce faire, accéder tout d'abord en calotte.

L'accès en calotte a nécessité d'excaver la galerie des câbles 380 kV, puis la galerie de contournement ainsi que le réservoir de réfrigération (figure 4, n^{os} 19, 22, 12).

D'autres contraintes, rappelées ci-après, ont dû être respectées pour permettre une progression efficace et harmonieuse des travaux:

- l'excavation de la galerie d'accès à l'usine afin de disposer à temps des puits de marinage (figures 4 et 5),
- le bétonnage des galeries des barres blindées et rameaux de fuite entre les cellules des transformateurs et la caverne principale des machines, avant l'excavation

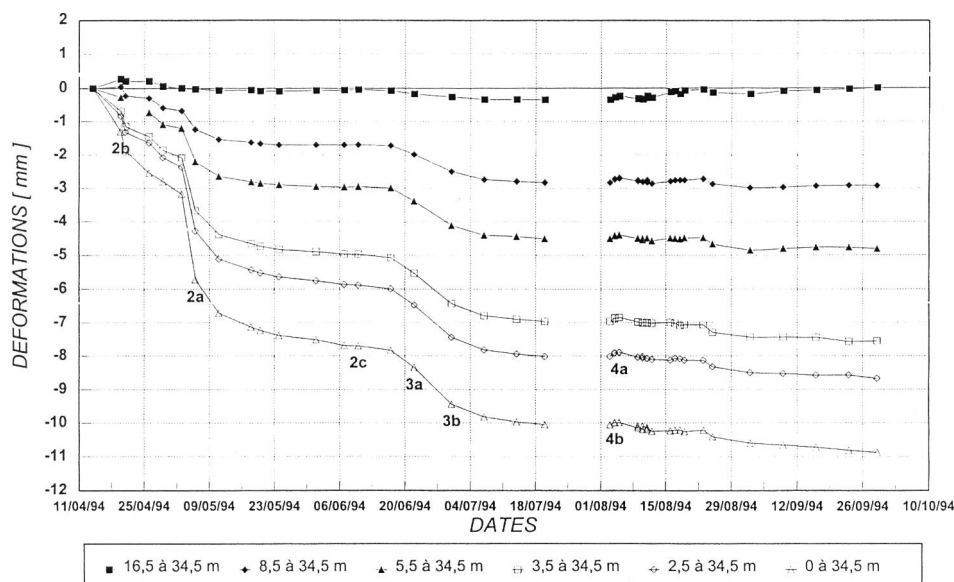


Figure 8. Usine de Bieudron, caverne principale des machines – Déformation de l'extensomètre E1, section A, en fonction du temps.

du stross de cette dernière, pour des raisons de stabilité des excavations,

- les chantiers de l'usine et du puits ont été strictement et physiquement séparés, aucun accès n'étant possible, par exemple, pour excaver la chambre des vannes via la galerie d'accès au répartiteur. Cette séparation décidée dès le début de l'élaboration du projet s'est révélée indispensable pour ne pas perturber l'avancement de la foration du puits. Cette dernière devant faire face à de nombreuses difficultés géologiques et mécaniques.

6.2 Principaux problèmes rencontrés pour respecter le programme des travaux

Pendant les six premiers mois des travaux, le consortium d'entrepreneurs a obtenu des cadences d'excavation nettement inférieures à celles prévues dans son offre. Ce manque de rendement était principalement dû aux problèmes suivants:

- Au début du chantier (été 1993), l'activité en travaux souterrains au niveau suisse était encore importante et plusieurs chantiers avaient commencé juste avant celui de Bieudron ou tardaient à finir.
- D'autre part, la date du démarrage des travaux n'a pas pu être communiquée très à l'avance au consortium car elle était liée à l'autorisation de défrichement et donc personne ne pouvait dire à l'avance quand elle tomberait. De ce fait, le consortium a été pris de cours et n'a pas pu reconstituer sur place des équipes entières, rodées et soudées, sachant travailler ensemble. L'encadrement a également été insuffisant pour les mêmes raisons.
- Le début des travaux a coïncidé pratiquement avec le début des installations de chantier.
- La complexité de l'ouvrage souterrain de Bieudron a empêché de mettre au point une méthode d'excavation répétitive dont on peut améliorer les rendements au fur et à mesure de l'avancement comme, par exemple, pour un tunnel. A peine quelques dizaine de mètres exécutés, qu'il faut déjà changer de dimensions, d'orientation, donc de plans de tirs, avec tous les ajustements et tâtonnements à recommencer.

Les trois premières raisons évoquées ci-dessus est le lot de beaucoup de démarrages de chantier.

Le consortium a alors fait un gros effort pour renforcer son encadrement et constituer des équipes performantes afin d'atteindre les cadences demandées. Le retard accu-

mulé était toutefois très difficile à rattraper, vu les cadences très élevées prévues à l'origine du projet, confirmées par l'offre de l'entrepreneur et finalement devenues contractuelles.

Dans la même période, des instabilités avec des convergences de plus de 10 cm sont apparues dans le corridor de liaison, entre les cellules des transformateurs pendant les excavations de ces dernières.

A cette époque, le projet prévoyait d'excaver le canal de fuite sous la galerie des câbles et d'accès aux cellules des transformateurs (figure 4, n° 19 et 14). Le fait de devoir creuser aux pieds des parements instables n'était pas satisfaisant et pouvait entraîner de sérieux retards supplémentaires.

6.3 Modification de projet et du programme des travaux en cours de construction

En tenant compte des difficultés présentes, une réorganisation complète du programme des travaux avec des modifications de projet, des mesures d'accélération et des moyens de manutention supplémentaire a été entreprise.

Modifications principales de projet (au nombre de quatre)

1. Déplacement du canal de fuite et de l'ouvrage de restitution 50 m plus à l'amont (côté Sion).

Cette modification apporte les avantages suivants:

- l'excavation additionnelle au pied de parements instables supprimée. Elle était prévue initialement dans le corridor d'accès aux cellules des transformateurs (figures 3 et 4, n° 14),
- ouverture d'un chantier séparé supplémentaire permettant le bétonnage des cellules des transformateurs en parallèle avec l'excavation et le bétonnage du canal de fuite,
- un accès via le nouveau canal de fuite jusqu'au fond des fosses des turbines, facilitant l'excavation de la galerie de drainage, au préalable, avant l'excavation du stross de la caverne principale des machines. Ce même accès facilitant également l'excavation des fosses des turbines,
- le maintien via la galerie de contournement de l'accès en calotte de la caverne principale. Cet accès aurait dû être interrompu pour l'excavation et le bétonnage de la galerie de fuite et de l'ouvrage de restitution prévue dans le projet initial.

2.

Déplacement de la galerie de drainage de la caverne principale dans l'axe de cette dernière pour faciliter son exécution.

3.

Adjonction d'un tronçon de galerie d'accès reliant la galerie d'accès en calotte à la caverne principale des machines environ à mi-hauteur du tympan sud, facilitant et simplifiant l'excavation du stross et fournissant un accès supplémentaire, précieux durant les excavations et le bétonnage (figure 4, n° 23).

4.

Suppression d'une grande partie des bétons primaires d'enrobage des blindages et des fondations de machine, vu la bonne tenue des excavations des fosses des turbines, ne nécessitant pas à priori de béton primaire pour son soutènement. Cette modification diminue les surfaces de coffrage et les volumes de béton à couler d'où une économie de temps et d'argent.

Ces quatre modifications mentionnées ci-dessus ont entraîné des gains de temps sur le programme des travaux, grâce aux éléments suivants:

- ouverture de plusieurs chantiers en parallèle avec peu d'interférences entre eux,
- nouveaux accès directs aux excavations, raccourcissant les temps de marinage de la roche excavée,
- simplification de formes et de techniques d'excavation grâce à de nouveaux accès directs,
- diminution des surfaces à coffrer.

Mesures d'accélération

Les mesures d'accélération ont consisté à excaver le stross de la caverne principale des machines en trois postes à raison de cinq jours par semaine au lieu de deux postes.

Moyens de manutention supplémentaire

Ces moyens de manutention supplémentaire ont consisté en:

- un pont roulant provisoire de calotte supplémentaire de 6,3 t, roulant sur la même voie que celui originalement prévu et pouvant être couplé à ce dernier,

- la prolongation sur le groupe de montage du pont provisoire de 32 t pour le montage des blindages et fondations des machines.

Toutes ces mesures ont permis de gagner directement environ quatre à cinq mois et de revenir dans le programme planifié à l'origine.

L'introduction de toutes ces modifications a pu être menée à bien grâce à une parfaite collaboration avec le consortium de génie civil et les constructeurs des machines, afin d'adapter les techniques de construction et de montage.

Cette collaboration fructueuse a permis également de trouver un accord financier avec les entrepreneurs.

L'augmentation du coût de toutes ces modifications et moyens d'accélération a été inférieure à un million de francs, grâce aux simplifications de projet adoptées.

7. Conclusions

La séparation du canal de fuite a été la modification essentielle du projet ayant permis la réorganisation du programme des travaux.

Le renforcement des moyens de manutention a été la deuxième clef de réussite permettant aux entrepreneurs de respecter des cadences de travaux très élevées.

Ainsi, le programme des travaux a pu être tenu pour le génie civil de l'usine de Bieudron, de même que le devis, car l'augmentation des coûts relativement modestes des mesures d'accélération a pu être prise en compte dans la marge des «divers et imprévus».

Le succès de la mise en application des modifications de projet et des mesures d'accélération est en grande partie due à l'excellente collaboration entre les directions générales et locales des travaux, les ingénieurs du projet et toutes les entreprises du chantier.

Adresse de l'auteur: *Alain Jaccard*, ing. civil. EPFL, chef adjoint Energie de l'Ouest Suisse SA, EOS, case postale 307, CH-1951 Sion.

Discours lors de la 86^e Assemblée générale de l'Association suisse pour l'aménagement des eaux, Sion-Bramois, le 18 septembre 1997.

Grösstes Wasserversorgungsprojekt der Welt eröffnet

Lesotho-Staudamm im Süden Afrikas

Der südafrikanische Präsident *Mandela* und König *Letsie III.* von Lesotho haben in Muela am 22. Januar 1998 das Lesotho-Hochlandprojekt eröffnet, das grösste Wasserversorgungsprojekt der Welt. Wasser soll künftig aus den schneebedeckten Maluti-Bergen in das industrielle Herzland Südafrikas um Johannesburg fliessen statt in den Indischen und Atlantischen Ozean. Heftige Regenfälle hatten kurz zuvor noch das unterirdische Wasserkraftwerk überflutet.

Zur ersten, jetzt eröffneten Phase des Projekts gehören der 185 m hohe Katse-Staudamm und ein 82 km langer Wasserstollen, der als «Weltrekord im Tunnelbau» galt. Der vor knapp fünf Jahren begonnene Bau galt als eines der grössten Vorhaben der Welt. Für die zweite Phase ist der Bau zweier Stollen, die bis zum Jahr 2003 den Wasserfluss von 17 auf 29 m³/s verstärken sollen, bereits vergeben.

Mit der Eröffnung des Projektes wird Lesotho auch durch ein kleines Wasserkraftwerk unabhängig von Stromlieferungen aus Südafrika. Ausserdem hat Lesotho, das eines der ärmsten Länder der Welt ist, den Wasserpreis für Südafrika um etwa 15 % erhöht und eine beständige Einnahmequelle aus seiner einzigen überreichlichen Ressource gesichert.

Nach dem Projekt werden sechs der neun Provinzen Südafrikas mit Wasser versorgt und etwa die Hälfte des Wasserbedarfs der Region Johannesburg gedeckt. Bis zum Jahr 2020 werden zum Projekt fünf Staudämme, 225 km Wasserstollen, 615 km neue oder verbesserte Strassen und Brücken im bislang unzugänglichen Hochgebirge gehören, die u. a. auch den Fremdenverkehr fördern sollen.

Die Weltbank und die EU, die neben Südafrika das Projekt (rund 4 Mrd. Franken) mittragen, zweifeln inzwischen daran, dass es sinnvoll ist, alle Stufen auszubauen. Nach Umweltgruppen sind die bislang umgesiedelten Bauern nicht hinreichend entschädigt und die ökologischen Auswirkungen der Wasserumleitung nicht genügend untersucht worden.

BG