

# MODELISATION A L'ECHELLE MESOSCOPIQUE DE L'ENDOMMAGEMENT FRAGILE DES ROCHES ET DES BETONS : APPLICATION AU COMPORTEMENT EN COMPRESSION D'UN GRES

D. Kondo, V. Renaud

*Laboratoire de Mécanique de Lille, U.R.A. CNRS, 1441  
Université de Lille I, 59655 Villeneuve d'Ascq*

Le comportement fragile des géomatériaux cohérents (roches, bétons) est de plus en plus étudié dans le cadre de la mécanique de l'endommagement (Krajcinovic, 1989 ; Lemaître, 1990). La modélisation phénoménologique de l'endommagement (cf. p. ex. Dragon et al., 1994) atteint maintenant des degrés de sophistication un peu comparables à ceux de ces homologues de la plasticité. Il semble cependant que des difficultés importantes subsistent encore lorsqu'il s'agit de décrire l'anisotropie induite ou les effets unilatéraux (Mazars et al., 1990) liés à l'endommagement par mésolfissuration des bétons et des roches (cf. Chaboche, 1992). C'est dans ce contexte, et en complément à des modélisations phénoménologiques (Kondo et al., 1992 ; Shao et al., 1995), que nous avons mis en oeuvre une modélisation à l'échelle mésoscopique. Ceci est encouragé par le fait qu'on dispose maintenant à partir de la littérature d'un certain nombre d'expériences (observations au MEB) convergentes quant aux mécanismes de mésolfissuration dans les roches et les bétons (Nemat-Nasser et Horii, 1982 ; Wong, 1982 ; Zaitsev, 1983). Des résultats issus de cette modélisation sont présentés et comparés aux données expérimentales obtenues sur un grès.

## **I Loi de comportement du milieu homogénéisé**

Soit un volume élémentaire représentatif (VER) contenant un grand nombre de mésolfissures (cf. p. ex. Nemat-Nasser et Horii, 1993). On suppose que la matrice solide (fragile) est homogène et à comportement élastique linéaire, de compliance  $\bar{S}^0$ . La loi de comportement du milieu homogénéisé, reliant les grandeurs macroscopiques  $\bar{\sigma}$  et  $\bar{\varepsilon}$  (moyennes des champs mésoscopiques locaux dans le VER) peut se résumer par les équations suivantes (cf. p. ex. Ju, 1991) :

$$\text{Enthalpie libre : } \psi^*(\bar{\sigma}, \bar{S}) = \frac{1}{2} \bar{\sigma} : \bar{S} : \bar{\sigma} = \frac{1}{2} \bar{\sigma} (\bar{S}^0 + \bar{S}^d) \bar{\sigma}$$

$$\text{Lois d'état : } \bar{\varepsilon} = \frac{\partial \psi^*}{\partial \bar{\sigma}} = \bar{S} : \bar{\sigma} = (\bar{S}^0 + \bar{S}^d) \bar{\sigma}$$

La compliance inélastique  $\bar{S}^d$ , due à la présence des mésolfissures, est évaluée à partir des discontinuités de déplacements (voir p. ex. Horii et Nemat-Nasser, 1983). La prise en compte des interactions entre défauts (voir Kachanov, 1993) est réalisée à l'aide du schéma autocohérent. Le passage méso-macro est effectué en considérant une distribution spatiale continue des mésolfissures.

La condition de dissipation positive donne (Ju, 1991) :  $\frac{1}{2} \bar{\sigma} \dot{\bar{S}} \bar{\sigma} \geq 0$ . Elle est ainsi fortement liée à l'évolution de la compliance effective du matériau mésolfissuré.

## **II Contenu physique du modèle mis en oeuvre**

La modélisation mésomécanique, issue des travaux de Fanella et Krajcinovic (1988) et de Lee et Ju (1991), comporte les deux étapes suivantes : (i) choix d'une mésostructure et évaluation des compliances effectives associées (ii) mise en oeuvre de lois d'évolution de la mésostructure. Sur la base des divers travaux déjà évoqués, les mésolfissures sont supposées initialement réparties sur des interfaces de grains, le matériau étant considéré comme un

agrégat composite. Selon que les défauts sont sollicités en traction ou en compression, l'évolution de la mésosfissuration fait intervenir des modes élémentaires différents (dissymétrie des réponses en traction et en compression). En traction, les mésosfissures se propagent en mode I (mode d'ouverture), tandis que les trajets de mésosfissuration en compression (voir figures 1) font intervenir à la fois le mode I et le mode II ou mode de cisaillement (Nemat-Nasser et Horii, 1982 ; Zaitsev, 1983). Les lois de croissance des mésosfissures sont obtenues à partir des critères classiques de la mécanique de la rupture.

### III Identification de paramètres et réponses du modèle

Le modèle comporte 9 paramètres tous physiquement identifiables (coefficients élastiques, coefficient de frottement, ténacités, paramètres définissant la mésostructure initiale). Ses performances (dans la version 3-D) ont été évaluées en étudiant les réponses en compression triaxiale du grès de Fontainebleau. Le chargement axial a été appliqué suivant la direction 1. On constate que les réponses expérimentales sont globalement bien reproduites (voir exemples des figures 2). L'analyse détaillée des résultats numériques montre que la dilatance obtenue est essentiellement due aux mécanismes de branchement de mésosfissures (mode d'ouverture axiale). Afin de se faire une idée plus précise sur l'importance de l'anisotropie de l'endommagement, nous avons tracé sur les figures 3 les variations des différentes composantes du tenseur de compliances normalisées (rapportées à leur valeur initiale). Pour la présentation de ces résultats, la notation de Voigt ( $\tau_1 = \sigma_{11}$ ,  $\tau_2 = \sigma_{22}$ ,  $\tau_3 = \sigma_{33}$ ,  $\tau_4 = \sigma_{23}$ ,  $\tau_5 = \sigma_{13}$ ,  $\tau_6 = \sigma_{12}$ ;  $e_1 = \varepsilon_{11}$ ,  $e_2 = \varepsilon_{22}$ ,  $e_3 = \varepsilon_{33}$ ,  $e_4 = 2\varepsilon_{23}$ ,  $e_5 = 2\varepsilon_{13}$ ,  $e_6 = 2\varepsilon_{12}$ .) est utilisée, avec  $e_i = S_{ij} \tau_j$ . On observe que la variation de la compliance latérale  $S_{22}$  est par exemple beaucoup plus forte que celle de  $S_{11}$ . La forte augmentation de  $S_{21} = S_{31}$  est à l'origine des non-linéarités de la déformation latérale. Enfin, nous avons étudié l'influence de divers paramètres (densité initiale de mésosfissures  $w$ , frottement, taux de création de nouvelles mésosfissures) sur la réponse du modèle (Kondo, 1996). A titre d'exemple, nous présentons ici les résultats de l'influence de  $w$  (figure 4). On remarque que la réponse du matériau dépend énormément de son endommagement initial. Le matériau devient plus dilatant lorsque  $w$  croît.

**Conclusions :** Les résultats confirment les potentialités de la modélisation à l'échelle mésoscopique. Le modèle reproduit bien les aspects essentiels du comportement mécanique des matériaux fragiles endommageables. De plus, les simulations numériques donnent de précieuses indications sur l'importance des mécanismes mésostructuraux mis en jeu dans le processus d'endommagement. Le choix d'un critère de rupture ainsi que l'analyse des effets unilatéraux font l'objet d'études en cours.

### Références bibliographiques :

- J.L. **Chaboche** (1992), Damage induced anisotropy : on difficulties associated with the active/passive unilateral condition. *Int. J. of Damage Mechanics*, Vol. 1(2), pp. 148-171.
- A. **Dragon**, F. **Cormery** F., T. **Desoyer**, D. **Halm** (1994), Localized failure analysis using damage models, in *Localisation and bifurcation theory for soils and rocks*, Chambon R., Desrues J. & Vardoulakis I. (eds), Balkema, 127-140
- H. **Horii** & S. **Nemat-Nasser** (1983), Overall moduli of solids with microcracks load-induced anisotropy. *J. Mech. Phys. Solids*, vol. 31, n° 2, pp. 155-171.
- J. W. **Ju** (1991), On two-dimensional self-consistent micromechanical damage models for brittle solids. *Int. J. Solids Structures*, Vol. 27, n° 2, pp. 227-258.
- M. **Kachanov** (1993), Elastic solids with many cracks and related problems, in J.W. Hutchinson & T. Y. Wu (eds), *Advances in Applied Mechanics*, pp. 259-445, Academic Press.
- D. **Kondo**, J.F. **Shao** J.F., J.P. **Henry** (1992), Numerical modelling of induced anisotropic damage in a sandstone. *NUMOG IV*, Swansea, U.K. Balkema, pp. 191-199.
- D. **Kondo** (1996), Endommagement par mésosfissuration et rupture fragile des roches. *Mémoire d'Habilitation à diriger des recherches*, Université des Sciences et Technologies de Lille. A paraître.

D. **Krajcinovic** (1989), Damage Mechanics. *Mechanics of Materials*, vol. 8, pp. 117-197.

J. W. **Ju** (1991) : On two-dimensional self-consistent micromechanical damage models for brittle solids. *Int. J. Solids Structures*, Vol. 27, n° 2, pp. 227-258.

J. **Lemaitre** (1990), A course on Damage Mechanics, *2nd edition Cambridge University Press*

J. **Mazars**, Y. **Bertaud**, S. **Ramtani** (1990), The unilateral behaviour of damage concrete, *Engineering Fracture Mechanics*, Vol. 35, n° 4/5, pp. 629-635.

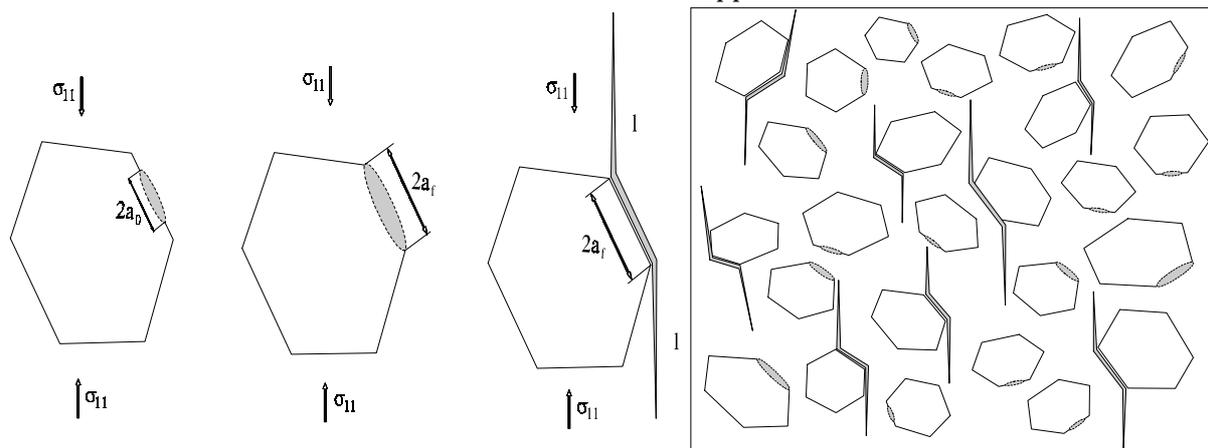
S. **Nemat-Nasser** & H. **Horii** (1982), Compression-induced nonplanar crack extension with application to splitting, exfoliation and rockburst. *J. Geophys. Res.*, vol. 87, pp. 6805-6821.

S. **Nemat-Nasser** & H. **Horii** (1993), *Micromechanics : overall properties of heterogeneous materials*, North - Holland, Amsterdam.

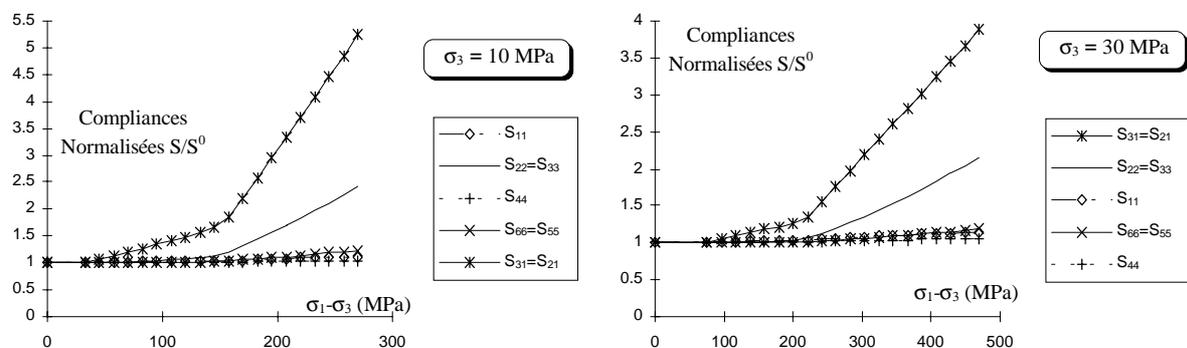
J.F. **Shao**, R. **Khazraei**, D. **Kondo** (1995), Impact of microcracking in brittle rocks on wellbore stability analysis. Proc. 8th *Int. Congress of SIMR.*, Tokyo.

T. F. **Wong** (1982), Micromechanics of faulting in Westerly granite. *Int. J. Rock Mech.*, 19, pp. 49-62

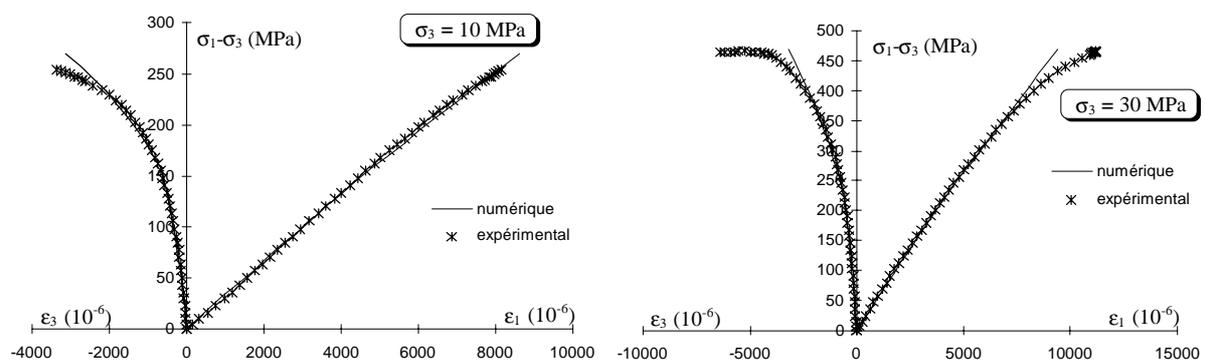
Y. B. **Zaitsev** (1983), Crack propagation in a composite material. in F. H. **Wittmann**, ed. *Fracture mechanics of concrete*, Elsevier, Amsterdam, the Netherlands, pp. 31-60.



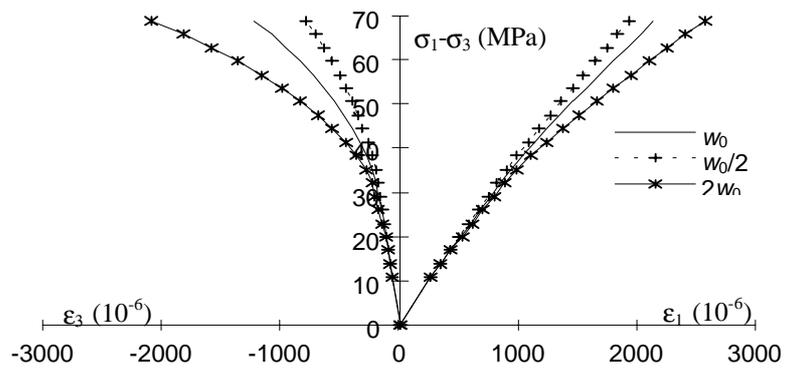
**Figures 1 : a) Etats possibles d'une mésocraque en compression - b) Vue d'ensemble de la mésostructure**



**Figure 2 : Réponses en compression triaxiale**



**Figures 3 : Variation des compliances normalisées en compression triaxiale**



**Figure 4 : Compression uniaxiale - Influence de la densité initiale de mésocraques ( $w_0$  est la densité de référence)**