

Zeitschrift: Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria
Herausgeber: Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband
Band: 82 (1990)
Heft: 9

Artikel: Le barrage de Zeuzier : rétrospective d'un événement particulier
Autor: Pougatsch, Henri
DOI: <https://doi.org/10.5169/seals-939825>

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: 27.04.2026

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

Le barrage de Zeuzier

Rétrospective d'un événement particulier

Henri Pougatsch

Zusammenfassung: Die Staumauer Zeuzier – Rückblick auf ein aussergewöhnliches Ereignis

Nach mehreren von einem vollständig zufriedenstellenden Verhalten gekennzeichneten Betriebsjahren wurden Ende 1978 bei der Bogenmauer Zeuzier aussergewöhnliche Deformationen festgestellt. Die in der Folge durchgeführten Untersuchungen zeigten, dass die anomalen Staumauer-Verformungen durch eine regionale Geländesetzung hervorgerufen wurden, welche ihrerseits durch die Drainagewirkung eines im Bau befindlichen Sondierstollens erzeugt wurde.

Der Bericht geht auf die Beobachtungen ein und fasst die Untersuchungen und die Studien zusammen, die zur Erklärung des Mechanismus und der Ursachen des Phänomens nötig waren. Die verschiedenen Phasen der Reparaturarbeiten am Bauwerk sowie das Vorgehen beim Wiederaufstau des Beckens werden beschrieben. Schliesslich wird auf die zahlreichen Lehren eingegangen, die aus diesem Fall gezogen werden können.

Das Becken wurde Ende August 1988 erneut vollständig gefüllt.

Summary: The Zeuzier arch dam – review of its extraordinary behaviour

Following several years of operation and an entirely satisfactory behaviour, abnormal deformations of Zeuzier Arch Dam have been noted at the end of 1978. Investigations demonstrated that the movements recorded at the dam were due to a local settlement caused by a drainage effect of an exploratory adit under construction.

Following the description of the observed facts, the paper summarizes all investigations and research works undertaken to explain the mechanism and the causes of the phenomenon. Then, the different phases of the repair works and the operation of refilling the reservoir are described. At last, the numerous lessons learnt from this event are given.

The normal level of the reservoir has been reached again at the end of August 1988.

Riassunto: La diga ad arco di Zeuzier – retrospettiva d'un avvenimento particolare

Dopo numerosi anni d'esercizio ed un comportamento soddisfacente, delle deformazioni anomale sono state individuate alla diga ad arco di Zeuzier verso la fine del 1978. I sopralluoghi effettuati hanno dimostrato che i movimenti individuati allo sbarramento erano stati provocati da un assediamento del terreno, causato a sua volta da un effetto di drenaggio d'una galleria di sondaggio in corso di realizzazione.

Dopo aver ricordato i fatti e gli elementi osservati, l'articolo riassume l'insieme delle indagini e degli studi effettuati per spiegare il meccanismo e le cause del fenomeno. In seguito, vengono descritte le diverse fasi dei lavori di ripristino dell'opera, come pure le operazioni d'invaso. Per finire, vengono citati i vari insegnamenti da trarre da un avvenimento così particolare.

Menzioniamo che il livello normale d'invaso è stato nuovamente raggiunto alla fine d'agosto 1988.

Préambule

Début décembre 1978, l'analyse des mesures des pendules du barrage de Zeuzier indiquait que l'ouvrage s'écartait de son comportement normal et régulier. Contrairement au régime des déformations enregistrées antérieurement, le barrage se déplaçait vers l'amont à retenue pratiquement pleine. Cette déformation inhabituelle était consécutive à un tassement général du terrain en forme de cuvette d'une extension de l'ordre de 2 à 3 km. Ce dernier provoqua d'importants dégâts dans le corps du barrage, ce qui nécessita une vidange complète de la retenue et son maintien à son niveau minimum.

Fin août 1988, le niveau normal de la retenue était de nouveau atteint.

Entre le moment où les premières déformations anormales furent constatées et celui où l'exploitation normale de la retenue fut de nouveau possible, dix années se sont écoulées. L'importance des faits constatés et les enseignements recueillis au cours de cette décennie méritent que l'on retrace le déroulement de cet événement peu commun dont l'acteur principal est un barrage.

D'autre part, durant ce laps de temps, de nombreuses études ont été effectuées, de nombreux rapports établis, divers articles publiés, aussi il semblait opportun de résumer ici les éléments essentiels.¹

1. L'aménagement de la Lienne et le barrage de Zeuzier

L'aménagement hydroélectrique de la Lienne est situé dans le Valais central. Il utilise les eaux de la Lienne, affluent de la rive droite du Rhône, qui prend sa source sur le versant sud du col du Rawil et se jette dans le Rhône près de St-Léonard, en amont de Sion (figure 1).

L'aménagement comprend un bassin d'accumulation de 50 hm³ de volume utile au site de Zeuzier et la chute disponible est utilisée en deux paliers successifs de 854 m et de 417 m.

Les ouvrages de retenue comprennent le barrage voûte de Zeuzier et la digue annexe de Proz-Riond (figure 2). Les caractéristiques principales du barrage construit entre 1954 et 1957 sont les suivantes:

Hauteur maximum	156 m
Longueur du couronnement	256 m
Epaisseur du couronnement	7,00 m

¹ Le présent article constitue aussi un complément à la série d'articles parus dans le numéro 3 (1982) de la revue «wasser, energie, luft – eau, énergie, air».

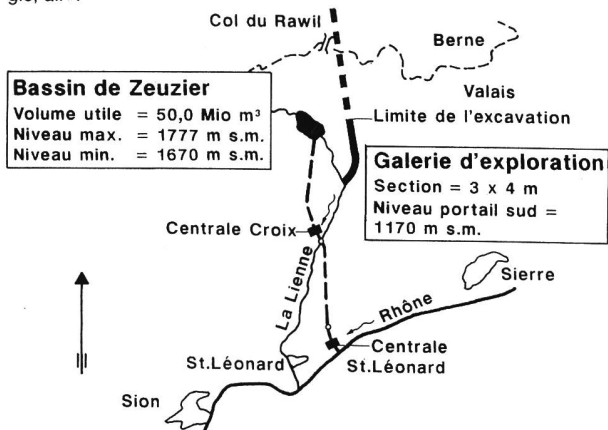


Figure 1. Situation de l'aménagement de la Lienne et de la galerie de sondage du tunnel du Rawil.

Epaisseur de la base	25,60 m
Volume des excavations	130000 m ³
Volume du béton	300000 m ³
Niveau du couronnement	1778 m s. m.
Niveau normal de retenue	1777 m s. m.
Niveau minimum d'exploitation	1670 m s. m.

En ce qui concerne la situation géologique, une coupe transversale (figure 3) montre que le barrage ferme un verrou rocheux, où le torrent a creusé une gorge profonde, formé par les calcaires du Malm supérieur. Les calcaires du Malm forment un pli dont le noyau contient également de l'Argovien et du Collovien-Oxfordien. Une couche plus ou moins continue de roches marneuses appartenant à l'Aalénien marque la limite inférieure du Malm. Sous celui-ci, se trouvent les couches calcaires du Dogger.

2. Rappel des faits

Suivi du comportement de l'ouvrage avant le comportement exceptionnel

Dès sa mise en exploitation en octobre 1957 et jusqu'en 1978, la déformation du barrage a été contrôlée au moyen de trois pendules et par triangulation sur des cibles de visée scellées sur le parement aval. Le pendule médian (M) pénétré dans le rocher par un puits qui rejoint la galerie d'in-

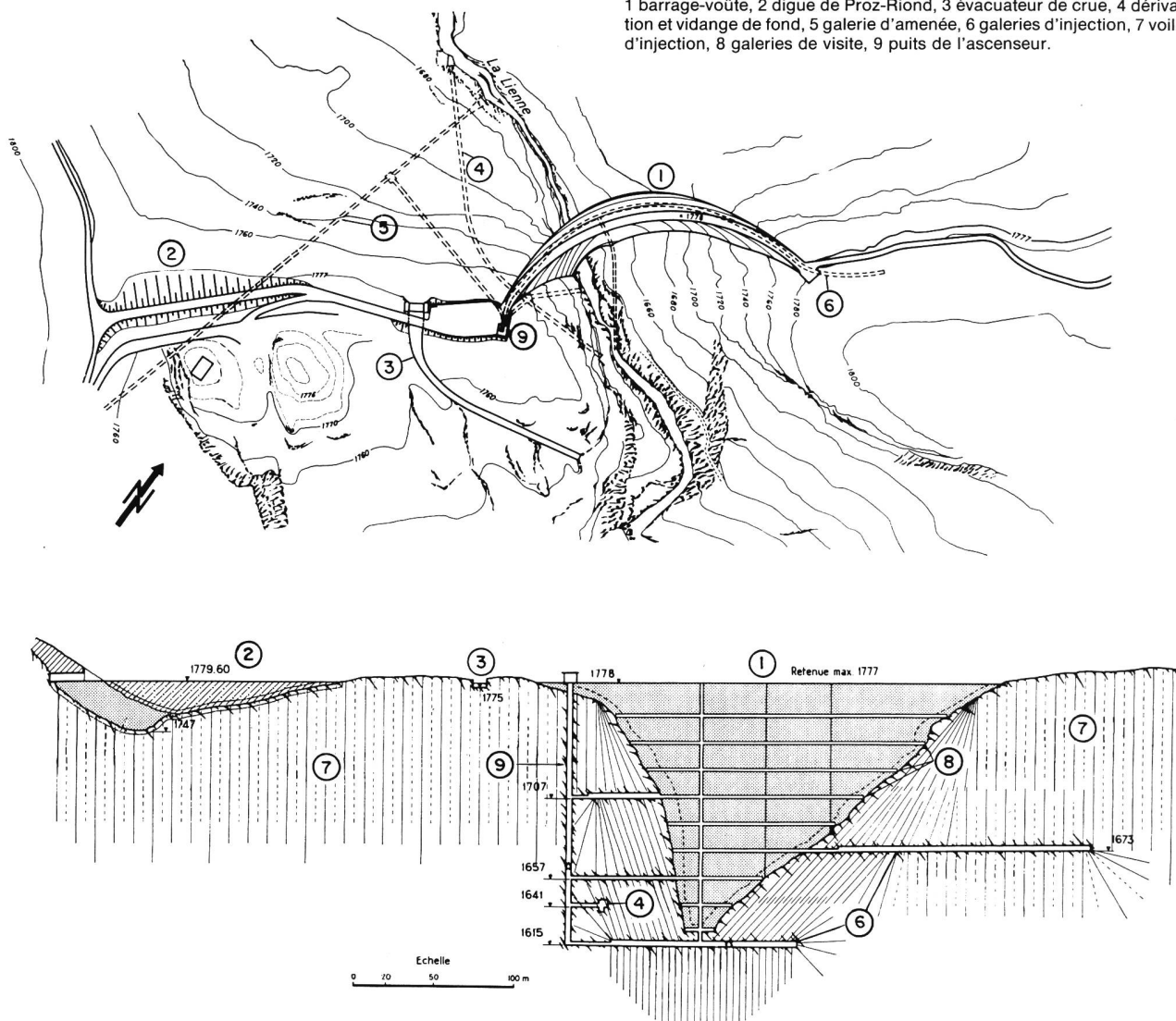
jection et de contrôle située sous le barrage à la cote 1615. Le pendule médian (M) et le pendule de droite (D) comprennent cinq stations de mesure, le pendule gauche (G), trois stations (figure 4a).

L'observation des températures du béton s'est faite au moyen de thermomètres électriques noyés à différents niveaux dans la section centrale et par des thermomètres glissés dans des tubes au niveau des galeries horizontales. Enfin, les débits des eaux de drainage et d'infiltration étaient mesurés dans les galeries d'injection.

Jusqu'à fin 1978, le programme d'auscultation comprenait une série mensuelle de mesures, à l'exception des thermomètres à mercure qui étaient relevés trimestriellement. Le comportement du barrage a été régulier jusqu'en automne 1978. L'analyse des déformations par méthode statistique avait montré que l'ouvrage réagissait élastiquement aux variations de la charge hydrostatique et aux cycles annuels de température.

Toutefois, en automne 1978, les mesures radiales des pendules indiquèrent l'amorce d'un déplacement du barrage vers l'amont, la retenue étant à ce moment pratiquement à son niveau maximum. Si on se réfère à la figure 6 dans laquelle sont reportés à titre d'exemple les déplacements mesurés au niveau du couronnement au droit du pendule de droite, on constate qu'après la mesure du 5 septembre 1978

Figure 2. Plan d'ensemble et profil en long du barrage de Zeuzier. 1 barrage-voûte, 2 digue de Proz-Riond, 3 évacuateur de crue, 4 dérivation et vidange de fond, 5 galerie d'amenée, 6 galeries d'injection, 7 voile d'injection, 8 galeries de visite, 9 puits de l'ascenseur.



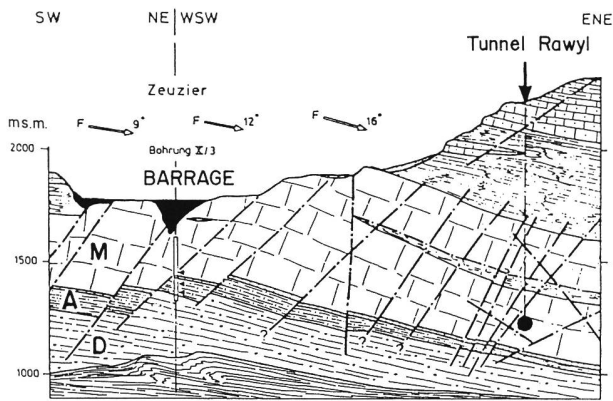


Figure 3. Profil géologique par l'axe du verrou prolongé jusqu'à la galerie de sondage du Rawil (selon Dr T. R. Schneider).
M Malm, A Aalénien, D Doger.

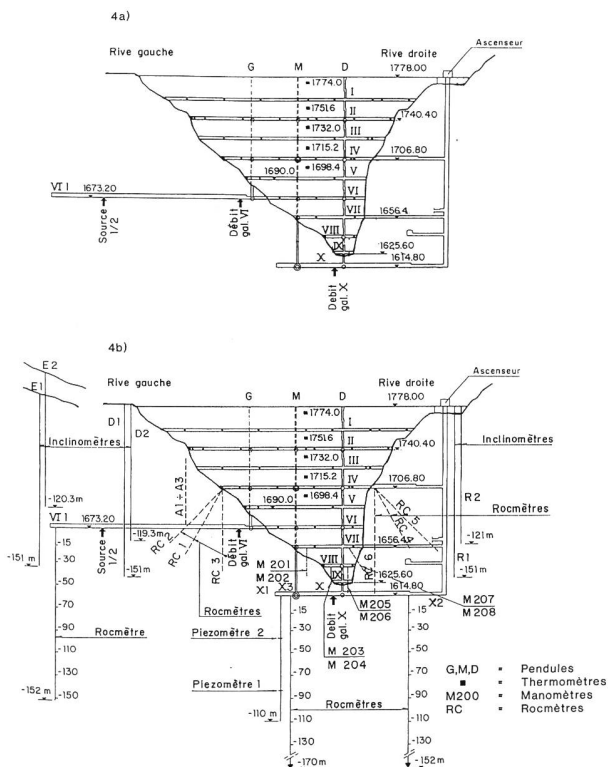


Figure 4. Dispositif d'auscultation du barrage.
a) instrumentation initiale
b) instrumentation actuelle

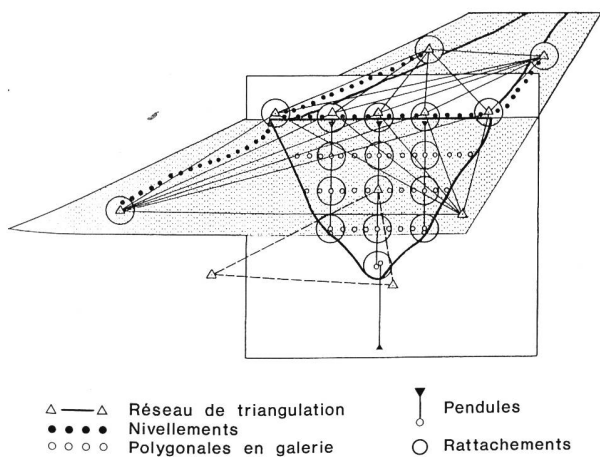


Figure 5. Réseau de mesure spatial.

les points s'écartent visiblement du cycle habituel des déformations. Si les valeurs d'octobre restent encore à l'intérieur de la courbe enveloppe (période de mesures 1958–1976), celle du 6 décembre se situe nettement à l'extérieur. Il a fallu dès lors se rendre à l'évidence que le comportement du barrage n'était plus conforme.

Si l'analyse des mesures brutes de déformation permet déjà de se faire une bonne idée de la nature du comportement de l'ouvrage, la détermination de déformations de comparaison – comme nous le verrons plus loin – offre la possibilité d'affiner cette analyse, car les résidus des déformations de comparaison doivent se confiner à l'intérieur d'une marge de tolérance fixée si le comportement est régulier. La figure 7 représente pour le cas du pendule médian, les résultats d'un tel calcul. On observe également cette divergence qui fait suite à la mesure du 5 septembre et, dans ce cas, la mesure du 6 octobre sort déjà de la bande de confiance fixée ici à ± 2 mm. Suite aux différentes analyses menées ultérieurement, il a été possible de situer le début du comportement anormal du barrage dans les derniers jours du mois de septembre.

Mesures prises suite à la détection de l'événement exceptionnel

Dès que l'on décèle des déformations anormales, la cadence des mesures fut intensifiée au rythme d'une mesure par semaine. Malheureusement les conditions climatiques et locales (présence de neige) ne permirent pas d'envisager des mesures géodésiques pour avoir une vue d'ensemble des déformations et déceler éventuellement des mouvements verticaux du barrage et de ses environs.

Puis, vu l'allure des déformations toujours données par les pendules, la conviction d'être en présence d'un mouvement d'ensemble du rocher se précisait. La question se posait alors de savoir quel phénomène de grande ampleur engendrait ces mouvements des appuis rocheux. L'hypothèse d'une influence des travaux de percement d'une galerie de sondage en vue de la réalisation future du tunnel routier du Rawil (figure 1) fut notamment retenue en raison d'une similitude frappante entre les courbes de déformations excédentaires du barrage et la courbe des débits cumulés de l'eau drainée par la galerie de sondage. Cette hypothèse devait se confirmer par la suite.

En raison de l'accroissement continu des déformations, la retenue fut abaissée. Dès avril 1979 et jusqu'au début du programme de remise en eau en mai 1983, le lac fut maintenu à son niveau d'exploitation minimum, pour permettre d'assurer l'approvisionnement en eau potable d'une région touristique l'hiver et de turbiner les apports au fil de l'eau l'été.

Par ailleurs, les travaux de percement de la galerie de sondage du tunnel du Rawil furent interrompus le 30 mars 1979. Devant l'importance du problème, l'Autorité fédérale de haute surveillance chargea un collège d'experts d'étudier les phénomènes constatés et les moyens de remise en état du barrage. Ce collège se composait de M. le Dr *Giovanni Lombardi*, de Locarno, pour les questions statiques, de M. le Dr *T. R. Schneider*, d'Uerikon, pour les questions géologiques ainsi que de M. *K. Egger* du bureau W. Schneider, de Coire, pour les questions géodésiques.

Dispositions prises dans le cadre de l'expertise

Afin de déterminer les causes des phénomènes exceptionnels observés, le dispositif de mesure installé a été considérablement complété et la fréquence des mesures augmentée.

Plus particulièrement, en ce qui concerne la géodésie, le réseau de triangulation a été élargi et amélioré, et les cheminements du nivellement étendus. Ces dispositions permettent de suivre le comportement des environs. D'autre part, les repères fixés sur le parement aval ont été remplacés par des polygones aux niveaux des galeries, ce qui donne la possibilité de procéder à des mesures en hiver lorsque la triangulation et le nivellement ne sont plus réalisables en raison de la présence de neige et du danger dû aux avalanches. En outre, afin de se prononcer sur le comportement altimétrique des points des polygones, un rattachement est effectué au moyen de fils invar suspendus en permanence dans les puits des pendules. Signalons encore que les pendules et les polygones sont rattachés entre eux ainsi qu'au réseau géodésique, ce qui permet de créer un réseau tridimensionnel de mesure des déformations (selon le schéma de la figure 5). Le programme de mesure complet est réalisé deux fois par an. Dans l'intervalle, un programme réduit est effectué: il comprend notamment l'observation du mouvement d'un point du couronnement, la mesure de distances entre les appuis et un nivellement. Les premières mesures complètes selon ces nouvelles dispositions ont été effectuées en octobre 1979.

Quant aux recherches géologiques, l'exécution de 20 forages d'une longueur totale de l'ordre de 1770 m a permis de recueillir des informations sur l'état des fondations du barrage. De nombreux instruments furent installés afin de surveiller la stabilité des appuis et de mesurer les pressions d'eau. Il s'agissait notamment d'inclinomètres (descendant jusqu'à une profondeur de 150 m), de shear strips, d'extensomètres (descendant jusqu'à une profondeur de 170 m), de piézomètres. La figure 4b montre l'emplacement de ces différents éléments.

Les mesures inclinométriques n'ont montré aucun signe d'instabilité sous forme de glissements locaux ou étendus dans le rocher. Les extensomètres n'ont pas fourni d'indice de contraction ou de dilatation des masses rocheuses. Il faut signaler que ces appareils supplémentaires n'ont pu être mis en place qu'au moment où la plus grande partie des tassements avait déjà eu lieu.

Des investigations pour contrôler le voile d'étanchéité et le contact béton-rocher ont également été entreprises. Les observations faites ont mis en évidence la nécessité d'examiner plus en détail le contact béton-rocher. Par contre, l'état du voile d'étanchéité était excellent. L'analyse des valeurs RQD ont montré que le massif rocheux n'avait pas subi de désordre.

Enfin, un réseau de 6 sismographes a été mis en place afin d'observer la micro-sismicité au droit du site. Deux appareils ont été placés en queue de retenue, un au pied du barrage et les trois derniers à l'aval. Ce réseau devait également être un élément de surveillance dans le cadre de la remise en eau.

3. Phénomènes observés

Mouvements du terrain et déformations du barrage

Les mesures géodésiques ont montré que non seulement le barrage, mais aussi les points de mesure dans le voisinage avaient bougé. Les déformations du mur n'étaient donc pas dues à des mouvements de rocher localisés, mais à une déformation d'ensemble de la contrée. En réalité, il s'agissait d'un affaissement du terrain en forme de cuvette qui engendrait une inclinaison convergente des rives avec pour conséquence un resserrement de la vallée. C'est ce dernier qui provoqua ce mouvement de déflexion du barrage vers l'amont détecté par les mesures des pendules.

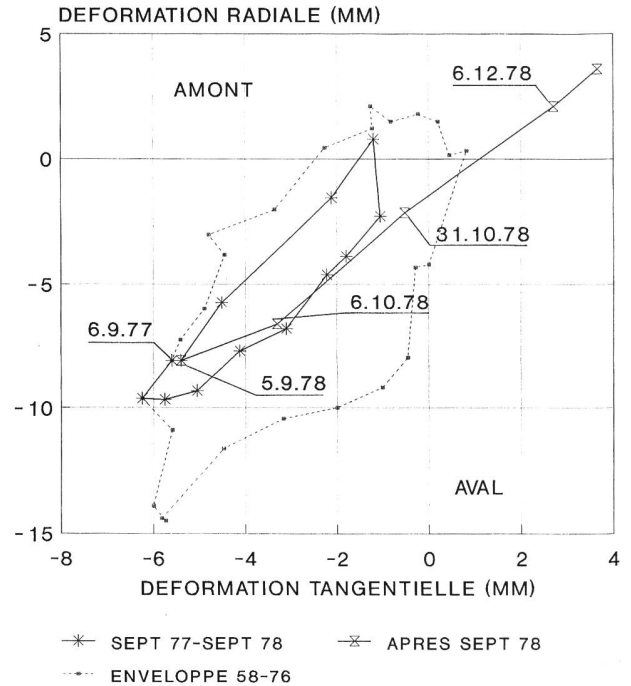


Figure 6. Evolution des lectures du pendule droit avant et durant les tassements de fin 1978.

Sur la base des mesures géodésiques, le tassement total au droit du barrage peut être estimé à 125 mm, le resserrement de la vallée à 71 mm, le déplacement du barrage vers l'amont en clef de voûte à 115 mm et à 18 mm au pied; enfin le barrage a subi une rotation vers l'aval de 12 ‰ (figure 8). Au début, les mouvements ont pris rapidement une ampleur considérable, puis ils se sont fortement ralentis et ont aujourd'hui cessé. Les mesures de nivellement et les mesures de distance entre deux points situés sur chaque rive donnent les indications les plus significatives sur l'évolution des déformations du terrain.

Les graphiques de la figure 10 représentent les variations de niveau de points du réseau de nivellement (N13 et N16) situés sur les ailes du barrage (situation des points voir figure 9). Considérées de façon générale, les courbes présentent deux parties distinctes: la première, qui se termine vers fin février 1979, correspond à une phase de progression rapide des déformations, la seconde, à une phase d'atténuation exponentielle qui tend vers un nouvel état d'équilibre. Dans le détail, on constate d'année en année un mouvement par-

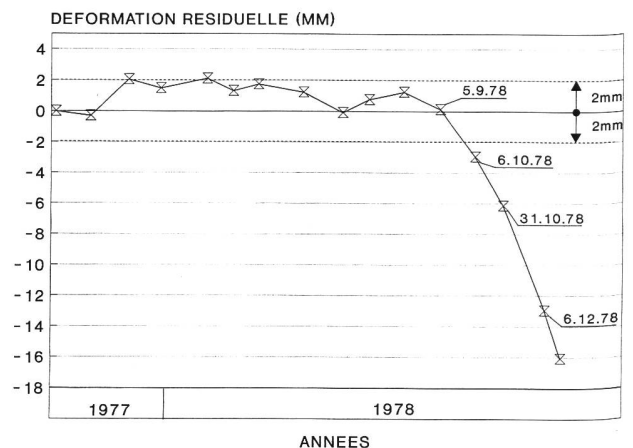


Figure 7. Evolution des déformations résiduelles avant et durant les tassements de fin 1978 (selon Dr G. Lombardi).

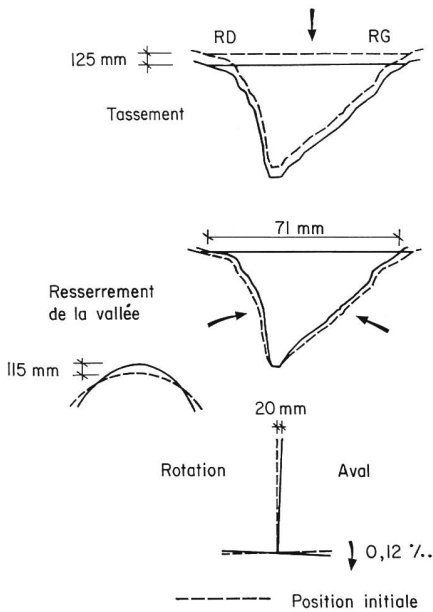
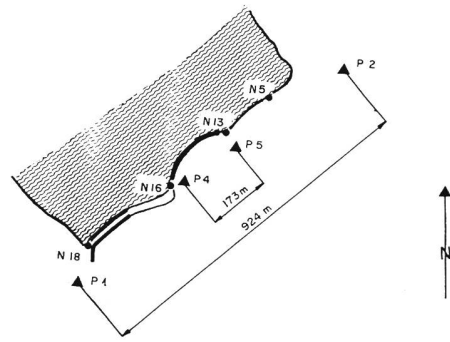


Figure 8, à gauche. Déformations totales observées sur le barrage entre 1978 et 1989.

Figure 9, à droite. Situation des piliers P1, P2, P4 et P5 et des points de nivellement N13 et N16.



ticulier qui se traduit par un léger accroissement de la déformation de l'automne au printemps, suivi d'un palier pendant la période estivale. Bien que couvert par l'intervalle de confiance, le caractère répétitif de ce mouvement reflète un effet saisonnier sur les déformations, dont la température en est la cause directe (figure 12).

La figure 11 donne une image des variations de distance entre deux piliers intégrés au système de triangulation et situés sur chaque rive (situation des points voir figure 9). L'allure générale des courbes montre bien une atténuation du mouvement de rapprochement des rives; l'influence saisonnière est également très sensible (figure 12).

Ces mouvements du terrain ont bien entendu eu une répercussion sur les déformations du barrage. Les mesures des pendules et celles des piliers situés sur le couronnement et intégrés au réseau géodésique ont permis de suivre de près l'évolution des déformations de l'ouvrage. La figure 13 montre, pour la console médiane, la déformation au niveau du couronnement mesurée par le pendule et par la géodésie. Quant à la figure 14, elle donne l'évolution des déformations radiales excédentaires vers l'amont au niveau du couronnement. On remarque toutefois deux irrégularités dues essentiellement à l'influence des travaux d'injection des joints qui ont entraîné des déformations supplémentaires du mur vers l'amont. Ce fait rappelle avec quelle prudence les travaux d'injection doivent être menés afin d'éviter tout effet désagréable.

Fissuration du mur

L'ensemble des déformations déterminées par les mesures concorde très bien avec les fissures apparues dans le mur (figure 15). Ces fissures se localisent principalement sur le parement aval le long de la fondation rive gauche (max. 10 mm), avec localement prolongement dans le rocher d'appui, le long des tronçons de galeries de sortie vers l'aval (max. 5 mm); d'autres fissures ont été encore observées dans les galeries de contrôle du barrage, essentiellement vers les appuis (max. 5 mm), avec quelques fissures dans le puits central (max. 1 mm), enfin sur le couronnement, plus ou moins selon la direction des joints verticaux du barrage (max. 1 mm). On a aussi constaté l'ouverture à l'amont de joints verticaux (max. 5 mm).

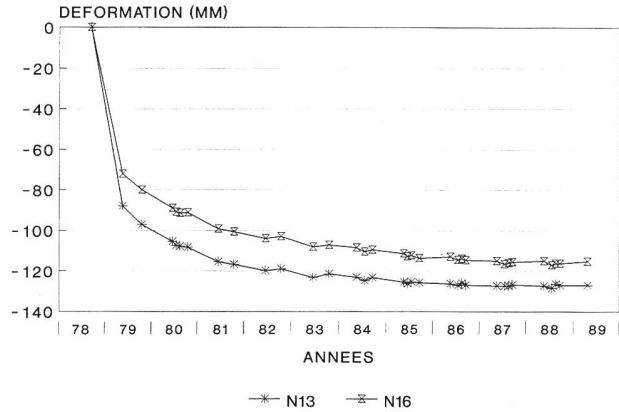


Figure 10. Affaissement des points de nivellement N13 et N16 entre septembre 1978 et avril 1989.

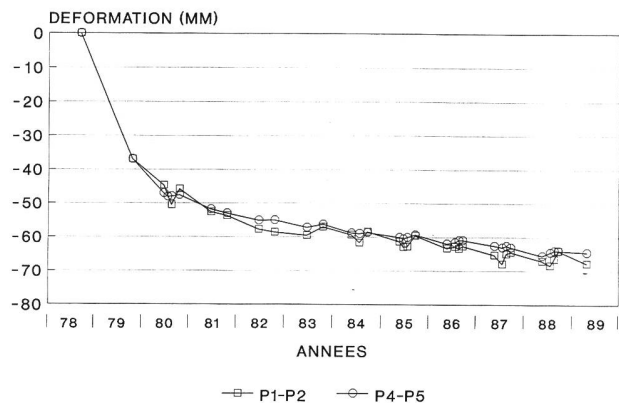


Figure 11. Variation des distances P1-P2 et P4-P5 entre les rives entre septembre 1978 et avril 1989.

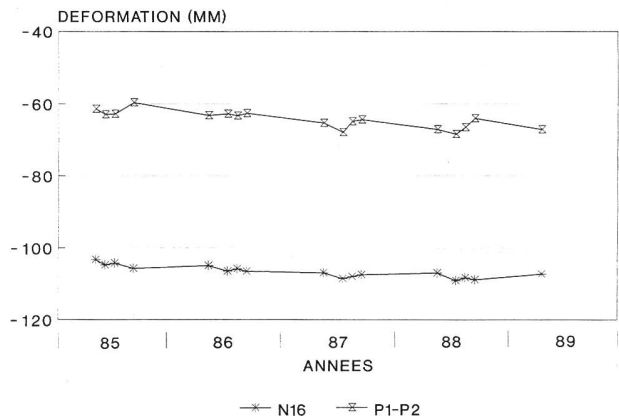


Figure 12. Effet saisonnier sur la déformation du terrain.

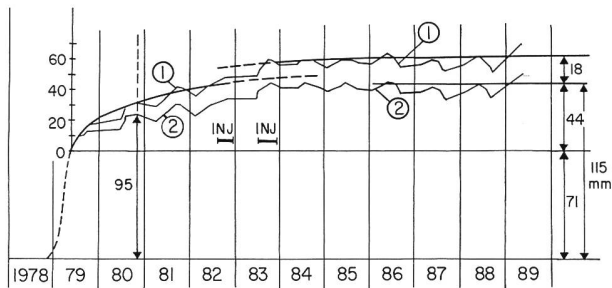


Figure 13. Déformation mesurée au droit de la console médiane au niveau du couronnement.
1 pendule médian, 2 pilier P7, INJ période d'injection.

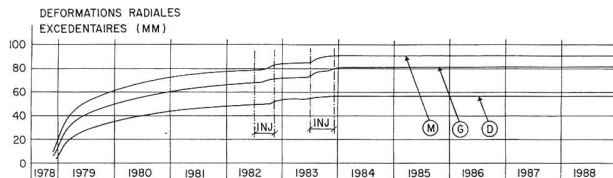


Figure 14. Evolution des déformations radiales excédentaires vers l'amont au niveau du couronnement d'octobre 1978 à décembre 1988 (courbes lissées) (selon O. Gicot).
M console médiane, G console de gauche, D console de droite, INJ période d'injection.

4. Explication du mécanisme

Généralités

Lors des premiers signes de mouvements aberrants, on se demanda tout d'abord s'il pouvait s'agir d'un dérangement des pendules (ce point se révéla rapidement négatif), ou d'un échauffement exceptionnel du barrage (l'automne fut particulièrement chaud) ou d'un phénomène d'hystérésis. Par la suite, on pensa à des mouvements dus à un glissement de l'un des appuis du barrage. Des inclinomètres placés dans des forages sur les rives montrèrent qu'aucun mouvement de ce type n'était en cours, alors que les déformations du barrage continuaient.

Il restait deux hypothèses importantes à examiner: la première, relative à une modification des conditions hydrogéologiques, la seconde d'ordre tectonique ou sismique.

L'hypothèse tectonique ou sismique

L'hypothèse d'un événement tectonique ou sismique a dû être écartée en raison tout d'abord d'une absence d'activité sismique avant, pendant et après les événements. Il n'existait aucune trace de mouvement spontané le long de fissure. Par ailleurs, on avait observé une très forte intensité des mouvements au début (durant cinq mois), puis leur épuisement extrêmement progressif au cours des années. Ces éléments sont les indices que les mouvements étaient indépendants de toute activité sismique ou tectonique.

L'hypothèse hydrogéologique

L'hypothèse d'une modification des conditions hydrogéologiques était par contre plus évidente. En effet, le percement de la galerie de sondage du Rawil provoqua un drainage important du massif rocheux et en outre il existait une remarquable concordance dans le temps entre les sorties d'eau dans cette galerie et les déformations du barrage (figure 16). Cette galerie, dont les travaux ont débuté en juillet 1976, devait permettre l'étude des conditions géologiques et hydrogéologiques en vue de la réalisation d'une route nationale devant relier le Valais au Plateau à l'altitude 1200 m s.m. Son tracé suit une direction sud-nord et elle se situe donc à une distance de l'ordre de 1400 m à l'est du barrage et à environ 400 m sous ses fondations. Le point le plus proche correspond au km 2,6 de la galerie; au km 2,7, la galerie devait rencontrer la même couche des calcaires du Malm sur laquelle est fondé le barrage. Avant d'atteindre les calcaires du Malm, on a noté différentes venues d'eau dont les débits étaient relativement modestes. Cette situation devait pourtant se modifier entre septembre 1978 et fin février 1979 lorsque des venues d'eau importantes, dont certaines de plus de 100 l/s (avec des pointes approchant les 1000 l/s), se sont produites d'abord entre les km 2,77 et 2,86 et plus tard entre les km 2,98 et 3,04 (figure 17).

Les travaux de la galerie ont été suspendus au km 3,24 le 30 mars 1979. C'est au plus tard dès cette date que se situe le début de l'amortissement des déformations du terrain. Plus tard, le Conseil fédéral prendra la décision d'interrompre définitivement ces travaux de reconnaissance.

Le débit total à la sortie de la galerie, de l'ordre de 100 l/s à la fin mars 1979, devait constamment diminuer par la suite; on

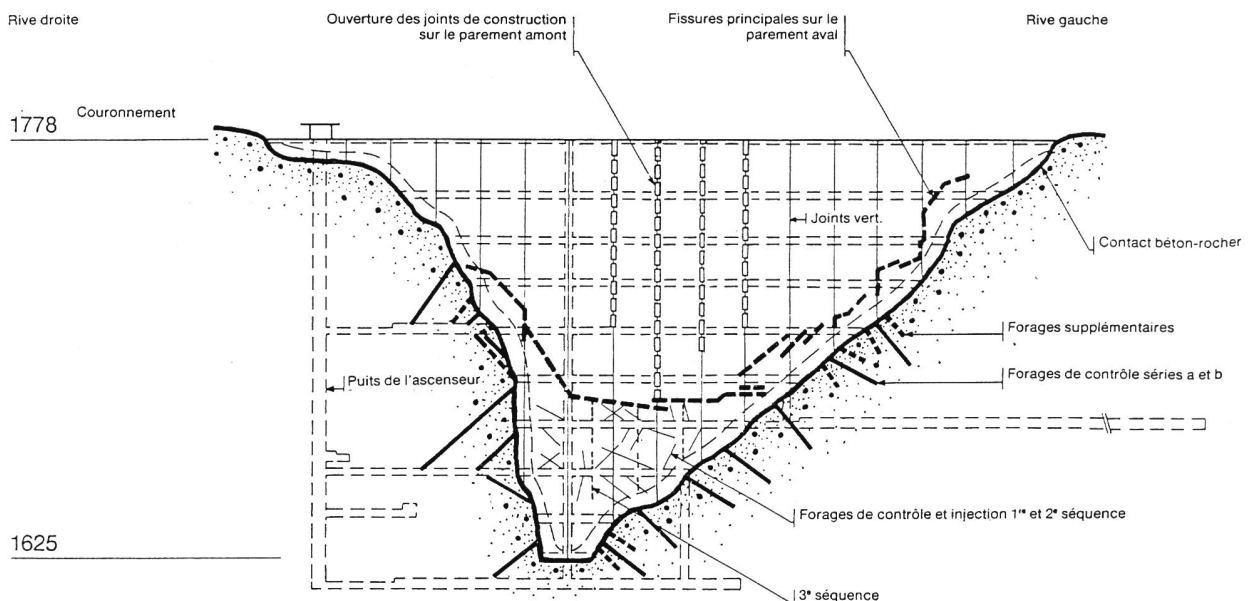


Figure 15. Situation des fissures principales et forages de contrôle.

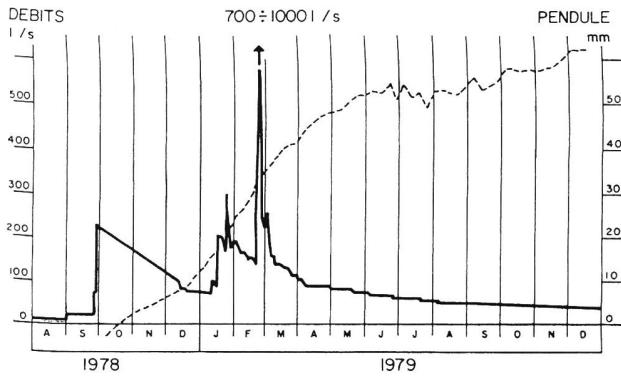


Figure 16. Débit de la galerie de sondage du Rawil (trait plein) et déformation indiquée par le pendule médian (traitillé).

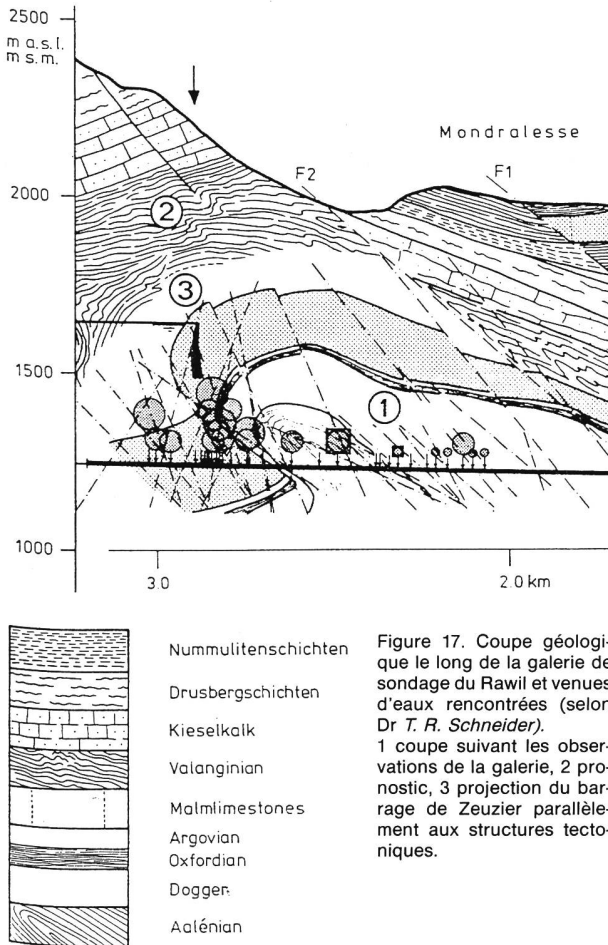


Figure 17. Coupe géologique le long de la galerie de sondage du Rawil et venues d'eaux rencontrées (selon Dr T. R. Schneider). 1 coupe suivant les observations de la galerie, 2 pronostic, 3 projection du barrage de Zeuzier parallèlement aux structures tectoniques.

mesurait 50 l/s à la fin août et 40 l/s à fin décembre. Finalement, depuis juillet 1987, le débit s'est stabilisé et est pratiquement resté constant de l'ordre de 19 l/s. Depuis ce moment également, on ne note pratiquement plus de tassements.

L'hypothèse hydrogéologique se confirmait de plus en plus au fur et à mesure que l'on progressait dans l'acquisition de connaissances, principalement en raison du suivi constant du barrage et de ses environs, des études menées pour le confortement de l'ouvrage, voire d'autres études théoriques spécifiques.

En 1986, M. le Dr G. Lombardi développa un modèle représentant le comportement d'un massif rocheux élastique fissuré saturé (Modèle F.E.S.) soumis à une contrainte de compression et à une pression interstitielle [10] [11]. Un élément essentiel qui entre donc en jeu est la présence d'eau dans les fissures et l'on s'est préoccupé de l'influence

que la pression interstitielle pouvait avoir sur la déformabilité et la déformation du massif rocheux. Le graphique de la figure 18 met, pour une roche donnée, en relation la contrainte de compression σ , la pression interstitielle p , la déformation ϵ du massif et le degré de fermeture des fissures. La déformation totale du massif se compose donc du serrage des fissures d'une part et de la compression de la masse rocheuse elle-même d'autre part. Il est intéressant de noter qu'une diminution de la pression interstitielle peut conduire à une déformation supplémentaire à contrainte totale constante. Il est donc concevable que l'on observe un affaissement de la surface du terrain suite au drainage d'un massif rocheux. Ce tassement ne pourra pourtant être détecté que si l'on dispose de moyens de mesure de haute précision.

Après avoir établi la loi de déformation du massif élastique rocheux, en fixant les valeurs des paramètres géotechniques, il a dès lors été possible d'estimer numériquement l'effet de venues d'eau dans la galerie de sondage du Rawil. Le calcul a été limité à la venue d'eau la plus importante (700 l/s); il s'agit bien entendu d'une simplification, car en réalité plusieurs venues d'eau successives ont été enregistrées.

Deux mécanismes principaux ont été considérés. Le premier suppose une nappe libre dans le Malm. Ce modèle était toutefois rapidement abandonné, car les études et calculs devaient montrer qu'il ne correspondait pas à la réalité.

Le second mécanisme part de l'hypothèse d'une nappe captive dans le Dogger (figure 19). En ce qui concerne les

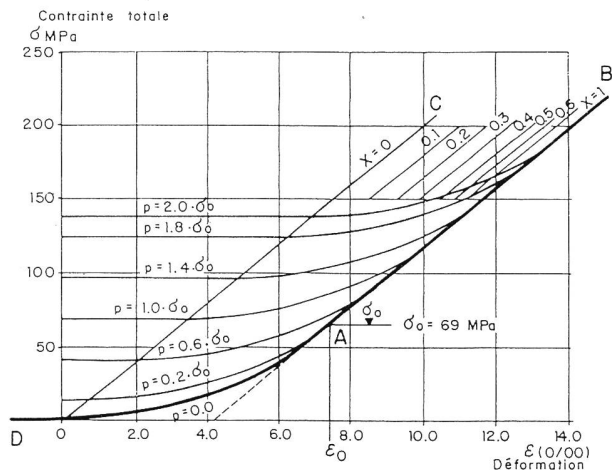


Figure 18. Modèle F.E.S. pour le massif rocheux (selon Dr G. Lombardi). p = pression interstitielle ou neutre, $X = 0$ fissures ouvertes, $X = 1$ fissures complètement fermées. Le point A correspond à la fermeture des fissures en l'absence de pression interstitielle. La courbe D-O-A-B est la relation contrainte-déformation pour massif sec.

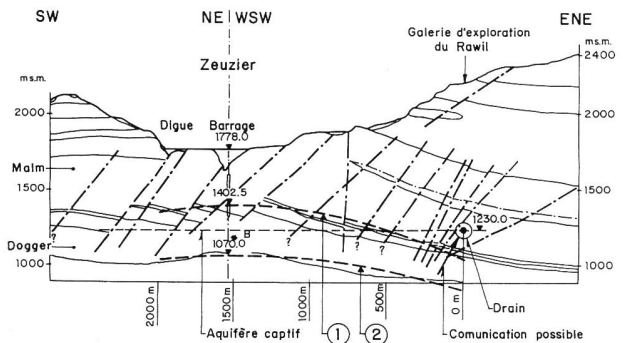


Figure 19. Cas de la nappe captive dans le Dogger. Profil hydrogéologique du verrou de Zeuzier (selon Dr G. Lombardi). 1 toit de l'aquifère, 2 base de l'aquifère.

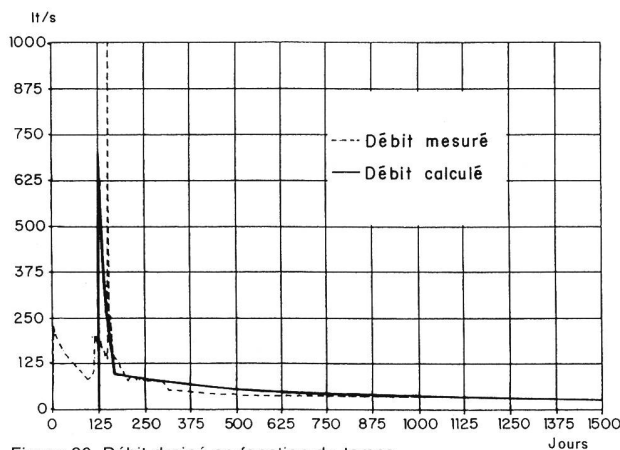


Figure 20. Débit drainé en fonction du temps. Comparaison mesures et calculs (selon Dr G. Lombardi).

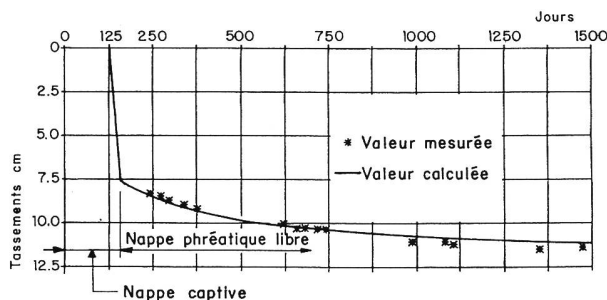


Figure 21. Tassements en fonction du temps. Comparaison valeurs mesurées et valeurs calculées (selon Dr G. Lombardi).

résultats obtenus, la figure 20 illustre la bonne concordance entre les débits mesurés dans le tunnel et ceux calculés. Quant à la figure 21 qui concerne les tassements, elle montre des résultats tout aussi probants. Si on considère l'allure de la courbe de tassement, on distingue deux phases. Pendant une première période, le tassement est rapide tant que la nappe est captive, puis il est beaucoup plus lent lorsque la nappe présente une surface libre.

Le but d'un modèle mathématique est notamment de permettre de mieux comprendre le déroulement d'un phénomène. Les résultats obtenus montrent donc de façon scientifique que le percement de la galerie de sondage est à l'origine du tassement du terrain observé au droit du site du barrage de Zeuzier. Toute autre hypothèse peut donc être réfutée. Le renouvellement d'un tel événement est exclu pour autant que dans les environs du barrage aucuns travaux souterrains ne soient entrepris. Au vu des expériences acquises, de tels travaux ne seraient pas autorisés ou éventuellement sous la condition expresse qu'ils ne risquent pas d'entraîner un quelconque drainage du massif rocheux. Cette règle s'applique bien entendu à tout autre barrage.

5. Contrôle et travaux pour la remise en état du barrage

Conditions posées par l'Autorité de haute surveillance

Avant de donner son autorisation pour l'exécution de travaux au barrage, l'Autorité de haute surveillance avait posé trois conditions essentielles:

1. que les mouvements tant du terrain que du barrage aient pratiquement cessé,
2. que le barrage soit effectivement réparable et que son comportement futur ne compromette pas la sécurité de la population à l'aval de l'ouvrage (il s'agissait notam-

ment de vérifier l'état des fondations du barrage, de pouvoir rétablir le monolithisme de l'ouvrage et de vérifier l'état de contraintes par des calculs statiques),

3. qu'une décision soit prise en relation avec l'avenir du tunnel du Rawil.

En date du 7 avril 1982, le Conseil fédéral décida d'interrompre définitivement les travaux de la galerie de sondage.

Etat des fondations

Les forages de reconnaissance exécutés en été et en automne 1979 ne révélèrent aucun signe d'instabilité locale du soubassement rocheux. En outre l'état des matériaux extraits par forage indiquait que la qualité de la roche de fondation n'a pas été diminuée par les mouvements et que le verrou de Zeuzier pouvait continuer de servir d'appui à un barrage comme auparavant.

Cette constatation n'a rien d'étonnant en soi, si l'on pense que le drainage des couches du Dogger est à l'origine de l'événement extraordinaire. Les couches du Malm se sont par conséquent affaissées en bloc.

Calculs statiques

Des calculs statiques ont permis d'apporter la preuve de la réparabilité du barrage, ainsi que celle d'une exploitation de la retenue en respectant les conditions de sécurité. Des études ont été menées en parallèle par MM. le Dr H. et O. Gicot, ingénieurs-conseils de la Lienne, Suisselectra Ingénieurs-Conseils SA et M. le Dr G. Lombardi.

Les calculs statiques originaux avaient été effectués en 1954 par M. le Dr H. Gicot par la méthode «arcs-murs» avec compensation radiale des déformations aux points d'intersection des arcs et des consoles.

Suite aux dégâts qu'il avait subis, on ne pouvait plus considérer le barrage comme un corps monolithique. Aussi, dans une première phase, il a fallu déterminer l'état de contraintes régnant dans le barrage fissuré soumis à son seul poids propre (cas du lac vide), en tenant compte, bien entendu, des déformations observées.

MM. le Dr H. et O. Gicot ont évalué l'état de contraintes en assimilant les déformations anormales de l'ouvrage à une augmentation adéquate de la température. L'effet de la fissuration a été prise en compte en variant les rigidités relatives des arcs et des consoles.

Pour sa part, M. le Dr G. Lombardi a introduit la fissuration dans la géométrie même de l'ouvrage en considérant des zones inactives déterminées par itération. Les calculs ont été menés en utilisant la méthode «arcs-murs» avec compensation radiale et tangentielle des déformations et prise en compte de l'influence de la torsion.

Le calcul du barrage réparé (remise en eau et exploitation normale) a été effectué d'une part par M. le Dr G. Lombardi en utilisant le même modèle «arcs-murs» cité plus haut, et d'autre part par Suisselectra Ingénieurs-Conseils SA qui a effectué une étude du mur et de la zone de fondation voisine par la méthode des éléments finis élastiques.

Pour répondre aux conditions d'exploitation futures, différents types de charges ont été considérés: poids propre, poussée horizontale de l'eau pour différents niveaux de la retenue (1680, 1720, 1750, 1765 et 1777), effets de la température, séisme. A ces charges venait s'ajouter une déformation des assises correspondant à 20% des déformations exceptionnelles enregistrées jusqu'au mois de décembre 1980 (mois correspondant à l'époque où a été fixée cette hypothèse de calcul). Cette valeur tient compte d'une part de 10% de déformation résiduelle jusqu'à stabilisation totale du mouvement, et d'autre part de 10% de déformation géométriquement semblable, qui pourrait être causée par

un tassement du sous-sol lors de la remise en eau du barrage. Un tassement provoqué par la charge de l'eau ne s'est pas manifesté et la réserve prévue à cet effet a été finalement couverte par les déformations supplémentaires consécutives aux travaux d'injection (figure 13).

L'analyse des résultats montre que par rapport à l'état initial (ouvrage intact à lac vide) les sollicitations sont plus élevées; quant aux cas de charges relatifs aux états futurs (remise en eau et exploitation), ils agissent dans le sens d'un soulagement des contraintes de compression dans les sections des consoles les plus sollicitées. Les calculs montrent que les contraintes de traction et de compression restent dans les limites admissibles vis-à-vis des résistances mesurées des bétons, dont les caractéristiques, comme on le constate pour d'autres bétons de barrage, s'étaient améliorées dans le temps. Les différents calculs s'accordaient aussi à montrer que le barrage était apte à être réparé, puis à reprendre du service par la suite.

Par ailleurs, l'excellente qualité du béton, la qualité du colmatage des fissures qui rend à l'ouvrage son monolithisme parlaient aussi en faveur de la réparation du barrage.

Nature des travaux

En fonction des zones à traiter et du mode d'exécution, les travaux de remise en état du barrage et de ses fondations ont été répartis en trois zones distinctes:

- Zone A: l'écran d'étanchéité
- Zone B: la zone d'appui du barrage (contact béton-rocher)
- Zone C: le corps du barrage

Les travaux ont été exécutés entre les années 1980 et 1984. En 1980 et 1981, on a procédé à des contrôles et des essais de réparation à grande échelle, ainsi qu'au choix du produit d'injection. Les travaux proprement dits, qui ont fait l'objet le 6 juillet 1982 d'une autorisation du Département fédéral des transports, des communications et de l'énergie, ont débuté en 1982 et les derniers contrôles ont été effectués en 1984.

Travaux de contrôle de l'écran d'étanchéité (Zone A)

1366 m de forages carottés ont été exécutés dans le plan du voile pour en vérifier son état et la qualité du rocher. Ces travaux ont montré que la roche était de bonne qualité et que le voile d'étanchéité était encore en mesure de remplir son rôle. Le verrou rocher possédait donc une imperméabilité suffisante et de ce fait aucuns travaux complémentaires furent nécessaires dans cette zone.

Travaux de la zone d'appui (Zone B)

1270 m de forages de reconnaissance répartis sur toute la surface du contact béton-rocher ont été réalisés. Les forages ont permis de repérer les zones où le contact devait être rétabli. Les injections de contact ont été réalisées en remontant le long des rives et avant le traitement des fissures et des joints verticaux des blocs formant appuis du barrage. Avant injection, des essais de perméabilité type Sabarly ont été réalisés. Lorsque dans la zone de contact la perméabilité était supérieure à 2 Lugeon, des forages supplémentaires ont été exécutés autour du forage initial (figure 15).

Réparation du corps du barrage (Zone C)

Ces travaux concernaient tant le traitement des fissures que celui des joints verticaux du barrage. Dans un premier temps, des essais particuliers ont été entrepris en 1980 dans la partie basse du barrage dans le but de choisir un produit et un procédé opportuns pour les travaux de réparation du mur. Ces essais devaient démontrer

qu'il était possible de réparer le corps du barrage en rétablissant son monolithisme et ont aussi permis de définir le mode d'exécution des travaux de colmatage.

Quatre produits à base d'époxy ont été testés. Compte tenu de la nature des fissures à traiter, du but recherché (rétablir le monolithisme du barrage) et des conditions locales (chantier en altitude), le produit devait répondre à certains critères importants: adhérence élevée sur surface mouillée, viscosité permettant l'injection des fines fissures, densité élevée, temps d'utilisation confortable et possibilité de mise en place par basse température (-5°C). Enfin, il devait également présenter de bonnes caractéristiques mécaniques. Le choix s'est finalement porté sur un produit mis au point par l'entreprise Swissboring, le Rodur 510 à faible viscosité et le Rodur 520 à haute viscosité. La combinaison de ces deux types de produits permettait d'adapter la viscosité en fonction de l'ouverture et de la profondeur des fissures à traiter.

En ce qui concerne le mode d'exécution des travaux, il a été décidé de traiter les joints en premier afin de bloquer les nombreuses fissures internes qui communiquaient avec les joints verticaux et de faciliter par la suite les travaux de réparation bloc par bloc. La partie à traiter était donc limitée verticalement par les joints du barrage et horizontalement par les niveaux des galeries. Le traitement des fissures s'effectuait du bas vers le haut selon un programme de traitement par séquences, ce qui offrait la possibilité d'orienter logiquement les phases suivantes en fonction des résultats atteints à un stade donné. L'implantation et l'orientation des forages d'injection étaient choisies en fonction de la fissuration.

En définitive, le volume des travaux pour les essais et la réparation du barrage, qui ont été exécutés entre 1980 et 1984 est le suivant:

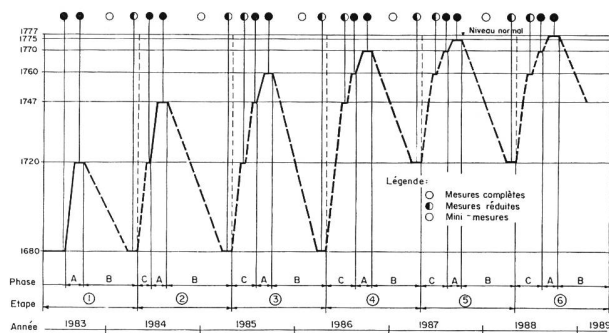


Figure 22. Programme général de remise en eau, avec indication des mesures géodésiques.

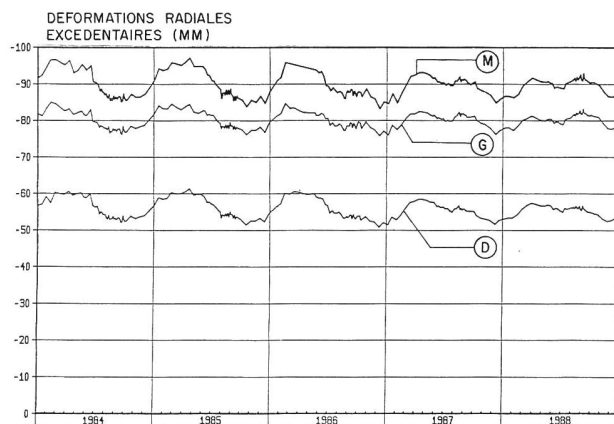


Figure 23. Déformations radiales excédentaires vers l'amont au niveau du couronnement entre 1984 et 1988 (selon O. Gicot). M console médiane, G console de gauche, D console de droite.

Longueur des forages	17400 m
Quantité injectée de ciment	206 t
Quantité injectée de Rodur	115 m ³

Pour vérifier la tenue dans le temps du traitement des fissures, un bloc de béton a été coulé dans une galerie. Il a été scié, puis injecté. Dans le futur, la prise d'échantillons permettra de contrôler la pérennité du collage et celle de la qualité du matériau injecté.

A la suite des travaux d'injection, l'extraction de carottes, en général d'un diamètre de 86 mm, permettait de se faire une idée précise du réseau de fissures, de leur orientation, de leur ouverture moyenne et de la qualité du collage. Certaines carottes prélevées étaient acheminées au Laboratoire d'essais des matériaux de l'EPFL pour des essais de résistance. Les échantillons soumis aux essais ont été prélevés sur les carottes par sciage; pour les essais de compression, la hauteur des échantillons était égale au diamètre, pour les essais de traction simple et de traction transversale (essai brésilien), la hauteur de l'éprouvette était égale à la racine carrée de la section.

De façon globale, les essais de résistance mécaniques ont donné les valeurs moyennes suivantes (les valeurs indiquées entre parenthèses correspondent au nombre total d'éprouvettes testées sans distinction de la provenance dans le barrage):

	Période 1980–1984 (essais et travaux)	Période 1983–1984 (travaux)
Masse volumique apparente	2,45 kg/dm ³ (89)	2,44 kg/dm ³ (29)
Résistance à la compression	58,6 N/mm ² (89)	60,8 N/mm ² (29)
Résistance à la traction simple	1,9 N/mm ² (116)	1,6 N/mm ² (63)
Résistance à la traction transversale	4,5 N/mm ² (52)	4,5 N/mm ² (48)
Module d'élasticité	34600 N/mm ² (61)	35620 N/mm ² (44)

6. Opérations de remise en eau

Programme de remise en eau

La première mise en eau d'une retenue est une opération délicate. Elle l'est d'autant plus lorsque l'ouvrage de retenue est un barrage qui a subi d'importantes déformations et de surcroît a dû être réparé. C'est pour cette raison qu'un programme de remise en charge progressive de l'ouvrage a été soigneusement étudié et préparé. Outre un programme général de remise en eau, un document contenant toutes les directives fixant les conditions de remplissage, le dispositif d'auscultation, le programme de mesures et le traitement des résultats a été élaboré par un groupe de travail ad hoc.

Initialement prévu en quatre étapes annuelles, le programme de remise en eau a été porté à six étapes par décision du Conseil fédéral suite à des recours. Les niveaux successifs ont été fixés aux cotes 1720, 1747, 1760, 1770, 1775 et 1777 m s.m., cette dernière valeur correspondant au niveau normal de retenue (figure 22).

Chaque étape comprenait trois phases distinctes:

- Phase A nouvelle phase de remplissage
- Phase B phase d'abaissement
- Phase C phase de remplissage jusqu'au niveau atteint précédemment par la phase A

Dès la seconde étape, la montée du plan d'eau s'effectuait par palier, afin de procéder à une série de mesures de contrôle, notamment une campagne de mesures géodésiques après une stabilisation préalable du niveau de la retenue. Les niveaux intermédiaires correspondaient à des niveaux atteints lors d'étapes précédentes.

Les directives fixaient également le début du programme en fonction de l'état d'avancement des travaux de réparation du barrage. Une différence de 20 m devait être garantie entre le plan d'eau et le niveau atteint par les travaux de réparation avant leur achèvement. D'autre part, des consignes concernant les vitesses de montée du plan d'eau différentes selon les phases, les niveaux et les surélévations tolérées en cas de crue figuraient également dans les directives. Enfin, Lienne SA établit un règlement d'exploitation donnant les directives pour la manœuvre des vannes en cas de crue.

Dispositif d'auscultation et programme de mesures

En plus des instruments mis en place en 1979 et de l'extension du réseau géodésique, le dispositif d'auscultation a été encore complété en vue du programme de remise en eau. Deux télécoordonateurs ont été installés sur le pendule médian afin de pouvoir enregistrer en continu et transmettre à l'usine de St-Léonard les déplacements du fil du pendule. Par ailleurs, afin de suivre le comportement des fondations du barrage, des rocmètres obliques formant un tripode, munis de thermomètres, ainsi que des manomètres pour mesurer la sous-pression au contact béton-rocher, ont été mis en place sur les deux rives. La figure 4b donne le schéma complet du dispositif d'auscultation.

Par la suite on procéda aussi à la pose de thermomètres électriques dans des forages dans le béton afin de remplacer les thermomètres à mercure existants.

Pour sa part, le géologue établit le cadastre complet des sources à l'aval; au total 45 sources ont été recensées.

En ce qui concerne la cadence des mesures, elle a été adaptée selon les différentes phases d'une étape. Il a été prévu des mesures quotidiennes, bihebdomadaires, hebdomadaires, bimensuelles et mensuelles. Les mesures les plus fréquentes ont été effectuées lors de toute nouvelle phase de remplissage (phase A); il s'agit de la mesure deux fois par semaine des paramètres les plus importants qui, après une interprétation rapide des résultats, permettait d'apprécier le comportement de l'ouvrage le jour même. Le programme était plus souple lors de la vidange de la retenue en hiver (phase B) et une cadence intermédiaire avait été adoptée pour la phase C.

Lors de chaque palier de stabilisation, des mesures géodésiques complètes ou réduites ont été réalisées; une mesure était programmée en hiver pendant la vidange.

Quant aux débits des sources, le cadastre complet des sources était mesuré deux fois en été, le cadastre réduit (six sources) toutes les deux semaines.

En vue d'analyses chimiques (pH, conductivité, dureté), des prélèvements d'échantillons d'eau des six sources du cadastre réduit, ainsi que de celles de la retenue et de la galerie de sondage ont été effectués.

Toutes les informations captées par les sismographes ont été transmises à la Centrale de Croix où elles pouvaient être automatiquement enregistrées 24 heures sur 24 heures.

Un programme de contrôle visuel du barrage a été prévu. Ce contrôle devait permettre de repérer et de suivre l'évolution de toute modification de l'aspect extérieur du barrage (par exemple nouvelles fissures) et tout phénomène particulier (par exemple nouvelles venues d'eau au barrage ou dans les environs) qui auraient pu se présenter pendant le programme de remise en eau.

Enfin, chaque année, à la fin du printemps et en automne, les fissures sur le parement aval ont été relevées et contrôlées. L'ouverture des fissures a tout d'abord été relevée au moyen d'une loupe; puis afin d'avoir une indication des mouvements éventuels de ces fissures, une série de boulons ont été placés pour effectuer des mesures au déformètre type Huggenberger. Les valeurs enregistrées sont de l'ordre de quelques dixièmes de millimètre. Plus tard, six déformètres ont été installés dans des niches sur le parement aval afin de suivre automatiquement et par télémesure dans le futur l'évolution de la fissure principale à l'aval; des téléthermomètres ont également été installés à côté des déformètres.

Organisation de la transmission et de l'analyse des résultats

En raison de l'importance du programme de remise en eau, cette opération devait être menée avec toutes les précautions voulues afin de garantir en tout temps la sécurité de la population à l'aval. C'est pourquoi, il était nécessaire de mettre sur pied une organisation pour le suivi des opérations, dont les tâches, clairement définies, devaient permettre le contrôle et l'analyse sans délai des mesures, notamment par ordinateur. La transmission rapide des résultats aux différentes parties intéressées avait également été prévue.

L'analyse des résultats a été prise en charge d'une part par le Service sismologique suisse pour les questions sismiques et d'autre part par le Bureau Lombardi pour le traitement des autres données.

A l'exception de la géodésie confiée au Bureau W. Schneider, l'ensemble des mesures au barrage a été effectué par le personnel de la Lienne SA. A la fin de chaque série de mesures, les gardiens de barrage avaient pour consigne de communiquer par téléphone les valeurs de certains paramètres choisis au Bureau Lombardi qui procédait immédiatement à un contrôle de leur plausibilité. Ce mode de faire permettait de répéter sans délai une mesure qui paraissait erronée, les gardiens du barrage attendant sur place la confirmation de la validité des mesures avant de quitter le barrage.

Par ailleurs, le niveau de la retenue, les déformations du point de suspension du pendule médian, ainsi que la température de l'air étaient quotidiennement communiqués par la Lienne SA à l'Office fédéral de l'économie des eaux.

En ce qui concerne les mesures géodésiques, les moyens mis en œuvre offraient la possibilité de traiter directement sur place les données et de connaître quelques heures après la fin des mesures les valeurs essentielles, ce qui permettait de prendre rapidement une décision concernant la suite du programme de remise en eau.

Analyse des résultats principaux des mesures

Comportement du barrage

L'analyse des déformations radiales s'est faite par trois modèles, dont le premier a été élaboré par M. O. Gicot (calculs des déformations excédentaires) et les deux autres par M. le Dr G. Lombardi (calculs de déformations de comparaison théoriques et ajustées).

Les déformations excédentaires sont égales aux déformations mesurées défalquées des effets calculés de la poussée de l'eau et des températures du béton par rapport à une mesure de référence. Cette méthode avait permis de mettre en évidence le comportement anormal du barrage et a été utilisée tout au long des études et du programme de remise en eau. Le report graphique des écarts calculés pendant la durée du programme de remise en eau (figure 23) montre que l'allure annuelle des courbes est cyclique et les points obtenus gravitent autour d'une moyenne stable, reflet d'un bon comportement de l'ouvrage.

Quant à la détermination des déformations de comparaison théoriques, elle consistait à ramener les déformations mesurées à une cote du lac donnée (1750 m s.m.) et une température du béton de 0°C. Dans ce cas, il s'agissait de caler le modèle en ajustant le module d'élasticité du béton et le coefficient thermique du béton. La correction due à la température du béton se basait sur la lecture des thermomètres noyés dans le béton dans le plan de la console médiane. L'examen des graphiques (figure 24) montre que les résidus évoluent selon une courbe à cycle annuel régulier, le résidu retournant à sa valeur initiale après chaque cycle.

L'évolution des déformations de comparaison théoriques étant donc cyclique, il semblait possible d'atténuer leur variation en intervenant sur la correction due à la température du béton. On pouvait donc définir d'une part une déformation de comparaison ajustée (figure 24) qui évolue de façon presque linéaire et d'autre part des bandes de tolérance de largeurs très réduites (de 4 à 6 mm). Par ailleurs, il serait encore possible d'introduire un coefficient correctif qui tient compte du mouvement saisonnier du terrain, élément qui a

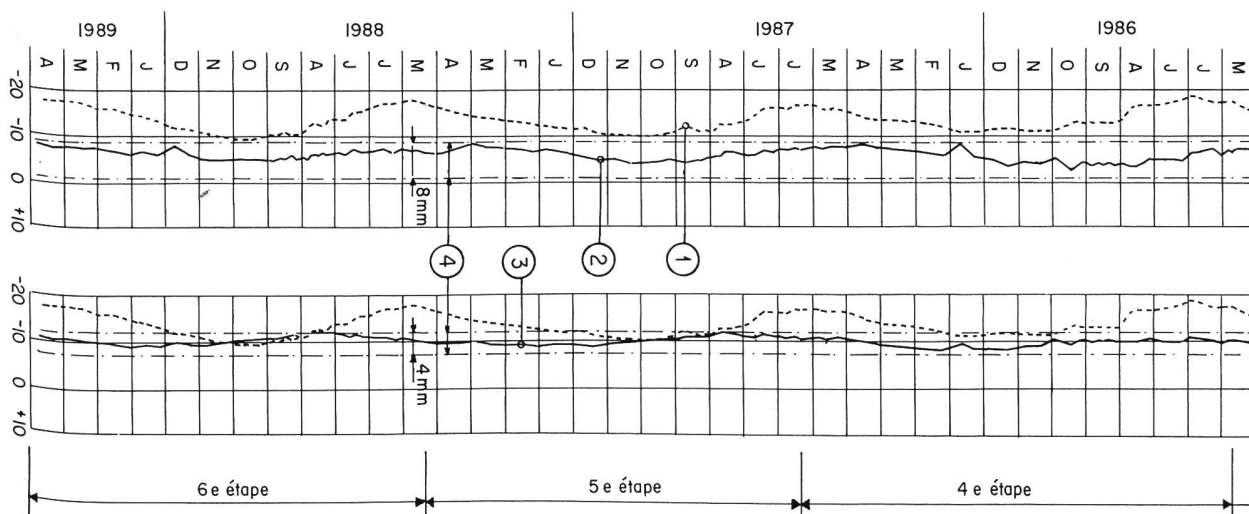


Figure 24. Evolution des déformations, des déformations de comparaison et des déformations ajustées pour le pendule de droite au niveau du couronnement (selon Dr G. Lombardi).
1 déformation mesurée, 2 déformation de comparaison théorique, 3 déformation de comparaison ajustée, 4 bande de tolérance.

été mis en évidence par les mesures géodésiques. L'intervalle de confiance peut alors presque être réduit au tiers de sa valeur initiale. Cette adaptation est prévue dans le cadre de la surveillance future du barrage.

La concordance entre les déplacements déterminés par la géodésie et ceux mesurés par les pendules a toujours été bonne, ce qui était l'indice d'une bonne stabilité du pied du barrage. En outre, les polygonales effectuées en galerie ont mis en évidence une déformation régulière des arcs.

En définitive, les analyses faites après chaque mesure des pendules et les résultats des mesures géodésiques ont montré que le comportement du barrage a été régulier, conforme et élastique tout au long du programme de remise en eau; la comparaison des valeurs obtenues pour des niveaux et des époques identiques a toujours montré une excellente superposition des valeurs obtenues. Les irrégularités qui ont été notées ont résulté de l'effet des travaux d'injection des joints. Ils avaient causé un déplacement vers l'amont de la partie centrale supérieure du barrage. Comme par la suite aucuns travaux d'injection n'ont été entrepris, les déformations n'ont plus été influencées par un quelconque élément extérieur.

Comportement des appuis

Les mesures des sous-pressions, des infiltrations, ainsi que des rocmètres ont permis de suivre le comportement de la zone d'appui de l'ouvrage.

En ce qui concerne tout d'abord les sous-pressions, il faut noter que les valeurs des pressions effectives relevées à lac plein ont été faibles; les maxima varient entre 1,0 et 2,5 kg/cm² sur rive gauche et 0,1 et 0,3 kg/cm² sur rive droite. Ces valeurs témoignent d'une part d'un bon effet du voile d'étanchéité et d'autre part de la bonne capacité de drainage du rocher de fondation à l'aval du voile d'étanchéité.

Quant aux infiltrations dans le barrage, elles ont été petites et n'ont pas été supérieures à celles observées avant 1978.

Les déformations des appuis mesurées par les rocmètres ont été de l'ordre 0,6 mm. L'allure des courbes des déformations montraient au cours d'un cycle de remplissage et de vidange une forme d'hystérèse avec retour à la position initiale, ce qui prouvait un comportement d'un rocher dur et élastique.

Comportement des environs du barrage

Le comportement des environs du barrage a été suivi par les mesures géodésiques. Lors des différentes campagnes géodésiques, les mesures de triangulation ont indiqué que le réseau restait toujours plus ou moins stable, car les points de référence se trouvaient en bordure de la cuvette de tassement. Quant aux mesures de distances entre les appuis et

les nivellements, les mouvements ont été faibles et, d'une mesure à l'autre, ils s'inscrivaient dans l'intervalle de confiance. Il était souvent difficile de certifier ces mouvements comme réels, d'autant plus qu'il existe un effet saisonnier. Toutefois, il est toujours possible de dégager l'évolution des déformations et la tendance générale montre bel et bien une stabilisation évidente de la zone du barrage (figure 10).

Débits des sources

Les débits des sources recensées à l'aval du barrage ont toujours varié en fonction de la saison et ne subissaient pas d'influence notable du niveau du lac. Comme lors du temps de l'exploitation normale, les débits des sources du Prozd-Scecx ont toujours augmenté dès que le niveau de la retenue dépassait la cote 1756 m s.m.

Comme déjà mentionné plus haut, le débit total des sources de la galerie du Rawil a diminué et s'est stabilisé aujourd'hui à 19 l/s. Il est probable que l'équilibre soit atteint entre les affluences et les décharges du massif drainé par la galerie.

Les analyses chimiques des eaux provenant de six sources sélectionnées, de la galerie de sondage et du lac ont été régulièrement effectuées. Les résultats obtenus ont montré que les caractéristiques chimiques des eaux étaient régulières. Les caractéristiques des eaux de la galerie de sondage étant quant à elles différentes de celles des autres sources.

La micro-sismicité

Depuis octobre 1981, un réseau d'observation de l'activité micro-sismique locale a fonctionné en continu. La moyenne des événements enregistrés a été de l'ordre d'un événement par jour. La comparaison de la courbe de remplissage avec celle du cumul des événements micro-sismiques montre que le cycle remplissage-vidange n'a eu aucune incidence sur la micro-sismicité locale (figure 25). Les événements, qui ont été enregistrés et localisés, se situent toujours dans la zone du Wildhorn et au sud, sud-est de la retenue.

7. Enseignements

Bien que les règlements concernant les barrages contiennent déjà des directives claires pour le contrôle global des ouvrages, le cas de Zeuzier a nettement souligné l'importance que ce document attache à la surveillance permanente, à la mise en place d'un dispositif d'auscultation ainsi qu'au traitement des résultats de mesure, tous ces éléments étant par ailleurs indissociables. Il a encore démontré quelle est l'échelle des moyens à mettre en œuvre pour détecter à temps toute anomalie du comportement d'un ouvrage et en expliquer les causes.

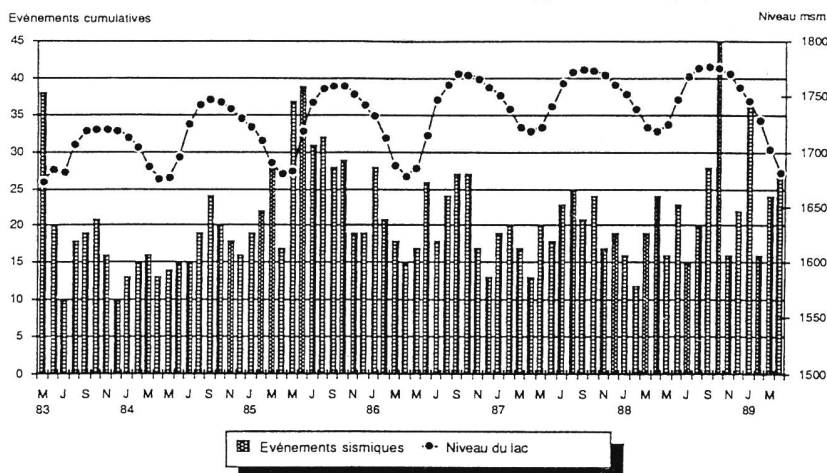


Figure 25. Observation de la micro-sismicité. Cumul des événements enregistrés et variation du niveau du lac.

Il vaut donc la peine de passer en revue l'ensemble des enseignements que l'on a pu retirer au cours de l'événement de Zeuzier.

Aspect de la surveillance

Selon le règlement concernant les barrages, les gardiens de barrages, l'ingénieur expérimenté et l'expert constituent les trois niveaux de la surveillance des barrages; l'Autorité de haute surveillance les «chapeaute». Le rôle des gardiens de barrage est important car par les inspections visuelles qu'ils effectuent, par l'estimation rapide des résultats des mesures qu'ils entreprennent, ils sont les premiers à pouvoir tirer la sonnette d'alarme. Ce fut le cas pour Zeuzier et pour bien d'autres ouvrages.

Toutefois, incorporé à la surveillance continue d'un barrage, l'ingénieur civil expérimenté peut encore apporter un plus en analysant de manière plus approfondie les résultats des mesures au moyen d'un modèle de calcul. Ce modèle de calcul sera de préférence déterministe car il permet de prévoir a priori le comportement du barrage en partant notamment d'hypothèses sur ses caractéristiques. Par ailleurs, on peut encore introduire dans le modèle un effet saisonnier, ce qui permet de resserrer la bande de confiance.

Dans le cas de Zeuzier, un modèle de calcul approprié aurait permis de détecter plus vite le début des déformations anormales et d'exécuter une mesure géodésique la même année.

Conception et ampleur du dispositif d'auscultation

Non seulement le dispositif d'auscultation doit permettre de déceler un éventuel comportement anormal, mais il faut aussi pouvoir obtenir rapidement toutes informations utiles en cas de besoin. C'est uniquement de cette façon qu'il sera possible de déterminer la nature d'un incident et de prendre à temps toutes mesures appropriées pour parer au danger. Dans les cas où l'on doit aussi tenir compte de conditions hivernales (présence de neige), le dispositif d'auscultation doit être conçu de telle manière qu'il puisse, dans la mesure du possible, être utilisé pendant cette période. Cette condition doit particulièrement être prise en compte pour les mesures géodésiques des déformations. La réalisation de polygonales dans les galeries avec rattachement à des points de repères extérieurs peut considérablement améliorer les mesures hivernales.

Lors de l'élaboration d'un projet de dispositif d'auscultation, il faut s'appliquer à prévoir des moyens qui permettent de mesurer les paramètres de charge et leur répercussion sur le barrage, ses fondations et ses environs. Ces trois éléments forment un tout et impliquent donc la mise en place d'un système spatial. Ce système comprend une instrumentation dans le «plan» du barrage et à l'extérieur de celui-ci, en général sous forme de mesures géodésiques (triangulation et nivellement); des points de liaison sont à prévoir entre ces deux éléments de manière à obtenir des déformations absolues (figure 5).

Dans le corps du barrage, le pendule reste un moyen simple et fiable.

Dernièrement de nouveaux appareils ont été développés qui garantissent une meilleure appréciation des déformations des fondations. Ils sont un bon moyen d'alarme (rocmètres) ou de mesures détaillées (micromètre coulissant). Dans la mesure du possible, les têtes des forages seront rattachées au réseau interne du barrage composé de polygonales et de pendules.

On ne négligera pas l'observation des sous-pressions qui dans de nombreux cas fait encore défaut.

Enfin, le cas de Zeuzier a permis de profiter au maximum des possibilités offertes actuellement par la géodésie. Elle a été d'une aide précieuse pour l'explication des causes et le suivi des déformations du terrain. Lors de l'étude d'un réseau, on veillera à ce qu'il soit largement étendu et, selon les conditions topographiques, qu'il englobe le barrage. D'autre part, on prolongera si possible sur les rives le nivellement situé au niveau du couronnement.

Mouvement saisonnier du terrain

Tant avant que pendant la remise en eau de la retenue, la fréquence des mesures géodésiques a été assez soutenue, ce qui a impliqué des mesures à différentes périodes de l'année et sous des conditions climatiques différentes.

Grâce à ces nombreuses mesures, il a été possible de mettre en évidence un mouvement saisonnier du terrain (figure 12). Il se confirme qu'il est préférable, afin de pouvoir comparer les résultats, de toujours effectuer les campagnes de mesures géodésiques à la même époque plutôt que de choisir un niveau de retenue identique. Toutefois, on peut renoncer à suivre ce principe à la lettre lorsque la charge due à la poussée de l'eau est prédominante.

Incidence de travaux souterrains

Des travaux souterrains, comme une galerie ou un tunnel, peuvent influencer les conditions hydrogéologiques par un effet de drainage dans un rayon plus important que l'on imaginait jusqu'à présent. Par conséquent, si de tels travaux souterrains sont envisagés à une distance maximale de 3 à 4 km d'un barrage, des mesures préventives doivent être prises. Il s'agira, si besoin est, d'une amélioration du dispositif d'auscultation et certainement d'une augmentation de la cadence des mesures.

8. Conclusions

Après la détection des déformations anormales, d'importantes études ont été menées dans le but de déterminer les causes de ce tassement régional. Aujourd'hui, on a acquis la certitude que les déformations du terrain sont la conséquence d'une modification des conditions hydrogéologiques due au percement de la galerie de sondage du Rawil. Les mouvements du terrain ont eu au début une ampleur considérable et se sont fortement atténués par la suite. Aujourd'hui, le terrain a trouvé un nouvel état d'équilibre, confirmé par les résultats des nombreuses campagnes de mesures géodésiques. Les différences de déformations observées entre deux mesures géodésiques devenaient de plus en plus faibles et s'inscrivaient dans l'intervalle de confiance. Par ailleurs, ces mêmes mesures géodésiques ont permis de mettre en évidence un mouvement saisonnier du terrain.

Signalons aussi que le débit des venues d'eau à la sortie de la galerie de sondage du Rawil s'est aussi stabilisé.

Les mouvements du terrain ont provoqué d'importants désordres au barrage. Après avoir contrôlé l'état des fondations et examiné les conditions et les possibilités de remise en état, le monolithisme du barrage a pu être rétabli grâce à une injection minutieuse des fissures.

A la suite des travaux de réfection, un programme de six étapes annuelles de remise en eau progressive a été établi. Durant toute la durée de ce programme, le comportement du barrage a été régulier et conforme comme l'ont démontré les analyses des mesures des pendules d'une part et les résultats des campagnes de mesures géodésiques d'autre part. Le barrage réparé répond donc totalement aux hautes exigences requises pour de tels ouvrages.

Après six étapes de remise en eau, la reprise successive de

la charge hydraulique n'a entraîné aucun effet tant géologique ou hydrogéologique que sismique.

Enfin, un tel événement a apporté quantité d'enseignements fondamentaux dans les domaines de la sécurité et de la surveillance des barrages. Il a ainsi permis de progresser dans la conception des dispositifs d'auscultation et l'analyse des résultats de mesures. Il a aussi attiré l'attention sur l'influence que peuvent avoir des travaux souterrains réalisés à proximité d'un barrage.

Dix années se seront donc écoulées entre la détection des premières déformations anormales et la reprise de l'exploitation normale. Aujourd'hui, grâce aux efforts conjugués de tous, l'aménagement a retrouvé sa fonction première, celle de produire de l'énergie de pointe.

Remerciements

Qu'il soit permis ici de remercier tous ceux qui ont œuvré pour la réussite de ce défi technique: les experts fédéraux, le Dr h.c. G. Lombardi, Dr T. R. Schneider, M. K. Egger du Bureau W. Schneider, ainsi que leurs collaborateurs, M. M. Parvex, directeur de l'Electricité de la Lienne SA, ainsi que MM. F. Dayer et J.-C. Perruchoud, chefs d'exploitation, M. O. Gicot, ingénieur-conseil de la Lienne SA, le Dr N. Pavoni, pour les questions sismiques et les représentants du canton du Valais, MM. C. de Kalbermatten et E. Fardel, qui ont tous activement participé aux travaux du «groupe de travail pour la remise en eau» sous la direction du Dr R. Biedermann, chargé de la sécurité des barrages auprès de l'Office fédéral de l'économie des eaux; les ingénieurs de Suisselectra qui ont élaboré le projet de remise en état du barrage et assumé la direction des travaux; au niveau de la réalisation des travaux les entreprises Stump SA, pour les travaux des zones A et B et Swissboring SA, pour les travaux de la zone C. Enfin, le personnel de la Lienne SA qui a assuré le contrôle permanent de l'ouvrage.

Bibliographie / Références

- [1] Gicot H. Dr h.c.: Barrage-voûte de Zeuzier. Comportement des grands barrages suisses, CNSGB 1964, pp. 213–222.
- [2] Biedermann R.: Ausserordentliches Verhalten der Staumauer Zeuzier, «wasser, energie, luft», Heft 7/8, 1980, pp. 182–184.
- [3] Schneider T. R.: Stauanlage Zeuzier. Geologisch-geotechnisch-hydrogeologische Aspekte der Mauerdeformation, «wasser, energie, luft», Heft 7/8, 1980, pp. 193–200.
- [4] Biedermann R., Gicot O., Egger K., Schneider T. R., Berchten A., Lombardi G., Amberg W.: Comportement anormal du barrage-voûte de Zeuzier (Suisse), «wasser, energie, luft – eau, energie – air», 74e année, cahier No 3, numéro spécial pour le congrès ICOLD, Rio de Janeiro 1982.
- [5] Pougatsch H.: Unexpected Behaviour of a Large Arch Dam in Switzerland (Case of Zeuzier). International Congress of Large Dams, Rio de Janeiro 1982, Vol I, Q. 52-R.40, pp. 627–640.
- [6] Schneider T. R.: Geological Aspects of the Extraordinary Behaviour of the Zeuzier Arch Dam. International Congress of Large Dams, Rio de Janeiro 1982, Vol II, Q.53-R.38, pp. 601–621.
- [7] Biedermann R.: Aussergewöhnliche Untergrundverformung bei der Talsperre Zeuzier, «Felsbau», Jahrg. 2, Nr. 4, Dezember 1984, pp. 214–217.
- [8] Pougatsch H., Müller R. W.: Barrages suisses, surveillance et entretien. Comité national suisse des grands barrages, 1985, pp. 189–192.
- [9] Berchten A.: Repair of Zeuzier Arch Dam in Switzerland. International Congress of Large Dams, Lausanne 1985, Vol. II, Q.57-R.40, pp. 693–711.
- [10] Lombardi G. Dr h.c.: Injections des massifs rocheux, Société suisse de mécanique des sols et des roches. Réunion de printemps, mai 1987, Bienne, Bulletin 115, pp. 29–41.
- [11] Lombardi G. Dr h.c.: Les tassements exceptionnels au barrage de Zeuzier. Société suisse de mécanique des sols et des roches. Réunion d'automne, novembre 1988, Berne, Bulletin 118, pp. 39–47.

Adresse de l'auteur: Henri Pougatsch, ingénieur civil EPFL, SIA, collaborateur du Chargé de la sécurité des barrages, Office fédéral de l'économie des eaux, case postale, 3001 Berne.

Einfache Formel für das Fusseinspannmoment von Gewölbestau Mauern

Max Herzog

Zusammenfassung

Die Elastizitätstheorie des kreiszylindrischen Behälters liefert eine einfache Formel zur Näherungsberechnung des Fusseinspannmoments von Gewölbestau Mauern infolge Wasserdrucks. Ihr Ergebnis wird mit den wenigen literaturkundigen In-situ-Messungen verglichen. Die Genauigkeit der einfachen Formel ist für Vorentwürfe ausreichend.

Summary: simple formula for the fixing moment of arch dams in the valley floor

The elastic theory of a cylindrical tank renders a simple formula for the approximate analysis of the fixing moment in the valley floor of arch dams subjected to hydrostatic load. Its results are compared with the few in situ measurements mentioned in literature. The accuracy of this simple formula is sufficient for preliminary design purposes.

1. Einleitung

Zur Vorbemessung von Gewölbestau Mauern sind einfache Näherungsrechnungen – wie die bekannte Ringformel von Mariotte – sehr praktisch, weil zeitsparend. Eine solche Näherung lässt sich auch für das Fusseinspannmoment von Gewölbestau Mauern unter Wasserdruck angeben. Dieser Lastfall ist neben der Eigenlast, die meist für den Fall offener

Blockfugen in Rechnung gestellt wird, massgebend für die kritischen Zugspannungen am wasserseitigen Mauerfuss.

2. Faustformel

Aus der Elastizitätstheorie des kreiszylindrischen Behälters mit konstanter Wanddicke unter Wasserdruck [1] ergeben sich folgende Gleichungen zur näherungsweise Berechnung des Fusseinspannmoments bei starrer Einspannung (Bild 1). Die kennzeichnende Länge der Kreiszylinderschale beträgt

$$L = 0,76 \sqrt{R_u d_u} \quad (1)$$

und das Fusseinspannmoment der dünnen Schale

$$M_u^0 = (\gamma L^3 / 2) (H/L - 1) \quad (2)$$

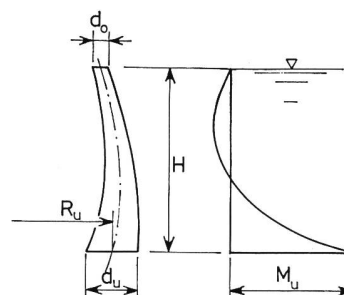


Bild 1. Hauptquerschnitt einer Gewölbestau Mauer mit Bezeichnungen und mit dem Biegemoment infolge Wasserdrucks.