

Zeitschrift:	Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria
Herausgeber:	Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband
Band:	74 (1982)
Heft:	3
Artikel:	Contrôle de l'état du barrage et recherche des méthodes de réparation = Examination of condition and evaluation of repair methods
Autor:	Berchten, Anton R.
DOI:	https://doi.org/10.5169/seals-954761

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: 24.02.2026

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

toujours imperméables au droit du voile d'étanchéité. C'est pourquoi du point de vue géologique et géotechnique, le verrou de Zeuzier sera encore en mesure de supporter le barrage lorsqu'il sera réparé. Tout cela est justifié par l'explication raisonnable formulée. Elle éclaircit l'origine des tassements observés, qui comme on sait, ont abouti au rapprochement des flancs de la gorge où est situé le barrage de Zeuzier.

Le changement des conditions de la nappe d'eau souterraine provoqué par l'effet de drainage de la galerie de sondage est, vraisemblablement, la cause principale des déformations du massif rocheux. Par ailleurs il faut souligner le fait que pour déclencher de pareils phénomènes, il a dû déjà y avoir des conditions hydrogéologiques très particulières. Il semble que la présence d'un système de nappes phréatiques sous pression et ne pouvant s'écouler librement serait indispensable. Le système doit être drainé par un percement souterrain provoquant ainsi des changements de pression dans le rocher. Ces modifications de la pression conduisent alors aux déformations que l'on sait. Vues sous cet angle, les répercussions sur le barrage de Zeuzier peuvent être considérées comme très spéciales, voire uniques en leur genre.

Adresse de l'auteur: Toni R. Schneider, Dr. sc. nat. EPFZ, géologue-conseil, expert fédéral, 8713 Uerikon, Suisse.

are still impervious in the region of the grout curtain. From the geological-geotechnical viewpoint, the riegel of Zeuzier will, therefore, still be capable of supporting the repaired arch dam in the future. These positive findings are, not in the least, justified by the fact that a very reasonable explanation could be found of the main cause for the observed settlements. They finally lead to the narrowing of the flanks of the gorge in which Zeuzier dam is placed.

The change of the groundwater conditions by the drainage effect of the exploratory adit is, with a high probability, the main cause for the deformations of the rock massif. On the other hand, it has to be pointed out that very special geological and hydrogeological conditions have to exist to trigger the observed phenomena. It seems that particularly the presence of a groundwater system under pressure with a blocked outflow is needed. This has to be drained by an underground construction to provoke the necessary changes in the stresses of the rock mass which then lead to the corresponding deformations. From this point of view, the incidents at Zeuzier dam may be considered as a very special, if not an almost unique case.

Address of the author: Toni R. Schneider, Dr. sc. nat. ETHZ, consulting geologist, federal expert, 8713 Uerikon, Switzerland.

V. Contrôle de l'état du barrage et recherche des méthodes de réparation

Anton R. Berchten

1. Introduction

A la suite de la première phase des investigations qui tentaient à éclaircir la nature et le mode de déformation des appuis du barrage (article IV), un projet de contrôle du barrage et de ses fondations a été élaboré et les travaux nécessaires ont été entrepris. Ces travaux avaient pour buts:

- de contrôler l'état actuel du barrage et de ses appuis,
- de définir le mode de réparation des dégâts apparents ou décelés à la suite des travaux de contrôle.

Ces travaux ont été divisés en trois zones distinctes, qui requièrent tant pour les travaux de contrôle que pour ceux d'assainissement des techniques assez différentes. Ces trois zones sont les suivantes:

Zone A: l'écran d'étanchéité. Ces travaux concernent le contrôle de la qualité du voile d'injection sous le barrage et au large et également au voisinage des failles.

Zone B: la zone d'appui du barrage. Il s'agit du contrôle du contact béton-rocher et des zones limitrophes.

Zone C: le corps du barrage. Ces travaux englobent le contrôle de la qualité du béton et les essais d'injection des fissures en vue de la réparation du barrage.

2. Travaux de contrôle de l'écran d'étanchéité (zone A)

Des forages de contrôle ont été prévus pour déceler d'éventuels défauts du voile d'étanchéité qui seraient survenus à la suite des tassements observés. Quinze forages dont la longueur varie entre 40 et 130 m et représentant un total de 1366 m ont été exécutés au carottier double avec un diamètre minimum de 66 . Sept ont été réalisés de-

V. Examination of Condition and Evaluation of Repair Methods

Anton R. Berchten

1. Introduction

Following a first step of investigations which were mainly directed to resolve the question of the nature and the mode of the deformations of the dam site (paper IV) a second step was directed to resolve the problems of the dam itself and its foundation. For this purpose an evaluation program was established covering the following:

- Examination of condition of the dam and its foundation
- Evaluation of methods suitable for repairing the damage to the dam detected by the explorations.

Three different zones of activities were differentiated, each requiring its own specific method of approach.

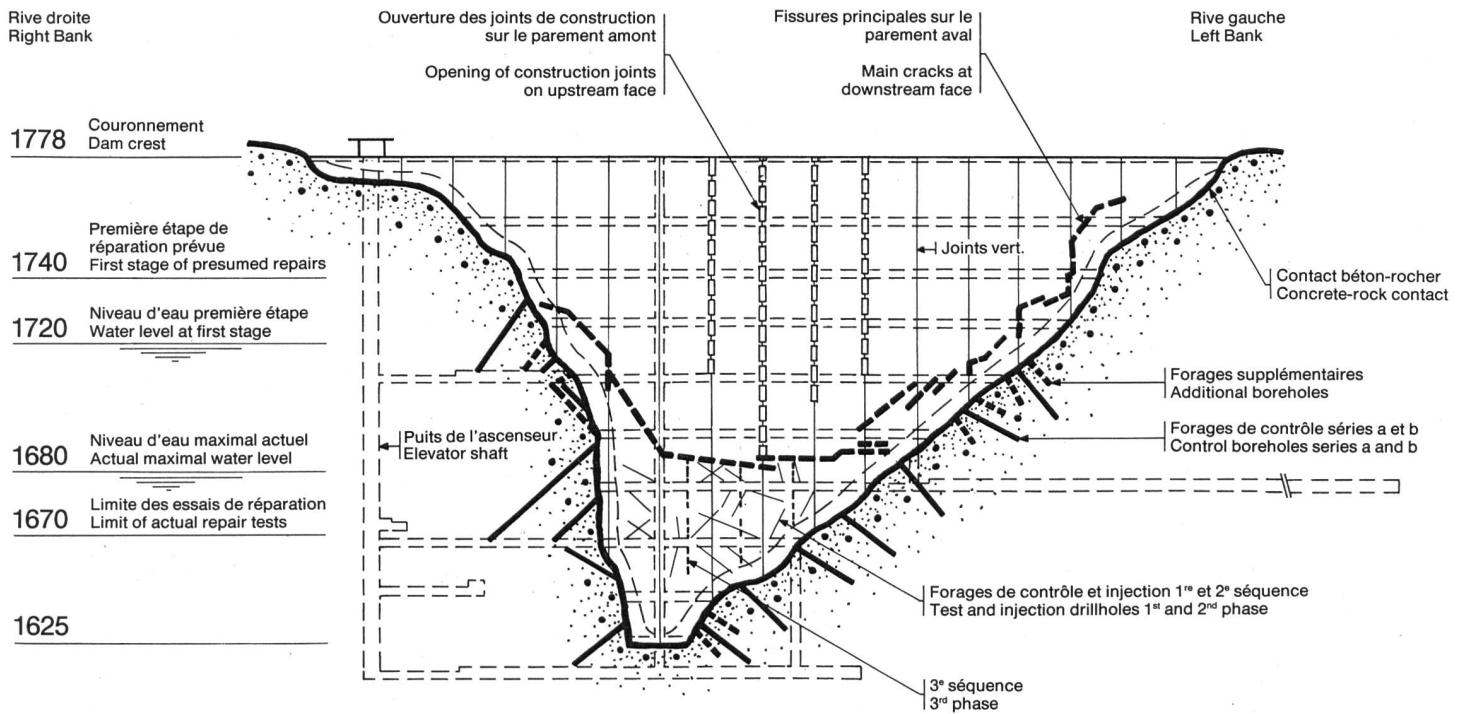
Zone A: Grout curtain. Investigation of the condition of the grout curtain in general and also in the proximity of existing faults.

Zone B: Abutment. Examination of the concrete-rock contact and adjacent zones.

Zone C: Dam body. Tests establishing the quality of the structural concrete as well as injection tests evaluating the possibilities of repair of the cracks in the dam.

2. Examination of the Grout Curtain (Zone A)

A series of boreholes were drilled into the grout curtain to investigate possible damage caused by the settlement and movement encountered in the surrounding region. Fifteen boreholes of various lengths between 40 and 130 up to a total of 1,366 meters were drilled by coring, with a diameter of 66 mm into the existing plane of the grout curtain. Seven of these boreholes were drilled from the existing grouting galleries, the remaining from the surface (figure 7 of paper IV).



puis les galeries d'injection existantes, les autres depuis la surface du terrain (figure 7, article IV).

Des essais de perméabilité type «Sabarly» ont été exécutés sur toutes la longueur des forages par passes descendantes de 5 m avec pressions croissantes et décroissantes de 4 à 15 bars en maintenant les pressions successives pendant une minute. Lorsque l'absorption d'une tranche était supérieure à 3 Lugeon, des essais complémentaires «Sabarly» ont été réalisés en subdivisant la tranche initiale de 5 m en passes de 1 m pour mieux localiser l'endroit des pertes.

Pour s'assurer que le forage ne s'écartait pas du plan théorique du voile, sa direction a été contrôlée au moyen de l'appareil «Eastman»; les résultats ont montré que la déviation fut inférieure à 0,5% de la longueur forée.

Les forages ont été injectés en remontant avec du ciment Portland avec des pressions de 10 à 30 bars.

Des forages exécutés pour la mise en place d'instruments d'auscultation ainsi que des forages de contrôle dans la zone contact béton-rocher réalisés selon de même procédé ont permis de compléter ces premiers résultats.

Toutes les carottes ont été relevées et consignées avec les résultats des essais de perméabilité, les analyses et les remarques du géologue.

Sur la base des résultats de ces travaux et des contrôles effectués, les conclusions suivantes ont été tirées:

- L'état actuel de l'écran d'étanchéité du barrage est satisfaisant et il est en tout cas susceptible de remplir son rôle.
- Le verrou rocheux du barrage de Zeuzier possède une imperméabilité suffisante, à l'exception des zones situées à proximité des failles obliques.
- La qualité du rocher est bonne.
- En dehors des anciennes failles connues aucune autre n'a été décelée.

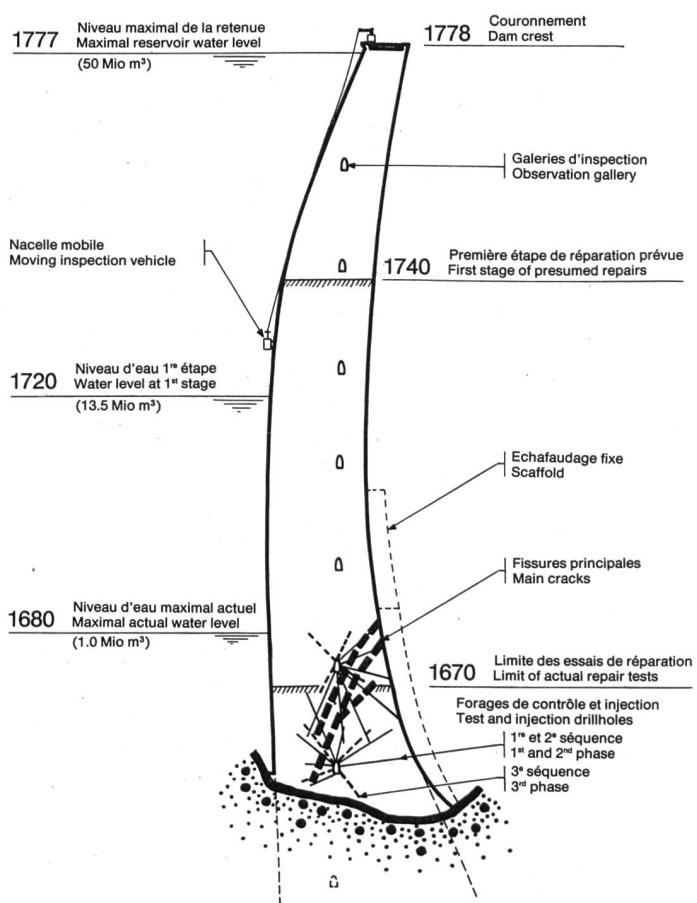
Tous les travaux de sondage, de contrôles par essais de perméabilité et de réinjections de l'écran d'étanchéité ont été exécutés par l'entreprise Stump Sondages SA Suisse et la direction de travaux a été assurée par Suiselectra Ingénieurs Conseils SA.

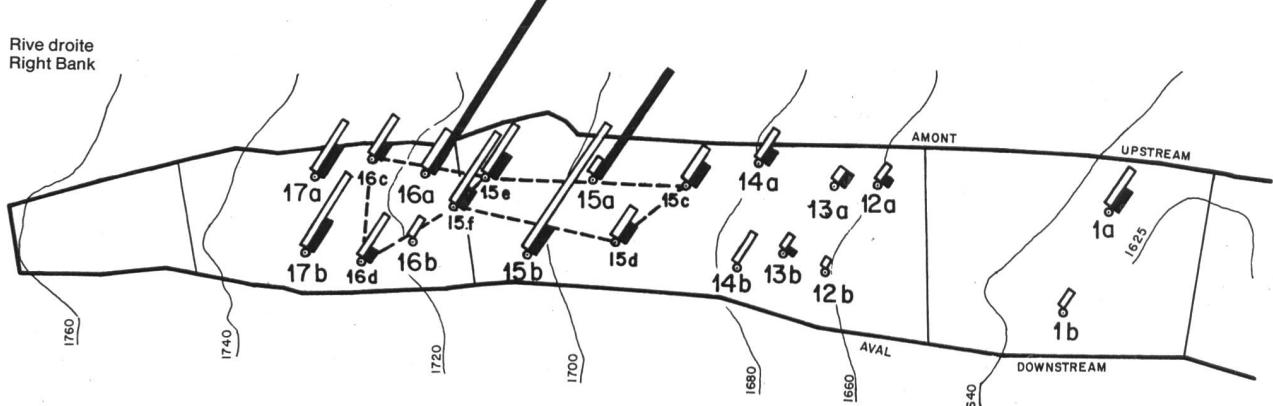
Figure 1. Fissures principales et forages de contrôle.

Figure 1. Main cracks and test boreholes.

Figure 2. Section au droit du joint de construction 8/9.

Figure 2. Cross section at the vertical construction joint 8/9.





Forages de contrôle le long des parements séries a et b

Forages supplémentaires séries c, d, e, f

Essais de perméabilité au contact (Sabarly)

■ 2 Lugeons (11/10 min, 10 bars)

Injection de coulis de ciment Portland normal

■ égal à 100 kg

Figure 3. Surface développée du contact béton-rocher avec situation des forages de contrôle.

3. Zone d'appui du barrage (zone B)

Des forages de contrôle ont également été prévus pour vérifier le contact béton-rocher dans la zone d'appui du barrage. Ces forages ont été répartis sur toute la surface de la fondation (figures 2 et 3).

Dans une première étape, ces travaux essentiellement situés entre les galeries X (cote 1681.80) et III (cote 1723.60) ont été subdivisés en trois phases distinctes:

- Forages de contrôle de la série a, soit 15 forages en direction de l'amont,
- Forages de contrôle de la série b, soit 16 forages en direction de l'aval,
- Forages supplémentaires des séries c, d, e, f en cas de forte perméabilité, soit 19 forages.

La longueur de ces forages variaient entre 20 et 40 m; 1270 m ont été réalisés au total. Ces forages ont été exécutés soit depuis les galeries du barrage, soit à partir des galeries d'injection en rocher. Selon leur point de départ, ils pénètrent de 20 m dans le rocher ou de 5 m dans le béton. Enfin ils ont été exécutés au carottier double avec un diamètre de 46 mm.

Des essais de perméabilité type «Sabarly» ont été systématiquement exécutés dans ces forages selon les séquences suivantes:

- Perforation jusqu'au contact plus 0,5 m.
- Essai de perméabilité du contact exécuté avec obturateur double sur une passe de 1 m (0,5 m en rocher + 0,5 m dans le béton).
- Poursuite de la perforation dans le rocher jusqu'à la profondeur prévue par passes de 5 m.
- Essai de perméabilité du rocher comme spécifié pour le contrôle de l'écran d'étanchéité.

A la suite des injections des forages des séries a et b, dans les zones où les essais de perméabilité avaient conduit à des valeurs égales ou supérieures à 2 Lugeon au contact, des forages supplémentaires pénétrant de 5 m dans le rocher (séries c, d, e, f) ont été réalisés en guise de contrôle. Les résultats de ces travaux ont montré que les absorptions restaient inférieures à 2 l/min m confirmant l'efficacité de l'injection. L'ensemble de ces travaux permet de s'assurer que l'état initial du contact béton-rocher peut être rétabli.

Boreholes along dam faces series a and b

Additional boreholes series c, d, e, f

Water pressure tests (Sabarly)

■ equal 2 Lugeons (11/10 min at 10 bars)

Portland cement grout absorption

■ equal 100 kg

Figure 3. Developed surface of concrete-rock contact with borehole locations.

Water pressure tests were carried out in descending sections of 5 meters following the system recommended by Sabarly with rising and lowering pressure from 4 to 15 bars, holding specific pressure for one minute at a time. In the case where the absorption was higher than 3 Lugeon, additional tests using the same method were carried out in sections descending by 1 meter subdividing the initial 5 meters, enabling the point of water loss to be located more clearly.

To make sure that the drilling had not drifted away from the axis of the grout curtain, the direction of the borehole was checked with the Eastman instrument. These results showed a maximum deviation of less than 0.5% of the driven length.

The boreholes were injected with Portland cement grout at pressures of between 10 and 30 bars.

The drillholes for placement of the observation instruments, as well as the boreholes in the contact zone concrete-rock, were driven by the same procedure and served to complete the data required.

The cores were drawn and completed with the water absorption test and the geological comments.

The investigations lead to the following conclusions:

- The condition of the grout curtain can be considered as satisfactory and is able to perform its designated role.
- The banks adjoining the dam are sufficiently impervious with the exception of locations at the existing faults.
- The quality of the rock is good.
- No new faults were detected.

All prospecting by boring, water pressure and injection tests of the grout curtain were conducted by Stump Drilling Company, Switzerland. The supervision of the project and the work was done by Suiselectra Consulting Engineers, Switzerland.

3. Abutment Zone of Dam (Zone B)

Prospective boreholes were carried out to test the concrete-rock contact along the foundation surface of the dam (figures 2 and 3).

In the first stage these investigations were carried out between the inspection gallery X and III or between 1,681.80 and 1,723.60 meters above sea level. Three different series of boreholes were applied:

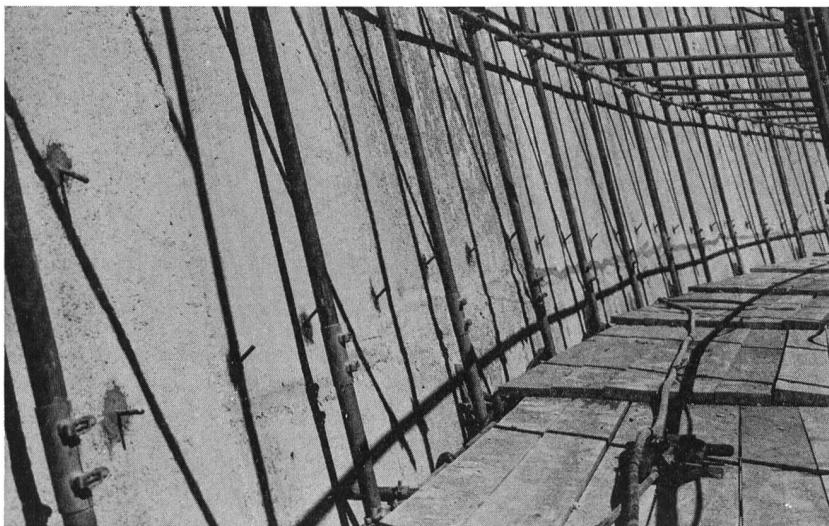


Figure 4. Echafaudage, fissures colmatées, événements.

Figure 4. Scaffold, sealed cracks, air vents.

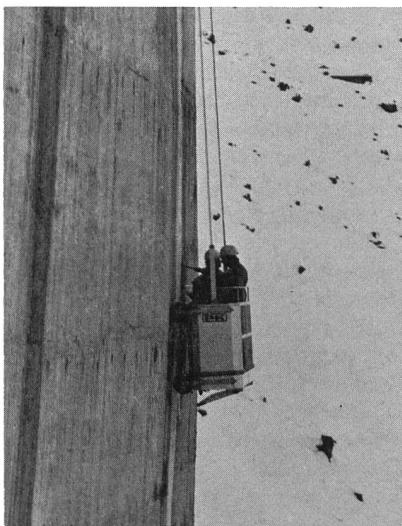


Figure 5. Nacelle.

Figure 5. Inspection vehicle.

On peut indiquer que les absorptions les plus importantes se sont situées dans les forages de la rive gauche entre les niveaux 1695 à 1726 et dans ceux de la rive droite entre les niveaux 1701 à 1718. Ces zones sont les plus proches des fissures relevées dans le béton parallèlement à l'appui du barrage.

4. Corps du barrage (zone C)

4.1 Réseau des fissures

Si l'intégrité du barrage n'est nullement atteinte par un tassement général et uniforme de la zone de son emplacement, il n'en est pas de même sous l'influence d'un resserrement de la gorge. En effet, le barrage-vôûte est comprimé par le mouvement de fermeture de la vallée, ce qui provoque un déplacement de la partie centrale vers l'amont et cause assez rapidement une fissuration du béton dans les zones sollicitées en traction. En règle générale, on constate une fissuration principale sur le parement aval du mur qui part du couronnement (cote 1778) et descend le long des deux appuis jusqu'à la cote 1670 environ, où elle traverse le barrage horizontalement. Dans la

- Series a: 15 boreholes along the upstream foundation line
- Series b: 16 boreholes along the downstream foundation line
- Series c, d, e, f: Additional 19 boreholes in areas of high water absorption.

The length of each borehole varied between 20 and 40 meters and added together gave a total of 1,270 meters. These boreholes were driven from the inspection galleries of the dam or from the existing grouting galleries in the adjoining rock. From the contact surface they were driven 20 meters into the rock or if directed from the grouting galleries 5 meters into the concrete of the dam. These boreholes were also cored but with a diameter of only 46 mm.

Water pressure tests of the Sabarly system were also carried out at these locations by the following procedure:

- Drilling from concrete 0.5 m into rock.
- Water pressure test of the contact zone using a double sealing device of 1 m (0.5 m in rock and 0.5 m in concrete).
- Completion of borehole to the full length in sections of 5 meters.

Figure 6. Forage en galerie.

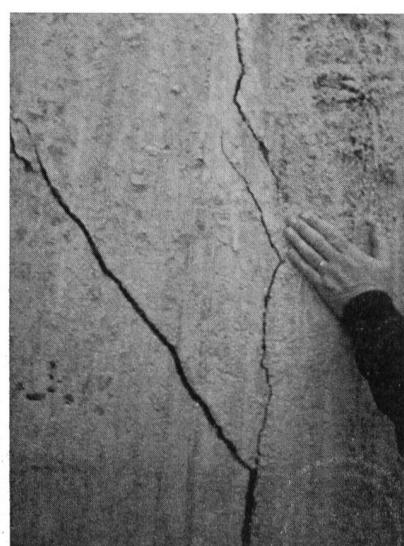
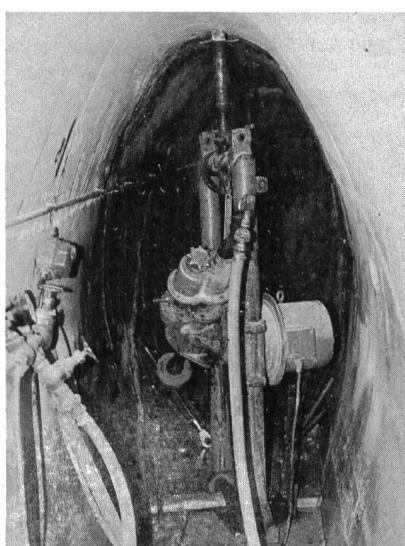
Figure 6. Drilling in gallery.

Figure 7. Fissures principales.

Figure 7. Main cracks.

Figure 8. Fissure en cours de traitement.

Figure 8. Crack to be sealed before injection.



partie centrale du parement amont, on observe une ouverture des joints verticaux depuis le couronnement jusqu'à la même cote environ (figure 1).

En 1980 et 1981 les travaux de contrôle et relevés détaillés entre les niveaux 1625 (pied du mur) et 1700 environ ont été exécutés depuis un échafaudage sur le parement aval, depuis une nacelle sur le parement amont et depuis les galeries de visite et les puits verticaux à l'intérieur du barrage (figures 4 et 5).

On a constaté que l'ouverture des fissures relevées périodiquement depuis avril 1979, se développait en parallèle avec les déformations observées par les mesures de pendule ou les mouvements déterminés par les mesures géodésiques.

En hiver 1980/81 après une stabilisation du terrain on constatait que les fissures avaient tendance à se refermer (relevé du 3.12.80), ce qui peut s'expliquer par un abaissement de la température.

L'ordre de grandeur d'ouverture des fissures principales observées sur les parements est de 15 mm au maximum, entre 4 et 7 mm pour des fissures qui se sont développées parallèlement à celles-ci (figure 8). Dans les galeries l'ouverture des fissures répertoriées sont en général inférieures à 5 mm.

Les forages et les essais de perméabilité ainsi que les injections pour les essais de réparation ont montré que dans la partie centrale les fissures horizontales à l'aval plongent à l'intérieur du barrage avec un angle d'environ 30° sur la verticale. Ces mêmes fissures se retrouvent dans les galeries inférieures (figure 8).

4.2 Exécution des travaux préliminaires de réparation

Un vaste programme de recherches et d'essais à grande échelle a été établi afin de choisir un produit à base d'époxy pour le colmatage des fissures et de déterminer un mode d'exécution adéquat.

Les joints verticaux ont tout d'abord été contrôlés et réinjectés jusqu'à la cote 1700. Ensuite, il a été procédé aux essais d'injection de collage des fissures entre les niveaux 1625 et 1670.

Afin de bloquer les nombreuses fissures internes qui communiquent avec les joints verticaux et de faciliter par la suite les travaux de réparation bloc par bloc, il a donc été décidé de traiter les joints en premier. L'injection de ces joints a été entreprise en utilisant un matériau à base d'époxy dans le but de colmater en même temps les fissures fines du béton. Les forages ont été réalisés à partir des galeries et des parements et recoupent le plan des joints à différentes profondeurs et selon des angles variables.

Le traitement des fissures s'effectue du bas vers le haut et bloc après bloc selon un schéma qui comprend plusieurs séquences. L'implantation et l'orientation des forages d'injection est choisi en fonction de l'état de fissuration. Les fissures traitées depuis l'intérieur qui se prolongeaient au-delà de la cote 1670, ont été injectées jusqu'à leur point de résurgence sur le parement aval. A la suite des travaux d'injection, l'extraction de carottes permet de se faire une idée précise du réseau de fissures, de leur orientation générale, de leur ouverture moyenne et de la qualité du collage (figures 4, 6, 7, 8, 9).

Suite aux investigations concernant l'extension du réseau des fissures et la sélection d'un produit d'injection, aux essais à grande échelle et aux essais de résistance, il a été constaté que le corps du barrage pouvait être réparé en rétablissant un monolithisme de l'ouvrage comparable à celui qui prévalait avant le tassement du terrain et les déformations observées.

– Water pressure tests as specified for the investigation of the grout curtain.

After injection with cement grout the boreholes series a and b were injected, additional boreholes series c, d, e, f were directed in those zones where the water absorption was equal or higher than 2 Lugeon at the contact surface but in this case only 5 m were driven into rock. Following the same procedure water tests at the contact surface were found to be substantially lower than the expected value of 2 l/min/m. This confirmed the effectiveness of the injection and it is demonstrated, therefore, that the initial condition of this contact zone can be re-established.

It was realized that the highest water absorptions were between 1,695 and 1,726 m a.s.l. on the left bank and between 1,701 and 1,718 m a.s.l. on the right bank. These zones where the bond broke are in the proximity of the main cracks which followed a surface in the concrete of the dam which is parallel to the surface of the lateral abutment.

4. Dam Body (Zone C)

4.1 Crack network

The integrity of the dam in its entirety was not influenced by a general and homogeneous settlement of its site. It was due to the encroaching of the two sides of the gorge at the dam site, forcing the dam to deform in such a way that it started to crack.

In fact the arch dam suffered under the lateral compression, pushing the key point of the crown in the upstream direction and caused the formation of cracks in areas of high tensile stress.

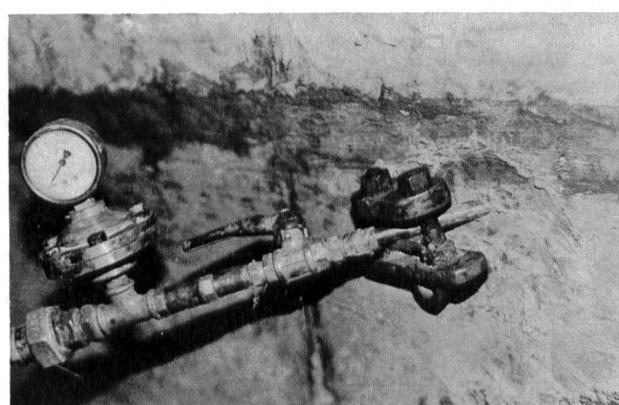
Main cracks were soon observed on the downstream face starting at the crest, following the abutments down to a level of approx. 1,670 m a.s.l. where they extend horizontally across the dam face. In the center section of the dam dilatation of the vertical construction joints on the upstream side were observed starting at the crest and continuing down to approximately the same level.

During the years 1980 and 1981 examinations from the dam foot to about 1,700 m above sea level were carried out with detailed drawing of the cracks using a scaffold erected on the downstream and a moving suspended vehicle on the upstream face of the dam. These observations were completed by those from the inspection galleries and the vertical shafts of the dam (figures 4 and 5).

It was noted and registered regularly since April 1979 that the width of the cracks increased parallel to the deformations observed by the measurements of the plumb line and those of the geodetic surveys. During winter 1980/81

Figure 9. Piston d'injection pour résine époxy.

Figure 9. Epoxide injection pistol with sealed-in copper tube and clamp.



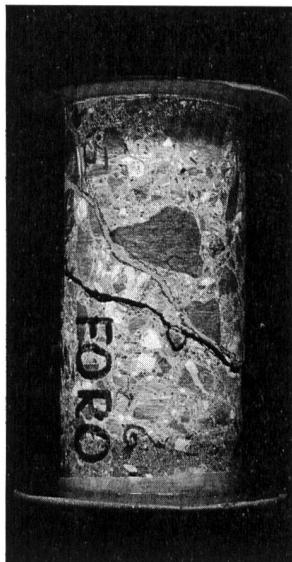


Figure 10. Carotte avec fissure injectée après essai de traction pure.

Figure 10. Sample with injected crack after tension test.

4.3 Choix du produit d'injection

Compte tenu de la nature des travaux (rétablir le monolithisme d'un barrage) et des conditions locales (chantier en altitude), le produit à envisager devait répondre à certains critères importants. Il devait avoir une adhérence élevée sur surface mouillée et une viscosité basse permettant d'injecter les fissures fines, une densité élevée permettant, lors de la mise en place du produit, le déplacement total de l'eau contenue dans la fissure et une température minimum de prise permettant le colmatage des fissures par basse température. Par ailleurs, il s'agissait d'avoir un produit dont le module d'élasticité soit le plus haut possible, des résistances à la traction et à la compression comparables à celles du béton du barrage.

Sur la base des résultats des essais d'injection préliminaires exécutés en mai 1980 la commission technique en accord avec les experts de l'Office fédéral de l'économie des eaux a porté son choix sur les matériaux d'injection à base d'époxy suivants:

- Rodur 510: produit à faible viscosité (colle).
- Rodur 520: produit à haute viscosité (mastic).

Ce produit est fabriqué en Suisse par Sika en exclusivité pour le groupe Rodio (tableau 1).

Tableau 1. Les valeurs de résistance des composants Rodur 510 (colle) et Rodur 520 (mastic)

	Colle	Mastic
– Viscosité à 25 ° (m pa s)	500	20 000
– Température min. de prise (°C)	5C	5C
– Résistance à la compression (N/mm²)	≥60	≥60
– Résistance à la traction (N/mm²)	≥10	≥10
– Résistance à la traction entre béton et époxy, appliquée sous l'eau à 3 ° (N/mm²)	≥2,5	≥2,5

Les composants colle et mastic peuvent être mélangés afin d'adapter la viscosité en fonction de l'ouverture et de la profondeur des fissures.

4.4 Injection des fissures

Pour réaliser le colmatage des fissures, trois séquences ont été prévues. Le programme de traitement par séquence a été choisi car il offre la possibilité d'orienter logiquement les phases suivantes en fonction des résultats atteints à un stade de traitement donné. Il a été prévu d'injecter toutes les fissures visibles sur les parements du barrage et dans les galeries dont l'ouverture est supérieure à 0,5 mm.

after the stabilization of the settlements, it was noted that the cracks had the tendency to close again (measurements of 12th December 1980) which can be explained by a decrease of the ambient temperatures.

The magnitude of the main crack width was 15 mm in maximum, between 4 and 7 mm at locations where parallel cracks in the vicinity developed (figure 8).

In the inspection galleries the crack widths noted and registered in general were below 5 mm.

Coring and water pressure tests as well as injection tests revealed that in the center section the horizontal crack observed at the downstream face falls to the inside of the dam by an angle of 30° to the vertical. These cracks are to be found again in the lower inspection galleries of the dam (figure 8).

4.2. Evaluation of repair works

A large scale investigation program was established directed to confirm the selection of the product based on an epoxide resin suitable for the repair of the dam and to investigate the correct method of application.

First the vertical construction joints had to be examined and then reinjected to a level of about 1,700 m a.s.l. It was followed by injection tests aimed at repairing the cracks between level 1,625 (foot of the dam) and 1,670.

To facilitate the proper injection of the smaller cracks crossing the vertical joints and subsequently the injection of the cracks block by block, it was decided to first inject the vertical joints. The injection was performed by using the same material as intended for the cracks, namely the epoxide resin.

Drillholes were driven from the inspection galleries and concrete faces intersecting the joints at different places.

The treatment followed a sequence from the bottom upward and block by block, following a several phase program. The location of the drillholes was adapted to the cracks and where they extended above the upper limit of 1,670 m a.s.l., the cracks were injected completely to the point where they reached the dam face. After this injection work, core samples were extracted to get detailed information regarding the location, orientation and extent of the crack network, as well as the widths of the cracks and the quality of the injection (figures 4, 6, 7, 8, 9).

The investigations regarding the crack network, the selection of an injection agent, the large scale procedures and the strength tests led to the conclusion that the dam body can be repaired to a condition equal to the state before the settlements and the observed site deformations.

4.3 Selection of the agent to be injected

Considering the main purpose of the intended work (re-establishing the monolithicity of the dam) and local conditions (working at high altitudes) the agent to be injected had to meet several severe criteria.

It had to show a high adhesion even if applied to a wet surface, a low viscosity to allow injection into small cracks and a high density to ensure the complete displacement of the water contained in the cracks. It must cure at temperatures below 5 °C to ensure a perfect seal of the cracks to the adjacent concrete at low temperatures. Furthermore, the injection agent had to have the highest possible modulus of elasticity tensile and compression strengths comparable to those of concrete.

Using the results of a preliminary injection test campaign of May 1980 as a base the Technical Commission in accordance with the experts of the Swiss Federal Office for Water Economy decided to select the following injection agents:

La description des différentes séquences est la suivante (figures 1 et 2):

1^{re} séquence:

Lors de la première séquence on a injecté les fissures visibles sur le parement aval et dans les galeries, les forages ne pénétrant que de 3 à 4 m dans le béton.

- Forages diamètre 46 mm non-carottés

- Essais de perméabilité Sabarly

- Injections de collage si les essais de perméabilité donnent des valeurs supérieures à 1 l/10 min, pression 10 atm.

2^e séquence:

Les injections de la deuxième séquence doivent couvrir la zone des fissures dont l'orientation a été précisée à la suite des travaux de la 1^{re} séquence.

- Forages diamètre 46 mm carottés (figure 6)

- Essais de perméabilité Sabarly

- Injections de collage si les essais de perméabilité donnent des valeurs supérieures à 1 l/10 min, pression 10 atm.

3^e séquence:

Les injections de la troisième séquence intéressent une zone plus étendue. Les phases de cette séquence sont identiques à celles de la seconde séquence.

Les forages sont prévus dans chaque bloc à partir des galeries perpendiculairement à son axe. Grâce à cette séquence, des résultats systématiques de la zone du barrage réparé peuvent être obtenus.

Les quantités injectées en moyenne diminuaient au fur et à mesure des différentes séquences, alors que la longueur totale des forages augmentait, ce qui tend à démontrer l'efficacité du mode de traitement des fissures. Tous les travaux d'essais de réparation ont été exécutés par l'entreprise Swissboring société suisse de sondages et prospection SA et la direction des travaux a été assurée par Suiselectra Ingénieurs Conseils SA.

4.5 Contrôle de la qualité du béton du barrage et du béton avec des fissures injectées.

Des essais de résistance du béton ont été effectués sur des carottes prélevées dans des zones non fissurées ainsi que sur des échantillons provenant de zones où les fissures avaient été traitées. Outre la résistance du béton, l'efficacité de l'injection et la résistance du contact résine/béton ont pu être contrôlées.

Les essais suivants ont été fait aux laboratoires des matériaux pierreux de l'Ecole Polytechnique Fédérale de Lausanne, Suisse:

1. Essais de résistance du béton prélevé dans des zones non fissurées

Ces essais ont été prévus pour obtenir des valeurs de référence pour les essais d'injection et pour juger de la qualité du béton du barrage.

2. Essais préliminaires de résistance du béton avec des fissures injectées avec des matériaux à base d'époxy (figure 10)

2 a) Première série pour le choix du produit avant les essais de réparation.

2 b) Deuxième série 6 mois plus tard pour juger du comportement du matériau dans le temps.

3. Essais de résistance du béton avec des fissures injectées à la suite des essais de réparation à grande échelle

Ces essais permettent de juger de la qualité des travaux d'injection exécutés dans des conditions de chantier.

En conclusion, ces essais montrent (tableau 2) dans l'ensemble une excellente qualité du béton. Les résultats des essais de résistance à la compression et à la traction ainsi

– Rodur 510: Agent on an epoxide resin basis with low viscosity (colle)

– Rodur 520: Agent with high viscosity (mastic).

These agents are manufactured in Switzerland by Sika as trademarks for the Rodio group (table 1).

Table 1.
Values and strengths of the agents Rodur 510 (colle) and Rodur 520 (mastic).

	Colle	Mastic
Viscosity at 25 °C (mpa s)	500	20,000
Min. curing temperature (°C)	5	5
Compression strength (N/mm ²)	≥ 60	≥ 60
Tensile strength (N/mm ²)	≥ 10	≥ 10
Bond between concrete and epoxide if applied under water of 3 °C (N/mm ²)	≥ 2.5	≥ 2.5

The two agents colle and mastic can be mixed to attain a desired viscosity to suit widths and depths of cracks to be injected and repaired.

4.4 Injection procedure for repair of cracks

To attain the proper effect in repairing the cracks, three phases were pursued (figures 1 and 2).

The treatment in three phases offers the possibility to plan the phases in a sequence based on the results obtained from previous phases of treatment. It was decided to repair all cracks appearing on the dam faces and in the galleries and accessible shafts having a width larger than 0.5 mm.

The description of the phases is as follows:

1st phase:

In the first phase cracks visible on the dam faces and in the inspection galleries were injected

- Drilling dia. 46 mm without cores
- Water pressure tests, system Sabarly
- Epoxide injection if water pressure tests give absorption values greater than 1 l/min at 10 bars.

2nd phase:

The injections of the second phase cover the zone of cracks detected on the basis of the investigations of the first phase

- Drilling dia. 46 mm cored
- Water pressure tests
- Epoxide injection if water pressure tests indicate losses higher than 1 l/min at 10 bars.

3rd phase:

In this phase epoxide injections covered a larger zone of the dam. The procedures (drilling diameter, water test, injection criteria) were as in the 2nd phase. The drillholes were driven from the inspection galleries in each block between two vertical joints, perpendicular to the axis of the gallery.

This phase is considered as a systematic investigation of the whole dam in zones within the proximity of the cracks.

It can be noted that the amount of material injected decreased with each phase whereas length of injection drillholes increased with each phase, which shows clearly the effectiveness of the repairs of the cracks.

All prospecting by boring, water pressure and injection tests for repair of the cracks in the dam was conducted by Swissboring, Swiss Boring and Prospecting Corporation, Switzerland. The supervision of the project and the work was done by Suiselectra Consulting Engineers, Switzerland.

4.5 Quality control of concrete and repair work

Tests were carried out on cores extracted from concrete zones without cracks and on cores with repaired cracks. This allowed the comparison of the original concrete

Tableau 2. Résultats des essais, valeurs moyennes résumées.

Essai	Essais de référence		sélection d'un produit	Essais à grande échelle
	1	2a		
Date	Avril 1980	Mai 1980	Sept. 1980	Mars 1981
Massé volumique apparente (t/m³)	2,47		2,45	2,47
Résistance à la traction (N/mm²)	2,7		3,89	3,18
Résistance à la traction transversale (essai brésilien) (N/mm²)	—	—	—	4,54
Résistance à la compression (N/mm²)	40 à 60		35,6	54,6
Module d'élasticité (N/mm²)	31 300		34 800	44 300

Table 2. Test results, mean values.

Test	Reference test		Selection of the agent	Large scale investigations
	1	2a		
Date	April 80	May 80	Sept. 80	March 81
Density (t/m³)	2.47		2.45	2.47
Tensile strength (N/mm²)	2.7		3.89	3.18
Brasilien tensile test (N/mm²)				4.54
Compressive strength (N/mm²)	40 to 60		35.6	54.6
Modulus of elasticity (N/mm²)	31.300		34.800	44.300

Tableau 3. Récapitulation générale des travaux 1980/81.

Zone	Nombre forages	Diamètre des forages mm	Longueurs forées ml	Coulis CPN injecté en t ciment	Epoxy injecté l
A Contrôle de l'écran d'étanchéité	15	66	1366	84,250	
Rocmètres	6	76	387	3,000	
Mesure de sous-pression	8	66	184	2,500	
Téléthermomètres	42	46	377		
B Réinjection du contact	51	46	1270	28,450	
C Réinjection des joints verticaux	184	46	693		1 717 (Rodur 510)
Colmatage des fissures	162	46	916		10 055 (Rodur 510) 858 (Rodur 520)
Extraction des carottes de contrôle	50	200	147		
	2	86	4		
	2	66	4		
Total	522		5348	118,200	12 630

Table 3. Recapitulation of work performed 1980/81.

Zone	Number of boreholes	Drilling dia. mm	Total length of drillholes m	Cement grout injection Cement in metric tons	Epoxide injection litres
A Examination of grout curtain	15	66	1,366	84.250	
Extensometers	6	76	387	3.000	
Pressure measurement	8	66	184	2.500	
Remote control thermometers	42	46	377		
B Injection of contact zone	51	46	1,270	28.450	
C Injection of vertical joints	184	46	693		1,717 (Rodur 510)
Injection for repair of cracks	162	46	916		10,055 (Rodur 510) 858 (Rodur 520)
Borings for tests of core samples	50	200	147		
	2	86	4		
	2	66	4		
Total	522		5,348	118.200	12.630

strength with the strength and adhesion of samples containing injected cracks.

The following tests were made at the laboratories of the Swiss Federal Institute of Technology in Lausanne:

1. Strength tests on concrete cores extracted from zones without cracks

These tests were used as reference values for the strength tests of the repaired zones and to judge the quality of the concrete of the dam.

2. Preliminary tests of core samples with repaired cracks by means of injection with epoxide resins (figure 10)

2a) The first series of samples was tested to obtain information concerning the selection of the agent for injection.

2b) A second series of samples extracted at the same location 6 months later gave information on the change in behaviour with time.

3. Strength tests on concrete cores extracted from the zone of the large scale investigation after injection phase

These tests permitted the control of the quality of the repaired cracks under actual large scale working and site conditions.

que la détermination du module d'élasticité sur carottes avec fissures injectées ont donné des valeurs, qui sont supérieures ou bien égales aux valeurs obtenues lors des essais de référence.

Les valeurs de résistance des essais effectués en mars 1981 représentent les résultats des travaux d'injection des fissures à grande échelle en été et en automne 1980 à Zeuzier compte tenu des conditions locales (température et autres conditions météorologiques, humidité à l'intérieur du barrage, etc.). Ce sont des valeurs moyennes en différents endroits du barrage.

Tous les essais exécutés au laboratoire ont montré une très bonne adhérence de la résine au béton. Avec la méthode et avec le procédé choisis pour les travaux de réparation du barrage, un parfait remplissage des fissures est possible. Les carottes extraites montrent un parfait colmatage des fissures même très fines.

Adresse de l'auteur: Anton R. Berchten, Ingénieur civil EPFZ, Suiselectra, Ingénieurs-Conseils SA, Maizgasse 32, CH-4010 Bâle (Suisse).

VI. Calculs statiques

Walter Amberg et Giovanni Lombardi

Une des conditions essentielles à remplir avant d'entreprendre les travaux de réparation du barrage est la démonstration par le calcul de la réparabilité de l'ouvrage dans le respect des conditions de sécurité. Il s'agit donc d'apporter la preuve que du point de vue statique une exploitation future du barrage après réparation est possible sans provoquer des contraintes excessives dans le béton. Trois études ont été parallèlement menées à bien dans le but d'une plus grande sécurité. Deux d'entre elles ont été réalisées pour le compte de Lienne SA (propriétaire de l'ouvrage) par Monsieur le Dr Gicot (expert de la société) et par Suiselectra SA (SEI). La troisième a été faite par le bureau du Dr Lombardi (expert fédéral). Elle comprend:

a) la détermination des contraintes et des déformations

Based on the test results (table 2) it can be concluded that the quality of the concrete is excellent. The tests performed on samples with repaired cracks showed tensile and compressive strength values and a modulus of elasticity higher or equal to the initial reference tests.

The results of the tests conducted in March 1981 (Table 2, test 3) indicate the strength of concrete containing cracks repaired in actual site and construction conditions (that is temperature and other meteorological influences, humidity inside the dam etc.) on samples extracted from various locations of the dam.

All tests performed in the laboratories demonstrated the perfect bond between the epoxide resin injected and the concrete of the cracks. If the procedures selected for repairing of the dam are followed, complete sealing of the cracks is possible. The core samples extracted show a perfect injection of even very small cracks.

Address of author: Anton R. Berchten, Civil Engineer, M.S. ETHZ, Suiselectra Consulting Engineers, Maizgasse 32, CH-4032 Basel (Switzerland).

VI. Static Calculations

Walter Amberg and Giovanni Lombardi

One of the basic conditions to start repairing the dam structure is to prove, through calculations, its reparability with respect to the security conditions. A future dam exploitation after its repair must be possible without excessive stresses in the concrete.

Three studies have been carried out contemporary with the aim of larger security. The first two were realized for Lienne SA by Dr. Gicot (expert of this Society) and by Suiselectra SA (SEI). The third one is done by Dr. Lombardi (Federal Expert) and is composed of:

- a determination of the intact structure stresses and deformations (normal operation before any cracking) (to be superposed afterwards to the results concerning the present state)

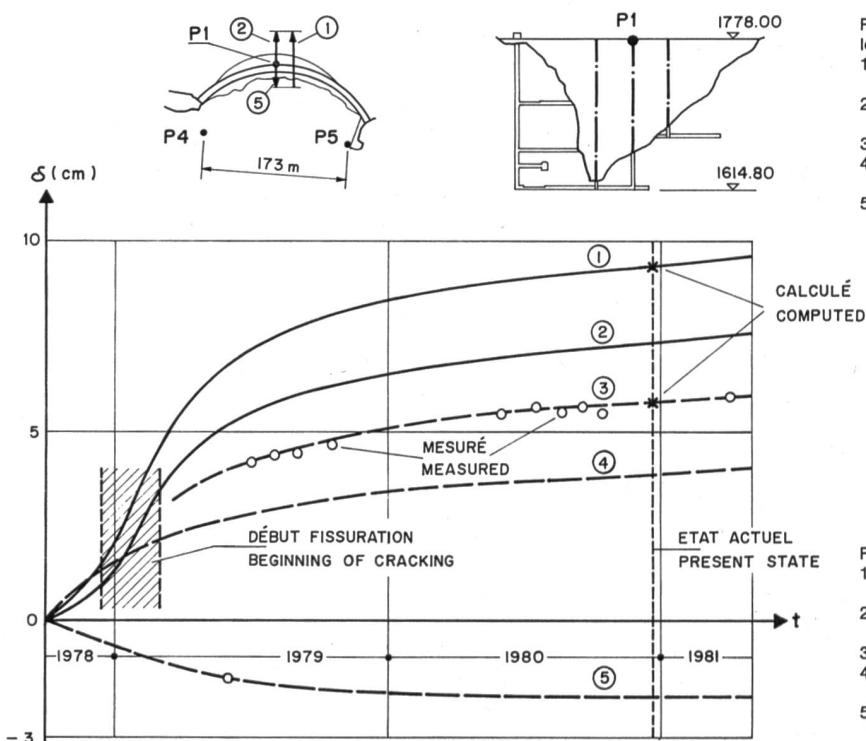


Figure 1. Evolution des déformations exceptionnelles.
 1 Déplacement de P1 causé par le tassement de la gorge de Zeuzier
 2 Déplacement radial mesuré de P1 (moyenne des lectures des pendules)
 3 Diminution de la distance P4-P5
 4 Déplacement radial calculé de P1 (modèle non fissuré)
 5 Déplacement de P1 suite à la rotation vers l'aval de l'ensemble du site

Figure 1. Evolution of exceptional deformations.
 1 Displacement of P1 caused by underground settlement
 2 Measured radial displacement of P1 (mean value of measurements)
 3 Diminution of distance P4-P5
 4 Computed radial displacement of P1 (dam without cracks)
 5 Displacement of P1 caused by tilting of the dam site in direction of the valley