



**HAL**  
open science

# Une méthode pour l'analyse du comportement d'exploitations minières de sel exploitées par la méthode des chambres et piliers

Farid Laouafa, Mehdi Ghoreychi

## ► To cite this version:

Farid Laouafa, Mehdi Ghoreychi. Une méthode pour l'analyse du comportement d'exploitations minières de sel exploitées par la méthode des chambres et piliers. 17. Congrès Français de Mécanique (CFM'05), Aug 2005, Troyes, France. pp.NC. ineris-00972495

**HAL Id: ineris-00972495**

**<https://ineris.hal.science/ineris-00972495>**

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.

# Une méthode pour l'analyse du comportement d'exploitations minières de sel exploitées par la méthode des chambres et piliers.

Farid, Laouafa & Mehdi, Ghoreychi

*Institut National de l'Environnement industriel et des Risques (INERIS)  
Parc technologique ALATA, BP2  
60550 Verneuil-en-Halatte*

## Résumé :

*L'impact à long terme des cavités laissées par les mines, en particulier les mines de sel, conduit à s'interroger sur leur stabilité à long terme sous l'effet de la fissuration et du fluage du massif rocheux. A partir de modélisations numériques, une méthode d'évaluation de la stabilité à long terme est proposée. Une correction des approches classiques est apportée à l'aide d'abaques issus de la modélisation confrontée à la réalité.*

## Abstract :

*The long-term behaviour of old abandoned salt mine openings is an important question from a safety assessment view point. A simple based-method is proposed to improve the accuracy of the classical method. The first part of this method deals with pillar stability. This is achieved by means of finite element computations. The validity of this method was checked successfully by comparing results of various finite element analyses with those of real cases.*

## Mots clefs :

**Mines ; sel ; piliers ; modélisation ; stabilité ; fluage.**

## 1 Introduction

De nombreux gisements de sel exploités en France, au cours des deux derniers siècles, ont déjà connu ou connaîtront une cessation de leurs activités [4]. Cette situation conduira dans les années à venir, à un nombre croissant d'exploitations abandonnées de sel. Quelles que soient les méthodes utilisées, les anciennes exploitations minières ont laissé de nombreuses cavités souterraines. L'existence de tels vides au sous-sol soulève la question de leur comportement à long terme d'un point de vue de l'impact sur la sécurité des personnes et des biens et de la protection de l'environnement. Les méthodes classiques de prévision de la stabilité (au sens géotechnique et non thermodynamique) des ouvrages miniers sont, pour la plupart, conçues pour le dimensionnement d'ouvrages et sont donc souvent pas adaptées à l'étude de stabilité à long terme des ouvrages abandonnés. Par exemple, dans le cas d'une exploitation par la méthode de chambres et piliers abandonnés, le critère de rupture *stricto sensu* des piliers est communément établi par comparaison de la résistance (pondérée) en compression uniaxiale du matériau avec la sollicitation estimée par la méthode dite de l'aire tributaire. Or se basant sur un tel critère de stabilité, de nombreuses exploitations qui sont à l'heure actuelle, stables devraient être effondrées.

Nous nous intéressons dans cet article plus spécifiquement aux mines de sel exploitées par la méthode des chambres et piliers abandonnés. Le sel gemme présente un comportement viscoplastique sans seuil responsable du fluage des parois des ouvrages souterrains. C'est pourquoi dans le cas de ce type d'exploitation, la problématique est double : la première est relative au comportement à court terme des piliers vis-à-vis de leur stabilité mécanique et la seconde est spécifique à l'évolution dans le temps de

l'endommagement, des déformations, des contraintes, etc., induites par le fluage des piliers. Le fluage a naturellement des conséquences en terme d'affaissements en surface du sol et en terme de tenue des piliers, du toit immédiat et des terrains de recouvrement. La méthode proposée ici, apporte une correction significative à la méthode de l'aire tributaire. Elle est bâtie sur les mêmes hypothèses à l'exception d'une seule : la prise en compte du frottement entre le pilier et le toit et/ou le mur qui conduit à générer des contraintes latérales qui augmentent considérablement la stabilité mécanique du pilier. Les facteurs correctifs sont obtenus à l'aide de modélisations numériques par éléments finis. Le recours à ce type de modélisation est inévitable du fait du caractère non homogène des champs de contraintes et de déformations, et de surcroît, dans un problème non linéaire. Nous observons que la prise en compte du frottement se traduit par une diminution très importante du déviateur des contraintes. Dans une analyse vis-à-vis de la rupture ou de l'endommagement, cela conduit à une réserve de résistance, fonction de l'élanement du pilier. Dans un milieu viscoplastique sans seuil (tel que celui admis pour les évaporites), cela conduit à une diminution de la vitesse de fluage et par conséquent, de la diminution de la déformation viscoplastique.

Le retour d'expérience de nombreuses exploitations de sel en France et à l'étranger a permis le calage du modèle. On vérifie en particulier que des cas d'instabilité mécanique et/ou d'accidents survenus dans certaines exploitations sont bien expliqués par le modèle. Les abaques issus des études menées sur le modèle ainsi validé fournissent une méthode d'analyse intéressante. Elle conjugue la simplicité et la pratique d'utilisation de la méthode de l'aire tributaire avec l'apport indéniable (sous quelques hypothèses) de la modélisation numérique. Notons toutefois que dans le cadre d'une analyse en elastoplasticité, la méthode proposée semble également applicable à d'autres mines que les mines de sel. L'intérêt principal de la méthode est qu'elle évite le recours ultérieur à une modélisation numérique.

## 2 Comportement rhéologique du sel gemme

Le comportement mécanique des évaporites, en particulier le sel gemme, a fait l'objet de nombreuses recherches tant expérimentales que théoriques[1][2][3]. Les mécanismes microscopiques responsables de la déformation du sel sont bien connus et intégrés dans les modèles rhéologiques. Le principal comportement pour les évaporites est un comportement viscoplastique dépourvu de tout seuil : en d'autres termes tout déviateur de contraintes non nul induit inévitablement des déformations différées. Nous utiliserons la terminologie de viscoplasticité ou d'élasto-visco-plasticité du fait du caractère irréversible des déformations. Parmi les nombreux modèles rhéologiques proposés pour décrire le comportement du sel, deux sont couramment utilisés. Le modèle de Norton et le modèle de Lemaitre [6]. Le modèle de Norton qui est très utilisé dans le monde suppose que, sous un déviateur de contrainte constant, la vitesse de déformation se stabilise définitivement après une phase transitoire. Contrairement au modèle de Norton, le modèle de Lemaitre stipule, sous les mêmes conditions de sollicitations, une décroissance continue de la vitesse de déformation. Dans ce dernier modèle, il n'y a pas lieu de distinguer les phases transitoire et stationnaire puisque cette dernière n'existe pas.

Soulignons que malgré ses différences, ces deux modèles (de puissance) retranscrivent très bien les principales caractéristiques du comportement du sel gemme à savoir : un comportement viscoplastique dépourvu de tout seuil de fluage, dépendance de ce comportement vis-à-vis de la seule partie déviatorique du tenseur des contraintes, caractère standard des lois proposées (lois associées : critère et potentiel de viscoplasticité identiques), ainsi que la forte dépendance des vitesses des déformations à la température. Dans la suite de l'article, nous présentons des résultats obtenus avec le modèle de Lemaitre, largement utilisée en France [8], dont nous rappelons l'expression ci-dessous.

$$\frac{\partial \boldsymbol{\varepsilon}^{vp}}{\partial t} = A e^{\left(\frac{-B}{T}\right)} \left( \frac{\sigma_{eq}}{\sigma_0} \right)^n \boldsymbol{\varepsilon}_{eq}^{vp}{}^m \frac{\partial \sigma_{eq}}{\partial \boldsymbol{\sigma}}$$

Dans cette expression  $\boldsymbol{\varepsilon}^{vp}$  désigne le tenseur des déformations viscoplastiques,  $\boldsymbol{\sigma}$  le tenseur des contraintes de Cauchy,  $\sigma_{eq}$  la contrainte équivalente de Von Mises. Cette expression fait intervenir l'unique paramètre d'écroutissage qui est la déformation viscoplastique équivalente  $\varepsilon_{eq}^{vp}$ . La contrainte  $\sigma_0$  est la contrainte de référence (1 MPa) et  $T$  la température en degré Kelvin. Les paramètres du modèle caractérisant le sel considéré sont alors au nombre de quatre :  $A$ ,  $B$ ,  $n$  et  $m$ . Soulignons que lorsque  $m$  est égal à zéro, le modèle de Lemaitre prend la forme particulière du modèle de Norton. L'expression du modèle de Lemaitre utilisée dans le code de calculs aux éléments finis VIPLEF [9] adopte l'écriture suivante, dans le cas particulier mono-dimensionnel et pour un essai de fluage :

$$\boldsymbol{\varepsilon}^{vp} = \left( \frac{\sigma_{eq}}{K} \right)^\beta t^\alpha$$

C'est à cette relation que nous ferons référence dans toute la suite de cet article. Notons que l'initiation et le développement de la fissuration du sel sont relativement peu connus. La grande ductilité de ce matériau confère effectivement au sel une aptitude à développer de grandes déformations sans nécessairement se rompre. Pour des valeurs de contraintes moyennes faibles, la rupture apparaît lorsque le sel est soumis à des vitesses de déformation relativement importantes, comme ce peut être le cas à court terme autour des ouvrages souterrains. L'analyse de la rupture ou de l'endommagement du sel dans un contexte de stabilité sera menée à l'aide du critère de Mohr-Coulomb avec des propriétés mécaniques adéquates.

### 3 Approche actuelle et démarche proposée

L'approche actuellement utilisée pour l'analyse du comportement des piliers, se base principalement sur la contrainte verticale moyenne évaluée à l'aide de la méthode dite de l'aire tributaire (AT). Cette dernière s'appuie sur plusieurs hypothèses :

- Homogénéité du champ de contrainte dans le pilier :  $\underline{\underline{\sigma}}(x, y, z) = \underline{\underline{\sigma}}, \forall (x, y, z) \in \Omega_{\text{pilier}} \subset \mathbf{R}^3$ ,
- Le tenseur de contrainte de Cauchy est entièrement défini par une unique composante :  $\underline{\underline{\sigma}} = \sigma_z$ .

La valeur de cette composante  $\sigma_z$  dépend du poids ( $\gamma H_r$ ) du recouvrement surplombant la mine ainsi que du pourcentage de minerai extrait (taux de défrètement)  $\tau$ . Ce dernier est classiquement défini comme étant le rapport de la surface exploitée sur la surface totale initiale. Avec ces uniques éléments, on définit classiquement la contrainte régnant dans le pilier à l'aide de la formule suivante :

$$\sigma_{AT} = \sigma_z = \frac{\gamma H_r}{1 - \tau}$$

Dans le but d'évaluer la stabilité des piliers, la démarche actuelle consiste à comparer  $\sigma_{AT}$  à la résistance uniaxiale  $Rc$  (généralement pondérée) du minerai. Elle statuera sur la stabilité ou sur la non stabilité en fonction de la valeur du coefficient de sécurité ( $Rc / \sigma_{AT}$ ) résultant de l'analyste. Dans l'analyse du comportement différé, la contrainte moyenne  $\sigma_{AT}$  sera intégrée dans l'équation de comportement (relation scalaire, dans le cadre de l'aire tributaire). Dans le cadre de l'analyse à la rupture, le critère de rupture adopté est celui de Mohr-Coulomb.

Comme nous pouvons l'observer, la démarche actuelle ne tient pas compte de la contribution mécanique du recouvrement qui peut, dans certaines configurations géométriques et mécaniques, soulager en terme d'effort, les piliers de la mine. Une autre remarque concerne les interactions agissantes aux extrémités des piliers. L'approche actuelle stipule qu'aucune contrainte de cisaillement n'agit sur ces extrémités, ce qui induit une surestimation excessive du déviateur des contraintes. Ces deux hypothèses, certes sécuritaires dans le cadre d'un dimensionnement d'ouvrage, ne sont pas justifiables dans le cadre d'une analyse menée sur des ouvrages anciens.

Dans le but d'améliorer la méthode de l'aire tributaire, tout en conservant sa simplicité, nous proposons d'appliquer deux facteurs correctifs, pour prendre en compte les effets du recouvrement et du frottement des piliers. L'expression de la contrainte moyenne corrigée, que nous proposons, est la suivante :

$$\bar{\sigma} = C_{RE} \times C_p \times \sigma_{AT}$$

Expression dans laquelle  $C_{RE} \leq 1$  est un facteur qui prend en compte la contribution mécanique du recouvrement, agissant uniquement sur la valeur de la contrainte (soulagement). Ce coefficient peut être considéré comme un *facteur de chargement*. L'autre facteur de correction  $C_p \leq 1$  est le coefficient qui prend en compte les effets mécaniques du frottement des piliers avec le toit et le mur de la mine. De par sa détermination il peut être assimilé à un *facteur de résistance*. En effet la valeur du coefficient  $C_p$  va déterminer l'intensité moyenne de la réduction à apporter au déviateur déduit de l'aire tributaire, et de ce fait va conditionner l'éloignement, du point représentatif de l'état de contrainte moyen, du critère de rupture (dans une analyse élastoplastique). L'expression ci-dessus est certainement plus parlante ou plus explicite, formulée de la manière suivante :

$$\bar{\sigma} = C_p \times C_{RE} \times \sigma_{AT}$$

L'intérêt d'une telle formulation réside dans sa forme scalaire d'où la simplicité d'utilisation. Dans toutes les analyses, élastoplastiques ou visco-élastoplastiques, la contrainte  $\bar{\sigma}$  se substituera dorénavant à la classique contrainte évaluée par la méthode de l'aire tributaire  $\sigma_{AT}$ . Dans la suite, nous supposons que  $C_{RE} = 1$  (recouvrement totalement pesant). La détermination de  $C_p$  est effectuée à l'aide de modélisations numériques par éléments finis sur un modèle de base (Fig. 1). Cette démarche est incontournable au vu du caractère non-linéaire et non homogène de ce problème aux limites évolutif.

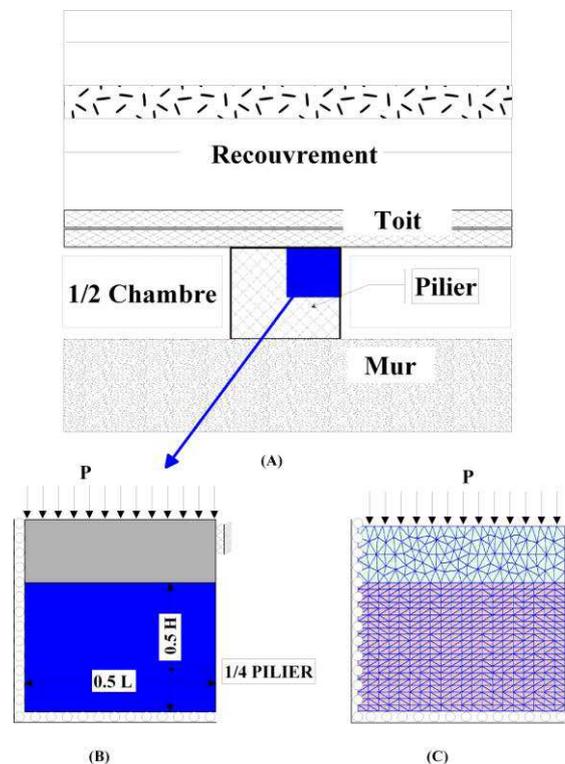


FIG. 1 – Coupe schématique transversale du recouvrement, chambres et piliers.

## 4 Détermination du facteur correctif $C_p$

La détermination de  $C_p$  se fait donc par le biais de modélisations numériques. Deux procédés sont adoptés. Dans une analyse à la rupture ou à l'endommagement, la sollicitation  $P$  au sommet du pilier est augmentée graduellement de manière continue jusqu'à la rupture de ce dernier pour la sollicitation  $\bar{P}$ , rupture caractérisée ou définie par la perte de convergence du procédé itératif. Aucune analyse à la bifurcation au sens de Rice [7] ou Hill [5] n'est considérée actuellement. Nous définissons le coefficient  $C_p$  par :

$$C_p = f(\phi, C, E, \nu, \lambda) = \frac{Rc}{\bar{P}} \text{ avec } \lambda = \frac{H}{L}$$

Une analyse paramétrique a montré que  $C_p$  dépendait uniquement de l'angle de frottement  $\phi$  et de l'élanement  $\lambda$  ;  $C_p = C_p(\phi, \lambda)$ . Dans une analyse du comportement des piliers de sel vis-à-vis du fluage, la sollicitation  $P$  est maintenue constante. Différentes intensités ont été choisies de manière à couvrir le plus large éventail possible de mines. Ayant admis que la viscoplasticité sans seuil du sel pouvait être correctement décrite par le modèle de Lemaitre, nous obtenons, après correction, l'expression scalaire suivante :

$$\bar{\varepsilon} = \frac{CV}{H} = \varepsilon^e + \varepsilon^{vp} = \frac{C_{RE} C_p \sigma_{AT}}{E} + \left( \frac{C_{RE} C_p \sigma_{AT}}{K} \right)^\beta t^\alpha$$

Expression dans laquelle  $CV$  représente la convergence (fermeture) de la hauteur de la mine. En présence de viscosité, le problème dépend naturellement de la variable *temps*. Il en est de même pour  $C_p$ . Au vu des différents paramètres du problème,  $C_p$  devrait naturellement dépendre de  $C_p = f(E, \nu, \lambda, \alpha, \beta, K, t)$ . Une analyse paramétrique a également été menée. Cette dernière a montré que  $C_p$  dépendait uniquement du temps  $t$  et de l'élanement  $\lambda$  ;  $C_p = C_p(t, \lambda)$ . Toutefois, la dépendance temporelle de  $C_p$  n'est limitée que pour le très court terme. Période où la composante élastique ( $\varepsilon^e$ ) de la déformation totale est prépondérante en comparaison à la déformation viscoplastique ( $\varepsilon^{vp}$ ). Avec le temps,  $C_p(t, \lambda)$  tend très rapidement vers une valeur asymptotique. En d'autres termes, pour les problèmes qui nous concernent, mines de sel relativement anciennes,  $C_p$  ne dépend uniquement que de l'élanement  $\lambda$ . A un instant  $t_n$  de l'histoire de la mine, la valeur  $C_p(t_n, \lambda)$ , est solution de :

$$\frac{C_p(t_n, \lambda) \sigma_{AT}}{E} + C_p(t_n, \lambda)^\beta \left( \frac{\sigma_{AT}}{K} \right)^\beta t_n^\alpha - \bar{\varepsilon}(t_n) = 0$$

Les figures ci-dessous montrent les coefficients de correction, en elastoplasticité et vis-à-vis du fluage.

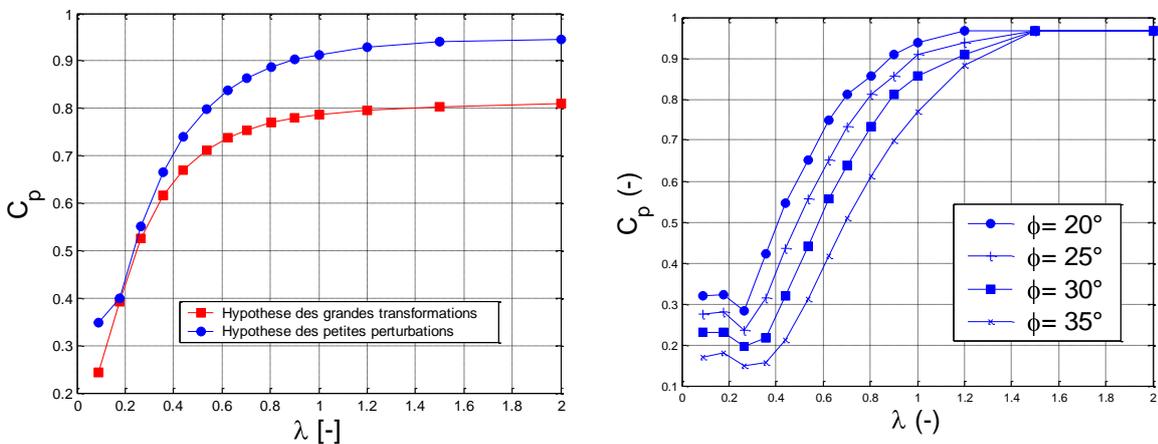


FIG. 2 – Coefficients de correction en viscoplasticité (gauche) et en plasticité (droite).

## 5 Exemples

Cet exemple concerne le cas réel d'une mine de sel exploitée dans l'Est de la France. Exploitée par chambres et piliers abandonnés, la mine présente dans un secteur (exploitée il y a environ un siècle) des piliers de 4,5 m de hauteur et des sections carrées 10 m × 10 m. Le taux de défrèvement  $\tau$  est de 75%. Cette partie est surmontée d'un recouvrement d'épaisseur 135 m. Un autre secteur de la mine, plus récent (70 ans) possède des piliers carrés de 15 m × 15 m et un recouvrement d'épaisseur 143 m. Un banc de sel à été laissé au toit de la mine. Des investigations menées *in situ* ont mesuré la vitesse de convergence actuelle, ainsi que les propriétés mécaniques du sel constituant le pilier. Des modélisations numériques par éléments finis ont été menées sur une partie du domaine (chambre, recouvrement, et pilier). La figure 3 montre les comparaisons entre les résultats des modélisations par éléments finis et ceux obtenus avec notre approche.

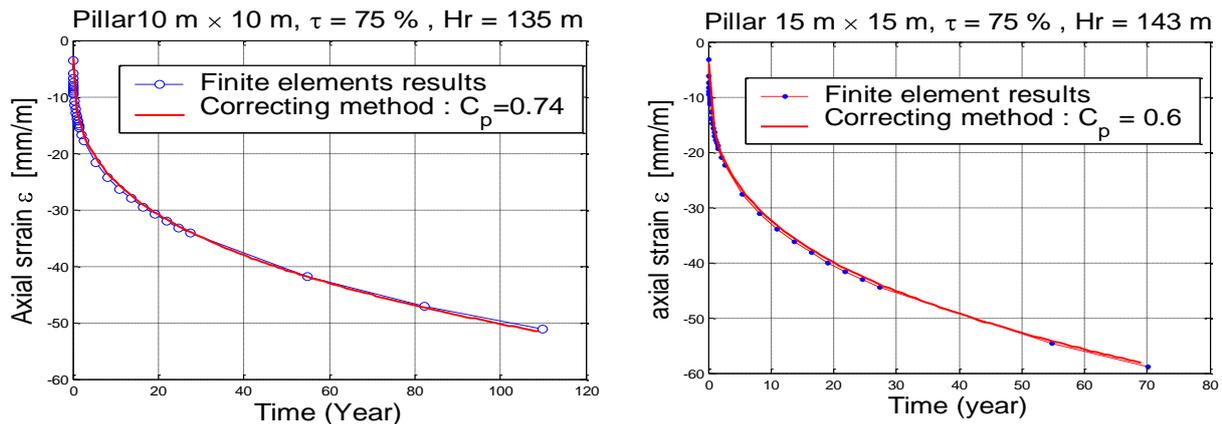


FIG. 3 – Comparaison de la déformation axiale (verticale). Résultats issus des modélisations par éléments finis et résultats issus de notre approche.

## 6 Conclusions

Comme nous pouvons l'observer sur la figure 3, à l'aide d'une approche semi-analytique, simple d'utilisation, nous obtenons une parfaite concordance entre les résultats issus de la méthode proposée et ceux issus de calculs complexes par éléments finis. La vitesse de convergence mesurée *in situ* dans les deux secteurs est respectivement de 0,148 mm/m/an et de 0,214 mm/m/an. A l'aide des abaques (Fig. 2) et des valeurs de  $\sigma_{AT}$ , nous obtenons, pour ces deux secteurs, les valeurs suivantes : 0,142 mm/m/an et 0,252 mm/m/an. L'approche a également montré toutes ses potentialités dans l'analyse de stabilité d'anciennes mines. Des études sont actuellement menées pour prendre en compte le rôle du haut-toit.

## Références

- [1] Cristescu N., Hunsche U. (1991), A constitutive equation for salt, 7<sup>th</sup> Int. Cong. Rock Mech., Aachen, Sept. 16-20, Balkema
- [2] Cristescu N., Hunsche U. (1998), Time effects in Rock Mechanics, Wiley.
- [3] Ghoreychi M. (1990) Conséquences du comportement thermomécanique du sel pour la conception et la sûreté d'un enfouissement de déchets radioactifs. Stockage en Souterrain, Presses des Ponts et Chaussées, 229-243.
- [4] Ghoreychi M., Daupley X. (2003). Devenir à long terme d'exploitations abandonnées de sel. Revue Française de Géotechnique, Vol. 106-107, 73-83.
- [5] Hill R. (1958). A general theory of uniqueness and stability in elastic-plastic solids. J. of Mech. and Phys. of solids, 6:239-249.
- [6] Lemaitre J., Chaboche (1988) J.L. Mécanique des matériaux solides. Dunod, Paris.
- [7] Rice J.R. (1974). The localisation of plastic deformation. Theoretical and applied mechanics, W.T. Koiter ed, North Holland, 207-220.
- [8] Vouille G., Tijani M., de Grenier F. (1981) Experimental determination of the rheological behavior of Tersanne rock salt. Proc. the First Conf. On "the Mechanical Behaviour of Salt", Pennsylvania State University.
- [9] VIPLEF version 011208, manuel d'utilisation, ENSMP, Paris