

MODELISATION DE L'ENDOMMAGEMENT D'UNE ROCHE AVEC INCLUSION DE MORTIER PAR RE-ANALYSE APRES MODIFICATION LOCALE DES MATRICES DE RIGIDITES

L. FATMI^[1] & J. M. BERTHELOT^[2]

[1] Laboratoire de Mécanique et Structures, Université du 8 mai 45, 24000 Guelma, Algérie.

[2] Institut d'Acoustique et de Mécanique, Groupe Composites et Structures Mécaniques, Université du Maine, Avenue Olivier Messiaen 72085 Le Mans cedex 9, France

Abstract

The insertion of a mortar inclusion into a rock subjected to compression results in a concentration of stress. The initiation of damage results from fracture of the mortar rock interface and from shear fracture of the rock near the interface. The shear fracture of rock does not seriously affect the stiffness of the test specimen.

Résumé

Dans le cas de l'inclusion de mortier dans une roche soumise à une compression, l'inclusion produit une concentration de contraintes. Il en résulte une initiation de l'endommagement par rupture en traction de l'interface mortier-roche et par rupture en cisaillement de la roche près de l'interface de part et d'autre de l'inclusion. Les ruptures essentiellement en cisaillement de la roche n'affectent pas de manière sensible la rigidité en compression de l'éprouvette.

1. Introduction

Ce travail a pour origine l'ensemble des travaux effectués au sein du Laboratoire Central des Ponts et Chaussées en collaboration avec le Laboratoire de Mécanique Productique et Matériaux, sur l'analyse de l'endommagement du béton par émission acoustique [1, 2]. Divers essais ont été considérés (essais de traction, essais de flexion 3-points, essais CT-compact tension) et adaptés à cette analyse. Seuls les résultats correspondant à la simulation de la roche colmatée soumise à une compression uniaxiale seront présentés dans ce papier. La fissuration est l'un des plus grands problèmes rencontrés dans les ouvrages de génie civil et minier. La solution la plus utilisée pour remédier à ce problème est l'injection de coulis à base de ciment ou de produit chimique à base de polymères. Les coulis de ciment auxquels on s'intéresse dans la présente étude sont utilisés pour le colmatage des fissures importantes pour étancher un massif rocheux fracturé ou pour stabiliser une structure fissurée. Ils sont aussi utilisés pour la consolidation des sols et rocs, le remplissage des cavités dans le roc et le scellement d'ancrages. Ces rôles deviennent de plus en plus importants dans les aménagements de génie civil et les projets de

stockage souterrain. Cependant, les zones injectées de coulis de ciment dans le cas de roches fracturées comme dans celui de l'interface d'un granulat dans le béton sont le siège de concentrations de contraintes à cause des différences dans les caractéristiques physiques et mécaniques des matériaux en présence. Une meilleure compréhension des phénomènes de dégradation requière une bonne connaissance de l'endommagement local et de son évolution en fonction des charges appliquées. Par ailleurs les résultats obtenus font apparaître que les phénomènes d'initiation et de propagation de l'endommagement sont fortement influencés par la répartition statistique des hétérogénéités du matériau étudié. Parallèlement à ces travaux, nous avons mis au point des moyens d'analyse de structures par éléments finis. La méthode des éléments finis est l'outil usuel d'analyse du comportement mécanique des structures : analyse dans le domaine élastique des structures complexes, analyse du comportement élasto-plastique déduit du comportement local des matériaux, analyse de l'endommagement par modélisation de la fissure à l'aide des éléments situés à la surface de contact des éléments ayant servis à la discrétisation de la structure [3], ou par modélisation

stochastique de l'endommagement [4]. L'ensemble des résultats obtenus par la modélisation montre l'aptitude de la démarche considérée à décrire les phénomènes de comportement et d'endommagement des matériaux hétérogènes sollicités en compression uniaxiale et leur concordance à ceux obtenus par expérience [5].

2. Problème posé

Considérons une structure en éléments finis (i), soumise aux conditions aux limites suivantes : encastrement d'un coté et chargement en force ou déplacement imposé de l'autre coté (figure 1).

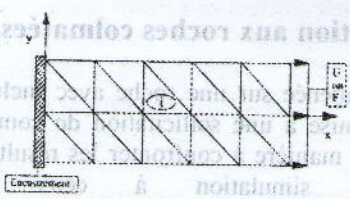
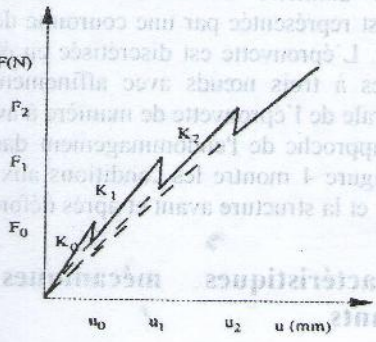
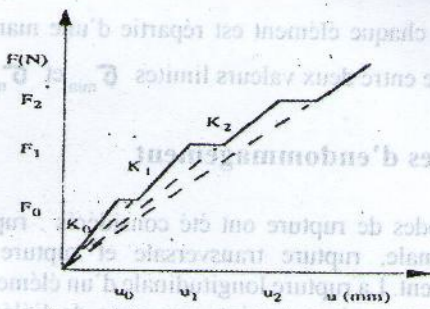


Figure 1 Structure et conditions aux limites.

A chaque élément (i) est attribué une résistance locale aléatoire $\sigma_u(i)$. Le calcul de la structure sous l'une des deux conditions aux limites donne les champs de contraintes $\sigma(i)$ et de déformations $\epsilon(i)$. La localisation de l'élément le plus contraint de la structure est déterminée par la recherche du maximum de $\sigma(i)_x / \sigma_u(i)_x$, $\sigma(i)_y / \sigma_u(i)_y$ ou de $\sigma(i)_{xy} / \sigma_u(i)_{xy}$ et donc de sa direction de rupture x, y ou xy de l'élément (i). On modifie ces caractéristiques mécaniques locales et on recalcule la structure de nouveau. Ce processus continue jusqu'à la rupture finale de l'éprouvette. Le comportement global de la structure peut être décrit par le tracé de la courbe enveloppe des différents points obtenus au cours du calcul de la structure selon l'un des deux schémas (figure 2).



a) déplacement imposé



b) force imposée

Figure 2 : Modèles de comportement

3. Discretisation de la structure

Dans le cadre de ce travail, nous nous sommes limités à traiter le problème à deux dimensions et à étudier la faisabilité de la méthode. Des éléments 2D de types triangle à trois nœuds (trim3) et quadrilatère à quatre nœuds (quam4) ont été utilisés pour la discrétisation de la structure.

4. Caractéristiques élastiques d'un matériau

Dans un schéma élastique à deux dimensions (1, 2), le comportement élastique d'un matériau relie les contraintes σ_{11} , σ_{22} et σ_{12} aux déformations ϵ_{11} , ϵ_{22} et ϵ_{12} . Dans le cas où le matériau est isotrope, le comportement élastique du matériau est caractérisé par son module d'Young (E) et par son coefficient de Poisson (ν). Pour un état de contraintes planes, la relation contraintes-déformations s'écrit :

$$\begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{12} \end{bmatrix} = \frac{E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1-\nu & \nu & 0 \\ \nu & 1-\nu & 0 \\ 0 & 0 & 2(1-\nu) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_{11} \\ \epsilon_{22} \\ \epsilon_{12} \end{bmatrix} \quad (2)$$

Dans le cas d'un état de déformations planes :

$$\begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{12} \end{bmatrix} = \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 2(1-\nu) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \epsilon_{11} \\ \epsilon_{22} \\ \epsilon_{12} \end{bmatrix} \quad (2)$$

5. Modélisation de l'hétérogénéité du matériau

Pour tenir compte de l'existence des microfissures, des porosités et des hétérogénéités des constituants du matériau (nature, formes et répartition etc...), nous avons considéré que la contrainte à la rupture maximale, selon les axes principaux σ_{11} et σ_{22} et

MODELISATION DE

σ_{12u} de chaque élément est répartie d'une manière statistique entre deux valeurs limites $\sigma_{\min}$ et $\sigma_{\max}$.

6. Modes d'endommagement

Trois modes de rupture ont été considérés : rupture longitudinale, rupture transversale et rupture par cisaillement. La rupture longitudinale d'un élément se produit lorsque la contrainte moyenne de l'élément σ_{11} atteint la contrainte à la rupture σ_{11u} . Après rupture, l'élément ne peut transmettre les contraintes longitudinales et le comportement de l'élément se réduit dans le cas d'un schéma de contraintes planes à :

$$\begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{12} \end{bmatrix} = \frac{E}{1-\nu^2} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-\nu}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{12} \end{bmatrix} \quad (3)$$

La rupture transversale se produit lorsque la contrainte moyenne de l'élément σ_{22} atteint la contrainte à la rupture σ_{22u} de l'élément. Après rupture, l'élément ne peut transmettre les contraintes transversales et le comportement de l'élément se réduit à :

$$\begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{12} \end{bmatrix} = \frac{E}{1-\nu^2} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-\nu}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{12} \end{bmatrix} \quad (4)$$

La rupture en cisaillement d'un élément se produit lorsque la contrainte moyenne de l'élément σ_{12} atteint la contrainte à la rupture σ_{12u} de l'élément. Après rupture, l'élément ne peut plus transmettre ni contraintes longitudinales, ni contraintes transversales. La matrice de rigidité de l'élément est réduite à :

$$\begin{bmatrix} \sigma_{11} \\ \sigma_{22} \\ \sigma_{12} \end{bmatrix} = \frac{E}{1-\nu^2} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \varepsilon_{11} \\ \varepsilon_{22} \\ \varepsilon_{12} \end{bmatrix} \quad (5)$$

7. Résolution numérique du problème

Avant modification locale de la matrice de rigidité, la relation matrice de chargement F en fonction de la matrice des déplacements U s'écrit sous la forme :

$$F = K U \quad (6)$$

où K est la matrice de rigidité globale de la structure. Soit dK une variation de K provoquant une variation dU de U, sans que F soit affectée. Il vient :

$$(K + dK) (U + dU) = F \quad (7)$$

Le développement de (7) conduit à :

$$K U + K dU + dK U + dK dU = F \quad (8)$$

En retranchant (6) de (8) on a :

$$K dU + dK U + dK dU = 0 \quad (9)$$

d'où

$$K dU = -dK (U + dU) \quad (10)$$

L'expression (10) est analogue à (6) avec K connue, dK connue, U connue et dU inconnue. Elle est résolue par une méthode itérative avec un critère d'arrêt des itérations de la forme :

$$\frac{\|dU_{n+1} - dU_n\|}{\|dU_n\|} \leq \varepsilon \quad (11)$$

avec n et n + 1 numéros de deux itérations successives et ε un critère de précision.

8. Application aux roches colmatées

L'étude est menée sur une roche avec inclusion de mortier soumise à une sollicitation de compression uniaxiale de manière à confronter les résultats issus de notre simulation à ceux obtenus expérimentalement par émission acoustique [5]. L'éprouvette étudiée est prismatique de dimensions 200*200*20 mm³ (figure 3).

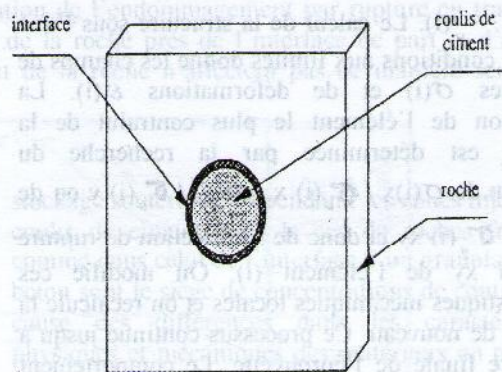


Figure 3 Eprouvette modélisant la roche injectée

La roche contient une inclusion cylindrique de mortier de diamètre 20 mm. L'interface roche inclusion est représentée par une couronne de 1 mm d'épaisseur. L'éprouvette est discrétisée en éléments triangulaires à trois nœuds avec affinement de la partie centrale de l'éprouvette de manière à avoir une meilleure approche de l'endommagement dans cette zone. La figure 4 montre les conditions aux limites appliquées et la structure avant et après déformation.

9. Caractéristiques mécaniques des constituants

Les caractéristiques mécaniques de la roche et du mortier ont été déterminées à partir des essais réalisés au Laboratoire de Mécanique des Roches du Département de Génie Civil de l'Université de

Sherbrooke par N. Feknous [5]. Les caractéristiques mécaniques de l'interface ne sont pas directement accessibles par les essais : la nature de l'interface impose des caractéristiques mécanique inférieures à celles du coulis et de la roche. Les valeurs de ces caractéristiques sont reportées sur le tableau 1.

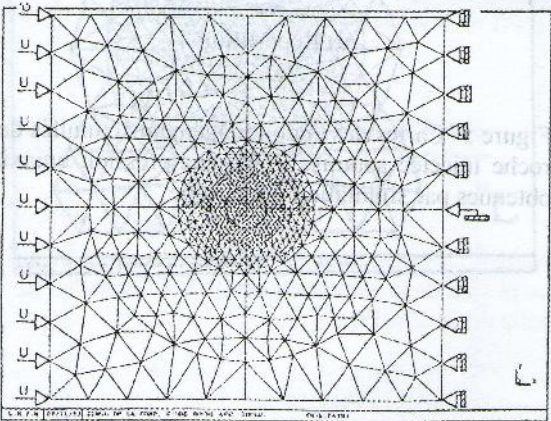
	E (GPa)	ν	σ_{ur} (MPa)
Roche	60,0	0,15	8,0
Coulis	15,0	0,2	4,0
Interface	8,0	0,2	2,0

Tableau 1 : Caractéristiques mécaniques des différents constituants [5].

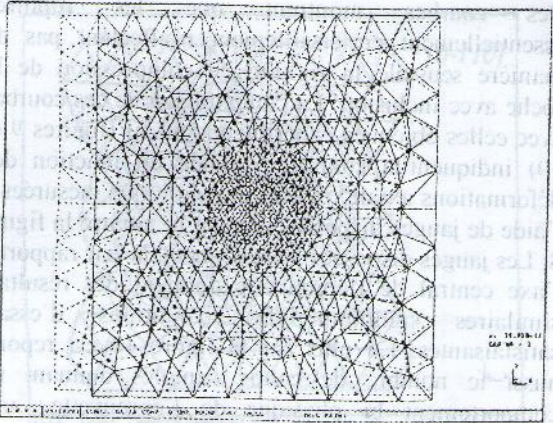
Les valeurs des contraintes à la rupture utilisées pour chacun des constituants sont regroupées dans le tableau 2, avec σ_{1ur} la contrainte à la rupture de la roche, σ_{11ur} la contrainte à la rupture de l'interface et σ_{11uc} la contrainte à la rupture du coulis de mortier. Pour chaque constituant, quatre répartitions différentes des contraintes à la rupture dans l'éprouvette sont considérées. Ces distributions sont générées à l'aide d'une fonction temps liée à l'heure du début de calcul. Ainsi, chaque lancement de calcul correspond à une distribution particulière des contraintes à la rupture dans l'éprouvette.

Roche	$4,0 \leq \sigma_{1ur} \leq 12,0$ Mpa
Interface	$0,5 \leq \sigma_{11ur} \leq 3,5$ Mpa
Coulis de mortier	$2,0 \leq \sigma_{11uc} \leq 6,0$ MPa

Tableau 2 : Contraintes de ruptures des différents constituants [5].



a) Maillage et conditions aux limites



b) Structure et déformée de l'éprouvette

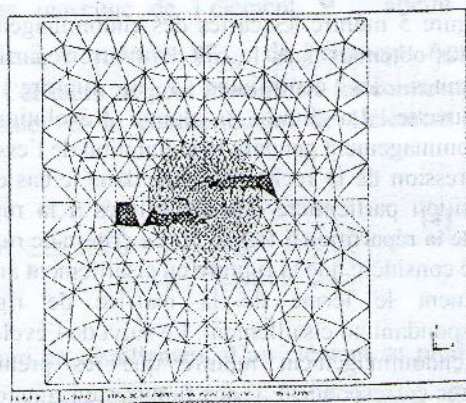
Figure 4 Conditions aux limites et structure avant et après chargement en compression uniaxiale.

10. Analyse des résultats de la simulation

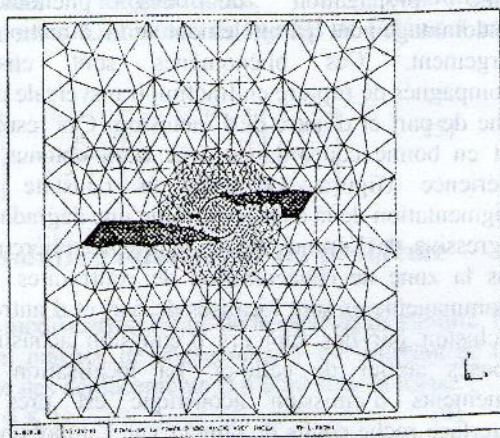
La figure 5 montre les cartes des endommagements cumulés obtenues dans le cas de quatre répartitions différentes des contraintes à la rupture dans l'éprouvette. La figure 6 donne l'évolution de l'endommagement pendant la simulation de l'essai de compression de la roche colmatée dans le cas d'une répartition particulière des contraintes à la rupture (cas de la répartition 3 figure 5). Le critère de rupture utilisé considère que la rupture en cisaillement annule seulement le terme de la matrice de rigidité correspondant au cisaillement. Le suivi de l'évolution de l'endommagement montre que les premières ruptures correspondent à des ruptures en traction de l'interface et à des ruptures en cisaillement de la roche près de l'interface initiées de part et d'autre de l'inclusion de mortier. Cette initiation est suivie d'une propagation de ces phénomènes d'endommagement parallèlement à la direction de chargement. Ces phénomènes sont ensuite accompagnés de rupture en traction transversale de la roche de part et d'autre de l'inclusion. Ces résultats sont en bonne concordance avec ceux obtenus par expérience (figure 11), où on constate que l'augmentation de la charge entraîne une dégradation progressive de l'éprouvette et plus particulièrement dans la zone de concentration de contraintes. Ces endommagements sont localisés de part et d'autre de l'inclusion par des capteurs d'émission acoustique disposés autour de celle-ci. La localisation des événements d'émission acoustique est près de l'interface roche coulis de ciment vue l'impossibilité de la détection d'E.A sur une interface de l'ordre du micron, tandis que l'erreur de la localisation est de l'ordre du millimètre.

Les courbes de comportement charges déplacements correspondants aux cartes d'endommagements cumulés de la figure 5 sont reportées sur la figure 7.

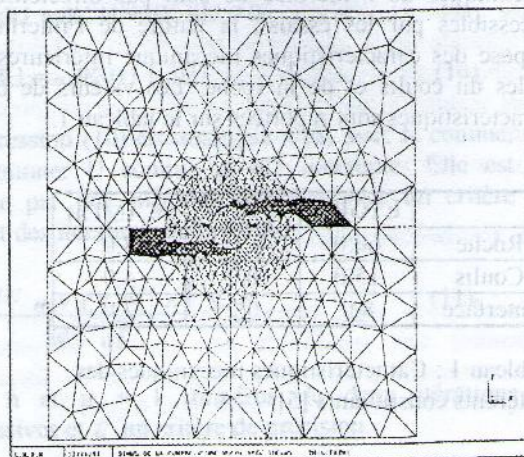
Ces courbes montrent que les ruptures essentiellement en cisaillement n'affectent pas de manière sensible la rigidité en compression de la roche avec inclusion. La comparaison de ces courbes avec celles obtenues expérimentalement (figures 9 et 10) indiquent la contrainte axiale en fonction des déformations axiale, radiale et volumique mesurées à l'aide de jauges disposées comme le montre la figure 8. Les jauges disposées symétriquement par rapport à l'axe central de l'éprouvette donnent des résultats similaires signifiant des conditions d'essais satisfaisantes. En plus sur la figure 10 est reporté aussi le nombre de coups cumulés donnant un comportement biphasique de l'éprouvette : une première phase durant laquelle le taux d'émission acoustique est constant et une deuxième durant laquelle on enregistre un accroissement du taux d'émission acoustique jusqu'à la rupture. La valeur moyenne calculée du module de Young à partir des courbes de simulation est de l'ordre de 58 GPa alors que celle obtenue expérimentalement par émission acoustique est de 60 GPa.



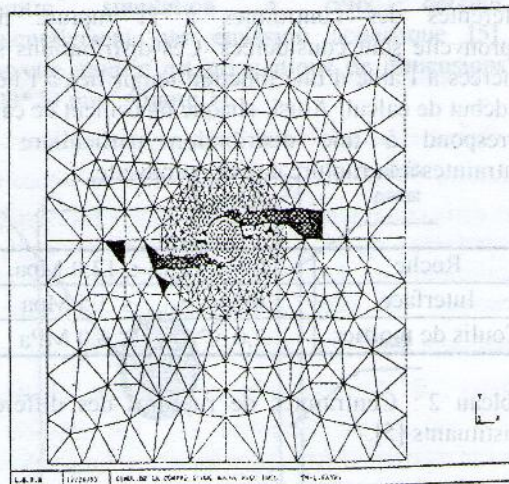
a) Répartition 1



b) Répartition 2



c) Répartition 3



d) Répartition 4

Figure 5 Cartes des endommagements cumulés de la roche injectée soumise à une compression uniaxiale obtenues par simulation numérique.

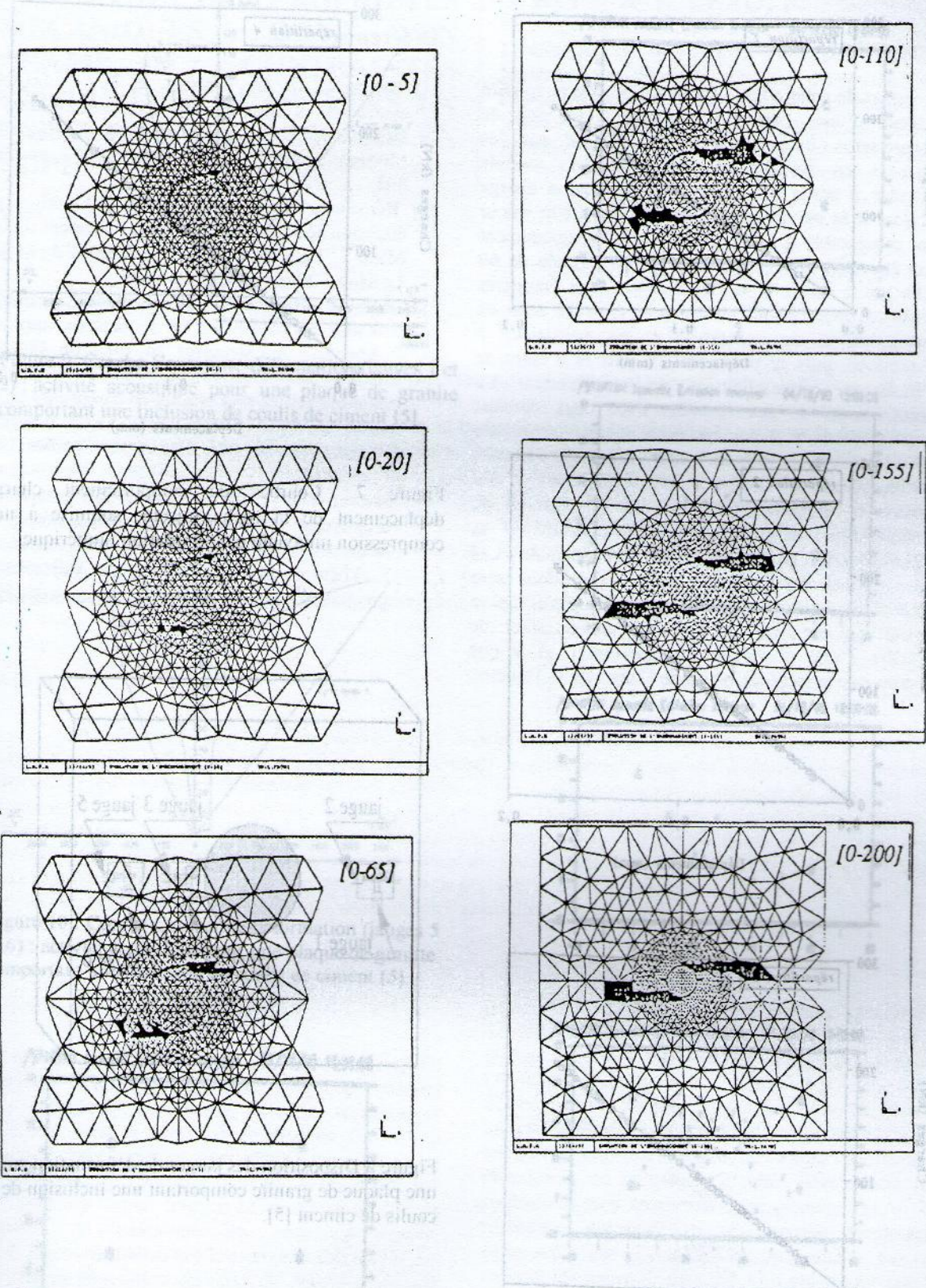


Figure 6 Evolution de l'endommagement de la roche injectée soumise à une compression uniaxiale par simulation numérique (cas de la répartition 3 de la figure 5).

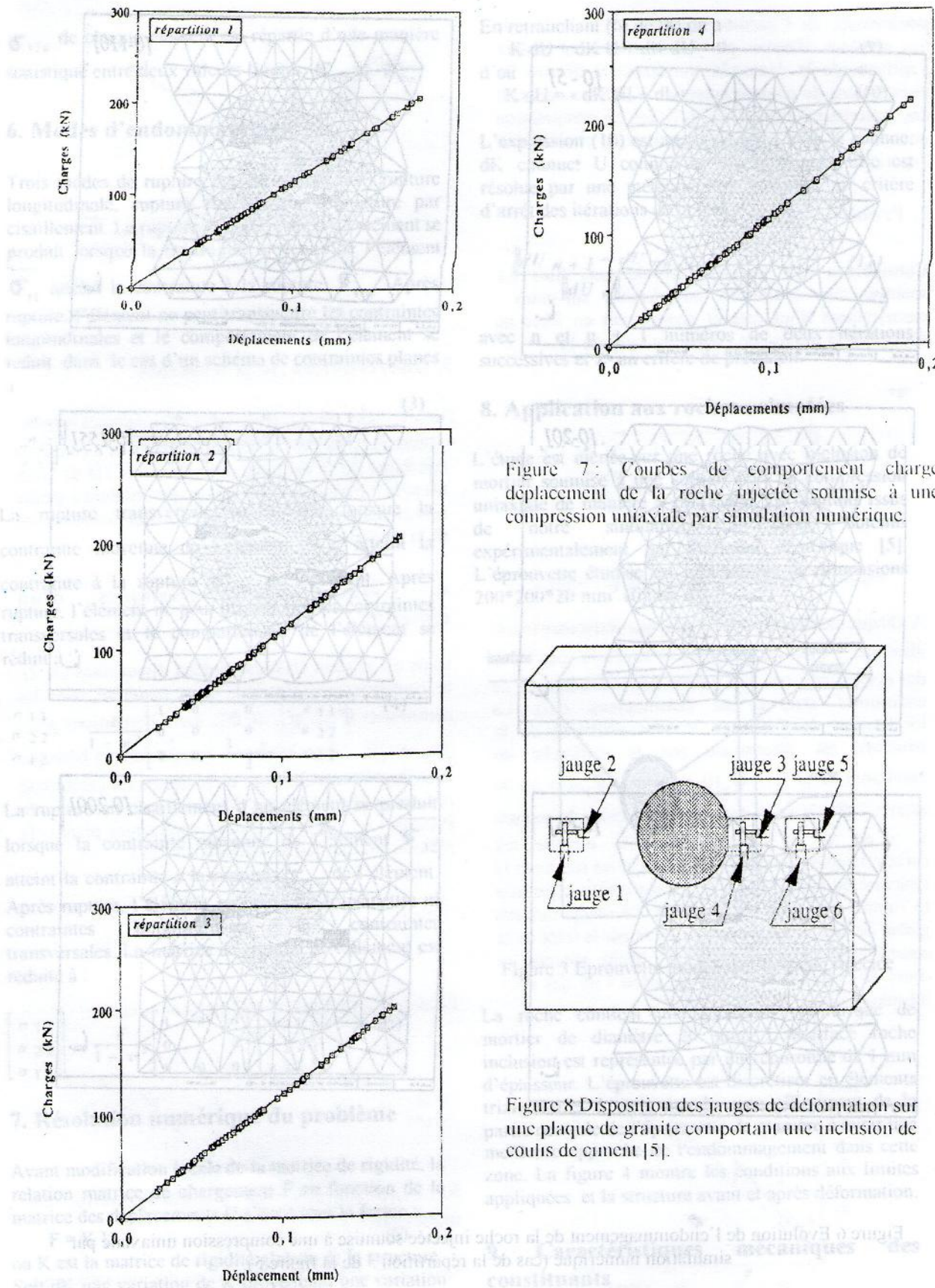


Figure 7 : Courbes de comportement charge déplacement de la roche injectée soumise à une compression uniaxiale par simulation numérique.

Figure 8 Disposition des jauges de déformation sur une plaque de granite comportant une inclusion de coulis de ciment [5].

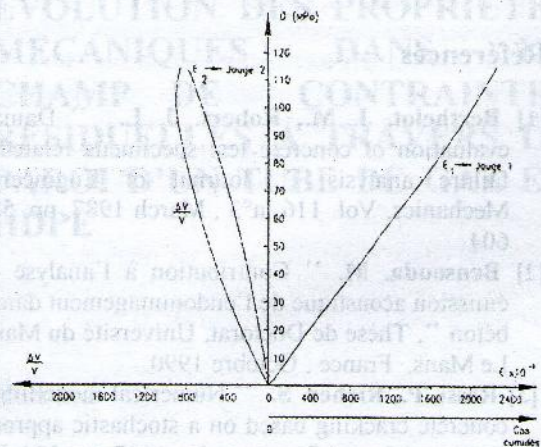


Figure 9. Courbe Contrainte-déformation (jauges 1 et 2) : activité acoustique pour une plaque de granite comportant une inclusion de coulis de ciment [5].

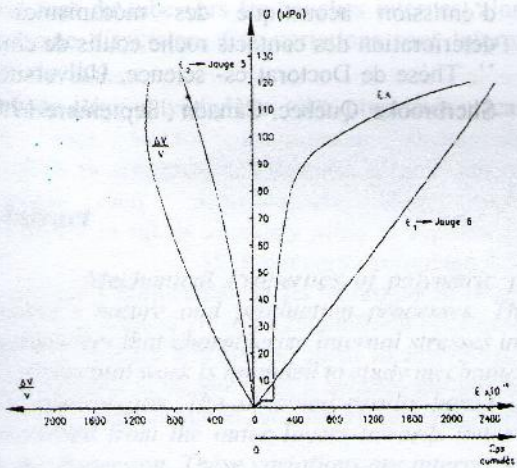


Figure 10 : Courbe Contrainte-déformation (jauges 5 et 6) : activité acoustique pour une plaque de granite comportant une inclusion de coulis de ciment [5].

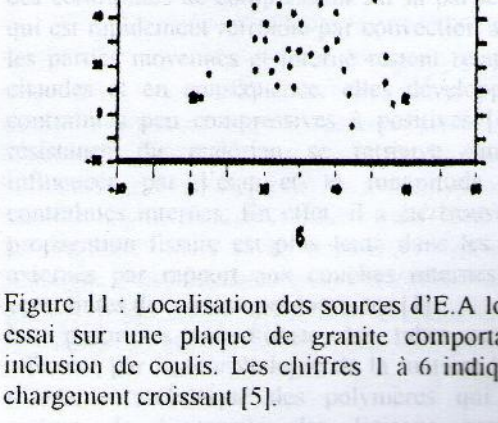
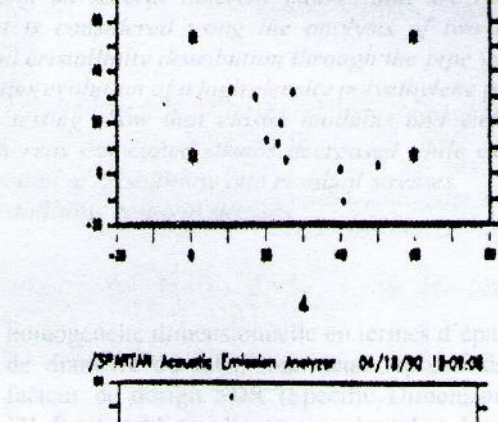
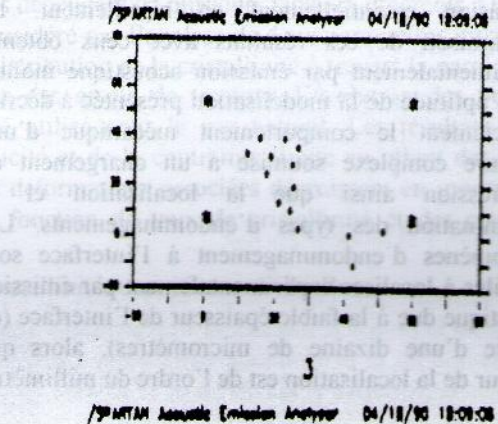
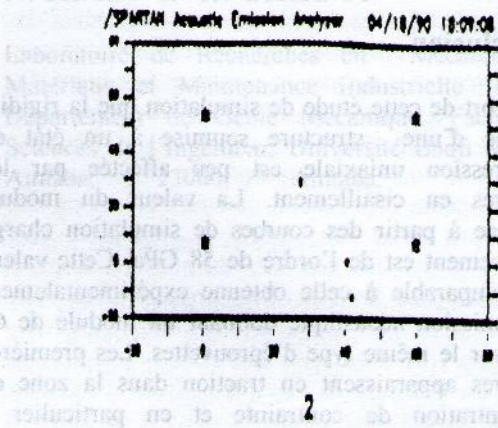
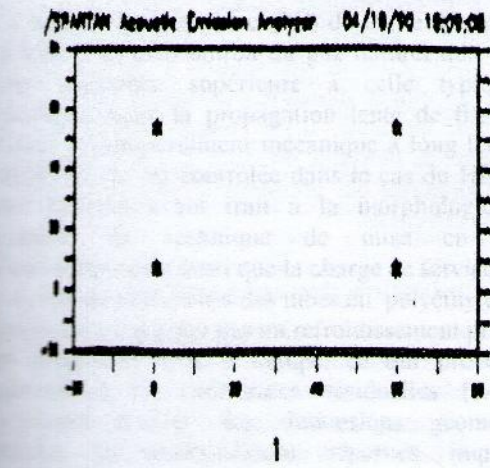
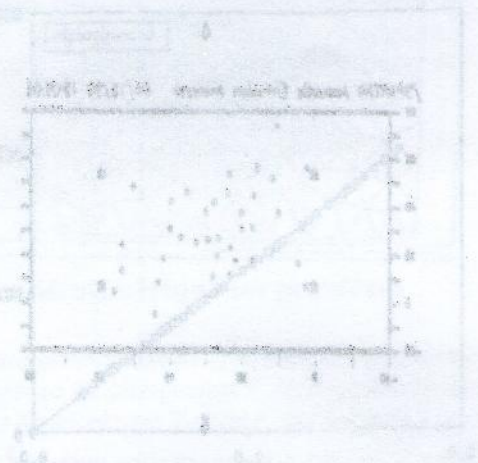
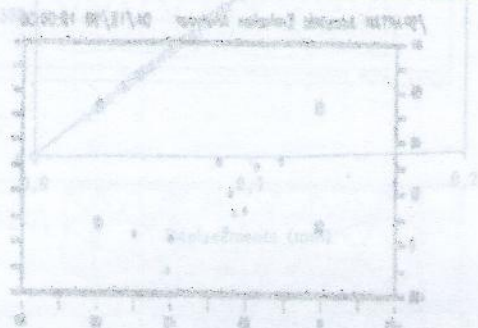


Figure 11 : Localisation des sources d'E.A lors d'un essai sur une plaque de granite comportant une inclusion de coulis. Les chiffres 1 à 6 indiquent un chargement croissant [5].

Conclusion

Il ressort de cette étude de simulation que la rigidité globale d'une structure soumise à un état de compression uniaxiale est peu affectée par les ruptures en cisaillement. La valeur du module calculée à partir des courbes de simulation charge déplacement est de l'ordre de 58 GPa. Cette valeur est comparable à celle obtenue expérimentalement par émission acoustique donnant un module de 60 GPa sur le même type d'éprouvettes. Les premières ruptures apparaissent en traction dans la zone de concentration de contrainte et en particulier à l'interface, puis se propagent de part et d'autre de l'inclusion essentiellement en cisaillement. La comparaison de ces résultats avec ceux obtenus expérimentalement par émission acoustique montre bien l'aptitude de la modélisation présentée à décrire correctement le comportement mécanique d'une structure complexe soumise à un chargement de compression ainsi que la localisation et la détermination des types d'endommagements. Les phénomènes d'endommagement à l'interface sont difficiles à localiser expérimentalement par émission acoustique due à la faible épaisseur de l'interface (de l'ordre d'une dizaine de micromètres), alors que l'erreur de la localisation est de l'ordre du millimètre.



Références

- [1] Berthelot, J. M., Robert, J. L. " Damage evaluation of concrete test specimens related to failure analysis ", Journal of Engineering Mechanics, Vol. 116, n°3, March 1987, pp. 587-604.
- [2] Bensouda, M. " Contribution à l'analyse par émission acoustique de l'endommagement dans le béton ", Thèse de Doctorat, Université du Maine, Le Mans, France, Octobre 1990.
- [3] Rossi, P., Richer, S. " Numerical modelling of concrete cracking based on a stochastic approach ", Materials and Structures, 20, 1987, pp. 334-337.
- [4] Breysse, D. " Numerical study of the effect of inhomogeneities and boundary conditions on the tensile strength of concrete ", ACI, Materials Journal, Vol. 88, n°5, September-October 1991, pp. 489-497.
- [5] Feknous, N. " Etude à l'aide de la technique d'émission acoustique des mécanismes de détérioration des contacts roche coulis de ciment ", Thèse de Doctorat es- science, Université de Sherbrooke, Québec, Canada, Septembre 1991.

