



Modélisation hydromécanique d'une fracture rocheuse sous contrainte normale

J.F. Lin, Hafid Baroudi, Jack-Pierre Piguet

► To cite this version:

J.F. Lin, Hafid Baroudi, Jack-Pierre Piguet. Modélisation hydromécanique d'une fracture rocheuse sous contrainte normale. International symposium of the international society for rock mechanics (EUROCK 1993), Jun 1993, Lisbonne, Portugal. pp.151-157. ineris-00971865

HAL Id: ineris-00971865

<https://ineris.hal.science/ineris-00971865>

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.

Hydromechanical modelling of rock fracture under normal stress

Modélisation hydromécanique d'une fracture rocheuse sous contrainte normale

Hydromechanische Modellierung eines Gesteinsbruchs unter Normalspannung

Lin J.F., H. Baroudi & J.P. Piguet

INERIS – Laboratoire de Mécanique des Terrains, École des Mines, Nancy, France

ABSTRACT: A hydromechanical coupling model of a rock fracture under normal stress was developed. The geometry of fracture void is generated using a stochastic model. The flow calculation is done by the void discretization (FEM). The boundary elements method (BEM) is used to compute fracture normal displacement. This paper presents the methods used and some simulation results.

RESUME: Un modèle de couplage hydromécanique d'une fracture sous contrainte normale a été développé. La géométrie du vide de la fracture est générée en utilisant un modèle stochastique. Le calcul hydraulique se fait par la discrétisation du vide (FEM). La méthode des éléments frontières (BEM) est utilisée pour calculer le déplacement normal de la fracture sous contrainte normale. L'article présente la démarche utilisée ainsi que les résultats obtenus pour différentes simulations.

ZUSAMMENFASSUNG: Ein hydromechanisches Momentenmodell eines Bruches unter Normalspannung ist entwickelt worden. Die Geometrie des Hohlraumes des Bruches wird mit Hilfe eines stochastischen Modells ermittelt. Die hydraulische Berechnung erfolgt durch Diskretisierung des Hohlraumes (FEM). Die Methode des Grenzelemente wird angewendet, um die Normalversetzung des Bruches unter Normalspannung zu berechnen. Der vorliegende Artikel stellt die angewendete Vorgehensweise und ebenso die ermittelten Resultate verschiedener Simulationen dar.

1. INTRODUCTION

La connaissance du comportement hydromécanique des massifs rocheux fracturés est primordiale dans l'étude des ouvrages souterrains destinés aux stockages de déchets. Quand le fluide traverse une fracture, l'écoulement s'effectue dans les chenaux préférentiels. L'écoulement dépend de la fraction des surfaces en contact, de la distribution des surfaces en contact, ainsi que des ouvertures de la fracture. Tous les paramètres sont fonction de la contrainte appliquée sur la fracture.

Brown (1987) propose un modèle numérique en utilisant la méthode des différences finies pour simuler l'écoulement dans une fracture de géométrie fractale. Tsang et al. (1987) propos, pour le même but, un autre type de modèle numérique qui utilise la méthode des éléments finis pour la discrétisation du vide. Dans le modèle de Tsang et al., la fracture est supposée de forme carrée et composée de deux surfaces symétriques,

avec une ouverture variable. Ce modèle rend compte l'existence du phénomène de la chenalisation de l'écoulement dans la fracture. Sur la base de ce modèle, nous avons développé un modèle numérique plus général appliqué au cas où la fracture est de forme rectangulaire et où les épontes sont symétriques ou non symétriques. Un paramètre désignant le plan moyen de la fracture est introduit dans notre modèle pour simuler l'imbrication de la fracture.

Chen (1990) et Bruel (1990) proposent un modèle numérique similaire en utilisant la méthode des éléments frontières (Crouch et al., 1981) pour calculer le déplacement normal d'une fracture sous contrainte normale. Ce modèle s'avère pratique et efficace. Il est basé sur la théorie de Rongved et al. (1957).

En ce qui concerne le couplage hydromécanique, Bruel (1990) associe son modèle mécanique au modèle hydraulique proposé par Cacas (1989) basé sur la conception d'une conductivité hydraulique intégrée

pour étudier le comportement hydromécanique d'un réseau de fractures circulaires. Chen (1990) associe son modèle mécanique à un modèle hydraulique basé sur la méthode des éléments frontières proposée par Brebbia (1978) pour étudier l'effet de certains paramètres statistiques de la distribution de l'ouverture sur les propriétés hydromécaniques de fractures carrées. Son modèle de couplage nécessite deux maillages différents pour le calcul hydraulique et le calcul mécanique respectivement. En plus, dans son modèle hydraulique, Chen (1990) suppose que l'ouverture hydraulique est constante partout dans la fracture. Cette simplification semble très discutable. Ce modèle hydraulique calcule seulement la perméabilité moyenne de la fracture et ne tient pas compte de la chenalisation de l'écoulement qui a été observée dans de nombreuses simulations numériques. Le modèle que nous proposons associe le modèle hydraulique de Tsang et al. modifié, et le modèle mécanique de Chen et de Bruel étendu aux fractures rectangulaires pour étudier le comportement hydromécanique d'une fracture sous contrainte normale. Ce modèle nécessite un maillage unique pour le calcul hydraulique et le calcul mécanique.

Dans la section suivante, nous présentons notre modèle géométrique qui génère la morphologie d'une fracture pour les calculs hydrauliques et mécaniques. La section 3 décrit le modèle hydraulique modifié. La section 4 décrit le modèle mécanique utilisé. Dans la section 5, nous proposons un algorithme de couplage. La section 6 résume quelques résultats de calculs effectués et les conclusions.

2. MODELE GEOMETRIQUE

Il est évident que la géométrie d'une fracture rocheuse ne peut pas être décrite par un unique paramètre - l'ouverture moyenne. Une fracture est composée de deux surfaces ayant des aspérités très irrégulières. Ces deux surfaces ne sont pas symétriques dans la plupart des cas. Plusieurs mesures (Neuzil, 1981; Bourke et al., 1985; Gentier, 1986; Gale, 1987; Hakami, 1988) ont montré que la variation de l'ouverture de la fracture peut être décrite par une distribution statistique (gamma, log-normale, etc.). Nous avons choisi la distribution log-normale pour les ouvertures variables dans le plan de la fracture. Le modèle que l'on a utilisé (Lin, 1991) est similaire à celui proposé par Smith et al. (1979) pour la génération des valeurs de conductivités spatialement autocorrélées. C'est un modèle stochastique "des voisins les plus proches" (*a nearest-neighbor stochastic process model*). Dans nos études récentes, un paramètre désignant le plan moyen de la

fracture est introduit pour simuler l'imbrication de la fracture. Le modèle géométrique génère un champ des valeurs d'ouvertures autocorrélées dans les trois directions orthogonales de l'espace.

Dans le modèle géométrique comme dans les modèles hydraulique et mécanique, la fracture est supposée de forme rectangulaire et son plan moyen est discrétisé par des éléments rectangulaires. Chaque élément possède une valeur d'ouverture différente.

Supposons que l'ouverture b est une variable qui suit une distribution log-normale. Si nous définissons $Y = \log b$, alors la variable Y est normalement distribuée. La relation bidimensionnelle autorégressive des voisins de premier ordre les plus proches peut s'écrire :

$$Y_{ij} = \alpha_x(Y_{i-1,j} + Y_{i+1,j}) + \alpha_y(Y_{i,j-1} + Y_{i,j+1}) + \epsilon_{ij} \quad (2.1)$$

où Y_{ij} : variable aléatoire qui satisfait la relation des voisins les plus proches ;
 $Y_{i-1,j}, Y_{i+1,j}, Y_{i,j-1}, Y_{i,j+1}$: voisins de premier ordre les plus proches de Y_{ij} ;
 ϵ_{ij} : variable aléatoire normale (0,1);
 α_x, α_y : paramètres d'autorégression exprimant le degré de dépendance spatiale de Y_{ij} sur deux valeurs voisines dans la direction x et dans la direction y .

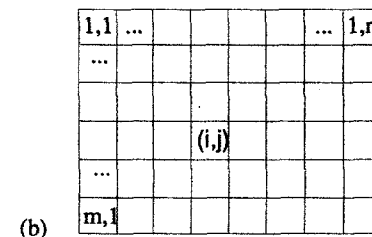
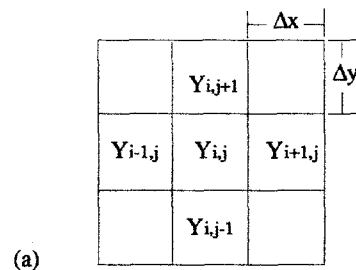


Figure 2.1 Modèle des voisins les plus proches
 Figure 2.1 Nearest-neighbor stochastic model

La figure 2.1a illustre schématiquement cette équation (2.1) pour l'élément (i,j) . Pour l'ensemble des éléments (Figure 2.1b), nous obtenons un système d'équations linéaires dont la matrice des coefficients est creuse. Un algorithme spécial destiné à réduire la mémoire de stockage et le temps de calcul est utilisé pour résoudre ce système d'équations.

La figure 2.2 montre un exemple d'une éponte de fracture générée avec notre modèle géométrique, (b ouverture moyenne et σ son écart type).

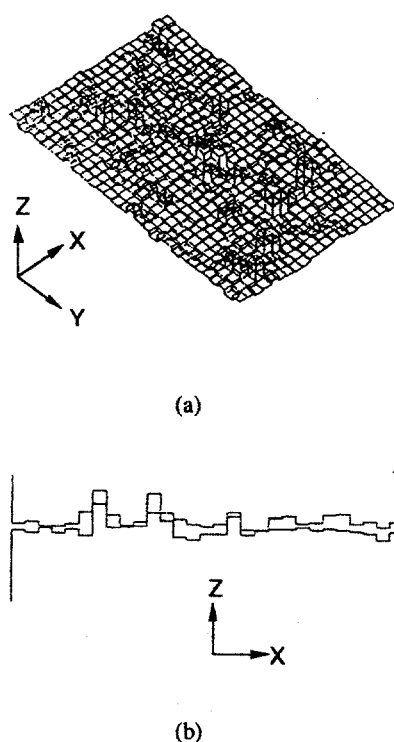


Figure 2.2 (a) Une éponte inférieure d'une fracture générée ($b=10 \mu m$, $\sigma=10 \mu m$)

(b) Une coupe verticale de la fracture

Figure 2.2 (a) example of a generated fracture surface ($b=10 \mu m$, $\sigma=10 \mu m$)

(b) a vertical cross-section of the fracture

3. MODELE HYDRAULIQUE

Basé sur une analogie bidimensionnelle de la résistance électrique, Tsang et al.(1987) calcule l'écoulement dans une fracture carrée par la

discretisation du vide. Le domaine d'écoulement est discrétisé en petits éléments carrés ayant une ouverture donnée. L'écoulement étant supposé laminaire, la loi cubique (Snow, 1969) est appliquée dans chaque élément. Les épontes de la fracture et le massif rocheux sont supposés imperméables, l'écoulement se fait uniquement dans le plan de la fracture.

L'écoulement du fluide à travers la fracture sera calculé avec les conditions aux limites suivantes (Figure 3.1a):

- pressions constantes P_1 et P_2 appliquées sur deux limites opposées de la fracture;
- écoulement nul ($Q=0$) imposé sur les deux autres limites.

Dans ce qui suit, par commodité, les éléments seront appelés des "noeuds" (centres d'éléments).

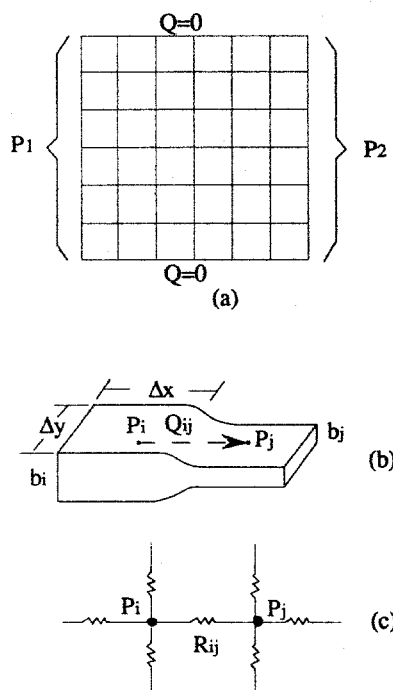


Figure 3.1 Modèle de Tsang et al.(1987) (d'après Moreno et al., 1988)

Figure 3.1 Tsang et al.'s model (1987) (after Moreno et al., 1988)

La Figure 3.1b montre un diagramme schématique pour deux noeuds adjacents avec ouvertures b_i et b_j

respectivement. Lorsque le débit volumique du noeud i au noeud j est Q_{ij} , alors

$$P_i - P_j = \frac{Q_{ij}}{\frac{b_i}{12\mu} \frac{\Delta y}{\Delta x}} + \frac{Q_{ij}}{\frac{b_j}{12\mu} \frac{\Delta y}{\Delta x}} = Q_{ij} \left[6\mu \frac{\Delta x}{\Delta y} \left(\frac{1}{b_i^3} + \frac{1}{b_j^3} \right) \right] \quad (3.1)$$

$$P_i - P_j = Q_{ij} R_{ij} \quad (3.2)$$

où

$$R_{ij} = 6\mu \frac{\Delta x}{\Delta y} \left(\frac{1}{b_i^3} + \frac{1}{b_j^3} \right) \quad (3.3)$$

est la résistance hydraulique entre noeuds i et j (Figure 3.1c).

Dans les équations précédentes, μ est la viscosité dynamique du fluide, P_i et P_j sont les pressions du fluide aux noeuds correspondants.

D'après l'équation de continuité, nous avons pour le noeud i l'équation:

$$\sum_j Q_{ij} = \sum_j \frac{P_i - P_j}{R_{ij}} = 0 \quad (3.4)$$

En dehors des noeuds sur les limites gauche et droite du domaine d'écoulement, la pression à chaque noeud est une inconnue. La résolution du système d'équations linéaires (3.4) avec des pressions (P_i) comme inconnues donne les valeurs de pressions à chaque noeud (élément), les débits volumiques entre des noeuds adjacents peuvent être alors calculés en utilisant l'équation (3.2).

Le modèle de Tsang et al. (1987) s'applique aux fractures carrées ayant deux surfaces symétriques. A partir de ce modèle, nous introduisons un paramètre désignant le plan de la fracture dans le calcul de l'écoulement à travers une fracture rectangulaire. Ce paramètre est la cote du centre de chaque élément, noté par $z(i)$. En connaissant les valeurs de $z(i)$, on définit une ouverture effective b_{eff} entre deux éléments adjacents (Figure 3.2):

$$b_{eff} = \min \left(z(i) + \frac{b(i)}{2}, z(j) + \frac{b(j)}{2} \right) - \max \left(z(i) - \frac{b(i)}{2}, z(j) - \frac{b(j)}{2} \right) \quad (3.5)$$

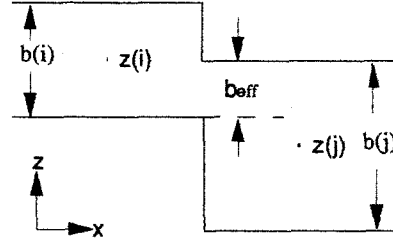


Figure 3.2 Définition de l'ouverture effective b_{eff}
Figure 3.2 Definition of effective aperture b_{eff}

On calcule la résistance hydraulique R_{ij} entre deux éléments adjacents de la façon suivante:

- si $b_{eff} \leq 0$, alors $1/R_{ij}=0$;
- si $b_{eff} > 0$, alors

$$R_{ij} = \frac{1}{2b_{eff}} \cdot \frac{\Delta x}{\Delta y} \left(\frac{1}{k_i} + \frac{1}{k_j} \right) \quad (3.6)$$

où

$$k_i = \frac{\rho g}{12\mu} \cdot b_i^2, \quad k_j = \frac{\rho g}{12\mu} \cdot b_j^2 \quad (3.7)$$

Dans les équations (3.7), k_i et k_j sont les perméabilités des éléments i et j, ρ est la masse volumique du fluide, g est la gravité et μ la viscosité dynamique du fluide.

Sous les conditions aux limites données, on peut maintenant calculer l'écoulement dans une fracture rectangulaire d'une morphologie quelconque, soit individuelle, soit dans un réseau de fractures. Un algorithme spécial est également utilisé pour résoudre le système d'équations (3.4) d'une manière plus efficace.

4. MODELE MECANIQUE

On suppose que la matrice rocheuse est homogène, isotrope élastique et d'extension infinie. Elle est plus parcourue par un assemblage complexe de fractures de dimension finie constituant autant de

limites. Crouch et al. (1981) propose une méthode dite *méthode des discontinuités de déplacement* pour étudier les effets tridimensionnels d'une excavation dans un gisement minier. Chen (1990) et Bruel (1990) reprennent cette méthode pour calculer la déformation d'une fracture rocheuse sous contrainte normale.

D'après les principes de l'élastostatique, en l'absence des forces de volume, les équations d'équilibre élastique sont les suivantes (Sokolnikoff, 1956):

$$(1 - 2\nu) \nabla^2 \vec{u}(x, y, z) + \nabla : \nabla \vec{u}(x, y, z) = 0 \quad (3.1)$$

où le plan $z=0$ est le plan de la fracture, u est le déplacement, ν est le coefficient de Poisson, et

$$\begin{aligned} \nabla^2 &= \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}, \\ \nabla : \nabla &= \frac{\partial^2}{\partial x \partial x} + \frac{\partial^2}{\partial y \partial y} + \frac{\partial^2}{\partial z \partial z} \end{aligned} \quad (3.2)$$

Le long du plan $z=0$, les conditions aux limites peuvent varier de part et d'autre :

- Sur les surfaces en contact :

$$\sigma_{zx} = \sigma_{zy} = 0, u_z = 0. \quad (3.3)$$

- Sur les surfaces non en contact :

$$\sigma_{zx} = \sigma_{zy} = 0, \sigma_{zz} = -T_{zz}. \quad (3.4)$$

Pour résoudre les équations élastiques avec la méthode des éléments frontières, on discrétise d'abord le plan $z=0$ en éléments rectangulaires. On suppose que les éléments sont suffisamment petits pour que la contrainte normale sur chaque élément puisse être considérée comme constante. Les formulations mathématiques de cette méthode sont basées sur la théorie de Rongved et al. (1957).

5. COUPLAGE HYDROMECHANIQUE

La géométrie du vide d'une fracture est générée en utilisant le modèle géométrique, ce qui représente la fracture sous contrainte normale nulle. Les pressions constantes P_1 et P_2 sont appliquées sur les limites gauche et droite du modèle. L'écoulement nul est imposé sur les deux autres limites. Le calcul hydraulique se fait par la discrétisation du vide avec le modèle hydraulique. Ensuite, on applique successivement la contrainte normale par incréments. Pour chaque incrément, on calcule les convergences des éléments par la méthode

des éléments frontières élastique avec le modèle mécanique. Par la suite, on recalcule les nouvelles ouvertures des éléments. L'écoulement dans la nouvelle géométrie du vide est alors recalculé.

On peut donc trouver une relation entre la fraction des surfaces en contact, l'ouverture hydraulique moyenne, la fermeture mécanique, le débit total et la contrainte normale.

6. RESULTATS DE CALCUL ET CONCLUSIONS

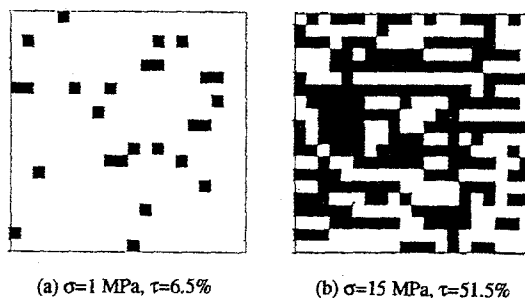
Dans cette section, nous présenterons quelques résultats d'un calcul effectué avec le code de calcul COHM3D. Dans ce calcul, on suppose que l'ouverture moyenne de la fracture et son écart-type sont de 250 μm et 200 μm respectivement. La différence des pressions exercées sur les gauche et droite est de 10 m.

On constate que l'augmentation de la contrainte normale engendre une croissance progressive de la fermeture moyenne et de l'aire en contact (Figures 6.1 et 6.3). La fermeture progressive de la fracture augmente sa résistance hydraulique, le débit total diminue (Figures 6.2 et 6.3). On note également que la courbe de l'ouverture moyenne et celle du débit n'ont pas une forme similaire, ce qui indique que la loi cubique n'est pas valide pour calculer l'écoulement dans une fracture dont la variation de l'ouverture est importante.

Les résultats de ce calcul montrent que les propriétés hydrauliques d'une fracture rocheuse dépendent essentiellement de sa morphologie dont la variation est très liée à la contrainte appliquée sur la fracture. Le code COHM3D qui permet de mettre en évidence le comportement hydromécanique d'une fracture individuelle, et constitue un élément de base pour comprendre celui d'un massif rocheux peu perméable fracturé.

Pour devenir opérationnel, ce modèle doit être validé par des expérimentations en laboratoire. La morphologie initiale de deux lèvres de la fracture doit être numérisée pour constituer une donnée de base pour le modèle. Ensuite, en cours d'essai, le suivi de paramètres globaux (déplacement mécanique, débit), permettra de procéder à la validation du modèle hydromécanique.

L'intégration de ce modèle dans un code de calcul hydromécanique d'un réseau de fractures est numériquement réalisable. Néanmoins, pour alléger les temps de calcul, il paraît nécessaire de procéder à des simplifications des modèles : par exemple calculer

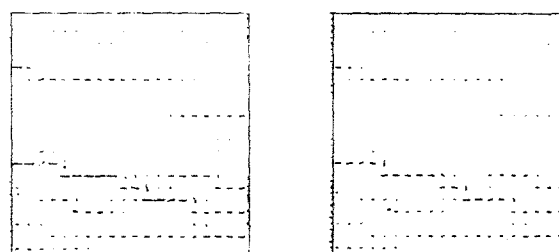


(a) $\sigma=1$ MPa, $\tau=6.5\%$

(b) $\sigma=15$ MPa, $\tau=51.5\%$

Figure 6.1 Aire de contact (τ) en fonction de la contrainte normale (σ)

Figure 6.1 Contact area (τ) as a function of normal stress (σ)



(a) $\sigma=0$ MPa, $Q=157.1 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$

(b) $\sigma=1$ MPa, $Q=122.5 \times 10^{-6} \text{ m}^3/\text{s}$

Figure 6.2 Champ de débits (Q) en fonction de la contrainte normale (σ)

Figure 6.2 Flowrate field (Q) as a function of normal stress (σ)

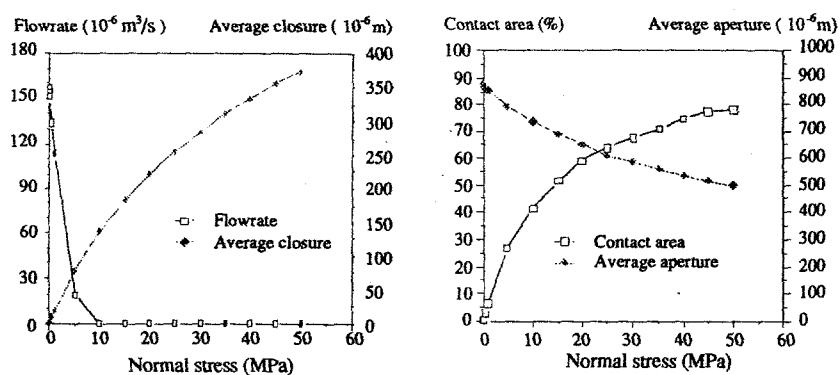


Figure 6.3 Courbes de variation des variables caractéristiques

Figure 6.3 Variation curves of characteristic variables

un tenseur de perméabilité initial et sa variation en fonction de la contrainte normale. Seuls les tenseurs seront ensuite intégrés dans le calcul du réseau.

Aussi pour un réseau de fractures, il paraît primordial de simplifier cette approche, et de rechercher des moyens pour disposer de données simples à acquérir concernant le comportement hydromécanique d'une fracture.

REFERENCE BIBLIOGRAPHIQUES

- Bourke, P.J.; Dunance, E.M.; Heath, M.J. & Hodgkinson, D.D. (1985) - Fracture hydrology relevant to radionuclide transport, AERE Rep. 11414, Atomic Energy Res. Estab., Harwell, U.K.
- Brebbia, C.A. (1978) - The boundary element method for engineers. London: Pentech Press.
- Brown, S.R. (1987) - Fluid flow through rock joints: the effect of surface roughness, *Journal Geophys. Res.*, 92(B2): 1337-1347.
- Bruel, D. (1990) - Exploitation de la chaleur des roches chaudes et sèches: étude des phénomènes hydrauliques, mécaniques et thermiques au moyen d'un modèle à fractures discrètes. Thèse de Doctorat, Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris.
- Cacas, M.-C. (1989) - Développement d'un modèle tridimensionnel stochastique discret pour la simulation de l'écoulement et des transferts de masse et de chaleur en milieu fracturé, Thèse de Doctorat, Ecole des Mines de Paris.
- Chen, D.W. (1990) - Coupled stiffness-permeability analysis of a single rough-surfaced fracture by the three-dimensional element method, Ph.D. thesis. University of California at Berkeley
- Crouch, S.L. & A.M. Starfield (1983) - Boundary element methods in solid mechanics. London: Allen & Unwin.
- Gale, J.E. (1987) - Comparison of coupled fracture deformation and fluid flow models with direct measurements of fracture pore structure and stress-flow properties, 28th US Symp. on Rock Mechanics, Tucson, Arizona. pp. 1213-1222.
- Gentier, S. (1986) - Morphologie et comportement hydromécanique d'une fracture naturelle dans un granite sous contrainte normale. Thèse de Doctorat, Université d'Orléans
- Hakami, E. (1988) - Water flow in single rock joints, licentiate thesis, Lulea, Sweden.
- Lin, J.F. (1991) - Ecoulement dans une fracture: un modèle stochastique et discret, rapport interne, Laboratoire de Mécanique des Terrains, Ecole des Mines de Nancy.
- Lin, J.F. (1992) - Comportement hydromécanique d'une fracture - bibliographie et proposition d'une approche numérique, rapport interne, Laboratoire de Mécanique des Terrains, Ecole des Mines de Nancy.
- Moreno, L.; Tsang, Y.W.; Tsang, C.F.; Hale, F.V. & Neretnieks, I. (1988) - Flow and tracer transport in a single fracture: a stochastic model and its relation to some field observations, *Water Resour. Res.*, 24(12): 2033-2048.
- Neuzil, C.E. & Tracy, J.V. (1981) - Flow through fractures, *Water resour. Res.*, 17(1): 191-199.
- Rongved, L. & N.J. Murray Hill (1957) - Dislocation over a bounded plane area in an infinite solid, *J. Appl. Mech.*, 24: 252-254
- Smith, L. & Freeze, R.A. (1979) - Stochastic analysis of steady state groundwater flow in a bounded domain, 2: two-dimensional simulations, *Water resour. Res.*, 15(6): 1543-1559.
- Snow, D.T. (1969) - Anisotropic permeability of fractured media, *Water resour. Res.*, 5(6): 1273-1289.
- Sokolnikoff, I.S. (1956) - Mathematical theory of elasticity, 2nd ed. New York: MacGraw-Hill
- Tsang, Y.W.; Tsang, C.F.; Hale, F.V.; Moreno, L. & Neretnieks, I. (1987) - Channeling characteristics of flow and solute transport through a rough-surfaced fracture. LBL-23195 UC-11, Lawrence Berkeley Laboratory, Berkeley, USA