

# INTERNATIONAL SOCIETY FOR SOIL MECHANICS AND GEOTECHNICAL ENGINEERING



*This paper was downloaded from the Online Library of the International Society for Soil Mechanics and Geotechnical Engineering (ISSMGE). The library is available here:*

<https://www.issmge.org/publications/online-library>

*This is an open-access database that archives thousands of papers published under the Auspices of the ISSMGE and maintained by the Innovation and Development Committee of ISSMGE.*

# Analyse et prédiction d'une zone dégradée à proximité des tunnels profonds

## Analysis and prediction of a damage zone around deep tunnels

F. LAIGLE

*Electricité de France – Centre d'Ingénierie Hydraulique*

*Savoie Technolac. 73 373 Le Bourget du Lac Cédex. France*

*François.Laigle@edf.fr*

**RESUME:** Cet article décrit la démarche de modélisation proposée par EDF-CIH pour prédire le développement d'une zone endommagée et fracturée dans un massif rocheux, lié à l'excavation d'un ouvrage souterrain. Une définition de cette zone perturbée, généralement dénommée EDZ (Excavation Damage Zone), est proposée relativement à différents critères. Le modèle rhéologique utilisé est décrit ainsi que la démarche d'interprétation des résultats de calcul qui lui est associée. Enfin, dans un dernier temps, une application au cas d'une galerie creusée dans des argilites est présentée, montrant que les simulations réalisées fournissent une prédiction tout à fait acceptable par rapport aux mesures.

**ABSTRACT :** This paper describes numerical simulations proposed by EDF-CIH for the prediction and study of a damage and fracture zone around an underground excavation. One definition of this EDZ (Excavation Damage Zone) is proposed in accordance with several criteria. The constitutive model used and the associated result interpretative approach are described. Finally, an application to a tunnel will be presented, showing the capacity of this numerical approach to provide a prediction of the shape and extension of the EDZ.

### 1 INTRODUCTION

L'excavation d'un ouvrage souterrain au sein d'un massif rocheux entraîne une réorganisation du champ des contraintes, susceptible de s'accompagner d'une dégradation des caractéristiques mécaniques de la roche au voisinage immédiat de la cavité. Cette dégradation qui sera définie plus précisément par la suite, doit rester d'extension limitée autour de l'ouvrage. Dans le cas contraire, un développement trop important de cette zone endommagée induirait des difficultés de réalisation, voir un effondrement de la structure.

Dans le cas des ouvrages courants de génie civil, le principal objectif au stade de la conception, est de concevoir le soutènement, les scénarii de creusement et de réalisation, ainsi que le revêtement, assurant aussi bien à court terme qu'à long terme, les meilleures conditions de stabilités et d'exploitation. Dans ce cas, le développement d'une zone physiquement et mécaniquement dégradée peut être considéré comme une conséquence de la conception globale. Il s'agit donc d'un critère de deuxième ordre.

Au contraire, dans le cas des ouvrages de stockage profond en milieu géologique de déchets nucléaires, la connaissance des caractéristiques physiques, mécaniques, mais surtout hydrauliques de cette zone détériorée devient essentielle pour la démon-

stration de sûreté des concepts proposés. Un des principaux risques identifié pour l'exploitation à très long terme d'un tel stockage, lorsque la barrière géologique devra être efficace, est l'écoulement et le transfert de radionucléides dans le massif. Comme le moteur de transfert de ces polluants est l'écoulement d'eau interstitielle, il devient essentiel de pouvoir définir les conditions de perméabilité du terrain et leur évolution, en fonction de l'état de la roche, c'est à dire de son degré d'endommagement et/ou de fissuration.

Cette zone située à proximité immédiate des ouvrages excavés, au sein de laquelle évoluent les propriétés rhéologiques et hydrauliques sous l'effet mécanique du creusement, est généralement appelée "Excavation Damage Zone" ou EDZ.

Que ce soit à court terme ou à long terme, la conception du site de stockage profond ne pourra se justifier sans respecter un critère relatif à l'extension de cette EDZ et à l'accroissement de perméabilité en son sein. Il est donc important de pouvoir prédire à partir de simulations numériques corroborées par des données et mesures expérimentales issues d'un laboratoire souterrain, les caractéristiques de cette zone endommagée juste après l'excavation du tunnel, mais aussi et surtout à très long terme.

Le but de cet article est de présenter quelques résultats récents issus de simulations numériques réalisées par EDF-CIH, montrant à partir de modélisations couplées hydrauliques-mécaniques le développement de l'EDZ.

La prédiction s'appuie sur l'utilisation d'un modèle rhéologique adapté pour la roche, associée à des hypothèses et à une démarche d'interprétation permettant de définir, en terme de fracturation et d'endommagement du matériau ou en terme d'accroissement de la perméabilité, l'extension de cette zone dégradée.

Dans un premier temps, une définition de l'EDZ est proposée, par rapport à un critère de dégradation physique de la roche (fissuration, fracturation,...) ou par rapport à un critère relatif à l'évolution des paramètres hydrauliques (accroissement de la perméabilité).

Le modèle de comportement utilisé sera ensuite brièvement présenté, en insistant sur les hypothèses et les spécifications initiales ayant conduit à son développement.

La démarche d'interprétation des résultats sera présentée, en décrivant les variables caractérisant l'état physique, mécanique et hydraulique de la roche.

Enfin, dans un dernier temps, l'application au cas de la galerie de reconnaissance du Mont-Terri sera décrite, montrant l'adéquation entre la prédiction numérique et les résultats expérimentaux.

## 2 DEFINITION DE L'EDZ

La notion de zone endommagée ou dégradée, intégrée sous la terminologie d'EDZ, peut se définir relativement à plusieurs types de critères :

- Un critère relatif à la perturbation subie par le champ des contraintes.
- Un critère qualitatif relatif à l'état de la roche.
- Un critère relatif à l'évolution de certains paramètres mécaniques de la roche.
- Un critère relatif à l'évolution de caractéristiques hydrauliques du massif, essentiellement la perméabilité.

### 2.1 EDZ fonction de la perturbation du champ des contraintes

Lors du creusement d'une excavation souterraine, le champ des contraintes régnant dans le massif rocheux est modifié. Cette influence peut être ressentie relativement loin de l'ouvrage, à une distance variant entre 5 et 10 rayons. Si à proximité de l'excavation la modification des contraintes est telle qu'elle peut s'accompagner d'une évolution des caractéristiques physiques et donc mécaniques de la roche, cette perturbation n'aura que peu d'effet lorsque l'on s'éloigne de l'ouvrage. Le risque ne serait pas de

modifier les caractéristiques mécaniques et/ou hydrauliques du massif, mais surtout de réactiver sous l'effet d'un faible cisaillement ou d'une décompression limitée des fractures et/ou diaclases préexistantes

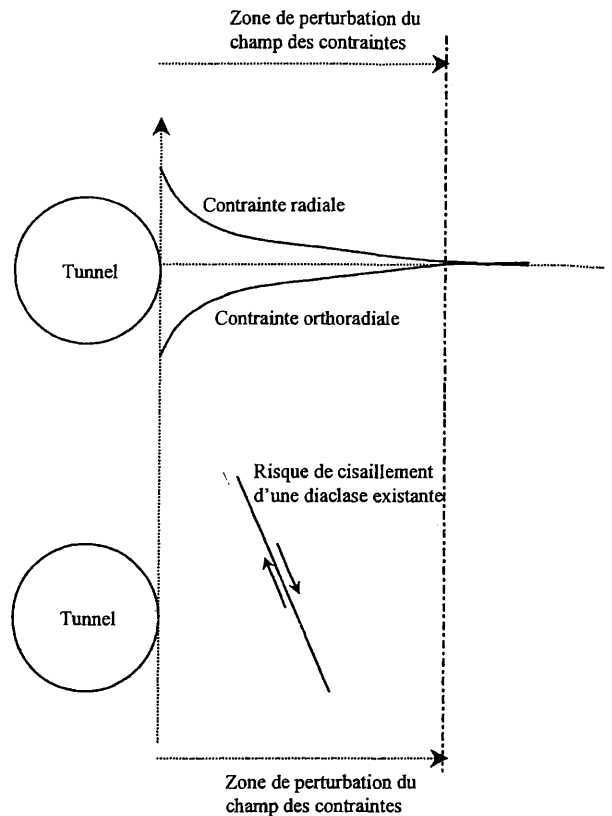


Figure 1 – Définition de l'EDZ en fonction de la perturbation des contraintes

### 2.2 EDZ fonction de l'état de la roche

Une deuxième démarche consiste à décrire l'état physique de la roche, en considérant plusieurs domaines :

- **Un état de roche « intact ».** Le terme « intact » n'est pas totalement correct, car il suppose que le matériau en place, avant creusement de l'ouvrage n'est ni dégradé, ni fissuré. Il serait préférable de parler d'état de référence, représentatif de la configuration de la masse rocheuse avant toute modification des sollicitations initiales. A ce stade, la masse rocheuse englobant l'ouvrage est supposée être sollicitée en dessous d'un seuil n'induisant ni fissuration ni fracturation supplémentaire néoformée de la roche.
- **Un état endommagé ou fissuré.** Comme précédemment, il est indispensable de se positionner par rapport à l'état initial du massif ; La roche pouvant, et étant généralement déjà fissurée dans son état « premier ». La roche fissurée peut s'imaginer comme étant parcourue de fissures non coalescentes. D'un point de vue mécanique, ceci s'accompagne d'un début d'anisotropie induite et d'une réduction de la cohésion apparente

de la roche, bien que celle-ci reste encore non-nulle.

- **Un état fracturé**, correspondant au développement d'une fracture continue au sein de la matrice. Cette fracturation induit une forte anisotropie au sein du matériau, associée à une annulation de la cohésion au niveau macroscopique, ainsi qu'à une augmentation importante de la perméabilité.

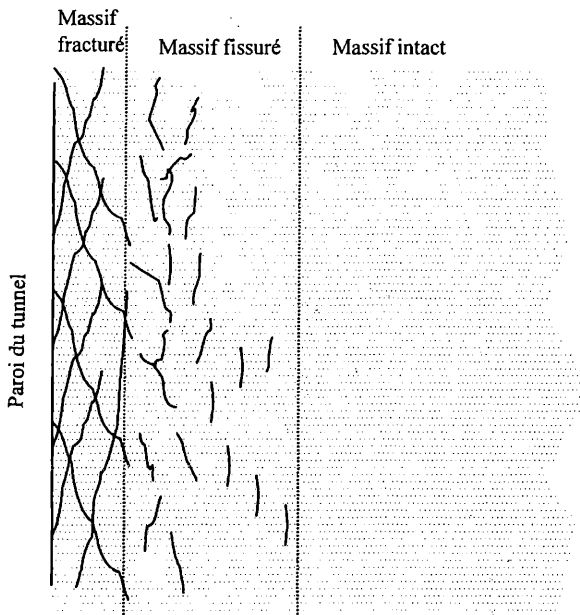


Figure 2 – Définition de l'EDZ en fonction de l'état de la roche

« L'Excavation Damage Zone » pourrait ainsi être définie comme étant le volume de roche endommagée et/ou fracturée, c'est à dire le domaine dans lequel la roche a augmenté de volume et où la perméabilité a commencé à croître.

### 2.3 EDZ fonction des propriétés mécaniques de la roche

Corrélées à la fissuration ou à la fracturation du massif, les caractéristiques mécaniques de ce dernier évoluent en fonction de la dégradation du milieu. Cette évolution correspond, de façon générale :

- **A une diminution progressive de la cohésion** à l'échelle macroscopique. Cette cohésion, caractérisant la résistance de la « colle », a tendance à diminuer au fur et à mesure du développement de l'endommagement, avant de s'annuler à partir du moment où une fracture continue est apparue.
- **A une évolution de la dilatance** qui après avoir augmenté durant la phase d'endommagement, subira une période de décroissance une fois l'apparition d'une ou de plusieurs fractures induites ; La dilatance s'annulant aux grandes déformations lorsque l'état résiduel est atteint.

« L'excavation Damage Zone » pourrait être associée au volume dans lequel la cohésion apparente a commencée à diminuer.

### 2.4 EDZ fonction des caractéristiques hydrauliques de la roche

La dernière manière de caractériser l'EDZ est de définir l'évolution de la perméabilité hydraulique du massif. Il s'agit indéniablement de la définition la plus pertinente pour différentes raisons :

- L'évolution de la perméabilité découle directement des phénomènes et mécanismes décrits précédemment, à savoir de la modification du champ des contraintes dans le massif conduisant à une fissuration ou fracturation de la roche et à une dégradation des propriétés.
- La valeur de la perméabilité, et la cinétique de percolation des radionucléides qui en découle à très long terme, sont des données essentielles de la démonstration de sûreté du concept proposé.

La quantification de l'accroissement de perméabilité a été étudiée et mesurée aussi bien sur échantillons de laboratoire que par des essais in-situ. Cette évolution, dans le cas des massifs rocheux cohérents, est pilotée par le développement de fissures et surtout de fractures, localisant les écoulements au droit de chenaux générés au sein de la matrice. L'accroissement de la perméabilité, à l'état saturé, va donc dépendre :

- de l'état de dégradation de la roche, et en particulier de la connectivité des fractures induites par la sollicitation ;
- de l'état de confinement du massif et de son évolution dans le temps ;
- du niveau de cisaillement atteint et surtout de la dilatance de la roche ;
- de la morphologie des fractures, corrélée à l'évolution de la dilatance, et fonction de la minéralogie et de la granulométrie de la matrice rocheuse.

Dans le cas des roches argileuses, des essais de laboratoire montrent un accroissement de la perméabilité de 1 à 2 ordres de grandeur [ANDRA 1999]. L'extrapolation de ces mesures à l'échelle de l'ouvrage reste délicate et il semble préférable de s'intéresser aux mesures effectuées en parois de tunnels comme ceci a été réalisé au Mont-Terri ou à Tournemire [ALHEID et al 1999]. Dans ces cas particuliers, l'accroissement maximal de la perméabilité s'est avéré être de 4 à 7 ordres de grandeur.

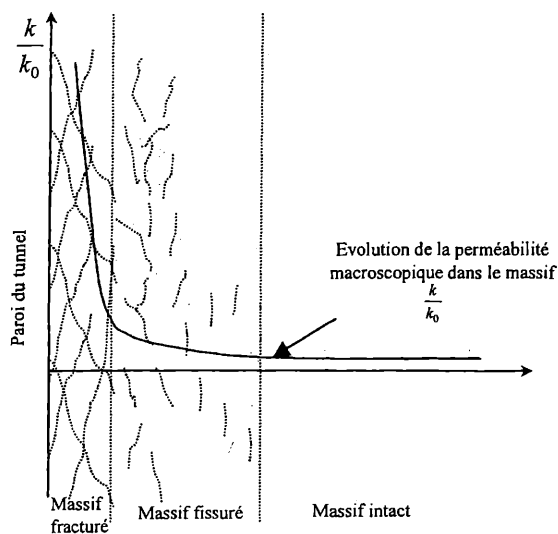


Figure 3 – Définition de l'EDZ en fonction de la perméabilité

### 3 MODELE RHEOLOGIQUE

Le modèle rhéologique utilisé [LAIGLE 2002] cherche à simuler la réponse de la roche sollicitée dans son domaine de comportement fragile. Cette loi se focalise essentiellement sur le comportement du matériau au-delà de son pic de résistance, dans le domaine des moyennes et grandes déformations.

La conception assistée par simulations numériques pour une excavation souterraine réalisée à grande profondeur, c'est à dire la définition et le dimensionnement des structures de soutènement et le scénario de réalisation, impose de pouvoir simuler le comportement du massif dans ce domaine des grandes déformations. Pour ces ouvrages profonds dont la roche est initialement soumise à de fortes contraintes, il est difficile, voir impossible, d'empêcher une plastification du massif, associée à une dégradation de ces caractéristiques mécaniques. Les convergences et leur évolution, ainsi que les efforts dans les revêtements sont alors directement fonction du comportement de la roche dans le domaine post-pic. Ce comportement est associé à l'initiation et au développement de mécanismes particuliers de déformations, d'extension ou de cisaillement [ORD et al 1991].

Le modèle rhéologique propose une description de ce comportement post-pic, en définissant des lois d'écroûissage et de dilatance spécifiques, reproduisant les principaux mécanismes pilotant le matériau dans le domaine des moyennes et grandes déformations. Ce modèle a été écrit en cherchant à respecter certaines spécifications, lui permettant d'apporter des informations utiles et représentatives au projecteur, tout en étant facile à mettre en œuvre dans le cadre des projets courants. Ces spécifications sont de 2 types :

#### Des spécifications liées à la rhéologie de la roche :

- Reproduire le comportement fragile de la roche (radoucissement post-pic).
- Traduire l'influence de la contrainte moyenne sur la résistance de la roche (critère de rupture adapté et évolution du comportement fragile vers un comportement ductile).
- Reproduire l'augmentation de volume sous sollicitation de cisaillement (dilatance des roches) ;
- Prendre en compte l'effet d'échelle propre aux problèmes de mécanique des roches (Réduction des propriétés avec le volume de la roche sollicitée) ;

#### Des spécifications liées au contexte d'étude et de réalisation des calculs:

- S'appuyer sur des notions et/ou formulations usuelles et relativement courantes pour les ingénieurs géotechniciens.
- Représentativité physique et relativement simple des mécanismes comportementaux simulés.
- Utiliser des paramètres compatibles avec les données généralement disponibles dès le stade d'une étude préliminaire.
- Identification aisée des paramètres et recherche d'une signification physique de ceux-ci.
- Rapidité et fiabilité de la modélisation numérique.
- Interprétation directe et aisée des résultats du calcul.
- Résultats concrets applicables dans le cadre d'une étude de génie civil.

Le comportement irréversible est ainsi décomposé en 4 parties schématiquement décrites dans le tableau 1 :

- Une première phase d'écroûissage positif, traduisant le développement d'un endommagement au sein de la matrice.
- Une première étape de radoucissement associée à la dégradation de la cimentation du milieu, se traduisant par un effacement progressif de la cohésion à l'échelle macroscopique.
- Une troisième phase correspondant au cisaillement d'une ou plusieurs fractures induites au sein du matériau. Le comportement est alors régi par les caractéristiques mécaniques et morphologiques de cette discontinuité induite.
- Le dernier domaine de comportement correspond à un état purement frottant, définissant la résistance résiduelle.

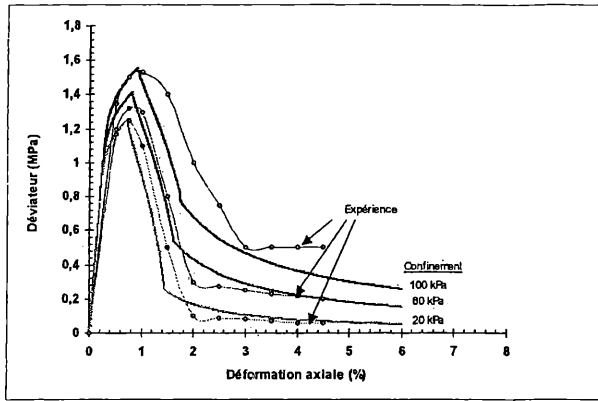


Figure 4 – Simulation du comportement triaxial d'un sable injecté

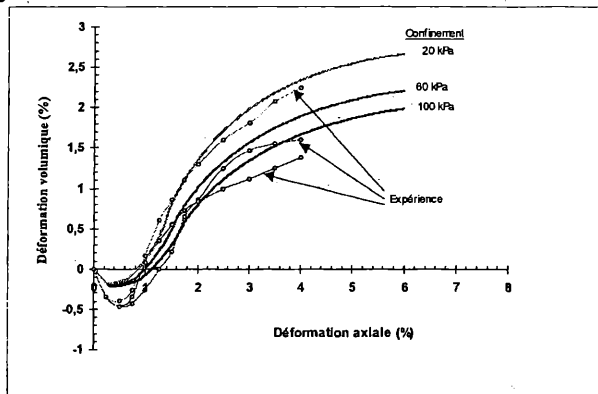


Figure 5 – Simulation du comportement triaxial d'un sable injecté

Le modèle rhéologique utilisé [LAIGLE 2002] est intégré dans le logiciel FLAC2D version 3.40, et il nécessite les paramètres d'élasticité  $E$  et  $\nu$  ainsi que ceux décrivant le critère de résistance de pic (Expression de Hoek et Brown) et le critère résistance résiduelle.

- Critère de pic :  $\sigma_c$ ,  $m_{pic}$  et  $a_{pic}$ .

$$\sigma_{max} = \sigma_{min} + \sigma_c \left[ m_{pic} \frac{\sigma_{min}}{\sigma_c} + 1 \right]^{a_{pic}} \quad (1)$$

- Critère de résistance résiduelle :

$$\sigma_{max} = (1 + m_{res}) \sigma_{min} \quad (2)$$

$$\text{avec } m_{res} = \tan^2 \left( \frac{\pi}{4} + \frac{\phi_{res}}{2} \right) - 1 \quad (3)$$

### 3.1 Démarche d'interprétation

Associé à l'élaboration du modèle de comportement, une démarche d'interprétation est proposée, permettant d'identifier et de quantifier l'évolution d'une

EDZ, relativement aux différents critères proposés précédemment.

#### 3.1.1 Critère sur l'état de la roche

La démarche d'élaboration du modèle rhéologique CIH permet d'associer à chaque phase du comportement un mécanisme de dégradation et de fracturation de la roche. En fonction de la valeur de l'écroutissage, différents états de la roche peuvent schématiquement être associés, tels que présentés dans le tableau 1.

Cette description qualitative de l'état de la roche permet de visualisé simplement l'étendue de la zone fracturée et endommagée autour d'un tunnel (figure 6)

Domaine	Etat de la roche		Domaine de déformation
0	Roche intacte		
1	Roche endommagée pré-pic		
2	Roche endommagée post-pic		
3	Roche fracturée		
4	Roche à l'état résiduel ultime		

Tableau 1: Description de l'état de la roche en fonction du niveau d'écroutissage

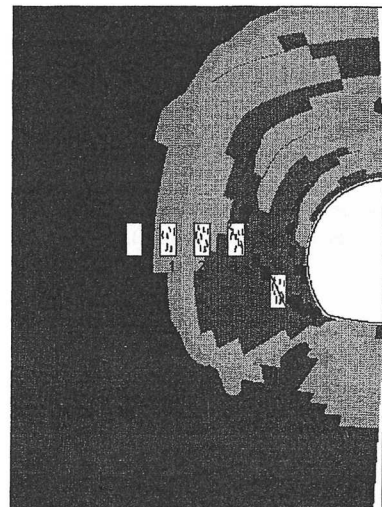


Figure 6 – Développement de la fissuration et de la fracturation autour d'un tunnel

### 3.1.2 Critère sur la perméabilité

Dans le cadre de l'analyse et de la conception des unités de stockage de déchets nucléaires, la démonstration de sûreté implique de quantifier l'évolution de la perméabilité macroscopique du milieu. Cette évolution sera liée à l'historique du creusement et aux conditions d'exploitation des ouvrages de stockage. Une phase essentielle consiste donc à analyser l'effet de l'excavation sur la génération d'une zone endommagée et à déterminer l'accroissement de la perméabilité dans ce domaine. Afin d'interpréter les résultats des simulations sur la base de ce critère d'augmentation de la perméabilité, une relation reliant la déformation volumique plastique à cette augmentation est proposée :

$$\frac{k}{k_0} = \xi \left[ 1 + \varepsilon_v^p \right]^3 \quad (4)$$

$k$  est la perméabilité actuelle,  $k_0$  est la perméabilité initiale du terrain,  $\varepsilon_v^p$  est la déformation volumique plastique induite par la sollicitation, et  $\xi$  est un paramètre d'ajustement du modèle.

Cette formulation se justifie par une corrélation directe entre la perméabilité de la roche et les déformations volumiques de dilatance. La figure 7 montre un calage réalisé dans le domaine de comportement préalable au pic de résistance, pour le granite du lac de Bonnet. Les données expérimentales sont issues des essais de Souley et al [Souley et al 1999].

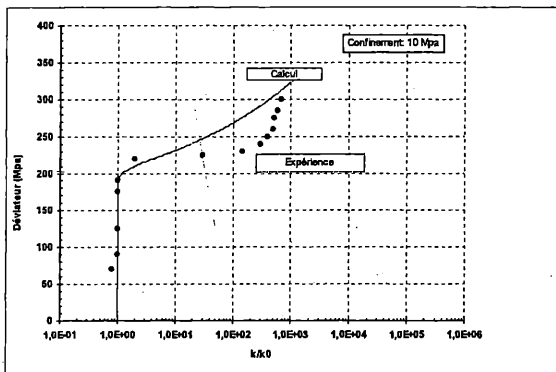


Figure 7 – Evolution de la perméabilité en fonction du déviateur des contraintes (Lac de Bonnet Granite).

## 4 APPLICATION

Dans un but de justification de la démarche globale d'étude et de modélisation, la simulation du creusement de la galerie de reconnaissance du Laboratoire du Mont-Terri a été réalisée. Cette galerie, creusée en 1989 préalablement à l'exécution d'un tunnel autoroutier, est actuellement partie intégrante du laboratoire souterrain de la NAGRA. En 1996,

des niches d'étude ont été réalisées afin d'effectuer divers essais in-situ, permettant de caractériser l'évolution de paramètres physiques au voisinage immédiat de la galerie. Certaines de ces mesures ont ainsi permis de visualiser l'extension de la fissuration et de la fracturation, ainsi que de fournir une estimation de l'accroissement de perméabilité. Il a ainsi été observé par la méthode MMPS [Système Mini Obturateur Modulaire] un accroissement de perméabilité d'un facteur  $10^6$  dans les 50 premiers centimètres, et de 10 à 50 jusqu'à 3 m de la paroi.

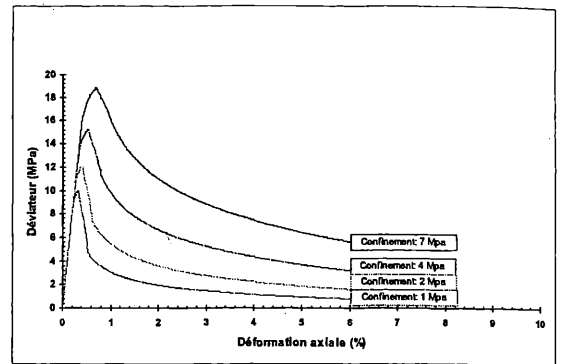


Figure 8 – Simulation du comportement triaxial de l'argilite du Mont-Terri.

La valeur du paramètre  $\xi$  intervenant dans la relation (4) est prise égale à  $2.10^{-12}$ . Cette valeur est issue d'un calage réalisé antérieurement lors d'une étude sur le granite du Lac de Bonnet. Bien que les matériaux soit géologiquement de nature différente, il n'a pas été nécessaire d'ajuster ce paramètre pour obtenir une simulation représentative.

Les paramètres mécaniques retenus pour simuler le comportement de l'argilite du Mont-Terri (figure 8) sont présentés dans le tableau 2.

Module E	4 GPa
Coefficient de Poisson	0.20
Résistance en compression simple $\sigma_c$	7 MPa
$m_{pic}$	9.0
$a_{pic}$	0.43
$m_{res}$	0.61

Tableau 2: Paramètres retenus pour l'argilite du Mont-Terri

La figure 9 montre l'état du massif en fin d'excavation. Compte tenu de l'état des contraintes régnant dans le massif, on constate le développement d'une zone fracturée sur les pénétrants de la galerie. Il est à noter que cette zone fracturée, au sein de laquelle se développent des mécanismes de cisaillement, n'est pas obligatoirement située en paroi, mais peut se localiser plus profondément dans le massif.

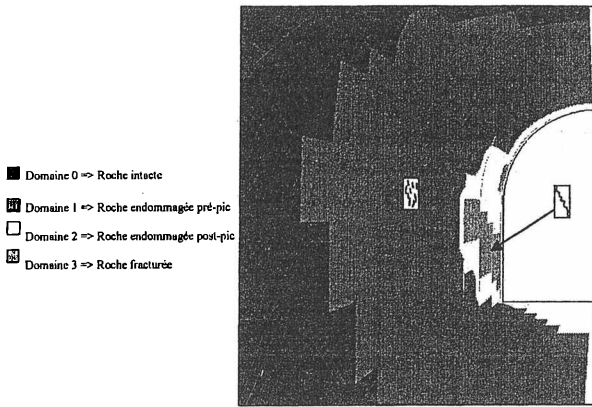


Figure 9 – Développement de la fissuration et de la fracturation autour de la galerie

Sur la vue suivante, une superposition des résultats du calcul et l'observation réalisée du massif est présentée. On retrouve une bonne similitude entre la prédiction de l'état physique du massif (zone fissurée et zone endommagée) et ce qui a été effectivement constaté derrière le soutènement de la galerie.

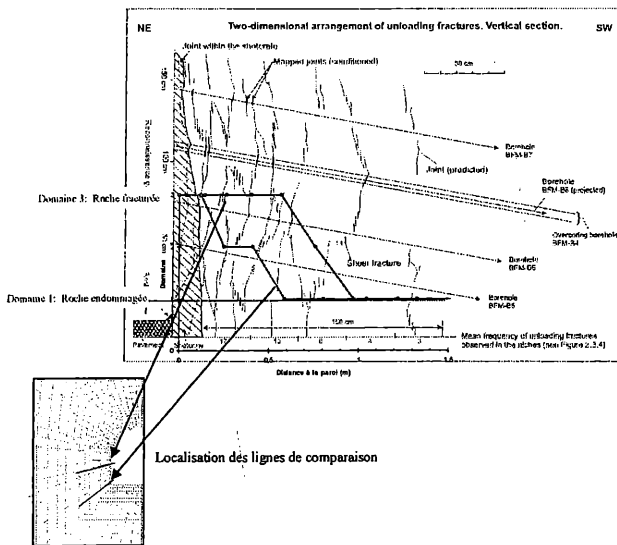


Figure 10 – Comparaison des résultats de calcul et des observations de la fissuration et/ou fracturation autour de la galerie.

Le graphique suivant présente la prédiction des évolutions de la perméabilité dans le massif. La perméabilité du massif « intact » est supposée isotrope, avec une valeur initiale de  $2.10^{-13}$  m/s.

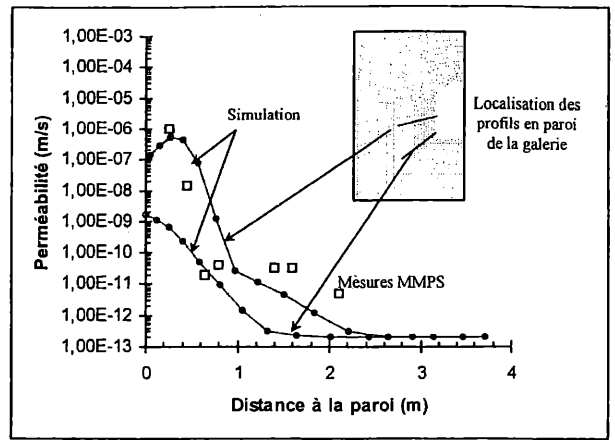


Figure 11 - Evolution des perméabilités dans le massif

## 5 CONCLUSIONS

La prédiction de l'extension de la zone perturbée autour d'un tunnel et les conséquences en termes de dégradation des propriétés mécaniques et d'accroissement de la perméabilité macroscopique est essentielle pour la démonstration de sûreté d'un stockage profond de déchets radioactifs. Dans cet article est présentée une démarche de modélisation et d'interprétation, justifiée par le calcul d'un ouvrage existant, permettant de prédire avec suffisamment de représentativité l'effet de l'excavation d'un tunnel sur les caractéristiques physique du massif.

## REFERENCES

- H.J. ALHEID & M; KNECHT & J.Y. BOISSON & F. HOMMAND-ETIENNE & S. PEPA. 1999. Comparaison de mesures hydrauliques et sismiques in situ au sein de la zone endommagée par l'excavation de galeries souterraines. Proc. 9eme Congrès International de Mécanique des Roches. Paris.
- ANDRA. 1999. Etude pour le stockage des déchets radioactifs HAVL. Bilan des études et travaux de l'exercice 1999.
- F. LAIGLE. 2002. Thèse de Doctorat. Proposition d'une modélisation rhéologique des roches adaptée à la conception des ouvrages souterrains. Thèse à paraître. Ecole Centrale de Lyon.
- A. ORD and I. VARDOULAKIS and R. KAJEWSKI. 1991. Shear Band Formation in Gosford Sandstone. Int. J. Rock Mech. Sci. & Geomech. Abstr. Vol. 28, N°5, pp 397-409
- M. SOULEY and F. HOMMAND and D. HOXHA and M. CHIBOUT. 1999. Damage around a keyed URL excavation: Change in permeability induced by microcracks growth. Flac and Numerical Modelling in Geomechanics. Detournay & Hart (eds). Balkema. pp 205-213



