

# Phénomène couplé thermo-hydro-mécanique des roches fracturées : Récents développements des méthodes de modélisation et tests de validation

Alain Thoraval, Hafid Baroudi, Jack-Pierre Piguet, E. Vuillod, Ghassan Abdallah, A. Hosni, Jiali Lin

## ► To cite this version:

Alain Thoraval, Hafid Baroudi, Jack-Pierre Piguet, E. Vuillod, Ghassan Abdallah, et al.. Phénomène couplé thermo-hydro-mécanique des roches fracturées : Récents développements des méthodes de modélisation et tests de validation. 8. International Congress on Rock Mechanics (ICRM 1995), Sep 1995, Tokyo, Japon. pp.703-706. ineris-00971945

**HAL Id: ineris-00971945**

**<https://hal-ineris.archives-ouvertes.fr/ineris-00971945>**

Submitted on 3 Apr 2014

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

# Phénomène couplé thermo-hydro-mécanique des roches fracturées: Récents développements des méthodes de modélisation et tests de validation

Coupled thermo-hydro-mechanical phenomena in fractured rocks:  
Recent developments in modelling methods and validation tests

Gekoppelte thermal-hydraulische Phänomene in brüchigem Felsgestein:  
Die neuesten Entwicklungen bei Modellier-Methoden und Validationsprüfungen

A.THORAVAL, H.BAROUDI, J.P.PIGUET, E.VUILLLOD, G.ABDALLAH, A.HOSNI & J.LIN, INERIS, Ecole des Mines, Nancy, France

**ABSTRACT :** Questions must be raised about the degree of complexity desirable in a predictive model of a fractured rocky medium. The first key question concerns the simplifications to be made to the geometry of a fractured network. The alternative is to treat the rocky mass as a continuum or, conversely, to take into account the geometrical irregularities at each fracture plane. The second question concerns the modelling of the coupled thermal-hydraulic-mechanical phenomena. The article presents two aspects of recent research on this topic. The third question concerns the validation of the models. A three-dimensional model of the french experimental site of Fanay-Augères has been used to show the reliability of the tool used for predicting the thermal-mechanical behaviour.

**RESUME :** On doit s'interroger sur le degré de complexité qu'il est souhaitable d'introduire dans un modèle prédictif pour un milieu rocheux fracturé. Une première question clef est celle du choix de la simplification à apporter à la géométrie d'un réseau de fractures. L'alternative est d'appréhender le massif rocheux comme un continuum ou à l'opposé de prendre en compte les irrégularités géométriques de chaque plan de fracture. La deuxième question concerne la modélisation des phénomènes couplés thermo-hydro-mécaniques. L'article rassemble deux aspects des recherches effectuées récemment sur ce sujet. La troisième question concerne la validation des modèles. Une modélisation tridimensionnelle du site expérimental français de Fanay-Augères a permis d'établir la fiabilité de l'outil utilisé pour ce qui est de la prédiction du comportement thermo-mécanique.

**ZUSAMMENFASSUNG :** Welches Maß an Komplexität sollte man in ein prediktives Modell für lockere Gebirge einführen? Die erste und wichtigste Frage ist die der vorzunehmenden Vereinfachung der Geometrie des Anlageplanes. Man hat die Wahl das Gebirge als ein zusammenhängendes Ganzes zu betrachten, oder aber die geometrischen Irregularitäten jedes einzelnen Anlageplanes zu berücksichtigen. Die zweite Frage betrifft die Modellisation der verkuppelten thermischen, hydraulischen und mechanischen Phänomene. Der Aufsatz enthält zwei Aspekte der neueren Forschungsergebnisse auf diesem Gebiet. Die dritte Frage betrifft die Validation des Modells. Ein dreidimensionales Modell der französischen Versuchsstation in Fanay-Augères hat es ermöglicht, die Sicherheit des Systems, im Hinblick auf das thermische und mechanische Verhalten des Gebirges, festzustellen.

## 1 INTRODUCTION

Le problème du stockage de déchets dans un milieu rocheux fracturé exige de plus en plus d'efforts et de rigueur de la part des modélisateurs pour mieux comprendre et prédire la réalité. Une première question est celle du choix de la simplification à apporter à la géométrie d'un réseau de fractures. La deuxième question concerne la modélisation des phénomènes couplés thermo-hydro-mécaniques. La troisième question concerne la validation des modélisations.

## 2 COMMENT APPREHENDER UN MASSIF ROCHEUX FRACTURE ?

### 2.1 Introduction

Le problème principal du modélisateur est le traitement des discontinuités. Deux aspects sont à considérer : la géométrie surfacique de chaque fracture et l'imbrication des différentes fractures.

Le premier aspect concerne la rugosité (point de vue mécanique) et la chenalisation (point de vue hydraulique) du plan de fracture. Il a été abordé par Lin (1993) qui a cherché à rendre compte de l'espace des vides de chaque plan de fracture en le discrétisant par des éléments rectangulaires d'épaisseur variable.

Le deuxième aspect intéresse les orientations, les longueurs (ou extensions), les espacements des fractures, leur connectivité, leur hiérarchisation. Pour représenter la réalité, le modélisateur choisit

soit de simuler explicitement les fractures en utilisant une approche numérique dite discrète (basée par exemple sur la méthode des Eléments Distincts), soit de les intégrer de façon implicite dans son modèle en utilisant une approche dite continue (basée par exemple sur la méthode des Eléments Finis). Ces démarches ont été utilisées par l'INERIS (Vuillod, 1995) dans le cadre d'une participation au projet DECOVALEX (DEvelopment of COupled models and their VALidation against EXperiments in nuclear waste isolation).

### 2.2 Représentation du plan de fracture

Si l'on s'intéresse uniquement aux écoulements hydrauliques dans la fracture, on peut se limiter à modéliser les chemins d'écoulements préférentiels ou réseaux de chenaux (Billaux, 1990).

On peut également chercher à s'approcher du profil de la fracture en discrétisant les vides compris entre ses épontes (Tsang, 1987). C'est cette approche qui a été retenue et développée par Lin (1993).

Un modèle géométrique a été développé en utilisant une loi log-normale pour décrire la distribution des ouvertures et des cotes du plan moyen d'une fracture. Deux coefficients de corrélation dans les directions orthogonales  $x$  et  $y$  sont également introduits pour modéliser l'anisotropie de la distribution statistique dans le plan de la fracture. L'ouverture  $b$  est supposée suivre une distribution log-normale. La figure 1 montre un exemple d'une éponté de fracture générée avec ce modèle géométrique.

Nous verrons plus loin comment ce modèle géométrique permet de calculer les variations de régime d'écoulement dans la fracture en fonction de l'état de contrainte.

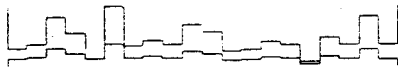
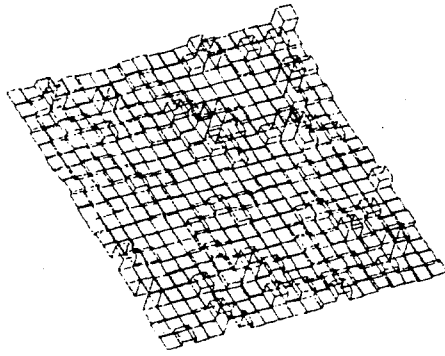


Fig. 1 : Generated fracture surface (a) and vertical cross-section of the fracture (b)

## 2.3 Représentation du réseau de fractures

### 2.3.1 Approche explicite

De nombreuses méthodes ont été développées pour simuler de façon explicite un réseau de fractures à partir d'informations limitées notamment par Massoud et Cacas cités par Billaux (1991). D'autres auteurs se sont également préoccupés de la hiérarchisation des fractures entre elles (Heliot, 1990).

Indépendamment des problèmes de caractérisation ou de simulation, une des difficultés supplémentaires est la capacité des ordinateurs à réaliser des calculs hydromécaniques en modélisant explicitement un très grand nombre de fractures. C'est pourquoi dans le cadre du projet DECOVALEX, un exercice (BMT3) a eu comme objectif de mieux connaître le comportement d'un massif rocheux sous de très fortes perturbations thermiques, mécaniques et hydrauliques, et de réfléchir à la façon de simplifier un réseau de fractures sans diminuer pour autant la validité de la modélisation.

Le BMT3 propose de réaliser une modélisation des échanges thermo-hydro-mécaniques observés à proximité d'un puits de stockage de déchets radioactifs creusé au mur d'une galerie située à 500m de profondeur. Les dimensions du modèle sont 50 x 50 m. Le réseau de fractures qui le compose est construit à partir de données provenant du site de Stripa (Suède). Il comprend 6580 discontinuités (voir fig. 6a).

La pertinence des simplifications nécessaires doit donc être discutée. Pour cela, nous avons élaboré un outil permettant d'évaluer la connectivité d'un réseau de fractures (ce paramètre influence, on le sait, énormément le champ des écoulements dans le milieu). Celui-ci calcule le nombre total des intersections ou noeuds existant dans un espace donné et détermine l'ensemble des chemins possibles joignant un noeud appelé source aux autres noeuds. Pour chacun des noeuds du système, c'est la distance minimale le séparant du noeud source qui est choisie (la distance internoeuds est pondérée de telle sorte qu'entre 2 chemins de même longueur on privilégie celui d'ouverture la plus élevée). Notons toutefois que les gradients hydrauliques et thermiques sont supposés constants en tout point du modèle.

Cette approche a permis de montrer que la connectivité du réseau de fractures n'était pas sensiblement modifiée lorsque l'on ne tenait pas compte des fractures dont l'ouverture hydraulique "a" était inférieure à une certaine valeur. Dans le cas du BMT3, le seuil était de 3 µm. En effet, en représentant sur un graphique la fréquence des noeuds situés à une certaine «distance minimale» du point source, on constate que les courbes obtenues sont similaires pour des seuils compris entre 0 et 3 µm (fig. 2).

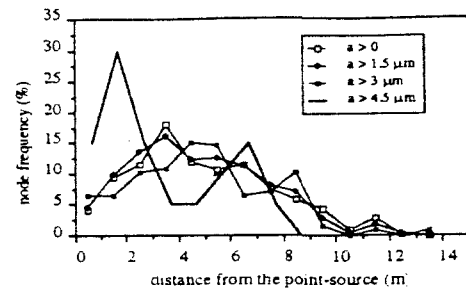


Fig.2 : Representation of a fracture network connectivity depending on the simplification threshold

### 2.3.2 Approche implicite

L'utilisation de l'approche dite continue pour rendre compte du comportement des matériaux rocheux discontinus oblige à l'élaboration de diverses techniques d'homogénéisation. Le principe consiste à chaque fois à considérer un matériau continu fictif dont les propriétés mécaniques et hydrauliques sont équivalentes à celles du milieu rocheux fracturé. Les approches classiques sont analytiques, car on cherche à établir une relation mathématique entre les propriétés équivalentes et les caractéristiques du milieu (voir les techniques développées par Oda et améliorées par Ababou (1991)).

Nous avons choisi une autre voie basée sur des simulations numériques qui ont consisté à déterminer le tenseur de perméabilité [K] relatif au modèle précédent (BMT3). Pour ce faire, nous avons choisi des «épreuves» d'une certaine taille (5 x 5 m par exemple) dans le réseau de référence de dimension 50 x 50 m.

On a utilisé le logiciel UDEC pour calculer les débits équivalents Q à travers l'éprouvette soumise à des conditions de pressions sur ses faces. On suppose que ce débit est lié à un gradient hydraulique I (imposé par les conditions de pression et constant sur l'éprouvette) par une relation tensorielle d'ordre 2. Il s'agit de résoudre le système:

$$\begin{pmatrix} Q_x \\ Q_y \end{pmatrix} = - \begin{bmatrix} K_{xx} & K_{yx} \\ K_{xy} & K_{yy} \end{bmatrix} \begin{pmatrix} I_x \\ I_y \end{pmatrix}$$

Deux chargements différents sont nécessaires pour déterminer les 4 termes du tenseur caractérisant le milieu équivalent.

On voit sur la figure 3 comment les termes du tenseur de perméabilité varient lorsque l'on augmente la taille d'une «épreuve» centrée sur l'origine. Des calculs supplémentaires permettront de vérifier si les courbes d'évolution se stabilisent pour des «épreuves» de taille supérieure à 12 x 12 m. Cette taille limite définirait un VER (volume élémentaire représentatif) pour lequel il est possible d'ajuster de manière satisfaisante la relation flux-gradient de charge à l'aide d'un tenseur symétrique d'ordre 2.

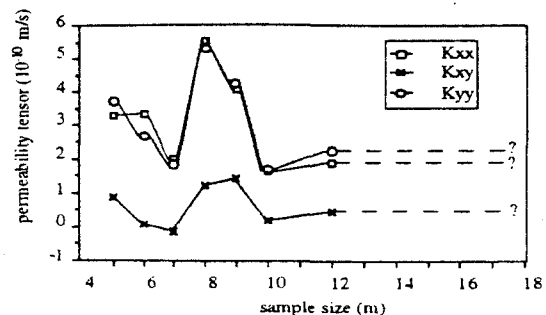


Fig. 3 : Evolution of the permeability tensor with the "sample" size

Le même principe a été utilisé pour calculer les termes du tenseur d'élasticité  $T_{ijkl}$  (3 types de chargements ont été définis) et les

termes du tenseur ainsi que le module de Biot  $B_{ij}$  en imposant sur les faces des conditions de déplacements nuls et successivement des pressions  $P_1$  et  $P_2$ .

### 3 IMPORTANCE DES PHENOMENES COUPLES

#### 3.1 Introduction

La compréhension des phénomènes couplés est devenue, aujourd'hui, une des préoccupations centrales de la communauté des mécaniciens des roches. Les phénomènes apparaissant sont de quatre ordres : thermique (T), mécanique (M), hydraulique (H), chimique (C).

Deux phénomènes sont dits couplés lorsque leur occurrence n'est pas dissociable, ainsi, par exemple, le couplage thermo-mécanique (dilatation de roche avec la température) ou encore hydro-chimique (modification de l'écoulement liée à l'altération chimique des épontes des fractures).

#### 3.2 Couplages à l'échelle d'une fracture

##### 3.2.1 Influence de l'état de contrainte sur les écoulements dans une fracture « rugueuse »

Un code a été développé (Lin,93) pour permettre de prendre en compte le régime d'écoulement dans une fracture en fonction de la contrainte normale s'exerçant sur ses épontes (couplage hydro-mécanique).

La géométrie du vide interfractural est générée en utilisant le modèle géométrique présenté plus avant. Des pressions ou des conditions d'écoulement sont appliquées aux limites du modèle. Le calcul hydraulique se fait par la discrétisation des vides (le domaine d'écoulement est discrétisé en petit éléments carrés ayant une ouverture donnée, la loi cubique étant appliquée dans chaque élément). On applique la contrainte normale par incrément. On calcule à chaque fois les convergences des éléments par la méthode des éléments frontières élastiques, puis les nouvelles ouvertures des éléments. L'écoulement dans la nouvelle géométrie du vide est alors recalculé. La figure 4 montre l'évolution de l'aire de contact et du débit dans la fracture en fonction de la contrainte normale exercée.

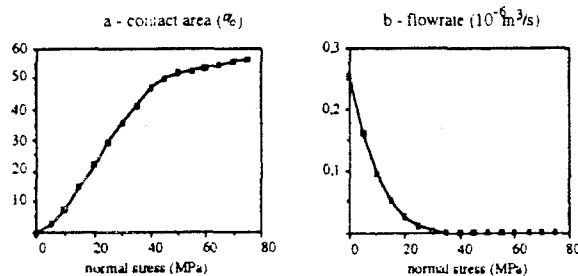


Fig. 4 : Variation curves of characteristic variables with the normal stress

##### 3.2.2 - Influence de la circulation d'un fluide dans une fracture sur le champ de température à proximité

Un autre développement (Abdallah, 95) visait à quantifier l'importance des échanges thermiques convectifs liés à la présence d'une fracture parcourue par un fluide de température différente de celle du massif. Nous avons choisi de réaliser ces développements sur le code UDEC dont la structure permettait d'accueillir facilement les modifications requises.

Nous avons testé notre modèle dans le cas de l'écoulement d'un fluide froid entre deux blocs (voir fig. 5). Dans le cas d'une modélisation thermo-hydraulique, les échanges thermiques calculés sont cohérents. On observe, en effet, que la convection thermique croît

avec l'ouverture hydraulique de la fracture et la vitesse du fluide, décroît avec sa viscosité.

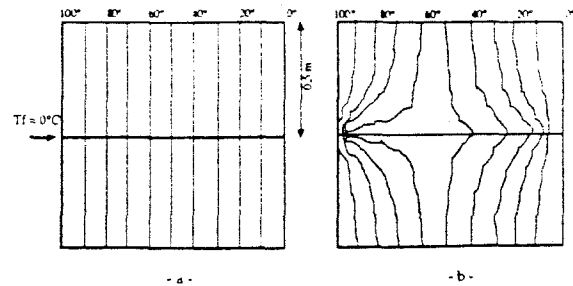


Fig. 5 : Isotherm before (a) and after (b) convection

#### 3.3 Couplage à grande échelle

Nous avons montré précédemment, en évaluant la connectivité du réseau, que lorsque les gradients thermiques et hydrauliques étaient faibles, on pouvait sans conséquence ne tenir compte que des fractures dont l'ouverture hydraulique est supérieure à un certain seuil.

La pertinence de cette simplification devient très discutable lorsque les gradients hydrauliques et thermiques deviennent importants (à proximité d'une excavation ou d'une source de chaleur). La figure 6 représente les réseaux de fractures introduits dans le modèle (DECOVALEX, BMT3).

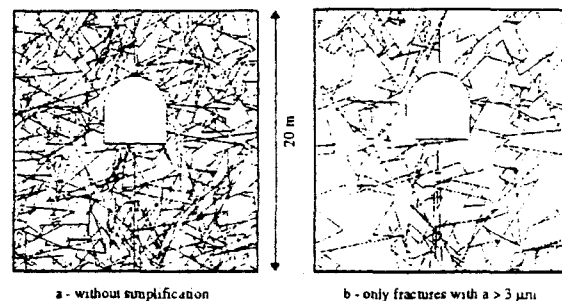


Fig. 6 : Representation of the network before and after simplification

On peut voir dans le tableau 1 que les résultats du calcul sont très sensibles à la simplification (les déplacements et les flux diminuent d'un ordre de grandeur lorsque l'on supprime la moitié des fractures les moins ouvertes). Les différences entre les flux sont encore plus marquées lorsque l'on cherche à modéliser le réseau de fractures autour du tunnel par un milieu continu équivalent puisque l'on calcule alors une valeur maximale 3 ordres de grandeur plus faible.

Tab. 1 : Some numerical results about near field hydro-mechanical computations

Model	Fractures aperture threshold (microns)	Max displacement around the tunnel (cm)	Max flux around the tunnel (m <sup>3</sup> /s)
a	0	62,69	1,2 · 10 <sup>-2</sup>
b	3	1,13	1,5 · 10 <sup>-3</sup>
c	eq. cont. approach	1,45	7,6 · 10 <sup>-6</sup>

L'idée vient alors de « coupler » les approches discrète et continue en réalisant un modèle « hybride », dans lequel seraient définies les zones suivantes : Dans la zone centrale, où le couplage hydromécanique est fort, on utiliserait l'approche discrète en s'abstenant, autant que faire se peut, de toute simplification du réseau fracturé. Dans la zone périphérique, où l'on peut considérer que les variations géométriques locales du réseau de fractures n'ont pas d'influence significative sur la valeur globale des écoulements ou encore que les perturbations d'ordre mécanique sont devenues négligeables, on

utiliserait l'approche continue. Dans la zone intermédiaire ou de transition, on pourrait se limiter à la prise en compte explicite des fractures les plus importantes hydrauliquement, le reste des fractures étant intégré par le biais d'un milieu poreux équivalent.

Une des difficultés de mise en oeuvre de cette approche hybride se situe au niveau des interfaces existant entre chacune des zones définies plus haut.

#### 4 VERIFICATION ET VALIDATION DES MODELISATIONS

Pour la plupart, un code est dit « vérifié » si pour un certain nombre de modèles, la solution numérique coïncide avec une solution analytique. Il est dit « validé » si le modèle est une représentation précise de la réalité ou si les prédictions du modèle sont en accord avec celle-ci. Il faut être conscient, toutefois, qu'une modélisation « réussie » ne donne pas au modèle une légitimité absolue à rendre compte de tous les aspects d'une réalité phénoménologique, ni même à en exprimer la vraie nature. Les modèles sont des représentations utiles qui permettent d'avancer vers d'autres modèles plus « fidèles » à la réalité.

Une expérience a été conduite dans la mine d'uranium de Fanay-Augères, exploitée par la COGEMA dans le Limousin, en France. Le projet a consisté à réaliser un essai de chauffage d'un massif de granite fracturé dans le but de caractériser les modifications du milieu sur les plans thermique, hydraulique et mécanique lors de ce chauffage et postérieurement.

Le site est accessible par une descenderie préexistante et l'ensemble est constitué d'une chambre expérimentale, d'une galerie d'accès et d'une galerie latérale (fig. 7). L'expérience s'est déroulée pendant

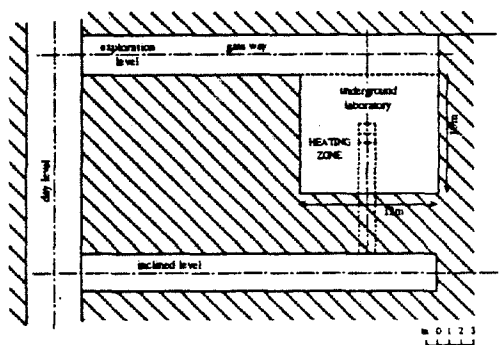


Fig. 7 : Plan and vertical sections of the experimental device of Fanay Augères

environ 120 jours, une source de chaleur placée à 3 mètres sous le radier débitant une puissance de 1000 W pendant les 51 premiers jours. La répartition de la température à la surface du radier et dans le volume rocheux autour de la source de chaleur, les déformations en surface, en profondeur et en particulier au niveau des fractures, ont été contrôlées.

La simulation du comportement thermo-mécanique du granite de Fanay-Augères à l'aide du code de calcul tridimensionnel 3DEC, a permis de s'affranchir de l'hypothèse de la continuité du milieu et d'introduire explicitement les fractures majeures relevées sur le site expérimental. Les résultats sont globalement en bon accord avec les mesures (fig. 8).

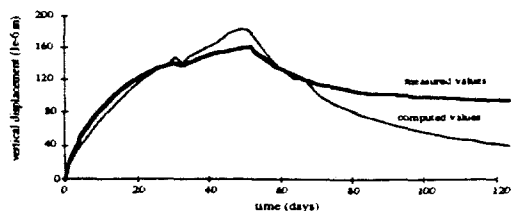


Fig. 8 : Evolution in time of the vertical displacement close to the heating zone

L'origine des différences semble liée en grande partie à la technique de résolution thermique utilisée (calcul du champ de température à partir de la solution analytique  $T = f(x, y, z, t)$ ) qui ne semble pas estimer correctement les températures dans le granite au voisinage immédiat de la source et ne permet pas également d'intégrer des conditions aux limites permettant de tenir compte du phénomène de convection à l'interface roche/galerie.

#### 5 CONCLUSION

La simplification de la réalité est nécessaire pour que l'on puisse la modéliser. Ainsi, on discrétise un plan de fracture, on « élague » un réseau de fractures ou on le transforme en un milieu poreux équivalent. D'un autre point de vue, on néglige un aspect dans son comportement (tel ou tel phénomène couplé).

Ces simplifications ne doivent pas dépasser certaines limites. On a pu en effet se rendre compte de l'importance de la convection thermique à l'échelle d'une fracture. On a vu également les conséquences d'une modification de la géométrie à proximité de zones sensibles (excavation, source de chaleur). Signalons également que l'approximation bidimensionnelle ne rend pas avec réalisme l'orientation et l'agencement des fractures dans l'espace.

Il est important pour le modélisateur d'établir la fiabilité de son outil de calcul mais aussi la pertinence de sa méthodologie. La validation présentée à partir de l'expérience de Fanay-Augères va dans ce sens. Elle a permis d'établir la capacité d'un code tridimensionnel à modéliser le comportement thermo-mécanique d'un milieu fracturé.

#### 6 REMERCIEMENTS

La participation de l'INERIS au projet DECOVALEX a été cofinancée par l'ANDRA et la CCE. L'IPSN a fourni données et assistance relativement à l'expérience de Fanay-Augères.

#### 7 REFERENCES

- Ababou, R. 1991. Approaches to large-scale unsaturated flow in heterogeneous stratified, and fracture geologic media. Report NUREG/CR-5743, U.S.N.R.C., Washington D.C.
- Abdallah G. & Co., 1995. Thermal convection of flow in fractured media, special edition of the IJRM on DECOVALEX.
- Billaux, D. 1990. Hydrogéologie des milieux fracturés : géométrie, connectivité et comportement hydraulique. Thèse à l'ENSMP, février 1990.
- Hart, R., Cundall P. A., Lemos J., 1988. Formulation of a 3D Distinct Element Model, I.J.R.M., Min. Sci. & Geomech., Abstr vol 25 n°3, pp. 117-125.
- Héliot, D. 1988. Conception et modélisation d'un outil intégré de modélisation des massifs rocheux fracturés en blocs. Thèse de doctorat, INPL et laboratoire de mécanique des terrains, Nancy.
- Lin, J. 1993. Hydromechanical modelling of rock fracture under normal stress. Eurock'93, Ribeiro e Sousa & Grossmann (eds), Balkema, Rotterdam.
- Rejeb A., Vouille G., Gros J.C., 1994. Expérience thermo-hydro-mécanique de Fanay-Tenelles ; interprétation des résultats expérimentaux et validation des modèles thermomécaniques. Rapport final CCE "Sciences et techniques nucléaires", EUR 14962 FR.
- Thoraval, A. & Hosni, A., 1995. Fanay-Augères THM test, TC2 of DECOVALEX phase III, Final Report CCE n° FI 2W -CT91-113.
- Tsang, Y.W., 1990. Hydrological characterization of variable-aperture fractures, Rock Joint, Balkema, pp 423-431.
- Vuillot, E. 1995. Modélisation du comportement THM des milieux fracturés. Thèse de doctorat, INPL, Nancy.