



**HAL**  
open science

# Modélisation micro-macro autocohérente du comportement du sel gemme : comparaison avec l'expérience de laboratoire

Luc Thorel, Ahmad Pouya, Mehdi Ghoreychi

► **To cite this version:**

Luc Thorel, Ahmad Pouya, Mehdi Ghoreychi. Modélisation micro-macro autocohérente du comportement du sel gemme : comparaison avec l'expérience de laboratoire. 3ème Colloque du Groupe Français de Rhéologie, Oct 1996, Metz, France. hal-00636851

**HAL Id: hal-00636851**

**<https://hal.science/hal-00636851>**

Submitted on 28 Oct 2011

**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.

## **MODÉLISATION MICRO-MACRO AUTOCOHERENTE DU COMPORTEMENT DU SEL GEMME : COMPARAISON AVEC L'EXPÉRIENCE DE LABORATOIRE**

Luc THOREL, Ahmad POUYA, Mehdi GHOREYCHI

Groupement pour l'Étude des Structures Souterraines de Stockage (G.3S)  
LMS (URA 317), École Polytechnique, 91128 Palaiseau Cedex.

### **RÉSUMÉ**

Le sel gemme est une roche évaporitique constituée essentiellement de monocristaux de chlorure de sodium, dont le comportement est assez bien connu. Le passage du comportement microscopique au macroscopique, est réalisé par le biais du modèle autocohérent de Berveiller et Zaoui. La simulation d'essais de chargements alternés est comparable aux résultats obtenus au cours d'essais de laboratoire, sous forte pression de confinement, lorsque les effets de la variation de la contrainte moyenne sont atténués. La modélisation micro-macro permet d'accéder aux contraintes internes affectant l'endommagement du sel gemme, et d'étudier leur variation en fonction du trajet de chargement. Certains aspects de la rhéologie du sel gemme sous forte contrainte moyenne peuvent ainsi être retrouvés à partir du comportement du monocristal de chlorure de sodium, tel que la nature de l'érouissage (isotrope ou cinématique).

### **ABSTRACT**

Rocksalt is an evaporitic rock, which contains mainly sodium chloride crystals, for which the behaviour is well known. Transition from microscale to macroscale is made with the Berveiller-Zaoui self-consistent model. Simulation of triaxial tests submitted to alternative compression-extension loading, is compared with experimental tests performed under high confining pressure, where the material becomes pressure-insensitive. Self-consistent modelling gives information about evolution of internal stresses affecting damage during loading. Under high mean stress, some characteristics of rocksalt rheology may be explained by this micro-macro model, on the basis of the sodium chloride monocystal properties such as the kind of hardening (isotropic or cinematic).

### **1. INTRODUCTION**

L'approche micro-macro de l'étude de la rhéologie d'un matériau formé de cristaux a pour objectif de décrire le comportement de l'agrégat polycristallin supposé macroscopiquement homogène, à partir de propriétés individuelles des cristaux. Si on considère l'agrégat comme un milieu infini macroscopique homogène (et non comme une structure), ses déformations et contraintes sont égales à la moyenne des déformations et des contraintes dans les grains qui le constituent. Contraintes et déformations dépendent du chargement imposé à l'infini sur le milieu macroscopique et aussi de l'interaction mutuelle des grains sur leurs surfaces de contact. Dans le modèle autocohérent utilisé, les interactions entre grains sont remplacées par l'interaction d'un grain (sous forme d'une inclusion) dans une matrice homogène. Le grain a les propriétés connues du monocristal. Chaque inclusion a des caractéristiques différentes (orientation, géométrie, nature). Les plus simples modèles autocohérents considèrent une inclusion de forme sphérique ou ellipsoïdale. Le comportement de la matrice de l'agrégat macroscopiquement homogène, constitue l'inconnue du problème. Les résultats de la modélisation et des essais de laboratoire sont comparés.

### **2. RÉSULTATS EXPÉRIMENTAUX SUR LE SEL GEMME**

Des essais triaxiaux axisymétriques de compression et d'extension (sous chargement compressif) sont réalisés, selon les trajets de chargement de la figure 1, avec mesure de la déformation volumique [Thorel, 1994]. Le sel gemme testé (Stampien), provient

des Mines De Potasse d'Alsace. Extrait du banc S1, il est relativement pur (au moins 90% de NaCl) dont les grains sont de dimension plurimillimétrique à centimétrique.

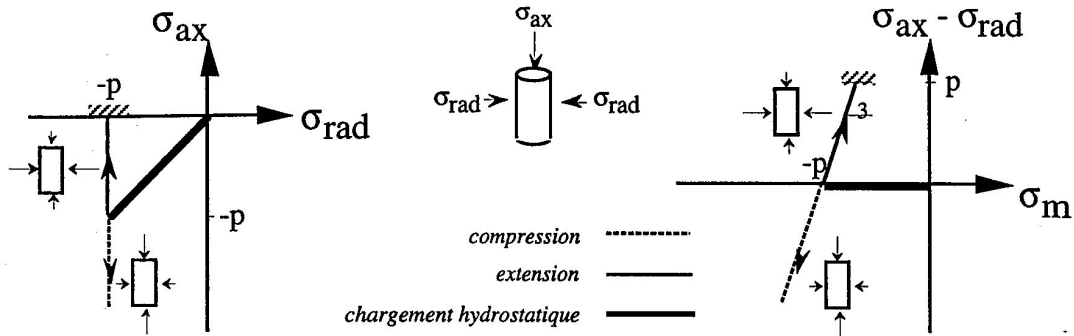


Figure 1 : Trajets de chargement de compression et d'extension axiales. (convention des compressions négatives)

### 2.1. Dispositif expérimental

Le dispositif expérimental [Thorel & Ghoreychi 1996] se compose essentiellement d'une presse hydraulique MTS asservie électroniquement, d'une cellule triaxiale de capacité maximale 70MPa, d'un contrôleur numérique pression-volume GDS (pression maximale 64MPa) connecté hydrauliquement à la cellule, permettant la mesure des variations du volume d'huile contenu dans la cellule et le contrôle de la pression de confinement. La mesure de la déformation axiale, est déduite du déplacement du piston.

Après le chargement hydrostatique, le chargement déviatorique est appliqué soit en augmentant en valeur absolue (compression), soit en relâchant (extension) la contrainte axiale, ou en alternant compression et extension. L'éprouvette, de diamètre 50mm, est d'élancement 2. Le chargement déviatorique est contrôlé en vitesse de déformation axiale ( $\approx 10^{-5} s^{-1}$ ).

### 2.2. Essai sous chargement alterné

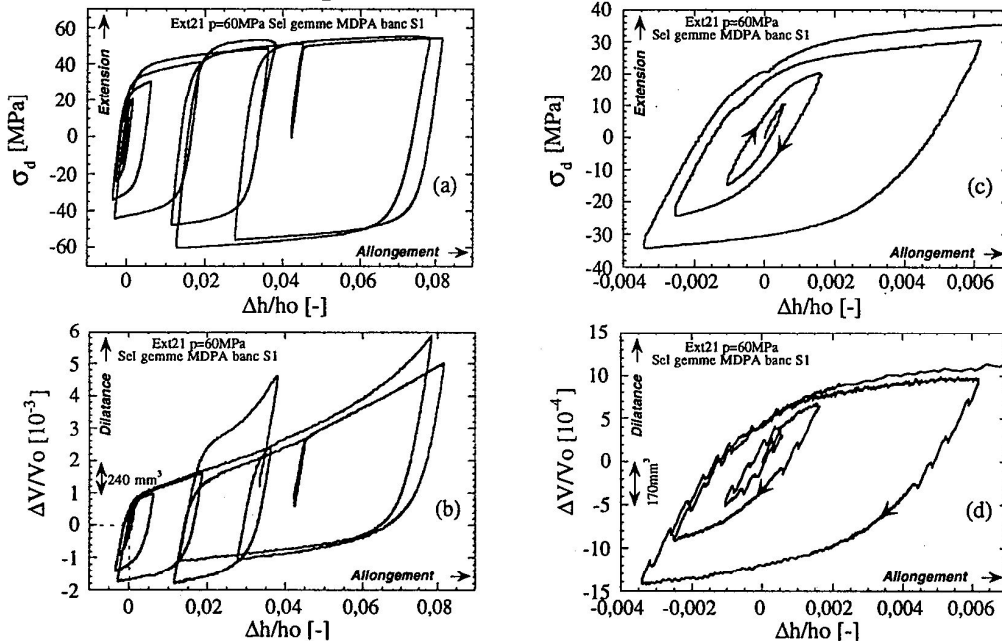


Fig.2 : Essai triaxial sous 60 MPa de confinement avec chargement déviatorique alterné (extension et compression). Les figures (2a) et (2b) montrent respectivement l'évolution de la contrainte déviatorique  $\sigma_d$  et de la déformation volumique  $\Delta V/V_0$  en fonction de la déformation axiale  $\Delta h/h_0$ . Les figures (2c) et (2d) sont des agrandissements des courbes au début de l'essai.

Comme beaucoup d'autres roches, le sel gemme est sensible aux effets de la contrainte moyenne. A l'essai triaxial, sous une pression de confinement supérieure à 12MPa, son comportement est ductile, les déformations volumiques étant essentiel-

lement élastiques. Les critères d'endommagement et de rupture sont identifiés sur la base d'essais triaxiaux de compression et d'extension [Thorel, 1994; Thorel & Ghoreychi, 1996].

Le résultat d'un essai avec chargement alterné en compression et extension est présenté (fig. 2.) Le point de départ des courbes correspond exactement à l'origine du chargement. Tant que la contrainte déviatorique est inférieure (en valeur absolue) à 20MPa environ (ou que la déformation longitudinale n'excède pas environ 0,3%) le comportement en compression et en extension demeure grossièrement symétrique, par rapport à l'origine, et la déformation volumique est essentiellement réversible. Au-delà, la déformation axiale en extension croît pour une faible augmentation du déviateur, ce qui conduit à déplacer peu à peu les cycles dans le domaine des déformations permanentes en extension, provoquant une accélération modérée de la dilatance. Elle s'accompagne d'une déformation volumique irréversible, qui traduit un endommagement progressif.

L'effet Bauschinger est visible sur la figure 2a. Pour de faibles déformations, l'érouissage comporte une part isotrope et une part cinématique (l'érouissage ne peut pas être qualifié de purement isotrope ou purement cinématique). Au-delà de quelques dixièmes de pour-cent de déformation axiale, une accélération modérée de la dilatance est observée durant les phases d'extension.

### 3. MODÉLISATION AUTOCOHÉRENTE DU SEL GEMME

#### 3.1. Modèle de Berveiller et Zaoui (B&Z)

Ce modèle autocohérent [Berveiller et Zaoui, 1978] considère une inclusion sphérique formée d'un seul cristal à comportement élastoplastique connu, dans une matrice homogène infinie (polycristal). Supposons que le polycristal soit soumis à l'infini à une contrainte et à une déformation plastique macroscopique, respectivement  $\underline{\underline{\Sigma}}$  et  $\underline{\underline{E}}_p$ . Les tenseurs de contrainte  $\underline{\underline{\sigma}}$  et de déformation  $\underline{\underline{\epsilon}}^p$  au sein de l'inclusion, sont reliés aux tenseurs macroscopiques par la relation suivante :

$$\underline{\underline{\sigma}} = \underline{\underline{\Sigma}} + 2 \mu \alpha (1 - \beta) (\underline{\underline{E}}^p - \underline{\underline{\epsilon}}^p) \quad \underline{\underline{\Sigma}} = \langle\langle \underline{\underline{\sigma}} \rangle\rangle, \quad \underline{\underline{E}} = \langle\langle \underline{\underline{\epsilon}} \rangle\rangle$$

où  $\langle\langle x \rangle\rangle$  est la moyenne volumique de  $x$ ,  $\beta$  est une fonction du coefficient de Poisson,  $\mu$  est le module de cisaillement, et  $\alpha$  traduit la diminution des contraintes internes du fait de l'accommodation plastique des grains.

En prenant uniquement le glissement sur les systèmes dodécaédriques (ou orthogonaux); on trouve avec le modèle B&Z que  $\alpha$  décroît rapidement de la valeur initiale de 1 (élasticité linéaire [Kröner, 1961]), vers la valeur limite  $\alpha=0,53$ . Si le glissement sur les systèmes octaédriques est également permis, alors la valeur limite est  $\alpha=0,035$  [Pouya et al., 1993]. Les glissements sur les plans cristallographiques du système cubique n'ont pas été pris en compte.

Le détail des seuils de plasticité et des modules d'érouissage est donné par Pouya et al. [1993], sur la base des essais d'érouissage réalisés sur le monocristal de halite par Carter et Heard [1970], effectués à température ambiante (25°C) et à vitesse de déformation de  $10^{-4}s^{-1}$ , qui sont proches des conditions expérimentales de nos essais.

#### 3.2. Nature de l'érouissage

En partant d'un modèle élastoplastique parfait pour le monocristal de halite, Pouya [1991] a montré que le comportement du sel polycristallin présente de l'érouissage. Cet érouissage structural s'ajoute à l'érouissage des cristaux de sel et intensifie l'érouissage de l'agrégat polycristallin.

On peut s'interroger sur la part et la nature de chaque érouissage d'origine monocristalline ou polycristalline. En admettant l'hypothèse vraisemblable de l'érouissage monocristallin isotrope, nous avons simulé le début d'un essai cyclique de compression/extension, correspondant à celui de la figure 2. L'endommagement, manifestement lié au signe du déviateur de contrainte, ne peut être exprimé par un modèle dépendant exclusivement du deuxième invariant du tenseur déviateur de

contrainte  $J_2$  comme c'est le cas de modèles décrivant les mouvements de dislocations. La dissymétrie observée entre la compression et l'extension par rapport à l'état initial ne peut pas être reproduite.

Les calculs confirment les résultats des essais, sur le fait que l'écroutissage du polycristal de NaCl comporte une part isotrope liée à l'écroutissage des monocristaux et une part cinématique due à l'agrégat polycristallin.

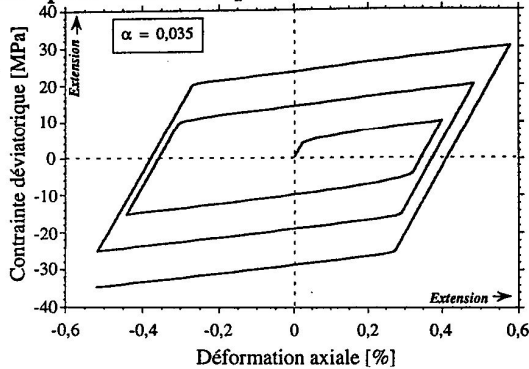


Figure 3 : Simulation par le modèle B&Z d'un essai alterné de compression-extension;  $\alpha=0,035$ .

La contrainte déviatorique est augmentée de 5 MPa en valeur absolue à chaque changement de sens des cycles de chargement pilotés en déformation. On remarque que la mémoire du dernier niveau de contrainte atteint est conservée séparément en compression et en extension, tandis que le passé du chargement en compression n'influe pas sur le chargement en extension et réciproquement.

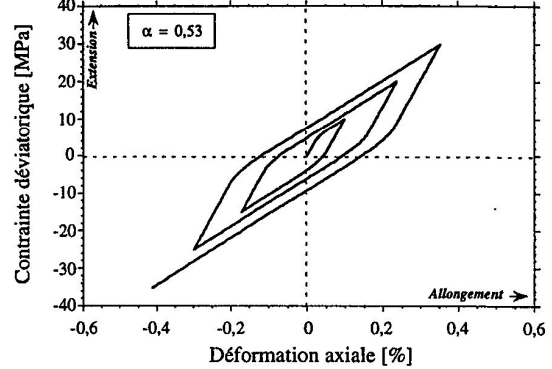


Figure 4 : Simulation par le modèle B&Z d'un essai alterné de compression-extension;  $\alpha=0,53$ .

L'écroutissage du polycristal présente un caractère nettement cinématique, le domaine élastique étant quitté prématurément, avant le changement de signe du déviateur. Cet aspect du comportement du polycristal est le fait de l'agrégation des monocristaux, car l'écroutissage monocristallin est isotrope.

L'écroutissage cinématique paraît d'autant plus significatif que le comportement de la matrice polycristalline se rapproche d'un comportement élastique. Ce phénomène apparaît nettement en comparant les courbes {contrainte-déformation} (fig. 3 et 4). Si  $\alpha=0,035$ , une nouvelle plastification ne peut se produire qu'après la décharge complète (qui s'avère élastique), suivie d'un chargement de signe opposé. Or, dans l'hypothèse  $\alpha=0,53$ , les trajets de décharge ne sont pas entièrement élastiques : une plastification précoce se produit avant même la décharge complète.

L'existence de trajets de décharges élastiques au cours des essais de laboratoire, va en faveur d'une faible valeur du coefficient  $\alpha$  pour le modèle B&Z. Cela suggère l'activation de deux systèmes cristallographiques. De plus, dans le cas où deux mécanismes sont activés, la diminution du module tangent est conforme aux résultats expérimentaux.

### 3.3. Contraintes internes

Les contraintes internes calculées avec le modèle B&Z peuvent éclairer sur l'initiation de l'endommagement du sel gemme. Ce modèle ne dépendant que du déviateur de contrainte, la simulation d'un essai triaxial revient à celle d'un essai de traction, ou de compression simple. Un essai triaxial fictif est proposé (figures 5 et 6).

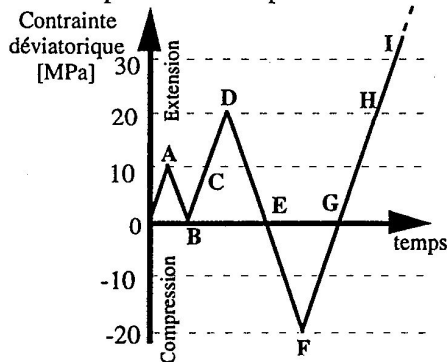


Figure 5 : Schéma de chargement déviatorique.

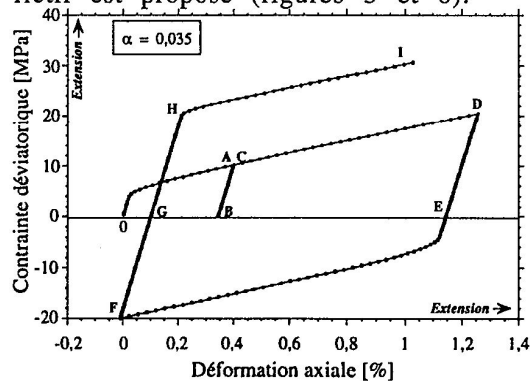
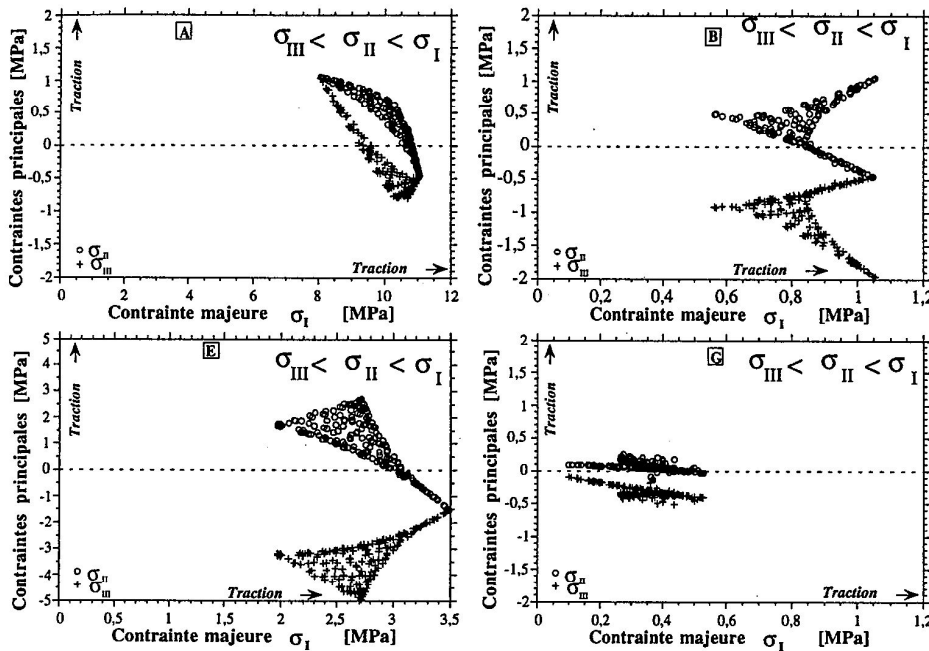


Figure 6 : Simulation par le modèle B&Z de l'essai fictif de chargement alterné.  $\alpha = 0,035$

La figure 6 illustre la courbe {contrainte; déformation} issue du calcul sur le modèle B&Z. On reconnaît l'allure des résultats des essais typiques de laboratoire : la décharge est réversible, mais une sollicitation déviatorique de sens opposé conduit à un durcissement du matériau. Le passage d'extension en compression s'accompagne d'une nouvelle plastification (F), qui se répercute sur le dernier trajet de chargement en extension (GHI) en le plaçant au-dessus du précédent trajet (CD).

La figure 7 présente l'allure des contraintes principales internes. Les contraintes locales oscillent de  $\pm 20\%$  environ autour de la valeur moyenne macroscopique, quel que soit le déviateur macroscopique. Lorsque le déviateur est déchargé complètement (B,E,G), la contrainte principale mineure, et dans une moindre mesure, la contrainte principale intermédiaire deviennent de traction par rapport à leur état initial (supposé nul dans le calcul). Cette traction est d'autant plus forte que la décharge intervient après un chargement d'extension (comparer E à G), et que ce chargement est intense.



**Figure 7:**  
Contraintes principales internes calculées pour le chargement des figures 5 et 6.

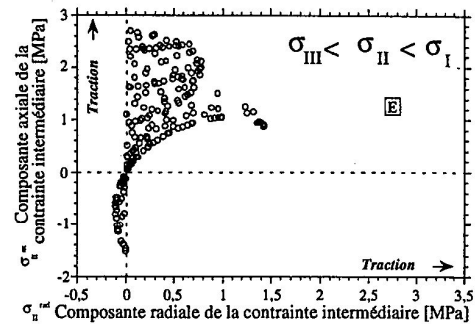
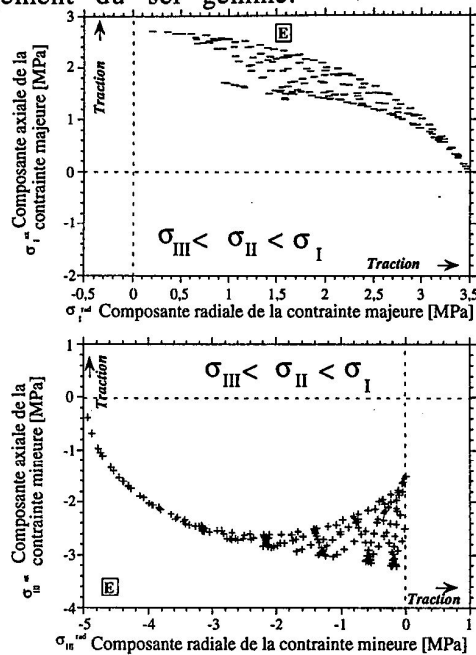
Chaque point correspond à l'un des 200 monocristaux qui sont supposés constituer l'agrégat polycristallin. Le modèle étant insensible à la pression, il faut ajouter la pression hydrostatique pour obtenir les vraies valeurs des contraintes principales. Un état de traction obtenu par ce calcul peut ainsi correspondre à une compression.

Pour connaître l'orientation des contraintes principales, ont été tracées (fig.8) leurs projections sur le plan  $\{\sigma_{rad}; \sigma_{ax}\}$ . D'après le modèle utilisé, aucune contrainte macroscopique de traction ne règne en théorie localement dans un échantillon de sel soumis à forte pression de confinement au cours d'un essai triaxial de compression ou d'extension. Les contraintes internes demeurant dans l'échantillon après la suppression de la pression de confinement, à la fin de l'essai, sont néanmoins susceptibles d'entraîner la fissuration par traction du sel gemme. Le risque d'une fissuration du sel due au relâchement de l'état de contrainte résultant du carottage semble, de ce point de vue, vraisemblable.

Cela n'explique pas pour autant l'endommagement du sel rencontré au cours des essais triaxiaux, phénomène mis en évidence par la mesure de la déformation volumique. Cependant, le risque d'endommagement disparaît pratiquement si la pression de confinement dépasse un certain seuil, fonction du déviateur maximum atteint préalablement à la décharge. Ce seuil vaut 2MPa (A) si le déviateur maximum est de 10 MPa; 5MPa (B) si la décharge s'effectue à partir d'un déviateur de 20 MPa, et croît régulièrement au fur et à mesure que le sel subit des déviateurs de plus en plus forts. Ces derniers ne dépassant que rarement 60 MPa, d'après les résultats des essais de laboratoire, on peut définir une valeur critique de la pression de confinement au-delà de laquelle le risque d'une fissuration par traction est pratiquement inexistant. Elle est de 15 MPa [Pouya et al. 1993].

De tel risque de fissuration par traction n'a évidemment de sens qu'après la suppression du déviateur; il n'explique pas l'apparition de l'endommagement au cours d'un chargement déviatorique réalisé sous fort confinement.

En supposant que le critère de l'endommagement local se confonde avec le critère global (hypothèse qui reste à vérifier), nous sommes tentés de conclure que d'après le modèle utilisé, la fissuration de cristaux de NaCl précède de peu la fissuration de l'agrégat polycristallin. Cette conclusion doit cependant être nuancée, car le sel gemme n'est pas exclusivement formé de cristaux de NaCl. Par ailleurs, des glissements aux joints de grains, non pris en compte dans notre modèle, peuvent également avoir lieu et conduire à une décohésion des grains entraînant à son tour l'endommagement du sel gemme.



**Figure 8 :** Composantes des contraintes principales dans la direction radiale et dans la direction axiale.

Ces contraintes sont calculées au point E du trajet de chargement de la figure 6. Les tractions (positives) ne sont qu'apparentes, car le modèle est insensible aux effets de la pression. La contrainte principale mineure est une traction d'orientation aléatoire, pour la plupart des cristaux.

#### 4. CONCLUSIONS

Ne considérant que les déformations dues aux mouvements de dislocation, le modèle micro-mécanique autocohérent de Berveiller et Zaoui reste insensible aux effets de la contrainte moyenne, qui ne peuvent ainsi être reproduits. En particulier, la fissuration est sous estimée, car n'est pas pris en compte l'effet des hétérogénéités et des impuretés présentes dans le matériaux naturel. Celles-ci sont souvent à l'origine de l'initiation de fissures par décohésion ou rupture locale, comme cela est observé en extension. Cependant, la présente modélisation procure quelques informations :

- bien que l'écroutissage du monocristal soit considéré isotrope, l'écroutissage trouvé pour le polycristal peut être en partie cinématique;
- l'étude des contraintes internes montre que le risque de fissuration est plus grand à la suite d'un chargement en extension, qu'à la suite d'un chargement de compression, les contraintes potentielles de traction étant plus fortes dans le premier cas.

#### RÉFÉRENCES

- BERVEILLER, ZAOUÏ, 1978. "An extension of the self-consistent scheme to plastically-flowing polycrystals", J. Mech. Phys. Solids, 26, 325-344.
- CARTER, HEARD, 1970. "Temperature rate dependent deformation of halite". Am.J.Sci., vol.269, pp193-249.
- KRONER E., 1961. "Zur plastischen verformung des viel-Kristalls". Acta Met. 9, 155-.
- POUYA, 1991. "Comportement rhéologique du sel gemme. Appl. à l'étude des excavations souter." Thèse ENPC,
- POUYA, 1991b. "Approche micro-mécanique de la fissuration du sel gemme". 7th ISRM Congr, Aachen, pp319-322.
- POUYA, ZAOUÏ, NABOULI, 1993. "A micro-macro model for polycryst.halite". 3rd Conf. Mech. behav. Salt, Trans Tech., Palaiseau, 12p.
- THOREL, 1994. "Plasticité et endommagement des roches ductiles : application au sel gemme". Thèse ENPC, 293p.
- THOREL, GHOREYCHI, 1996. "Plasticité et endommagement du sel gemme". Rev. Franç. Géotech. (sous presses).