

# **TASSEMENTS DE MASSIFS ROCHEUX AU-DESSUS DE TUNNELS**

Symposium Géologie AlpTransit  
Zürich, 15 - 17 février 1999

---

Dr Ing. Giovanni Lombardi

# Tassements de massifs rocheux au-dessus de tunnels

G. Lombardi

*Lombardi SA, Ingénieurs-Conseils, CH – 6648 Minusio*

**RESUME:** La question des tassements de massifs rocheux induits par l'effet de drainage consécutif à la construction de tunnels avait été longtemps ignorée. Les événements qui se sont produits en 1978 au barrage de Zeuzier en Valais ont surpris tout d'abord, mais ont mis en évidence l'importance que peut assumer le phénomène. Le mécanisme en est présenté ainsi que le modèle mathématique FES qui a été développé pour l'expliquer. En raison de la présence d'un certain nombre de barrages au-dessus du tracé des tunnels ferroviaires du système AlpTransit, des études ont été entreprises et sont en cours depuis quelque temps pour mettre en évidence des interférences qui pourraient compromettre l'intégrité de ces ouvrages. Quelques résultats des études en cours sont présentés.

**ZUSAMMENFASSUNG:** Die Frage von Setzungen in Felsmassiven, die durch die drainierende Wirkung von Tunnelbauten verursacht werden können, wurde lange nicht beachtet. Die Ereignisse des Jahres 1978, die sich unter der Sperre Zeuzier, im Wallis, abspielten, wiesen aber auf die Wichtigkeit des Phänomens hin. Das Wesen desselben wie auch das zur Erklärung entwickelte mathematische Modell, FES, werden im Bericht erläutert. Die Existenz einer Anzahl von Staumauern oberhalb der AlpTransit-Tunnel ist der Grund, dass seit einiger Zeit Untersuchungen im Gange sind, um eine allfällige Gefährdung dieser Bauwerke aufzuzeigen. Erste Ergebnisse der laufenden Studien werden aufgeführt.

**SUMMARY:** The question of settlements in rock masses due to the lowering of the water table caused by the construction of tunnels was neglected for long time. The 1978 events at the Zeuzier dam in the Canton Wallis were surprising at the beginning, but did show the possibly great importance of this phenomenon. The mechanism behind it, as well as the mathematical model, FES, developed to explain the events are presented in the paper. Because of the existing dams above the tunnels of the AlpTransit system, investigations and studies are carried out since some time in order to detect any influence that could jeopardise the integrity of these structures. Some results of the ongoing study will be presented.

## 1 INTRODUCTION

On traitera, fort sommairement d'ailleurs, la question des tassements causés dans une masse rocheuse par l'effet drainant dû à l'excavation de tunnels.

Il était bien connu depuis fort longtemps que l'abaissement d'une nappe phréatique dans un terrain alluvionnaire causait un affaissement, parfois très important, de la surface du terrain. De même l'on savait que l'extraction de pétrole était généralement la cause d'une subsidence plus ou moins localisée. Il y avait même quelques cas où l'on avait noté des tassements significatifs consécutifs à l'extraction d'eau d'une nappe phréatique en milieu rocheux. Par contre, jusqu'en l'année 1978, on ne semblait pas s'être jamais préoccupé des conséquences que



Très rapidement, pour ne pas dire immédiatement, des mouvements ont été détectés par les pendules du barrage et des dommages importants à l'ouvrage se sont produits par la suite, ainsi qu'indiqué à la figure 3.

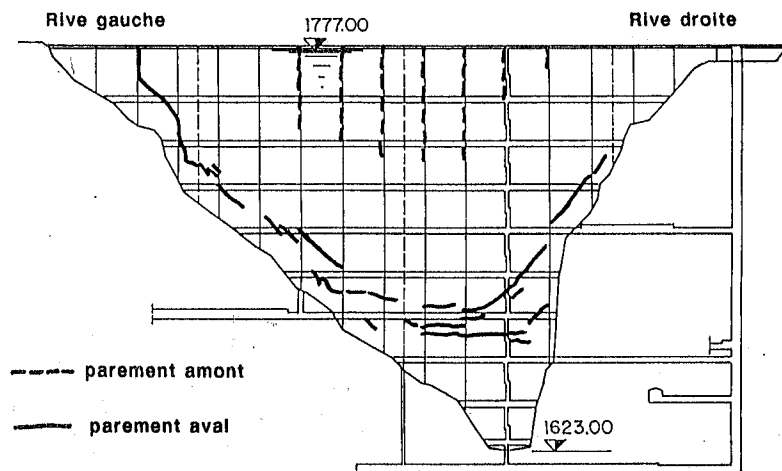


Figure 3. Situation des fissures principales en décembre 1980 (ouverture  $\geq 1$  mm).

Le profil géologique transversal à la vallée est représentée par la figure 4. On notera que la formation du Dogger comportait un aquifère captif qui a été partiellement drainé par la galerie. Ajoutons que celle-ci passait à environ 1,5 km de la vallée de la Lienne et à 400 m en-dessous de son fond. Les conséquences du drainage ainsi causé sont visibles à la figure 5 et consistent en un tassement qui atteint 13 cm dans l'axe de la vallée et seulement 4 cm au droit du tunnel mais, en même temps, (fig. 6) en un resserrement de la vallée de l'ordre de 6 cm au niveau du couronnement de l'ouvrage.

A l'époque trois facteurs avaient particulièrement surpris, à savoir:

- l'importance considérable des tassements (13 cm), malgré la grande distance (1,5 km) existant entre tunnel et barrage, et l'excellente qualité du rocher de fondation,
- le fait que les tassements étaient plus importants dans l'axe de la vallée qu'au droit de la galerie d'exploration, et enfin
- la rapidité du phénomène qui a débuté presque immédiatement après une venue d'eau importante.

Tous ces aspects ont pu être parfaitement expliqués par le modèle géomécanique développé à ce propos et qui porte le nom de FES (Fissured Elastic Saturated rock mass model).

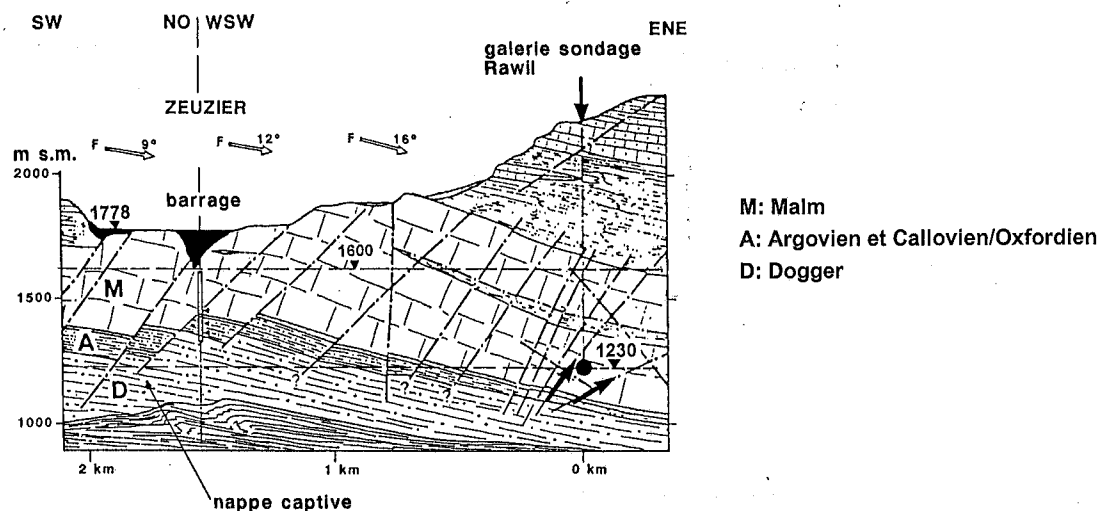


Figure 4. Barrage de Zeuzier. Profil géologique transversal à la vallée.

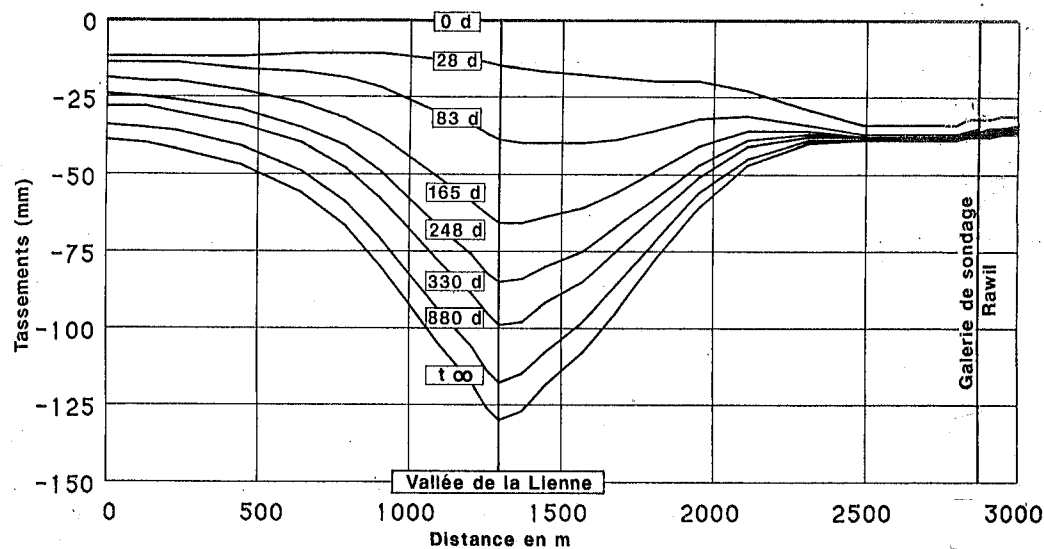


Figure 5. Barrage de Zeuzier. Tassements dus au drainage.

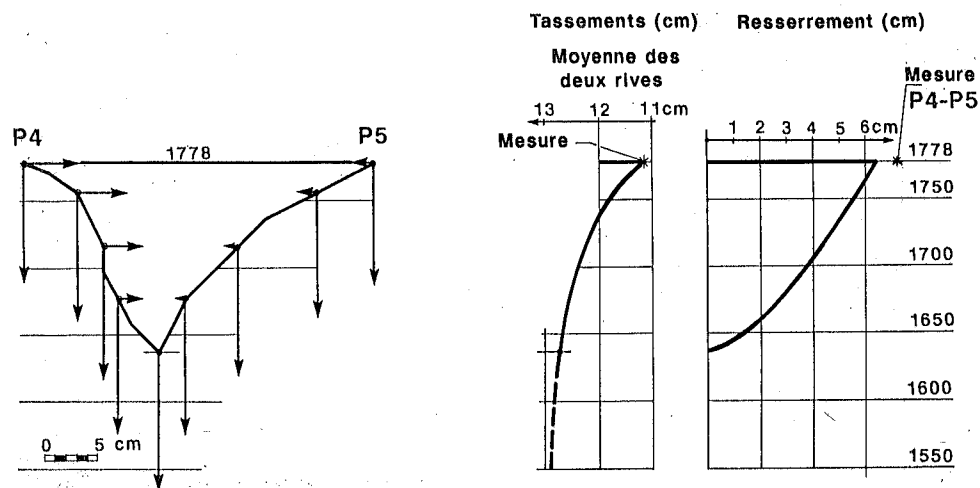


Figure 6. Barrage de Zeuzier. Tassements et resserrement de la vallée. Etat final.

### 3 LE MECANISME DES TASSEMENTS

On s'imagine volontiers que le creusement d'un tunnel peut causer des tassements en surface, en raison du volume de roche excavé. Il s'agit d'un phénomène réel ainsi que cela s'est parfois vérifié pour des tunnels peu profonds, comme indiqué à la figure 7. Toutefois il va de soi que la section de la cuvette de tassement est toujours très faible par rapport à la section du tunnel; en réalité elle ne représente même qu'une partie du volume correspondant aux mouvements de convergence.

Ainsi donc, si l'on considère que la cuvette de tassement s'étend d'autant plus loin que le tunnel est profond, les effets de changements dans l'équilibre statique du massif sont tout à fait négligeables pour les tunnels situés à grande profondeur.

Dans le cas du barrage de Zeuzier, la section de la cuvette transversalement à la vallée représentait par contre au moins 300 m<sup>2</sup> et était donc sans aucune mesure avec les déformations d'ordre statique générées par la petite galerie de 10 m<sup>2</sup> de section et ses mouvements de con-

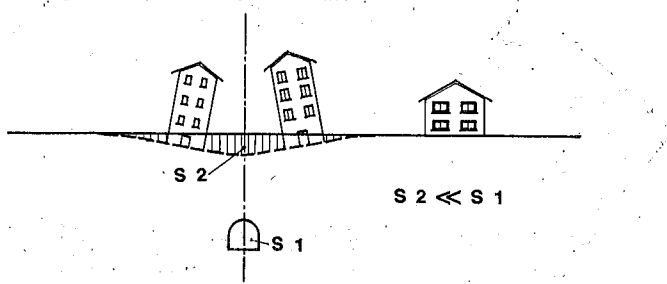


Figure 7. Tassements de nature "statique".

vergence extrêmement limités. Il faut donc faire intervenir des modifications de l'équilibre hydraulique du massif pour expliquer le phénomène.

On a pu constater à Zeuzier que le phénomène comportait non seulement des affaissements verticaux mais également des mouvements horizontaux. Ainsi que l'indique la figure 8, l'impact sur un ouvrage en surface peut être fort différent selon la position de l'ouvrage. En effet, l'allure des tassements verticaux comportera toujours un maximum en quelque endroit que ce soit - au-dessus du tunnel ou ailleurs - et s'épuisera forcément à une distance suffisamment grande des deux côtés de celui-ci. La courbe présentera donc inévitablement une zone à courbure positive et deux zones à courbure négative. Comme on le voit à la figure 8, on peut donc avoir, dans le cadre du même événement, des vallées qui se resserrent et d'autres qui s'ouvrent, et cela en raison des rotations liées aux tassements différentiels. Si des ouvrages rigides se situent à cet endroit ils sont susceptibles de subir des déformations et partant des dommages qui peuvent être importants.

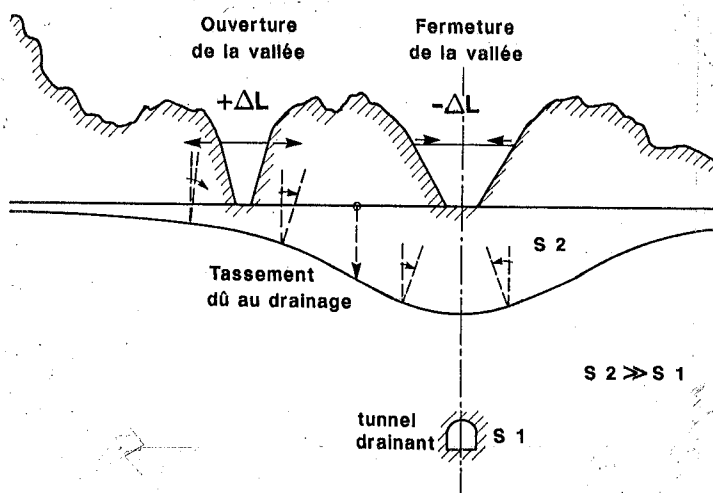


Figure 8. Ouverture ou fermeture de la vallée causées par le drainage dû à la construction d'un tunnel.

#### 4 LE MODELE FES

La figure 9 montre une représentation plausible du comportement d'une discontinuité dans une masse rocheuse soumise à compression. On aura des zones de contact et des zones ouvertes et donc des canaux où une circulation d'eau peut se produire. En augmentant la contrainte totale agissant sur l'éprouvette ainsi définie, on cause la fermeture progressive de la fissure ainsi que cela ressort à la figure 10. La pression interstitielle agissant dans les discontinuités du massif joue évidemment un rôle important.

La figure 11 représente le comportement d'un tel système et met en évidence la relation contrainte totale - déformation, en tenant compte de la pression interstitielle  $p$ , ainsi qu'indiqué.

Si l'on fait abstraction de la présence d'eau, la caractéristique de déformabilité du massif est représentée par une courbe de serrage OA qui se prolonge, après fermeture totale des discon-

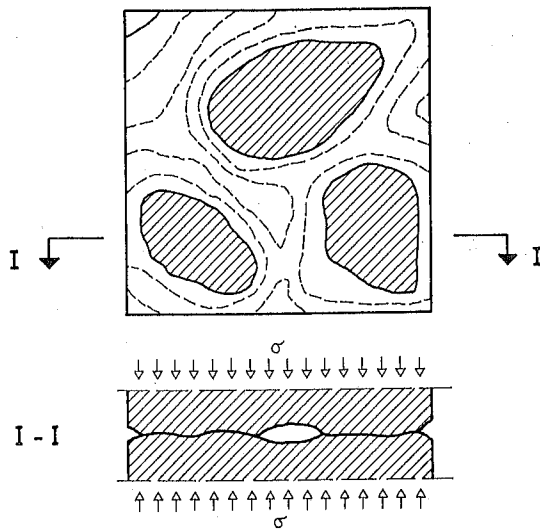


Figure 9. Massif élastique fissuré. Plan topographique et coupe d'une fissure soumise à compression.

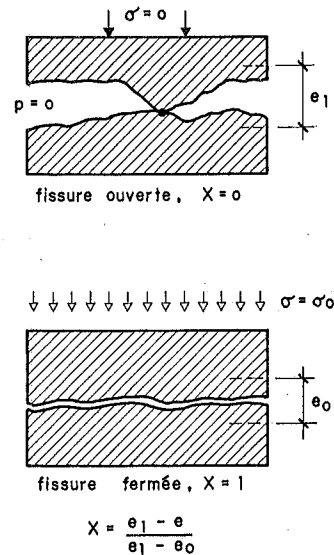


Figure 10. Degrés X de fermeture de la fissure (Serrage).

$p$  = pression neutre (interstitielle)  
 $X$  = degré de serrage  
 $X = 0$  fissures ouvertes  
 $X = 1$  fissures complètement fermées

Exemple d'un massif avec un seul système de fissures ayant 0.6 mm d'épaisseur ("hauteur d'onde") et 100 mm de longueur ("longueur d'onde") distantes de 100 mm. Module de la matrice rocheuse 20 Gpa  
 Point A ( $\sigma_0, \epsilon_0$ ) = serrage complet en absence d'eau.

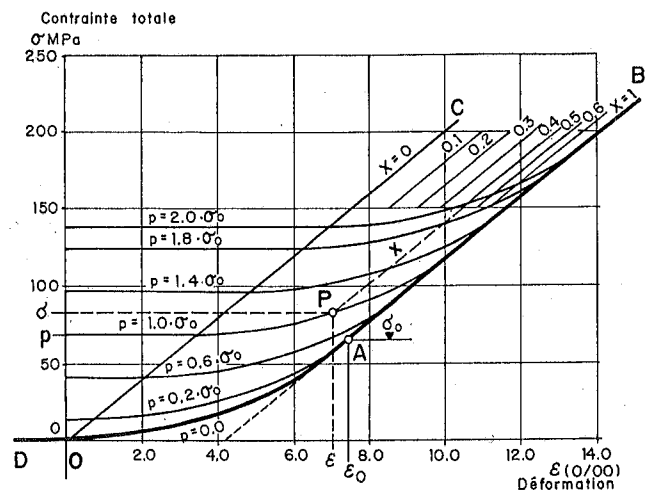


Figure 11. Modèle FES pour un massif rocheux.

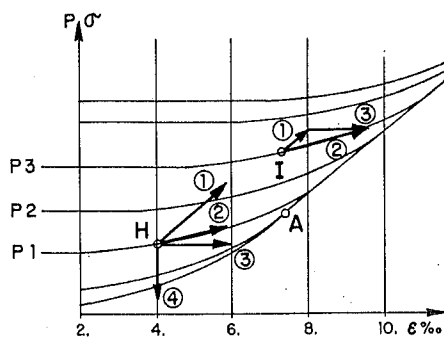
tinuités, par une droite AB de comportement pratiquement élastique. La pression interstitielle décale parallèlement à elle même la courbe de comportement à sec. Comme on le voit c'est essentiellement la pression effective qui régit le comportement des massifs fissurés.

Selon la figure 12 on peut distinguer, à partir d'un équilibre représenté par un point H sur le graphique, quatre directions principales correspondant à:

1. un chargement non drainé
2. un chargement à pression interstitielle constante
3. un drainage à charge totale constante, ainsi qu'un
4. changement d'état à dilatation nulle par une variation de la pression interstitielle, accompagnée d'une variation de la contrainte totale.

La combinaison des trois premiers effets conduit à quelque chose qui présente une certaine similitude avec la consolidation des argiles.

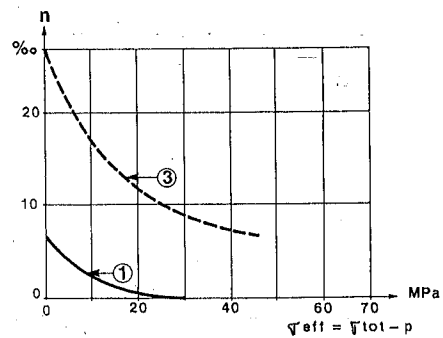
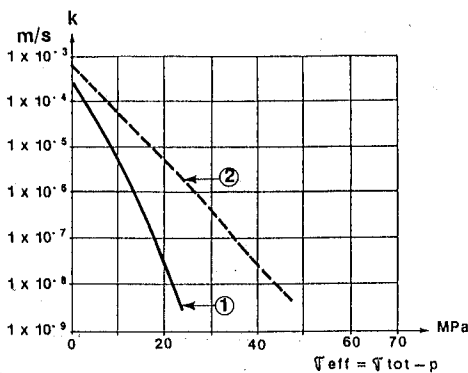
Outre le comportement statique, c'est-à-dire la relation contrainte/déformation il faut encore tenir compte de la variation de la perméabilité en fonction de l'état de contrainte ainsi que cela est représenté à la figure 13, dans le cas particulier relatif au Dogger de Zeuzier.



### Exemple

Direction	Variations ( p, σ, ε )	Rapports au point H
①	chargement non drainé :	$\frac{\Delta \sigma_1}{\Delta \varepsilon_1} = 20 \text{ GPa}$
②	chargement à pression int. constante :	$\frac{\Delta \sigma_2}{\Delta \varepsilon_2} = 5 \text{ GPa}$
③	drainage à charge constante (module uniaxial de tassement) :	$\frac{\Delta p}{\Delta \varepsilon_3} = M_{t1} = 8 \text{ GPa}$
④	dilatation nulle :	$\frac{\Delta \sigma}{\Delta p} = \varphi = 0.8$

Figure 12. Modèle du massif élastique fissuré. Variations d'état particulièrement significatives.



① = un système de discontinuités

② = trois systèmes de discontinuités

③ = ② plus porosité secondaire

Figure 13. Dogger à Zeuzier. Variation de la perméabilité et de la porosité avec la contrainte effective.

Disposant d'un modèle de ce type, il suffit d'intégrer simultanément les équations du comportement mécanique du massif dans les diverses zones considérées, ainsi que celles qui régissent le champ des pressions internes, en tenant compte des conditions de continuité et de perméabilité, et évidemment de celles aux limites tant statiques qu'hydrauliques.

Il s'agit donc d'une intégration couplée des diverses équations. Cela peut avoir lieu à l'aide d'algorithmes d'intégration adéquats selon les cas par un modèle bi-dimensionnel et, avec davantage d'efforts, en faisant recours à un modèle tri-dimensionnel.

## 5 APPLICATION DU MODELE

Une fois les notions de base établies et le modèle construit, il faut évidemment y introduire des paramètres numériques pour pouvoir procéder à l'intégration.

Les paramètres essentiels nécessaires en toutes les zones du massif supposées homogènes sont représentés à la figure 14. Il s'agit pour chaque masse rocheuse de connaître ses paramètres élastiques et de résistance à l'écrasement, mais aussi la configuration des systèmes de fissures; chacun étant défini par la fréquence des discontinuités, leur ouverture, la forme des ondulations des épontes ainsi évidemment que par leur orientation dans l'espace.

Il va de soi que la définition de ces paramètres est extrêmement importante et a une grande influence sur le résultat des calculs.

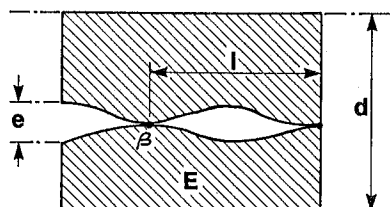
Qu'il faille en ce domaine faire recours à des mesures et au jugement du géologue est évident et l'on peut s'estimer heureux quand s'offre la possibilité d'un étalonnage lors d'un phénomène réel constaté et mesuré. Heureusement, si l'on peut dire, l'expérience et les relevés qui



ont été et seront faits de par le monde - maintenant que le phénomène est connu - contribueront à augmenter nos connaissances sur ce problème.

Ne nous cachons toutefois pas le fait que l'on ne peut, en l'état actuel de la question, parler de véritables prévisions, mais seulement de la définition de probabilités d'événement de phénomènes semblables ou différents de celui qui a été constaté au barrage de Zeuzier.

Un système de discontinuités



- E module d'élasticité
- $\beta$  résistance à l'écrasement
- d espacement des discontinuités
- e ouverture de la fissure
- l distance des points de contact

Plusieurs systèmes de discontinuités

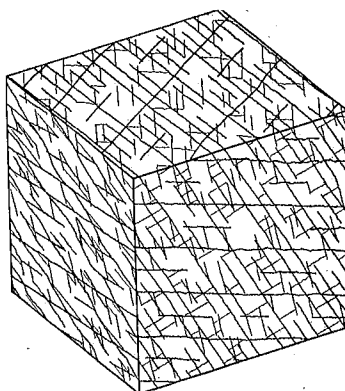


Figure 14. Principaux paramètres du modèle FES.

## 6 LES TUNNELS D'ALPTRANSIT

Dans la figure 15 sont indiqués les barrages susceptibles d'être concernés par les tunnels d'AlpTransit. Les ouvrages qui présentent le plus grand intérêt sont ceux de Ferden pour le Lötschberg et de Curnera, Nalps et Sta Maria pour le St. Gothard. Il s'agit dans tous les cas de barrages-voûte qui sont donc des ouvrages assez rigides - par rapport, par exemple, à des ouvrages en enrochement ou en matériaux meubles - et qui, de par leurs dimensions, sont susceptibles d'être affectés par les mouvements du massif rocheux de fondation.

La question de la sécurité des ouvrages concernés a donc été soulevée par le Service des barrages de l'Office Fédéral de l'Economie des Eaux.

En accord avec l'Office Fédéral des Transports et les Maîtres d'Ouvrages, il a donc été décidé d'approfondir la question et de simuler le mieux possible l'effet que la construction des tunnels des deux lignes du réseau AlpTransit pourrait avoir sur les barrages qui viennent d'être mentionnés.

Le but de l'étude est d'apprécier le risque susceptible d'être encouru et de prendre les mesures adéquates - tant au niveau des tunnels qu'à celui des barrages - pour l'éliminer ou, tout au moins, pour le réduire à des valeurs acceptables.

En réalité, ainsi que le montre la figure 16, un barrage-voûte n'est pratiquement sensible qu'à un déplacement différentiel entre les deux rives, soit que celui-ci ait lieu transversalement à la vallée - par ouverture ou fermeture de celle-ci - soit qu'il se produise dans le sens de la vallée en causant un effet de torsion. Par contre, il va de soi que des mouvements globaux tels que le tassement d'ensemble de la région ou la rotation rigide du massif de fondation selon n'importe quel axe n'ont aucun effet sur la sécurité du barrage ni sur son bon comportement.

Des études ont été réalisées ou sont en cours pour tous les ouvrages signalés. A titre d'exemple on peut montrer l'influence que la construction du tunnel du St. Gothard pourrait avoir sur le barrage-voûte de Sta. Maria (fig. 17).

Pour chaque barrage les limites admissibles soit pour l'ouverture ou la fermeture de la vallée que pour la torsion ont été calculées, ce qui permet d'établir des seuils d'alerte pour chaque ouvrage et pour chaque type de déformation qui pourrait l'intéresser.

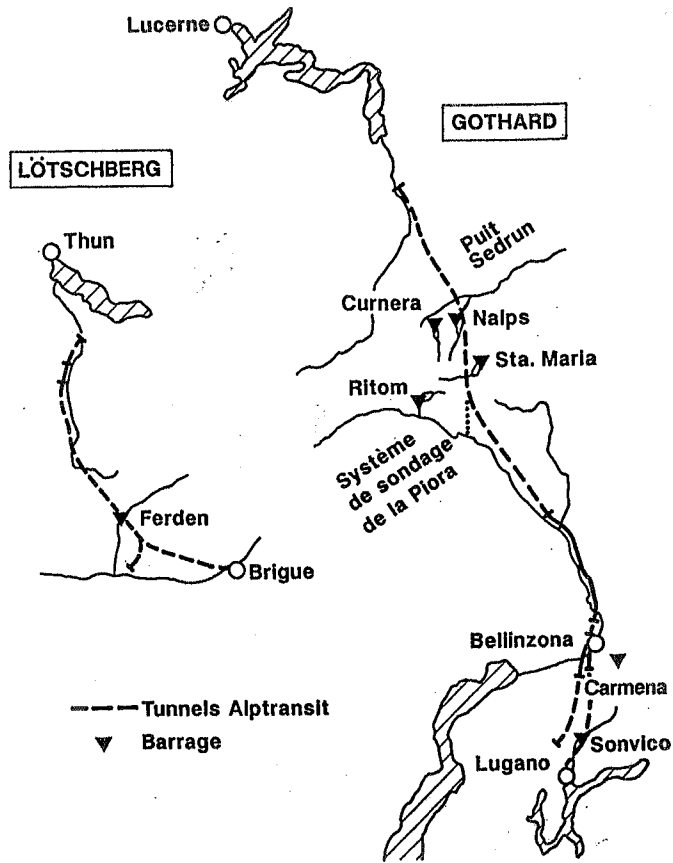


Figure 15. Disposition des barrages par rapport au tunnel projeté.

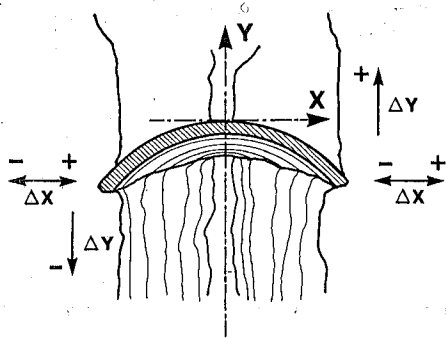


Figure 16. Déplacements horizontaux sollicitant un barrage-voûte.

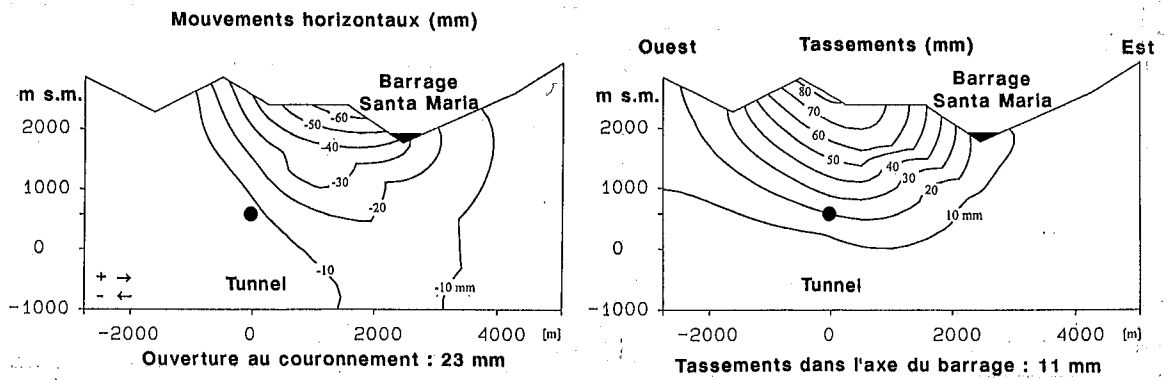


Figure 17. Barrage de Santa Maria (exemple)

## 7 CONCLUSIONS

A la suite des événements de Zeuzier, le modèle FES a été établi. Il a été très sensiblement complété et amélioré par la suite, ce qui permet de gérer des problèmes comme celui qui intéresse ici. Il représente de ce fait un outil fort intéressant à disposition de l'ingénieur.

Il va de soi que la qualité des résultats qui peuvent être obtenus dépend de celle des données mises à disposition, et il faut bien se rendre compte que parfois on ne dispose pas de tous les éléments nécessaires à l'étude. Il faut alors se contenter de procéder à l'évaluation de limites plausibles plus que de valeurs exactes. Ajoutons encore qu'une fois le modèle établi pour un certain barrage, il pourra toujours être amélioré si des valeurs complémentaires sont mises à disposition par la suite; par exemple pendant la réalisation du tunnel lui-même. Dans des cas particuliers il est possible de procéder à un certain étalonnage sur la base de mesures directes comme celle des tassements qui semblent s'être produits au-dessus du tunnel routier du St. Gothard.

Etant donné l'incertitude inévitable qui subsiste quant à la valeur quantitative des résultats, il est indispensable - ainsi que cela est en cours de réalisation - d'installer un système d'auscultation qui n'intéresse pas seulement le barrage lui-même, mais toute la région avoisinante. Cela dans le but de détecter à temps tout mouvement excessif qui pourrait s'amorcer à l'approche du front d'avancement.

On pourra ainsi disposer d'un système d'alerte qui permettra, le cas échéant, de prendre les mesures nécessaires pour assurer la sécurité de l'ouvrage.

Ajoutons pour terminer qu'il serait hautement désirable de disposer d'une banque de données relatives aux paramètres qui intéressent ces phénomènes. Elle pourrait être utile non seulement pour traiter des cas comme celui que nous venons d'exposer, mais aussi d'autres interventions, comme le traitement par injection des fondations de barrages ou celui des roches encaissant la cavité souterraine dans le but d'en diminuer la perméabilité et de réduire ainsi les effets sur les nappes phréatiques et donc les tassements qui peuvent se produire en surface. Elle serait également extrêmement importante pour évaluer, en plus grande connaissance de cause, les débits d'infiltration qui peuvent se produire lors de l'excavation des tunnels et cela en fonction de tous les paramètres mis en évidence ci-dessus.

## BIBLIOGRAPHIE

- Pougatsch H., *Le barrage de Zeuzier - Rétrospective d'un événement particulier*, Wasser, Energie, Luft, 82. Jahrgang, 1990, Heft 9, pp. 195-208
- Biedermann R., Gicot O., Egger K., Schneider T.R., *Das Verhalten der Staumauer Zeuzier*, Wasser, Energie, Luft, Sonderdruck aus Heft 7/8, 1980, 72. Jahrgang
- Lombardi G., *The F.E.S.-model and foundations for concrete dams*, Victor de Mello Volume, Editora Edgar Blücher Ltda, São Paulo, Brasil, 1989, pp. 270-283
- Lombardi G., *La Roca y el Macizo Rocosó - Leyes constitutivas*, Academia Nacional de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales - Buenos Aires, Sesiones Científicas Ing. Francisco García Olano, La Mecánica de Rocas en la Ingeniería Civil, diciembre 12, 1987, pp. 309-356, Edición Mayo 1989, ISSN - 0365-1185
- Lombardi G., *Les tassements exceptionnels au barrage de Zeuzier*, Publication de la Société Suisse de Mécanique des Sols et des Roches, Réunion d'automne, 1988, Berne, N. 118, pp. 39-47
- Lombardi G., *Gli eccezionali cedimenti della diga di Zeuzier (versante destro dell'alta valle del Rodano)*, Geologia tecnica, trimestrale dell'Ordine Nazionale dei Geologi, numero 1/91 - gennaio/marzo 1991, pp. 23-37
- Lombardi G., *La perméabilité et l'injectabilité des massifs rocheux fissurés*, Revue Française Géotechnique, N. 51, Avril 1990, pp. 5-29
- Lombardi G., *The F.E.S. rock mass model - Part 1*, Dam Engineering, Vol. III, Issue 1, February 1992, pp. 49-72, *The F.E.S. rock mass model - Part 2*, Dam Engineering, Vol. III, Issue 3, August 1992, pp. 201-221

Lombardi G., *Modèle structurel et hydraulique pour roches fissurées, Porous or fractured unsaturated media: transports and behaviour*, Scientific colloquium, october 5-8, 1992, Monte Verità, Centro Stefano Franscini -ETH Zürich, Ascona, Switzerland, Organized by Swiss Federal Institute of Technology of Lausanne (EPFL) / University of Neuchâtel. Part 2: Flows, Behavior and deformation of variously saturated soils and rock masses, pp. 287-308

Amberg W., Zeuzier - *Une leçon importante*, CNSGB, Symposium de Crans-Montana, Septembre 1995