Zeitschrift: Wasser Energie Luft = Eau énergie air = Acqua energia aria
Herausgeber: Schweizerischer Wasserwirtschaftsverband
Band: 74 (1982)
Heft: 3

Artikel: Aspects géologiques du comportement extraordinaire du barrage de Zeuzier = Geological aspects of the extraordinary behaviour of Zeuzier arch dam

Autor: Schneider, Toni R.

DOI: https://doi.org/10.5169/seals-954760

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: 11.07.2025

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

IV. Aspects géologiques du comportement extraordinaire du barrage de Zeuzier

Toni R. Schneider

1. Introduction

Cet article expose les aspects géologiques du comportement extraordinaire du barrage de Zeuzier. C'est une version légèrement révisée de l'article qui figure sous le même titre dans les «Comptes rendus» du 14e Congrès CIGB de Rio de Janeiro, Question 53, R. 38, pp. 599–619, il inclut en outre les derniers résultats des travaux de recherche.

2. Géologie générale

2.1. Tectonique

Le barrage de Zeuzier et son bassin sont situés dans le système de nappes helvétiques des Alpes suisses, plus particulièrement dans la nappe du Wildhorn. La figure 1 montre la situation générale; la figure 2 représente une section le long de l'axe du projet du tunnel routier du Rawil, c'est-à-dire la situation telle qu'elle se présente du côté gauche de la vallée principale. La nappe du Wildhorn est consituée d'une grande couche de roches sédimentaires orientées vers le SO-NE et plongeant en pente douce vers le SE. Les résidus du système de nappes ultrahelvétiques se situent au-dessus de la nappe du Wildhorn. La position et la composition des parties situées plus en profondeur de la nappe du Wildhorn ne sont pas connues car elles n'apparaissent pas à la surface et n'ont jamais été pénétrées par des forages ou par d'autres moyens d'investigation. C'est pourquoi on postule que la nappe du Wildhorn recouvre la nappe suivante, c'est-à-dire celle des Diablerets.
Comme les figures 1 et 2 l'indiquent, la nappe du Wildhorn est coupée par plusieurs chevauchements et failles internes, qui se situent principalement le long de la direction SO-NE du corps de la nappe ou qui la coupent obliquement à environ 45°. De plus, les séries de la nappe montrent quelques plissements internes, comme l'indique la figure 2. C'est ce qui ressort surtout de l'arrangement des calcaires du Malm.

2.2. Stratigraphie

La colonne stratigraphique de la nappe du Wildhorn est présentée en figure 3. Elle montre la composition régulière des séquences de sédimentation du système des nappes helvétiques. Elle est caractérisée par des cycles rythmiques qui se composent principalement des formations calcaires compétentes et des séries incompétentes généralement marno-schisteuses. On peut observer que les calcaires du Malm massifs du Séquanien et du Portlandien, qui représentent le rocher de fondation du barrage de Zeuzier, sont entourés de puissantes formations schisteuses. Par-dessus, on trouve d'épaisses séquences de marne du Valanginien, parfois intercalées de calcaires silicieux. Au-dessous du Malm, on trouve d'abord les calcaires marneux de l'Argovien, puis les marnes du Callovien-Oxfordien. Si l'on fait abstraction du sommet du Dogger avec sa mince séquence de calcaires spathiques, les parties de la nappe du Wildhorn situées plus en profondeur sont essentiellement composées de séries plus ou moins schisteuses. La nappe du Wildhorn ne présente donc pas de formations antérieures à l'Aalénien. C'est probablement à

IV. Geological Aspects of the Extraordinary Behaviour of Zeuzier Arch Dam

Toni R. Schneider

1. Introduction

This presentation deals with the geological aspects of the extraordinary deformations of the foundation rock of Zeuzier arch dam. It is a slightly revised version of a paper which figures under the same headings in the Proceedings of the 14th ICOLD-Congress in Rio de Janeiro, Question 53, R. 38, pp. 599–619, including the newest results of the research work.

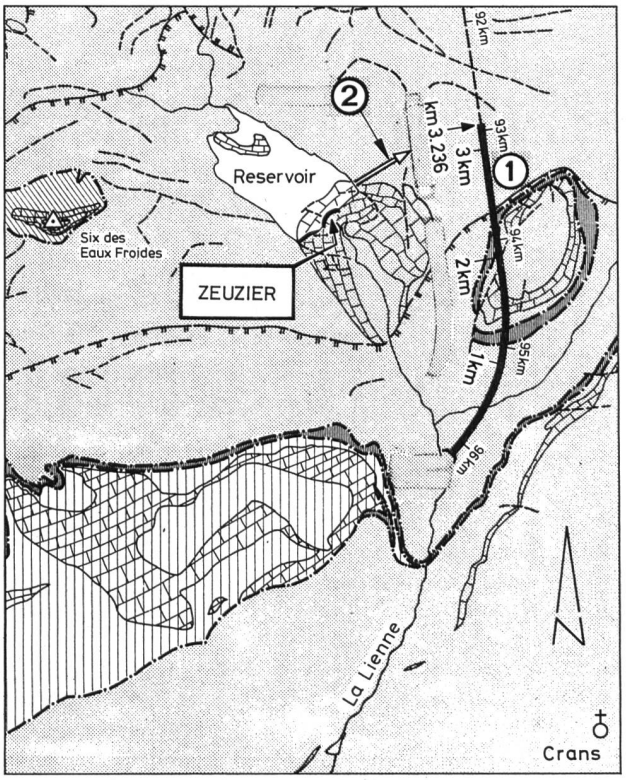


Figure 1. Situation tectonique
1 Galerie de reconnaissance pour le tunnel du Rawil
2 Axe des plis
Nappes ultrahelvétiques
3 Nappe du Sex Mort
4 Nappe de la Tour d'Anzeinde
5 Nappe de la Plaine Morte
Système des nappes helvétiques
6 Nappe du Wildhorn
7 Limite entre les nappes
8 Chevauchement
9 Failles
10 Calcaires du Malm (Séquanien-Portlandien)

Figure 1. Tectonic situation
1 Exploratory adit for the Rawil tunnel
2 Foldaxes
Ultrahelvetic nappes
3 Sex Mort nappe
4 Tour d'Anzeinde nappe
5 Plaine Morte nappe
Helvetic nappe system
6 Wildhorn nappe
7 Boundary between nappes
8 Overthrust
9 Faults
10 Malm limestones (Sequanian-Portlandian)

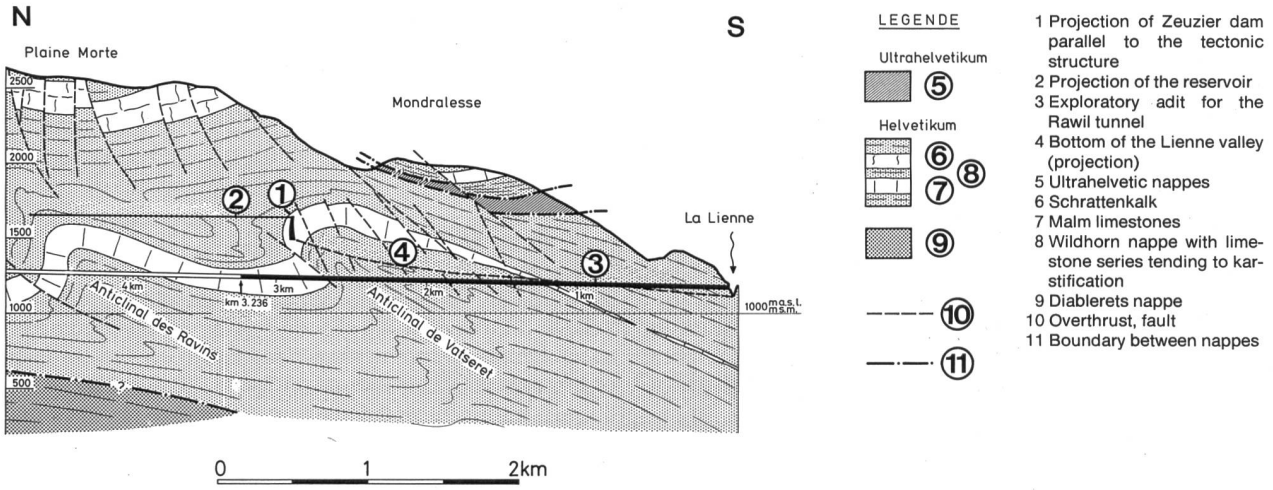


Figure 2. Coupe tectonique le long de l'axe du projet du tunnel du Rawil.

1 Projection du barrage de Zeuzier parallèlement à la structure tectonique
2 Projection du réservoir
3 Galerie de sondage du tunnel du Rawil
4 Fond de la vallée de la Lienne (projection)
5 Nappes ultrahelvétiques
6 Schrattenkalk
7 Calcaires du Malm
8 Nappe du Wildhorn avec séries de calcaires ayant une tendance à la karstification
9 Nappe des Diablerets
10 Chevauchement, faille
11 Limite des nappes

Figure 2. Tectonic section along the axis of the Rawiltunnel project.

1 Projection of Zeuzier dam parallel to the tectonic structure
2 Projection of the reservoir
3 Exploratory adit for the Rawil tunnel
4 Bottom of the Lienne valley (projection)
5 Ultrahelvetic nappes
6 Schrattenkalk
7 Malm limestones
8 Wildhorn nappe with limestone series tending to karstification
9 Diablerets nappe
10 Overthrust, fault
11 Boundary between nappes

cause de cette position entre des séries de roches à la fois épaisses, tendres et aisément déformables, que les calcaires du Malm, pour la plupart rigides, peuvent former des plis étendus à l'intérieur du système de nappes.

3. Hydrogéologie régionale

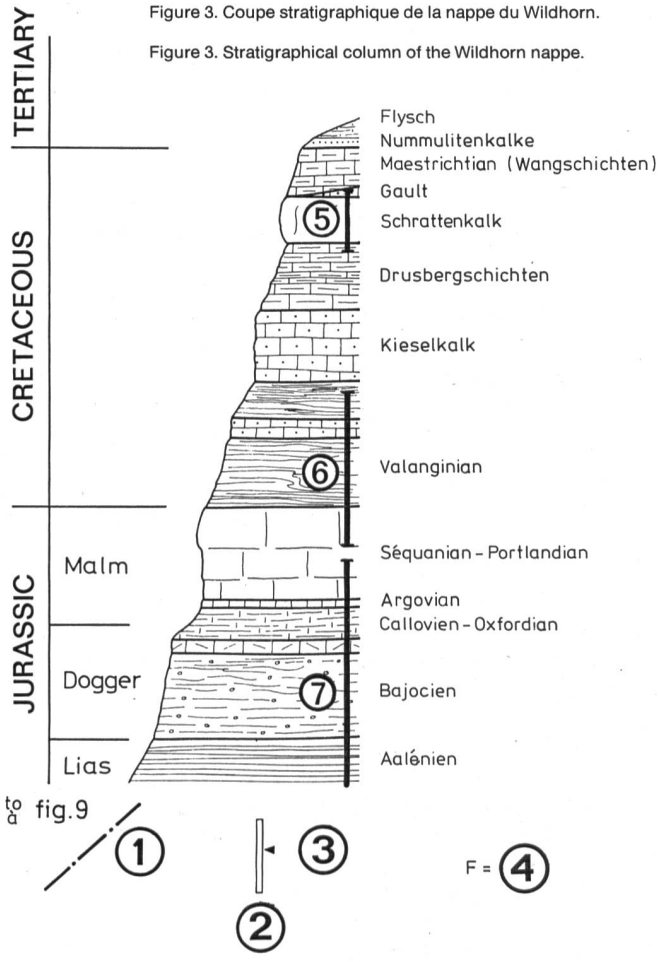
Si l'on dispose actuellement de quelques connaissances au sujet des conditions hydrogéologiques régionales, c'est avant tout aux travaux de recherche se rapportant au projet du tunnel routier du Rawil et aux observations faites pendant l'excavation de la galerie de sondage le long de l'axe du futur tunnel qu'on les doit. De ces études, on peut tirer que les circulations d'eau sont surtout définies par les séquences lithologiques des séries sédimentaires de la nappe du Wildhorn. Les séries à dominance calcaire doivent être considérées comme plus perméables, plus particulièrement si l'on tient compte de la plus grande fracturation de ces roches due à l'activité tectonique au cours de l'orogénèse alpine. Par ailleurs, les séries plutôt marneuses sont plus imperméables. On tire de la colonne stratigraphique (figure 3) que le Schrattenkalk spécialement et les calcaires du Malm en tant que calcaires massifs et presque purs sont hautement perméables et qu'ils peuvent être soumis à la formation de karst. Ces deux formations sont mises en évidence par la figure 2.

Un niveau karstique supérieur est lié au Schrattenkalk. Il a été étudié de façon relativement approfondie. Des tests de marquage ont démontré l'existence de systèmes de circulation principaux, qui suivent généralement les synclinaux dans le Schrattenkalk. On a découvert qu'il y a des connections directes entre la région du col du Rawil et des sources importantes dans la partie supérieure de la vallée de la Lienne. Ces sources constituent les affluents principaux du réservoir der Zeuzier. On a également décelé des circulations transversales le long des failles, mais elles présentent des capacités et des débits moindres.

On trouve, à côté du système karstique supérieur, un grand nombre de sources plus petites. Leurs régions d'alimentation respectives sont reliées à des dépôts de sols locaux ou aux limites de roches plus perméables en haut et relativement imperméables en bas. Elles drainent normale-

Figure 3. Coupe stratigraphique de la nappe du Wildhorn.

Figure 3. Stratigraphical column of the Wildhorn nappe.



1 Faille
2 Forage
3 Venue d'eau
4 Axes des plis
5 Niveau supérieur de karstification
6 Barrière hydrogéologique
7 Nappe phréatique inférieure

1 Fault
2 Drillhole
3 Water inflow
4 Foldaxis
5 Upper karst level
6 Hydrogeological barrier
7 Lower groundwater level

2. General Geology

2.1 Tectonics

Zeuzier dam and its reservoir are situated in the Helvetic nappe system of the Swiss alps, in particular in the Wildhorn nappe. Figure 1 shows the general situation, figure 2 a section along the axis of the project of the Rawil road-

ment des masses de roches locales. Les débits de ces sources et du système karstique supérieur sont soumis à d'importantes fluctuations au cours des saisons. Les sources naissent au printemps à la fonte des neiges et continuent à être alimentées par les pluies et les orages en été. Les petites sources tarissent durant cette saison, alors que les grandes continuent à couler jusqu'à l'automne. Les débits respectifs de ces sources ont été contrôlés sur plusieurs années et des rapports correspondants ont été établis pour chaque saison.

Les systèmes de circulation des calcaires du Malm et des séries rocheuses au-dessous sont moins bien connues. Les renseignements que l'on détient sont tirés des observations faites dans la galerie de sondage le long du projet du tunnel routier du Rawil et des forages exécutés dans les fondations du barrage de Zeuzier. Il semble que les calcaires du Malm et le Valanginien schisteux superposé forment une barrière hydraulique.

Dans les parties supérieures des calcaires du Malm qui font surface au sommet du verrou de Zeuzier, on a trouvé que l'eau de surface s'infiltre le long des fractures du rocher et laisse des traces de karstification mineures. Cette circulation d'eau est souvent affiliée à des conduits en forme de tube et ne doit pas être considérée comme un phénomène répandu. Selon toute apparence, il n'existe pas de karstification plus forte comprenant toute la série de calcaires du Malm.

Il existe une deuxième nappe phréatique importante dans les parties profondes des calcaires du Malm et les formations situées au-dessous (figure 3). Son écoulement semble entravé par une barrière de calcaires imperméables du Malm, placée dans la partie supérieure de cette série et par le Valanginien schisteux situé par-dessus. Le système est soumis à une pression interne et sa composition chimique se distingue nettement de celle de l'eau de surface à cause de sa concentration élevée en bicarbonate de sodium. De plus, elle est modérément tempérée avec des températures allant jusqu'à 29 °C dans la galerie de sondage. Mais en général, les températures recueillies correspondent assez bien aux gradients thermiques régionaux prévus.

L'existence de ce système d'eau souterraine fut découverte au cours de l'excavation de la galerie de sondage, après que quelques importantes sorties d'eau sous pression avaient été recensées.

Plus tard, on put relier une sortie d'eau dans un profond trou de forage situé sous le barrage à ce système de nappe phréatique. Elle émanait des marnes du Callovien-Oxfordien.

L'analyse de la composition chimique de cette eau souterraine indiqua qu'elle pouvait avoir une origine éloignée et qu'elle provenait peut-être même du socle cristallin. On pourrait aussi l'expliquer par une chloritification des épaisses séries marneuses se trouvant sous les calcaires du Malm, ce qui signifierait que son origine ne se trouve pas trop loin de la galerie.

La diminution relativement lente des tassements d'une part et l'afflux d'eau quasi continuel dans la galerie de sondage d'autre part parlent en faveur du drainage de corps rocheux larges et semi-perméables comme le présentent les séries marneuses situées sous les calcaires du Malm. Cette observation appuie la seconde thèse, qui est actuellement considérée comme la plus vraisemblable. La diminution des tassements est un autre argument en sa faveur. En règle générale, ils cessent en été lorsque l'alimentation en eau de la nappe phréatique est forte du fait des pluies estivales et de la fonte des neiges, et reprentunnel, e.g. the situation on the left hand side of the main valley. The Wildhorn nappe is a large sedimentary rock sheat, arranged in a SW-NE direction, dipping in general gently to the SE. The residuals of the Ultrahelvetic nappe system are above the Wildhorn nappe. The position and the composition of the lower parts of the Wildhorn nappe are not known. They appear nowhere on the surface and have never been penetrated by drillings or other exploratory means. It is therefore assumed, as indicated in figure 2, that some hundred meters in the depth, the Wildhorn nappe overlies the next deeper nappe, e.g. the Diablerets nappe.

As indicated in figures 1 and 2, the Wildhorn nappe is cut by several internal overthrusts and faults. They are mainly arranged along the SW-NE strike of the nappe body or cutting it at oblique angles of approximately 45°. In addition, the nappe sheet shows some internal folding, as indicated in figure 2. This is manifested particularly in the arrangement of the Malm limestones.

2.2 Stratigraphy

The stratigraphical column of the Wildhorn nappe is presented in figure 3. It shows the regular composition of the sedimentary sequences of the Helvetic nappe system. It is characterised by rhythmic cycles of competent, mainly calcareous formations and incompetent, generally marly series. It can be observed that the massive Malm limestones of Sequanian to Portlandian age, which present the foundation rock of Zeuzier dam, are surrounded by mighty schisteous formations. Above this follows the thick sequence of the Valanginian marls, sometimes interbedded with siliferous limestones. Below the Malm are situated first the marly limestones of the Argovian and then the marls of the Callovian-Oxfordian. Except for the top of the Dogger with its thin, spatic limestone sequence, the lower parts of the Wildhorn nappe are also mainly composed of more or less schisteous series. As mentioned above, older formations than the Aalénian are not exposed of the Wildhorn nappe. It is probably this position in between mighty, soft, easily deformable rock series which enabled the mainly rigid Malm limestones to form the widespread folding within the nappe system.

3. Regional Hydrogeology

The present knowledge of the regional hydrogeological conditions is mainly due to research work in connection with the project of the Rawil roadtunnel and the observations during the excavation of the exploratory adit along the axis of the future tunnel. From these studies it can be derived that the water circulations are mainly governed by the lithological sequences of the sedimentary series of the Wildhorn nappe. The more calcareous series have to be considered as more permeable, especially with a view to the stronger fracturing of these rocks by tectonic activity in connection with the Alpine orogenesis. On the other hand, the predominantly marly series are rather impervious. From the stratigraphical column, figure 3, follows that especially the Schrattenkalk and the Malm limestones as massive, almost pure limestones, are highly pervious and might be subjected to the formation of karst. These two formations are rent prominent in figure 2.

An upper karst level is connected to the Schrattenkalk. It has been studied in relative detail. Tracing tests showed that main circulation systems are present, which usually follow the synclines in the Schrattenkalk. It was discovered in particular that there are straight connections between the region of the Rawilpass and important springs in the

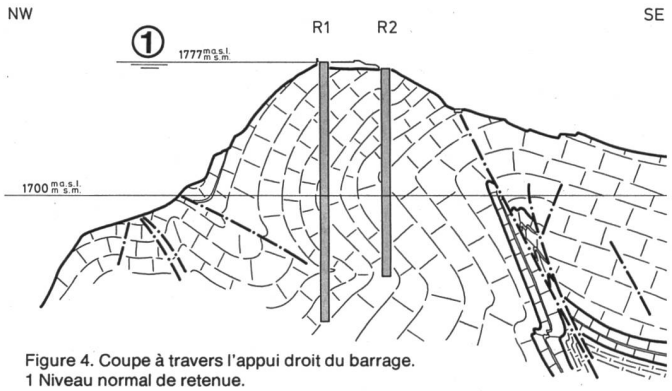


Figure 4. Coupe à travers l'appui droit du barrage.
1 Niveau normal de retenue.

Figure 4. Section across the right abutment.
1 Retention water level.

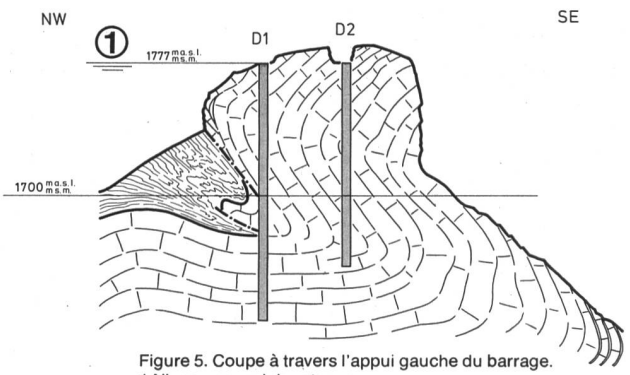


Figure 5. Coupe à travers l'appui gauche du barrage.
1 Niveau normal de retenue.

Figure 5. Section across the left abutment.
1 Retention water level.

nent en hiver lorsque l'alimentation de la nappe diminue fortement.

4. Géologie du verrou de Zeuzier

Le barrage de Zeuzier ferme une gorge étroite entaillée par la Lienne en des temps post-glaciaires dans un verrou calcaire. Le verrou voit son origine dans un plissement local des calcaires du Malm (figures 4 et 5). Il a été travaillé par l'érosion glaciaire, car les calcaires du Malm étaient bien plus résistants que le Valanginien schisteux qui s'étend par-dessus. La gorge taillée par la Lienne a une profondeur d'environ 150 m et présente une forme asymétrique (figure 6). Les calcaires du Malm forment un pli dont le noyau contient également de l'Argovien et du Callovien-Oxfordien (figure 4). L'axe de ce pli a une direction SO-NE; il plonge avec une pente de 5 à 16° vers le NE. Sa crête est coupée par une faille qui plonge abruptement vers le SE.

A droite de la Lienne, le plissement du verrou est toujours intact (figure 4). A gauche de la Lienne, le flanc sud de l'anticlinal a été érodé (figure 5), c'est pourquoi le verrou est plus étroit à gauche qu'à droite de la vallée. Morphologiquement, il ressort comme une crête relativement étroite à travers le sens de la vallée principale.

Le barrage de Zeuzier est fondé dans le versant NO de l'anticlinal en forme de S. Il se situe avant tout dans la partie plus ou moins verticale du versant. Pourtant, les parties inférieures de ses fondations atteignent son prolongement quasi horizontal qui se poursuit en direction du réservoir. Il continue dans le synclinal plus large où se situe le réservoir.

Le verrou est coupé par quelques failles transversales, qui ont des directions perpendiculaires à l'axe de l'anticlinal et par là parallèles à la vallée principale. Elles plongent à environ 45° vers le SO (figure 6). Ce sont des failles normales, le long desquelles les parties SO ont été abaissées de quelques dizaines de mètres. Généralement, les failles consistent en de petits interstices larges de quelques millimètres. On n'a observé que localement des traces de cisaillement et de broyage de roches avoisinantes.

Les calcaires du Malm du verrou de Zeuzier ne sont que superficiellement karstifiés. Ni les anciens sondages, ni ceux du voile d'étanchéité, ni les forages nouveaux effectués après que les déformations se sont produites n'ont révélé des traces de karstification en profondeur. On n'a traversé qu'à l'extrême droite de la vallée une large caverne, avec un seul forage du voile d'étanchéité. L'absence de karstification plus massive du Malm est probablement due au fait que cette série se situe dans les pro-

upper part of the valley of the Lienne. They form the main inflow into the Zeuzier reservoir. Transversal circulations along faults could also be noticed, but with lower capacity and circulation speeds.

Besides this upper karst system there are many smaller springs. Their catchment areas are related to local soil deposits or boundaries between more permeable rocks at top and relatively impervious rocks below. They usually drain very local rock masses. The outflows of these local springs and the upper karst system vary strongly with seasonal changes. They start in springtime with the thaw and continue with the summer rains and thunderstorms. The smaller springs dry out during summertime, whilst the stronger ones continue until fall. The outflows of these springs have been controlled for many years and corresponding reports are prepared for each season.

The circulation systems in the Malm limestones and the rock series below are less well known. The main indications are derived from the observations in the exploratory adit along the Rawil roadtunnel project and the drillings in the foundation of Zeuzier dam. At present it looks as if the Malm limestones, together with the overlaying Valanginian marls, form a hydraulic barrier.

In the upper parts of the Malm limestones, exposed on top of the riegel of Zeuzier, there are circulations of infiltrated surface water along fractures in the rock mass with minor karst formations. These circulations are mainly related to tubelike conduits and should not be considered as a widespread phenomena. A stronger karstification comprising the whole Malm limestone series obviously does not exist.

A second important groundwater system exists in the lower parts of the Malm limestones and the formations below (figure 3). Its outflow seems to be blocked by a barrier of impervious Malm limestones in the upper part of the series, together with the overlaying Valanginian marls. The system is under internal pressure and its chemical composition is distinctly different from the surface water, due to its high sodium-bicarbonate content. In addition, it is moderately tempered, with temperatures up to 29 °C in the exploratory adit, but the observed temperatures correspond fairly well with the expected regional thermal gradients.

The presence of this groundwater system was discovered during the driving of the exploratory adit, when several strong outbursts of water under pressure were encountered. Later, a water outflow from a deep drillhole under the dam could be chemically related to this groundwater system. It originated from the Callovian-Oxfordian marls.

The chemical composition of this groundwater system in-

fondeurs de la chaîne alpine. Cette localisation l'a mise à l'abri de circulations plus importantes le long du système de fractures. La circulation d'eau au sein de ces formations rocheuses est, de ce fait, surtout reliée aux accidents tectoniques, par exemple failles, zones de cisaillement, joints ou, plus particulièrement, aux intersections de deux systèmes de fractures.

5. Investigations faites pour éclaircir la nature et le mode des déformations

Le groupe d'experts fédéral fut mandaté en 1979 et visita le site le 11 avril de la même année. A cette époque de l'année, la région était toujours recouverte d'une épaisse couche de neige. En se basant sur des observations faites sur le terrain, qui révélaient déjà que le barrage se situait dans le flanc d'un anticlinal raide, et sur la documentation concernant le projet, on pensa d'abord que les fissures du barrage étaient dues à des instabilités dans les appuis. Cette supposition se trouvait encore renforcée par les déplacements des pendules. C'est pourquoi les investigations débutèrent par le contrôle des fondations du barrage. D'autre part, les déplacements des pendules donnaient des valeurs de l'ordre de quelques centimètres, c'est-à-dire un ordre de grandeur qui échappe aisément aux observations géologiques habituellement faites sur le terrain. En partant de cette évaluation de la situation, on conclut qu'il était nécessaire de disposer d'un système de mesures adéquat, permettant de détecter et de délimiter les masses rocheuses en mouvement. Il s'agissait surtout d'envisager un sondage des couches profondes. C'est pourquoi on ne put tenir compte que d'instruments pouvant être installés dans des forages, car des mesures de surface seules n'auraient pas été représentatives du phénomène global. En plus de la surveillance de la stabilité des fondations du barrage, il s'avérait nécessaire de pouvoir disposer d'informations sur les déformations des roches et les conditions hydrauliques du verrou. Finalement, les instruments installés dans un premier temps, durant l'été et l'automne 1979, furent les suivants:

- 7 inclinomètres du type Slope Indicator, Sinco, Seattle.
- 2 shear strips
- 3 extensomètres du type Uni-Rod, Solexperts, Zurich
- 2 piézomètres du type habituel
- 1 cellule de Gloetzl

Les figures 4, 5 et 6 montrent la disposition de ces instruments. Les inclinomètres, qui constituent le réseau principal d'observation, furent installés dans quatre sections comprenant au moins deux appareils. Cette disposition complétée par une polygonale géodésique permettraient de déceler un éventuel plan de glissement ou une zone de glissement en au moins trois points.

Un an et demi d'observations et de travail géologique sur le terrain et l'inspection détaillée d'un total de 1769 m de carottes de forages menèrent aux résultats et conclusions suivants quant aux conditions du verrou de Zeuzier:

- Il résulte des mesures des inclinomètres qu'il n'y a pas de déplacement des fondations du barrage. Il n'y a aucune indication d'instabilité sous forme de glissements locaux ou étendus dans le rocher.
- La lecture des extensomètres ne fournit pas d'indice de contraction ou de dilatation des masses rocheuses couvertes par les instruments.
- Les piézomètres révèlent des pressions de deux à quatre bars au sommet du forage X/1.
- La cellule de Gloetzl indique une pression d'eau supérieure de cinq bars à la différence des niveaux compris entre le haut du forage et la cellule. Cette pression de cinq dicates that it could have a relatively distant origin. It might even come from the cristallin basement. Another explanation of the special chemical composition is that it could originate from the chloritisation of the mighty marl series below the Malm limestones, which means that its origin is not too far away from the water inflows into the adit.

The relatively slow decrease of the settlements on one hand and the more or less continuous outflow from the exploratory adit on the other hand speak for the drainage of large, semi-permeable rock bodies as presented by the marly series below the Malm limestones. This would be in favour of the second explanation, which is now considered to be the more probable one. Another argument for this explanation is the observed decrease of the settlements. They usually come to a standstill in summer, when the inflow into the groundwater system is strong due to summer rains and thaw, but start again during winter, when the inflow into the groundwater is strongly reduced.

4. Geology of the Riegel of Zeuzier

Zeuzier dam closes a narrow gorge cut into a limestone riegel by the Lienne river in post-glacial times. The riegel is due to a local fold in the Malm limestones (figures 4 and 5). It was worked out by glacial erosion because the Malm limestones were much more resistant than the overlying Valanginian marls. The gorge cut by the Lienne has a depth of about 150 m and an asymmetrical shape, as presented in figure 6. The Malm limestones form a fold whose core contains also Argovian and Callovian-Oxfordian (figure 4). The axis of the fold has a direction SW-NE; it dips with 5 to 16° towards the NE. The crest of the fold is dissected by a fault which dips steeply to the SE.

To the right of the Lienne, the fold of the riegel is still complete (figure 4). To the left of the Lienne, the southern limb of the fold has been removed by erosion (figure 5). Therefore, the riegel is much smaller on the left hand side of the valley than on the right hand side. It comes out morphologically as a relatively small ridge across the direction of the main valley.

Zeuzier dam is founded in the NW limb of the fold, which forms a marked S-shaped fold. The dam is situated mainly in the more or less vertical part of the limb. However, the lower parts of the foundation reach the flat lying continuation towards the reservoir. It continues in the larger syncline in which the storage is situated.

The riegel is cut by some transversal faults. They have a direction perpendicular to the axis of the fold and are, therefore, arranged parallel to the main valley. They dip with about 45° towards SW (figure 6). They are normal faults along which the SW-parts have been lowered for some tenths of meters to the NE-parts respectively. Usually, the faults consist of small openings of a few millimeters open space. Only locally, stronger shearing and crushing of the neighbouring rocks could be noticed.

The Malm limestones of the riegel of Zeuzier are only karstified superficially. Neither the old exploratory drillings nor the drillings for the grout curtain and the new drillings after the deformations gave any indications of karstifications in the depth. Only along the fault on the extreme right hand side of the valley a large cavern was crossed by one single drillhole of the grout curtain. The absence of a stronger karstification in the Malm is probably due to the fact that this serie is situated deeply in the mountain chain. This situation prevented stronger circulations along the fracture systems. The water circulations in these rock formations are, therefore, mainly related to tectonic ac-

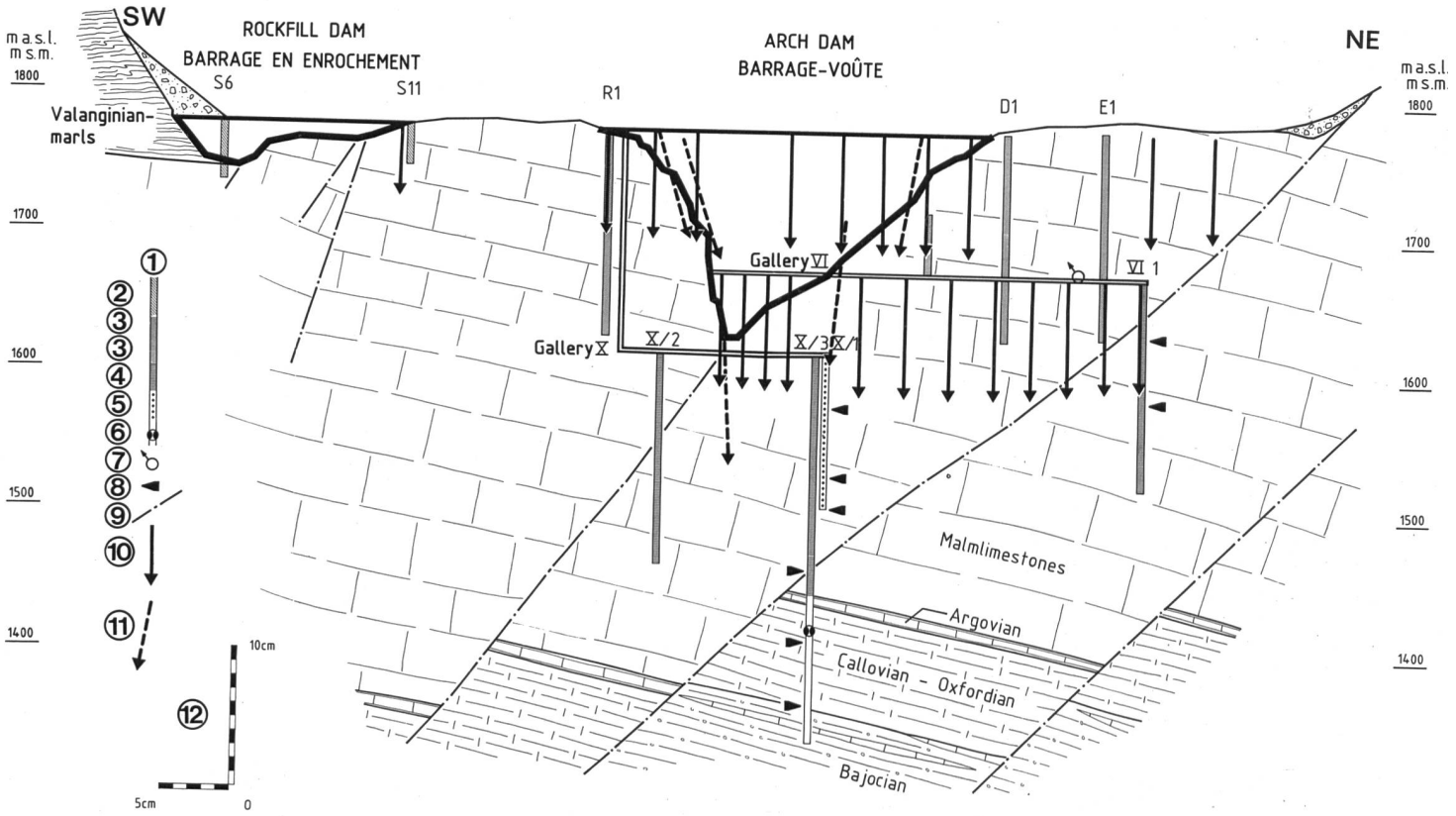


Figure 6. Coupe le long de l'axe du verrou de Zeuzier et des déformations entre 1972 et l'automne 1979.

1 Forage
2 Forage du temps de l'évaluation du projet
3 Forage de l'été et de l'automne 1979 avec inclinomètre
4 avec extensomètre
5 avec piézomètre
6 Cellule Gloetzl
7 Source
8 Venue d'eau
9 Faille
10 Tassements des points du nivellement
11 Mouvements des piliers géodésiques sur le terrain (projection sur le plan de la coupe)
12 Echelle des déformations

Figure 6. Section along the axis of the riegel of Zeuzier and the deformations between 1972 and fall 1979.

1 Drillholes
2 Drillings of the time of the project evaluation
3 Drillings during summer/fall 1979 with inclinometer
4 with extensometer
5 with piezometer
6 Gloetzl-cell
7 Spring
8 Water inflow
9 Fault
10 Settlements of the points of the levelling
11 Movements of the geodesic pillars in the field (Projection on the plaine of the section)
12 Scale of the deformations

bars correspond très exactement à la colonne d'eau entre le niveau abaissé du réservoir et la galerie X d'où partait le forage X/3.

– Six trous de forages couvraient la longueur du contact béton-rocher. Pour deux d'entre eux le contact était parfaitement conservé, deux ont montré des indications de décollement et les deux derniers ont révélé un décollement. De ces observations, on a conclu de la nécessité d'examiner le contact béton- rocher plus en détail.

– Les valeurs RQD ont révélé que le Malm sur lequel se fonde le barrage est toujours dans un excellent état (RQD> 90%). Une diminution notoire des valeurs RQD n'a été trouvée que sous le Malm, dans des séries plus schisteuses.

– Les analyses chimiques de divers échantillons d'eau ont indiqué les relations suivantes: l'eau du réservoir montre une composition particulière, qui se caractérise par une minéralisation basse. Les afflux d'eau dans les forages, la source de la galerie de sondage (figure 5) et une source de surface du côté gauche de la vallée située au-dessus du réservoir ont des constitutions semblables, caractérisées par une minéralisation moyenne. L'arrivée d'eau au forage X/3 à la limite du Callovien-Oxfordien et du Bajocidents, e.g. faults, shearzones, joints or, especially, intersections of two systems of fractures.

5. Investigations to Evaluate the Nature and Mode of the Deformations

The federal board of experts was commissioned in early 1979. It visited the site on April 11th. At that time the whole landscape was still covered with a thick blanket of snow. From the observations in the field which revealed already the position of the dam on a steep dipping limb of an anticline and from the project documents consulted, the suspicion arose that the defects of the dam are due to slope instabilities in the abutments. This supposition was supported by the information about the displacements from the pendulums. The first step of investigations was, therefore, to control the dam foundation. On the other hand, it resulted from the displacements indicated by the pendulums that the values are situated in the range of some centimeters. These are values which easily escape observations during ordinary geological field work. This judgement of the situation lead to the conclusion that a comprehensive instrumentation is necessary for the detection and limitation of the rock masses assumed to be in movement. An investigation of the deeper rock layers had to be mainly envisaged. Therefore, only instruments which could be installed in drillholes could be considered, because surface measurements alone would not be conclusive. In addition to this supervision of the abutment stability, information was also necessary on the rock deformations and on water conditions of the riegel. Finally, the instrumentation installed in the first step during summer and fall 1979 comprised the following:

– 7 inclinometers, type Slope Indicator, Sinco, Seattle
– 2 shear strips
– 3 extensometers, type Uni-Rod, Solexperts, Zurich
– 2 piezometers of the usual pipe type
– 1 Gloetzl-Cell

cien (figure 6) a montré une composition chimique totalement différente: elle se distingue par une minéralisation à forte teneur en bicarbonate de sodium. Cette composition chimique correspond exactement à celle de l'eau de la galerie de sondage du tunnel routier du Rawil.

Parallèlement aux investigations géologiques, de nouvelles mesures géodésiques d'un ancien nivellement combinées à celles d'un réseau géodésique ont révélé que les déformations principales consistent en un tassement homogène étendu qui couvre toute la section de la vallée et qui se prolonge sur quelques centaines de mètres dans les flancs de la vallée. Ces mesures ne montrent pas d'influence d'un élément structurel quelconque sur la grandeur des tassements. Ces observations ont été confirmées plus tard par des mesures d'un nivellement et d'un réseau géodésique améliorés. Ces résultats ont permis de comprendre pourquoi les inclinomètres n'indiquaient pas de glissement des fondations, qui de ce fait peuvent toujours être considérées comme stables. De plus les mesures géodésiques ont fait ressortir que l'on n'a pu enregistrer que les derniers 10–20% des déformations avec les instruments proposés par le groupe d'experts. La majeure partie des déformations s'est produite entre le début du mois d'octobre 1978 et l'été 1979.

Parallèlement au travail de recherche mentionné ci-dessus, on a étudié la sismicité. Dans un premier temps, en partant d'un contrôle des enregistrements existants fournis par l'une des stations principales du réseau sismique suisse, éloignée de 4 km environ du barrage de Zeuzier, on a pu démontrer que le commencement et la phase la plus importante des déformations rocheuses n'ont pas été accompagnés d'un grand événement sismique. Pourtant, des mêmes enregistrements on a encore pu tirer par des méthodes statistiques, que l'on avait assisté – depuis octobre 1978 – à une augmentation considérable du nombre des micro-secousses sismiques. Prises par périodes de trente jours, leur fréquence passe de $1{,}7 \pm 1{,}2$ événements avant la fin du mois de septembre à $4{,}6 \pm 2{,}3$ (écart-type) événements après le début du mois d'octobre 1978. L'activité se poursuit en tous cas jusqu'à la fin de 1979. Le début de l'augmentation de l'activité microsismique montre de plus une assez bonne concordance dans le temps avec les premières et fortes arrivées d'eau dans la galerie de sondage, le 28 septembre 1978. En outre, on a pu tirer une corrélation entre la vitesse de déformation indiquée par les pendules et la fréquence des événements sismiques. Les plus grandes vitesses de déformation ont été mises en relation avec des fréquences d'événements sismiques plus élevées et vice-versa.

Tout ce travail de recherche fut effectué en 1979. Il a prouvé que le rocher de fondation de Zeuzier est toujours en bon état et que du point de vue mécanique, il n'a pas souffert des déformations enregistrées. Les principales questions qui restaient ouvertes, concernaient la qualité restante du voile d'étanchéité, l'état actuel du contact béton- rocher et celui du rocher situé immédiatement au-dessous, de même que les problèmes de réparation de la structure en béton du barrage. Les travaux de recherche s'y rapportant se sont déroulés tout au long de l'été et de l'automne 1980. Les aspects géologiques se trouvent décrits ci-dessous.

6. Recherches faites en vue de la réparation du barrage

Comme nous venons de le décrire, la première phase des investigations était dominée par le souci d'éclaircir la nature et le mode des déformations du barrage. Dans un se-

The layout of these instruments is shown in figures 4, 5 and 6. The main observation network, the inclinometers, were installed in four sections, always with at least two instruments in one line. This arrangement allows, together with a geodetic polygonal, the recording of a possible sliding surface or sliding zone on at least three points.

One and a half years of observations, together with geological field work, detailed inspection of the totally 1769 m of drilling cores lead to the following results and conclusions about the conditions of the riegel of Zeuzier:

– From the inclinometer measurements results that no displacements are present in the abutments of the dam. There are no indications of instabilities in the form of local or large rock slides.

– The extensometer readings show no indication of contractions or dilatations in the rock mass covered by the instruments.

– The piezometers in drillhole X/1 reveal pressures at the top of two to four bars.

– The Gloetzl-Cell indicates a water pressure which is five bars higher than the difference of levels between the top of the drilling and the cell. These five bars pressure correspond very accurately to the water column between the lowered level of the reservoir and gallery X, where drillhole X/3 started.

– Six drillholes covered the rock-concrete contact. Two showed a completely conserved contact, two showed indications of detaching and two were detached. From these observations it could be derived that the rock-concrete contact should be examined in more detail in the future.

– The RQD-values revealed that the Malm which forms the foundation of the dam is still in an excellent state (RQD$>$90%). A noticeable decrease of the RQD-values was found only below the Malm in the more schisteous series.

– Chemical analyses of different warter samples indicated the following relations: The water from the reservoir showed a particular composition which is mainly characterised by a low mineralisation. Water inflows in the drillholes, the spring in the grouting gallery (figure 6) and a surface spring above the reservoir on the left hand side of the valley have similar chemical compositions. These are characterised by a medium mineralisation. The water inflow in drillhole X/3 at the limit between the Callovian-Oxfordian to the Bajocian (figure 6) showed a completely different chemical composition. It is characterised by a high sodium-bicarbonate mineralisation. This chemical composition corresponds very accurately with the one determined of the water in the exploratory adit of the Rawil roadtunnel.

Parallel to the geological investigations, geodetic re-measurements of an old levelling, together with a geodetic net revealed that the main deformations consist in a large homogeneous settlement. It covers the whole section of the valley and continues some hundred meters into the valley flanks. It shows no influence on the amount of settlement from any structural elements. These findings were later confirmed by re-measurements of the improved levelling and geodetic net.

From these results it could also be unterstood why the inclinometers indicate no sliding of the abutments which, therefore, can still be considered as stable. Moreover, from the geodetic measurements it turned out that, with the instruments installed by the board of experts, only the latest 10–20% of the deformations were covered. The main deformations occurred between the beginning of October 1978 and summer 1979.

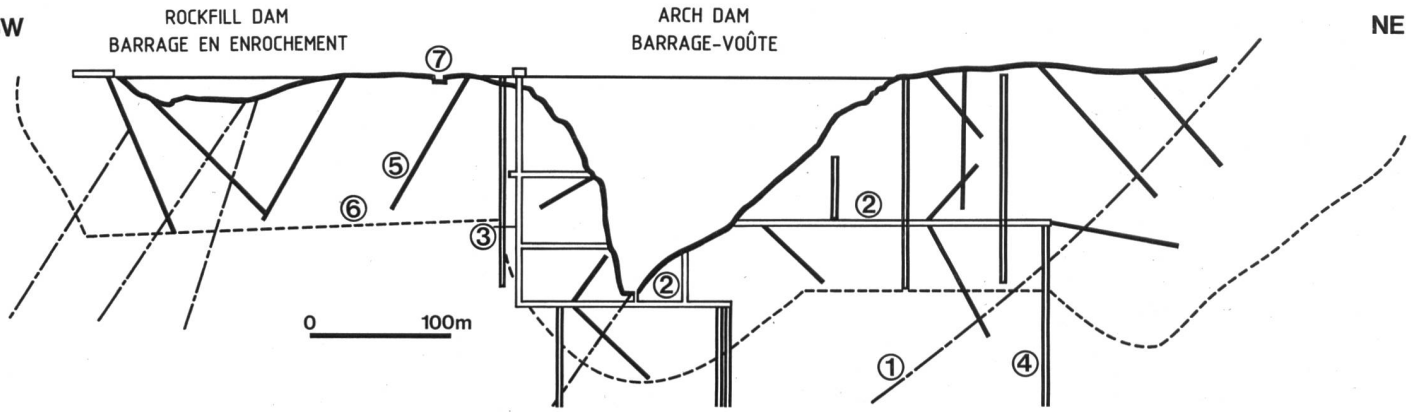


Figure 7. Extension de la voile d'étanchéité actuelle et disposition des forages de la zone A.

1 Faille
2 Galerie d'injection
3 Puits vertical
4 Forage de l'été et de l'automne 1979
5 Forage de la zone A
6 Limite inférieure de la voile d'étanchéité
7 Evacuateur des crues

Figure 7. Extension of the existing grout curtain and layout of the boreholes of zone A.

1 Fault
2 Grouting gallery
3 Vertical shaft
4 Drillings during summer/fall 1979
5 Drilling of zone A
6 Lower limit of grout curtain
7 Spillway

cond temps, on s'occupa avant tout des problèmes relatifs au barrage, de son environnement et de sa réparation. Dans le but d'avoir des résultats plus clairs, on distingua trois zones d'activité:

– Zone A: Contrôle de la qualité du voile d'étanchéité;
– Zone B: Contrôle de l'état du contact béton-rocher et sa réparation;
– Zone C: Essais de réparation des fissures du béton.

Les aspects géologiques du travail de recherche dans les zones A et B sont les suivants (pour de plus amples détails techniques sur ces deux zones et sur la zone C, voir article V):

Zone A

Le concept selon lequel se dérouleraient les recherches en zone A proposait de procéder à des forages de contrôle sur toute la longueur du voile d'étanchéité, afin de pouvoir évaluer son degré de perméabilité. La disposition des forages posa un grand problème, car ils devaient être prévus de manière à ne pas endommager le système des instruments préalablement installés. De plus, on ignorait la localisation exacte du voile d'étanchéité en plusieurs points du verrou. Le voile d'étanchéité se compose d'une rangée de forages verticaux qui s'étend sur toute la longueur du verrou (figure 7). On devait s'attendre, en outre, à une éventuelle déviation de la ligne théorique relativement longue des forages inclinés. C'est pourquoi, dans le cas où de grosses pertes d'eau se produiraient, on aura recours à la détermination de la direction réelle des forages.

Les forages furent carottés; les relevés des carottes furent exécutés et les valeurs RQD furent déterminées. On réalisa au total 1366,8 m de forages dans la zone A.

Les travaux de recherche en zone A firent ressortir les résultats suivants:

– Le côté droit du verrou, le massif au-dessous du barrage et les parties situées plus bas du côté gauche du verrou peuvent être considérées comme plus ou moins imperméables. Les quelques zones à perte d'eau élevée ont toutes pu être reliées aux zones rocheuses plus fracturées.
– Les parties les plus élevées du verrou sont un peu plus perméables des deux côtés, ceci est essentiellement dû à une karstification superficielle.

Parallel to this research work, seismic studies were carried out. In a first step, from a review of the existing registrations of a main station of the Swiss seismic network, which is only about 4 km from Zeuzier dam, it could be shown that the beginning and the main phase of the rock deformations were not accompanied by a major seismic event. However, from the same records it could be derived, by statistical methods, that from the beginning of October 1978, a considerable rise in the number of micro-seismic events can be noticed. Per period of 30 days, the frequency of micro-seismic events rose from 1.7 ± 1.2 events before the end of September to 4.6 ± 2.3 (standard deviation) events after the beginning of October 1978. The later activity continued at least until the end of 1979. The beginning of the higher micro-seismic activity shows, after all, a fairly good temporal conformity with the first stronger water inflows into the exploratory adit on September 28th, 1978. In addition, a correlation could be found between the deformation speed indicated by the pendulums and the frequency of the seismic events. Higher deformation speeds were related to higher frequencies of seismic events and vice-versa.

All this research work was carried out in 1979. It proved that the foundation rock of Zeuzier dam is still in good condition and has not suffered mechanically from the observed deformations. The main open questions concerned the remaining efficiency of the grout curtain, the actual state of the rock-concrete contact and the immediately underlying rock mass, as well as the problems of the repair of the concrete structure of the dam. The corresponding research work was carried out in summer and fall 1980. The geological aspects are described hereafter.

6. Investigations in View of Repairing the Dam

The first step of investigations was directed, as described above, mainly to resolve the question of the nature and the mode of the deformations of the dam foundation. The second step was now mainly concerned with problems of the dam itself, its environment and the repair of the construction. For this purpose, three different zones of activities were distinguished:

– Zone A: Control of the state of the grout curtain;
– Zone B: Control of the state of the concrete-rock contact and repair of it;
– Zone C: Tests for the repair of the cracks in the concrete.

The geological aspects of the research work in Zones A and B shall be described as follows (for technical details of Zones A and B and for Zone C, see paper V):

Zone A

The main idea of the research work in Zone A was to drill some control boreholes across the grout curtain to evalu-

– De grosses pertes d'eau ont été enregistrés sur deux sondages de la rive gauche, car ils ont été réalisés en dehors du voile d'étanchéité. Un forage supplémentaire situé dans le voile et ne montrant pas de pertes d'eau considérables le prouva.
– Des pertes d'eau un peu plus grandes ont également été notées autour de la galerie d'injection du côté gauche, à cause du rocher détaché au-dessus de cette excavation souterraine.
L'injection des forages fut exécutée avec le ciment habituel. L'absorption de ciment était partiellement plus élevée que la perméabilité indiquée par les essais d'eau à cause des plus hautes pressions.
Le travail de recherche en zone A permit de tirer les conclusions suivantes:
– Le voile d'étanchéité peut toujours être considéré comme intact. Il n'a pas souffert des déformations du verrou.
– Il n'y a pas de besoin impérial de procéder à des injections supplémentaires.
– L'exécution d'injections complémentaires ne répond qu'à des considérations purement économiques.

Zone B

Le travail de recherche en zone B consistait en un contrôle systématique de l'état du contact béton-rocher. Dans une première phase, on exécuta deux forages recoupant le contact à la base de chaque bloc de fondation. Les points de pénétration se trouvent à chaque tiers de l'axe médian. Les forages ont été réalisés depuis la galerie d'inspection du barrage, en choisissant la meilleure position de départ. Dans la section de forage à ± 1 m du contact, on effectua des essais d'eau type Sabarly. Le forage atteint 20 m dans le rocher de fondation.
Le travail en zone B n'est toujours pas achevé. Jusqu'à présent, 51 forages ont testé 17 zones du contact. Les résultats recueillis permettent de considérer l'état du contact béton-rocher comme relativement imperméable, avec une moyenne de 1,96 Lugeon. La valeur maximale était de 13 Lugeon et trois forages n'ont pas révélé de pertes d'eau. Le rocher situé sous les contact est relativement imperméable, sa valeur moyenne atteint 0,49 Lugeon, avec un maximum de 7,5 Lugeon. Le rocher de trois forages était complètement imperméable.
Les résultats des tests exécutés jusqu'à présent en zone B nous permettent de considérer le contact béton-rocher en général intact. Dans les cas où le contact n'était pas assuré, les injections s'avérèrent sans problème et furent couronnées de succès.
En 1981, on réalisa des forages supplémentaires pour installer des rocmètres dans les appuis et pour mesurer les sous-pressions dans les parties basses du barrage. Le relevé de ces carottes, les valeurs RQD et les résultats des essais d'eau confirmèrent toutes les données receuillies précédemment au sujet de la bonne qualité et de la faible perméabilité des calcaires du Malm, sur lesquels repose le barrage de Zeuzier.

7. Causes des déformations du rocher

Le groupe d'experts s'est fixé pour but d'éclaircir au mieux les causes des déformations du rocher. Parmi toutes les explications géologiques possibles, par exemple activité tectonique ou minière, présence de roches solubles, activité volcanique, érosion interne de roches tendres, on a dû exclure plusieurs hypothèses à cause des conditions géologiques locales et régionales et du déroulement des événements. Finalement, la commission en est venue à

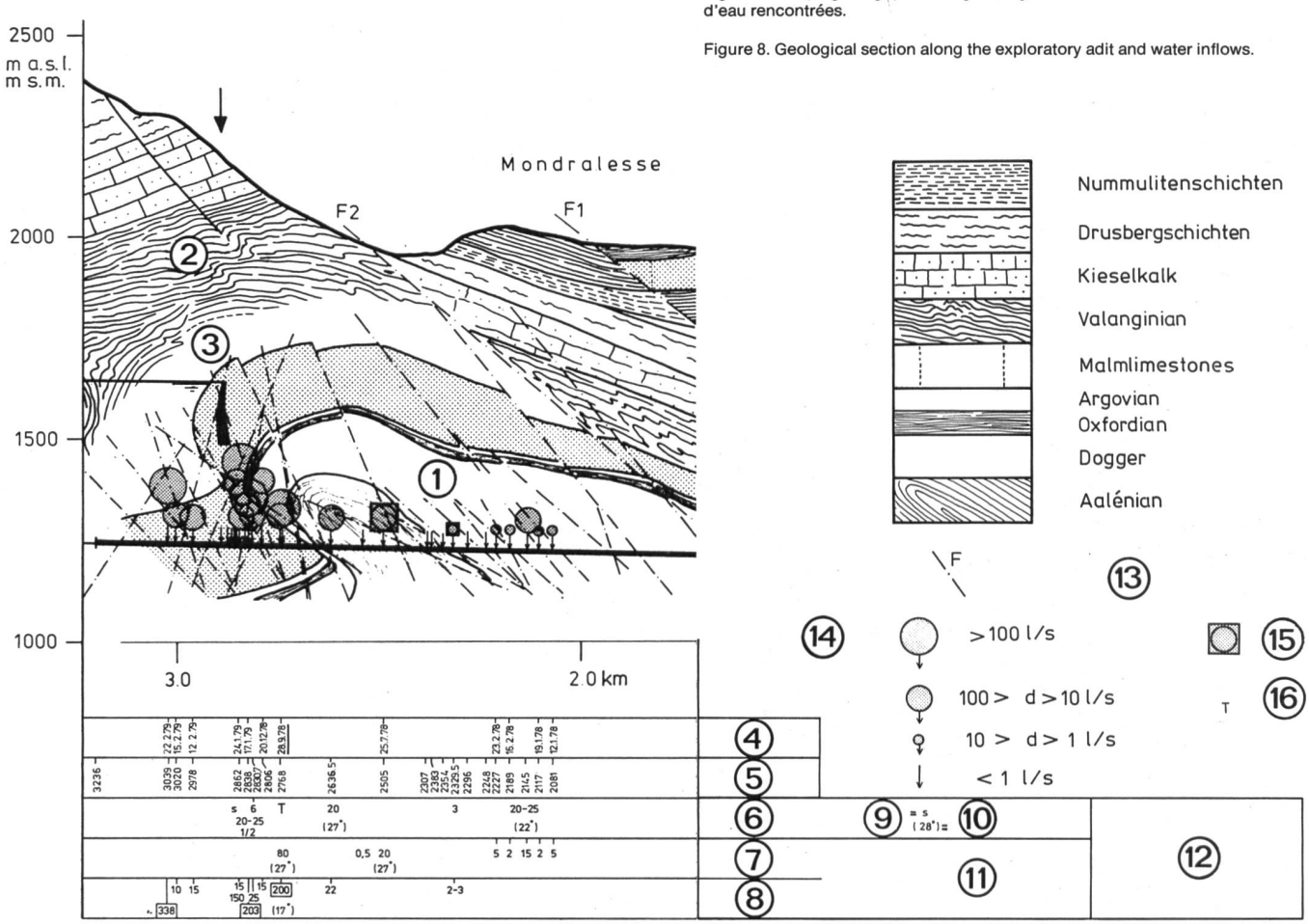
ate its permeability. The major problem was that the drillings had to be arranged in a way to avoid damages to the measuring systems already installed. Also, the location of the existing grout curtain was, in some parts of the riegel, not too accurately known. The grout curtain consists of one row of vertical drillholes extending along the whole riegel (figure 7). In addition, some deviation had to be expected of the theoretical line of the relatively long, inclined drillings. Therefore, in cases of high water losses, measurements of the actual direction of the drillholes had to be considered.
The drillings were cored, the cores mapped and the RQD-values determined. A total of 1366.8 m of drillings was carried out in Zone A.
The research work in Zone A resulted in the following:
– The right hand side of the riegel, the massif below the dam and the lower parts of the left hand side of the riegel can be considered as more or less impervious. The few high water losses could all be related to more fractured rock zones.
– The uppermost parts of the riegel have a slightly higher permeability on both sides, which is mainly due to a shallow surface karstification.
– The two boreholes on the left hand side showed high water losses because they were deepened outside the grout curtain. This was proved by an additional drillhole situated in the grout curtain and showing no considerable water losses.
– Slightly higher water losses were also noticed around the grouting gallery on the left hand side in the loosened rock mass above the underground excavation.
The grouting of the borings was executed with common cement grout. The grout take was partly higher than the permeability indicated by the water tests. This was due to higher pressures.
The research work in Zone A lead to the following conclusions:
– The grout curtain can still be considered as being intact. It has not suffered from the deformations of the riegel.
– There is no imperative need for additional grouting.
– It is a pure question of economy if some regrouting should be carried out in different parts.

Zone B

The idea of the research work in Zone B consisted of a systematic control of the concrete-rock contact. In a first step, two boreholes cross this contact at the base of each foundation block. The penetration points are situated along the middle axis in the tripple points. The boreholes are drilled from the best suitable position in the nearest inspection gallery of the dam. In the borehole section ±1 m of the contact water tests following Sabarly are carried out. The drilling continues 20 m into the rock.
The work in Zone B is not finished yet. Until now, 17 contacts have been tested with 51 drillings. Until now, the concrete-rock contact has to be considered as relatively impermeable with a mean of 1.96 Lugeon. The maximum value was 13 Lugeon. In three drillings no water losses were registered. The rock below the contact is relatively impervious. The mean value reached 0.49 Lugeon, the maximum 7.5 Lugeon. In three drillholes the rock was completely impervious.
From the tests executed until now in Zone B it can be derived that the concrete-rock contact is generally intact. Where it is open, grouting proved to be unproblematic and successful.
Additional drillings were carried out in 1981 for the installation of rockmeters in the abutments and for uplift mea-

Figure 8. Coupe géologique le long de la galerie de reconnaissance et venues d'eau rencontrées.

Figure 8. Geological section along the exploratory adit and water inflows.



1 Coupe suivant les observations dans la galerie
2 Pronostic
3 Projection du barrage de Zeuzier parallèlement aux structures tectoniques
4 Date
5 Distance depuis le portail sud
6 Indication d'après les relevés géologiques
7 Indication suivant les forages vers l'avant
8 Observations dans le front de taille
9 Humidité
10 Température
11 Indications selon les rapports d'avancement
12 Informations sur les venues d'eau
13 Faille
14 Venues d'eau
15 Venue d'eau sous pression
16 Venue d'eau tarissant rapidement

1 Section following observations in the adit
2 Prognosis
3 Projection of Zeuzier dam parallel to the tectonic structures
4 Date
5 Distance from south portal
6 Indication following geological mapping
7 Indication following predrilling
8 Observations in the heading
9 Water seepage
10 Temperatures
11 Indications following heading rapports
12 Informations about the water inflows
13 Fault
14 Water inflows
15 Water inflow under pressure
16 Water inflow dried out after a short time

conclure que ces phénomènes étaient essentiellement dûs à l'interférence dans les conditions hydrogéologiques de la progression des travaux dans la galerie de sondage du tunnel du Rawil. Ceci surtout parce que cette explication est de toutes celle qui correspond le mieux aux phénomènes observés à Zeuzier et qu'elle couvre la majeure partie des faits:

1.
La surveillance géodésique a montré qu'il existait un affaissement géologique étendu. Sa forme correspond relativement bien aux tassements dûs à l'abaissement de la nappe phréatique dans les sols. De plus, la littérature rapporte un abaissement d'eau souterraine contrôlé dans des calcaires et dolomites karstifiés d'Algérie. On a pu observer exactement le même phénomène à Zeuzier.

2.
Le verrou de Zeuzier, sur lequel est fondé le barrage endommagé, est la continuation structurelle d'un anticlinal du Malm qui a été traversé par la galerie de sondage (fi-

surements in the lower parts of the dam. The geological mapping of these cores, together with the RQD-values and the results of the permeability tests confirmed all the earlier findings about the good quality and low permeability of the Malm limestones forming the foundation of Zeuzier dam.

7. Causes of the Rock Deformations

The board of experts has put in a strong effort to find out the causes of the rock deformations among the many geological possibilities, e.g. tectonic activity, mining activity, presence of soluble rocks, volcanic activity, internal erosion of weak rocks. It had to exclude many hypotheses because of the local and regional geological conditions and the sequence of the events. Finally, the board came to the conclusion that the main cause of the events was the interference into the hydrogeological conditions caused by the driving of the exploratory adit for the Rawil roadtunnel. This mainly because it fits best with all the observable phenomena and covers most of the facts:

gure 8). De la galerie au barrage, la géologie peut être clairement suivie. C'est la raison pour laquelle il y a une relation directe entre la géologie au site du barrage et celle que traverse l'excavation souterraine (figure 9). Les figures 1 et 9 démontrent que la galerie et le barrage ont une distance minima de 1400 m, mesurée entre le kilomètre 2,5 et 2,6 du tunnel. La différence de niveau atteint 400 mètres entre la galerie et le bas de la fondation du barrage. Le percement de la galerie fut interrompu au km 3,236 vers le début du mois d'avril 1979.

3.

Le meilleur argument à l'appui de la relation entre les déformations du rocher et l'afflux d'eau dans la galerie se fonde sur l'étroite correspondance dans le temps de deux facteurs généralement indépendants l'un de l'autre. On a trouvé les relations suivantes:

– Les premières déformations, encore très faibles, se sont produites entre les mois de novembre 1977 et janvier 1978, lorsqu'après avoir traversé une longue section sèche, on remarqua les premières sorties d'eau dans la galerie (figure 8). Les déformations n'atteignaient alors que quelques millimètres et n'ont pu être détectées que par évaluation statistique des mesures des pendules.

– Les grosses déformations qui ne tardèrent pas à être observées, commencèrent au mois d'octobre 1978, après que de fortes arrivées d'eau ont été notées le 28 septembre.

– Les déformations s'accélérèrent après que furent observé de nouvelles et massives venues d'eau, les 17 et 24 janvier 1979.

– Après une légère accalmie, on a pu noter une reprise du processus de déformation, après avoir remarqué de nouvelles et fortes venues d'eau vers la fin du mois de février 1979.

– Les déformations diminuèrent lentement, mais continuellement après le 2 mars, lorsqu'on cessa de rencontrer

1.

The geodetic survey has shown that an extended homogeneous settlement exists. Its shape corresponds quite well with settlements due do the lowering of the groundwater table in soils. In addition, the literature reports the lowering of the groundwater table under control in karstified limestones and dolomites in Algeria. Absolutely the same phenomena as at Zeuzier could be observed.

2.

The riegel of Zeuzier, on which the damaged dam is founded, is the structural continuation of an anticline in the Malm which was crossed by the exploratory adit (figure 8). The geology can be clearly followed from the adit to the dam. Therefore, there is a straight relation between the geology at the dam site and the geology crossed by the unterground excavation (figure 9). Figures 1 and 9 show that the dam and the adit have a shortest distance of about 1400 m from each other, which was reached between km 2.5 and 2.6 of the adit. The difference in the levels reaches about 400 m between the lower foundation of the dam and the adit. The heading of the adit was stopped at the beginning of April 1979 at km 3.236.

3.

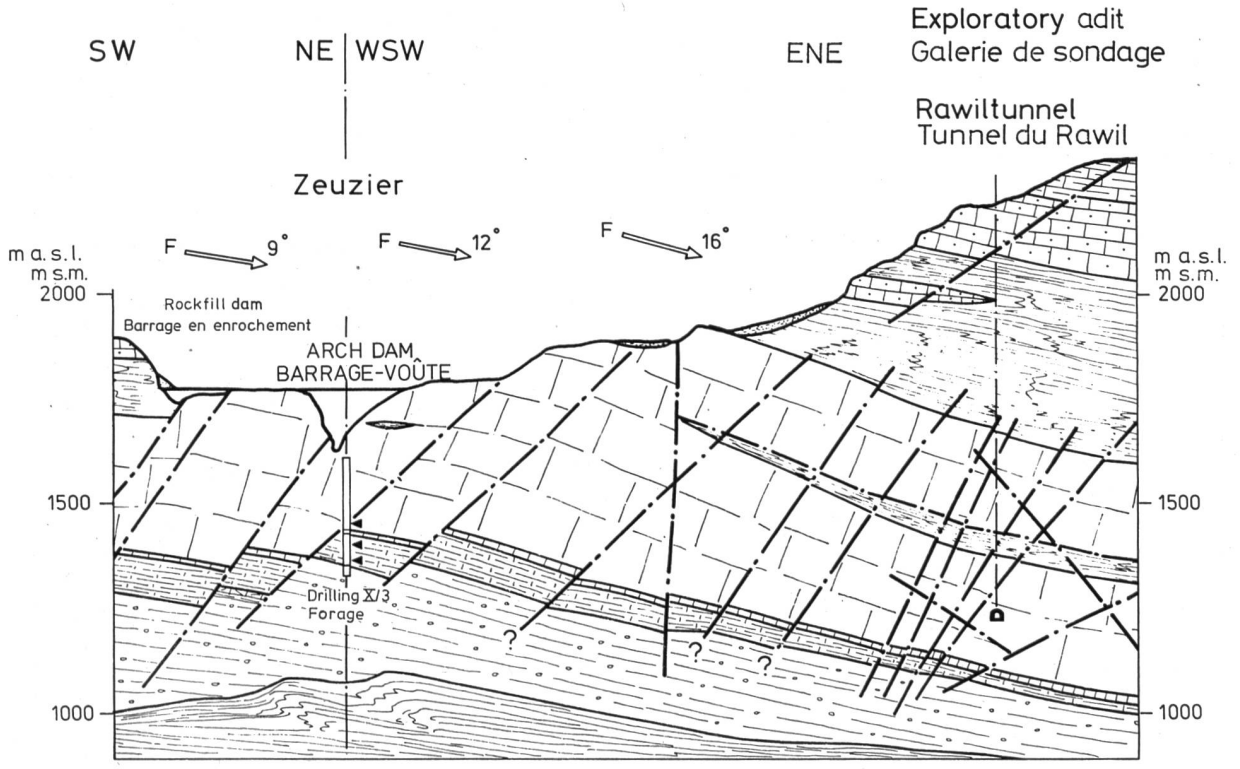
The strongest argument for the relation between the deformations of the rock mass and the water inflows into the exploratory adit are based on the very narrow temporal correspondence of the two commonly independent factors. The following correspondences could be found:

– The first, still very modest deformations occurred between November 1977 and January 1978, when after a long, dry section, the first springs were met in the adit (figure 8). The deformation reached only a few millimeters and could only be detected by statistical evaluation of the pendulum measurements.

– The strong deformations which were soon noticed started at the beginning of October 1978, after the first

Figure 9. Coupe géologique à travers le barrage et la galerie de reconnaissance (légende voir figure 3).

Figure 9. Geological section trough the dam and the exploratory adit (legend see figure 3).



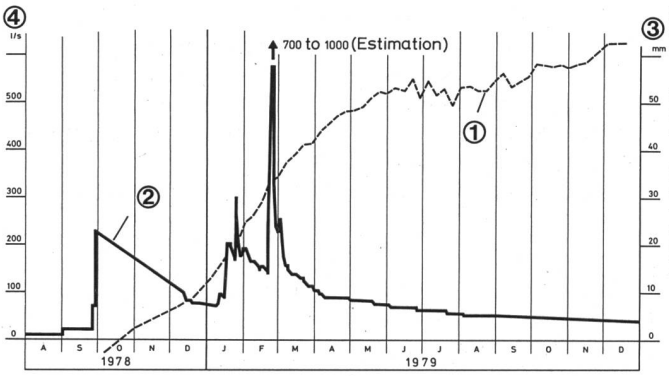


Figure 10. Développement au cours du temps des déformations du barrage et venues d'eau dans la galerie de sondage.
1 Déviation corrigée du pendule médian au niveau du couronnement du barrage
2 Total des venues d'eau dans la galerie de reconnaissance
3 Déviation du pendule en mm
4 Venues d'eau en l/s

Figure 10. Temporal development of the deformations of the dam and the water inflows into the exploratory adit.
1 Corrected deviation of the medium pendulum at the crown of the dam
2 Total of water inflows into the exploratory adit
3 Deviation of the pendulum in mm
4 Water inflow in l/s

de l'eau et après que l'on eut mis fin aux travaux dans la galerie quelques semaines plus tard.
– On supposa que l'arrêt des déformations fut atteint durant l'été 1980. C'est en tous cas ce qu'indiquèrent les mesures géodésiques, qui par la suite n'ont enregistré que des déformations comprises dans la marge d'erreur. L'hiver 1980/81 a de nouveau apporté une accélération des tassements suivie d'un arrêt en été 1981. Les déformations hivernales n'ont atteint qu'environ la moitié de celles de l'année précédente (1979/80). Depuis lors, une diminution graduelle allant jusqu'à un arrêt définitif a pu être notée. Pour l'année 1982, on s'attend à ce que les déformations atteignent des valeurs qui resteront de l'ordre de l'erreur sur les mesures.
– La figure 10 montre d'une part le développement au cours du temps des déformations du barrage mesurées par le pendule médian, et d'autre part l'afflux d'eau dans la galerie de sondage jusqu'à fin 1979.

4.
Les quelques analyses chimiques de l'eau récoltée ont montré que la galerie de sondage avait essentiellement drainé la nappe phréatique inférieure. Les observations faites au cours du percement de la galerie ont révélé qu'au moment où un forage atteignait un réservoir, l'eau jaillissait avec une pression considérable. L'effet de drainage ainsi obtenu mena d'abord à une baisse de la pression générale, puis à une diminution de la pression de l'eau des fractures du massif initialement remplies. Comme mentionné plus haut, la résurgence de cette eau semble entravée par des parties imperméables situées dans les calcaires du Malm avant tout. Plus tard, on évacua la majeure partie du système d'eau souterraine, si bien qu'elle peut aujourd'hui s'écouler librement, avec un débit stable qui correspond à l'alimentation en eau du système. On ne sait toujours pas si la nappe phréatique inférieure communique avec celle d'en haut, on ignore donc combien d'eau du système supérieur a aussi été drainée par la galerie. Quoi qu'il en soit, il semble que l'influence subie par la nappe phréatique supérieure ait été faible, peut-être même nulle et jusqu'à présent personne n'a noté de diminution de l'écoulement de ce système karstique ou des petites sources résurgentes déjà décrites.
Le relâchement de la pression de l'eau dans des fractures telles que les diaclases, failles, fissures et peut-être même dans les plans de stratification en relation avec une nouvelle distribution des pressions mena à une certaine fermeture de ces interstices. La somme de tous ces rétrécissements a finalement provoqué le tassement de tout le massif. On a pu démontrer à l'aide des forages, qu'il suffisait aux fractures de se resserrer d'un dixième de millimètre (par exemple) pour que de pareilles déformations se produisent. En se basant sur les connaissances actuelles, il

strong water inflow was encountered on September 28th.
– The deformations accelerated after new strong water inflows were met on January 17th and 24th, 1979.
– A new acceleration of the deformations could be noticed after a slight fading when new, strong water inflows were encountered at the end of February 1979.
– The deformations slowed down slightly but continuously after March 2nd, when no new water inflows were met and the heading of the adit was stopped.
– It was assumed that a standstill of the deformations was reached during summer 1980. This was indicated by the geodetic measurements which, thereafter, showed only deformations within the range of accuracies. Winter 1980/81 showed a new acceleration of the settlements which was again followed by a standstill in summer 1981. The winter deformations reached only about one half of those of winter 1979/80. Hence a gradual decrease towards a definite standstill can be noticed. It is expected that in 1982 the deformations will reach a state of values remaining permanently in the accuracies of the measurements. Figure 10 shows the temporal development between the deformations of the dam, measured on the medium pendulum, and the water inflows into the exploratory adit until the end of 1979.

4.
From the few chemical analyses of the inflowing water it can be derived that the exploratory adit drained mainly the lower groundwater system. Observations during the heading of the adit showed that, when a reservoir was touched by the drillings, the water stood under considerable pressure. The drainage effect of the adit lead, therefore, in a first step to the release of this pressure and hence to a release of the water pressure in all the fractures of the rock massif filled with this groundwater. As mentioned above, its surface outflow seems to be blocked by impervious parts mainly in the Malm limestones. In a second step, the major parts of the groundwater system were evacuated in a manner that finally the water inflow observed at present into the adit corresponds to the natural inflow into the system. Today we do not know yet if the lower groundwater system has some correspondence with the upper one and, therefore, how strongly the upper system was drained by the adit too. At the moment it looks as if the influence on the upper system was rather small or even nil. In any case, until now, no diminution of the outflows of the upper karst systems or of the mentioned small surface springs is reported.
The release of the water pressure in the fractures such as joints, faults, cracks, perhaps even bedding planes, together with the new stress distribution, lead to a certain closure of these openings in the rock mass. The sum of all these closures of the open space in the rock finally caused

faut postuler que l'affaissement principal s'est produit dans les séries sous le Malm. Leur perméabilité relativement faible explique que les tassements se sont produits pendant une période relativement longue et qu'ils n'ont pris fin qu'au terme d'une phase de décroissance lente.

5.
Le modèle exposé au point 4 nous permet d'expliquer pourquoi le tassement fut plus grand au centre de la vallée qu'à ses flancs. Dans les flancs de la vallée, la couverture a empêché les fractures de s'ouvrir davantage à l'époque où le système d'eau souterraine a été formé et mis sous pression. La plupart de ces fractures sont donc restées fermées, raison pour laquelle la baisse de la pression hydraulique n'a pas conduit à un tassement majeur.

6.
Peut-être ne connaîtra-t-on jamais l'étendue réelle de l'affaissement. Tout ce que l'on sait à son sujet, est qu'il diminue vers les flancs de la vallée. On peut également dire qu'il s'étend le long de la route d'accès sur environ 1,5 km vers le sud, le long du nivellement. Cet état peu satisfaisant des connaissances vient surtout du fait que les déterminations premières des points géodésiques des environs de Zeuzier n'ont pas été faites avec suffisamment de précision pour permettre de tirer des résultats concluants, si l'on considère les déformations plutôt petites auxquelles on a eu affaire (10–12 cm seulement). Le rapprochement des deux côtés de la gorge de la Lienne et des flancs de la vallée principale n'est qu'une conséquence géométrique de la forme des tassements en général.

7.
En partant du modèle ci-dessus, on comprend aisément pourquoi les déformations n'ont pas été accompagnées d'un événement sismique majeur (M> 3): il manque un mouvement spontané le long d'une fracture isolée pour engendrer un tel incident. Le modèle décrit montre, au contraire, qu'on a eu affaire à beaucoup de petits tassements qui n'ont pu déclencher que des événements microsismiques. Ces considérations expliquent l'augmentation de ce type d'activité. Celle-ci commença immédiatement après la première arrivée d'eau dans la galerie, c'est-à-dire vers la fin du mois de septembre 1978.

8.
Dès à présent, l'absence de déformations à l'intérieur des rochers couverts par les extensomètres s'explique. Il est indiscutable, que durant tout le temps de surveillance, qui débuta en automne 1979 pour se poursuivre jusqu'à aujourd'hui, les déplacements principaux se produisirent dans des séries de roches situées très en profondeur, même plus bas que le Malm. Toutefois, on ne peut exclure qu'au cours de la phase principale des déformations, entre octobre 1978 et mai 1979, les parties supérieures du Malm aient été déformées elles aussi.

Le groupe d'experts est convaincu que ce grand nombre d'arguments renforce sa thèse sur les causes des déformations, qui atteint par là un haut degré de probabilité.

8. Conclusions

En se basant sur la lecture des instruments en place, les informations tirées des forages et des essais d'eau tout au long des recherches, on peut affirmer que le rocher de fondation du barrage de Zeuzier a résisté aux déformations sans subir de dommage. Les valeurs RQD, qui généralement excédaient 90%, sont toujours très élevées. Les essais d'eau ont prouvé que les calcaires du Malm sont

the general settlement of the whole massif. It could be shown on the drilling cores that e.g. a closure of only 1/10 mm of each observed open gap in the Malm limestones would be sufficient to create the observed deformation. According to the present state of knowledge, it has to be considered that the main settlement happened in the rock series below the Malm. The relatively low permeability is the reason for the slow decrease rate of the settlement and its long duration.

5.
The model explained in point 4 enables us to answer the question why the settlement in the center of the valley was greater than the one in the valley flanks. In the valley flanks the overburden prevented a stronger opening of the fractures at the time when the groundwater system took place and was set under pressure. They remained mainly closed and, therefore, the release of the water pressure did not lead to a major settlement.

6.
We may never know the real extent of the settlement. All we do know is that they diminish towards the valley flanks. We also know that it extends along the access road about 1.5 km towards the south along the levelling. This unpleasant state is mainly due to the fact that the original determinations of the geodetic points in the environment of Zeuzier is not accurate enough to get conclusive results, considering the rather small deformations of only 10–12 cm. The narrowing of the two sides of the gorge of the Lienne and of the main valley flanks is only a geometrical consequence of the shape of the general settlements.

7.
From the model explained above, the reason can be understood why the deformations were not accompanied by a major seismic event (M>3). For such an event a spontaneous movement along a more extended single fracture is missing. The described mode of the origin of the settlements shows, on the contrary, that many small local settlements occurred which were able to trigger micro-seismic events. These considerations explain the rise in the micro-seismic activity. It started immediately after the first major water inflow into the exploratory adit which occurred at the end of September 1978.

8.
The absence of deformations in the rock mass covered by the extensometers can now also be explained. It can be taken as a fact that during the observation time starting in fall 1979 until today, the main displacements occurred in the deeper rock series, mainly even below the Malm. But it cannot be excluded that in the main phase of the deformations between October 1978 and May 1979 some deformations occurred in the upper parts of the Malm as well.

The board of experts is convinced that this great number of arguments speaks strongly for its assumptions on the causes for the deformations. They reach, therefore, a high degree of probability.

8. Conclusions

Based on the results of the instrumentation readings and the information gained from the drilling work and water tests either in the first or second stage of exploration, it can be stated that the foundation rock of Zeuzier dam has stood the deformation without minor or major damage. The RQD-values, which generally exceed 90%, are still very high. The water tests proved that the Malm limestones

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 tendaient 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).