

# Processus de rupture dans les roches fragiles : déformations, variations de perméabilité et émission acoustique

Mokhfi Takarli

Laboratoire de Génie Civil et Génie Mécanique - INSA de Rennes - 20 Avenue des Buttes de Coësmes 35043 Rennes cedex

---

*RESUME.* Cette étude a été consacrée à la caractérisation du comportement sous charge de différentes roches granitiques par identification des caractères généraux de leurs processus de rupture. Des échantillons de roches ont été soumis à cet effet, à des essais de compression uniaxiale avec enregistrement simultané des déformations, des variations de perméabilité et des événements acoustiques. L'analyse des résultats obtenus a permis d'identifier plusieurs phases et seuils qui ponctuent le processus de rupture sous contrainte compressive. La résistance des roches étudiées est intimement liée aux seuils de microfissuration définis au cours de cette analyse.

*MOTS-CLÉS :* Processus de rupture, Microfissuration, Granite.

---

---

*ABSTRACT.* In this paper, failure process in granitic rocks under compressive loading is investigated. Samples was subjected to uniaxial compressive test with simultaneous measurements of deformations, permeability variations end acoustic emission. Based on the deformations -stress curves, permeability-stress and curve and histograms of acoustic energy a number of stages and fields of micro-cracks development under mechanical loading are highlighted. It was also shown that there is a good correlation between the ultimate strength of the samples and theirs microcracks thresholds.

*KEYWORDS :* Failure process, Microcracks, Granite.

---

## 1. INTRODUCTION

L'essai de compression uniaxiale permet de déterminer la résistance à la compression et les caractéristiques élastiques d'un matériau (le module de Young et le coefficient de Poisson). Cet essai, simple à mettre en oeuvre et associé à des techniques d'observations, se prête également à l'étude du phénomène de fissuration. Plusieurs auteurs l'ont utilisé pour suivre le développement progressif de la microfissuration et son rôle déterminant sur le comportement fragile des roches ([Raynaud, 1995](#) ; [Menendez et al., 1996](#) ; [Nishiyama et al., 2002](#) ; [Seo et al., 2002](#)). A partir d'examen microscopiques de lames minces prélevées dans des cylindres de roches déformés en compression simple ou en chargement tri-axial, ces chercheurs ont essayé de caractériser la distribution et l'organisation des divers micromécanismes de rupture identifiables. Cependant, avec les méthodes optiques directes, il est nécessaire de tester plusieurs échantillons soumis à un état de contrainte maximale différent et observer le réseau de microfissures correspondant. La technique de préparation des échantillons en vue d'une observation directe des microfissures est une méthode destructive et peut perturber l'état de la roche.

Dans le cas d'endommagement induit par un chargement mécanique, les méthodes indirectes sont plus avantageuses. Elles permettent de mesurer sur un seul échantillon l'évolution de la microfissuration au cours du chargement. Ces méthodes indirectes consistent à mesurer les propriétés des roches perturbées par la présence de discontinuités : mesure de la vitesse de propagation d'ondes ultrasoniques, mesure de l'émission acoustique, mesure de la perméabilité ... etc. Dans cette étude, nous nous sommes intéressés à la caractérisation du comportement sous charge de plusieurs roches granitiques par mesures simultanées des déformations, des variations de perméabilité et l'enregistrement des événements acoustiques.

## 2. MATERIAUX ET PROCEDURE EXPERIMENTALE

### 2.1. MATERIAUX

Les échantillons étudiés ont été prélevés sur quatre sites granitiques différents situés dans le Sud de la France (E.F1, G.F2, G.F3 et P.F2). La composition minéralogique de ces roches a été déterminée par la technique de la double coloration de la surface des feldspaths (Laniz et al., 1964). Les résultats obtenus sont présentés sur la figure 1. Les roches ont été également caractérisées par la détermination de la taille moyenne des grains minéraux. La méthode utilisée consistait à déterminer le rayon d'un cercle ayant une surface équivalente à celle du grain analysé (Prikryl, 2001). Les résultats obtenus ont montré que les tailles des grains des échantillons E.F1 et G.F2 sont relativement proches ( $d \approx 0,63\text{mm}$  et  $d \approx 0,66\text{mm}$ ). Les échantillons G.F3 sont constitués de grains plus fins ( $d \approx 0,43\text{mm}$ ) alors que les échantillons P.F2 comportent des gros cristaux d'orthose de taille centimétrique (1 à 2 cm) noyés dans une matrice composée principalement de quartz et de plagioclases.

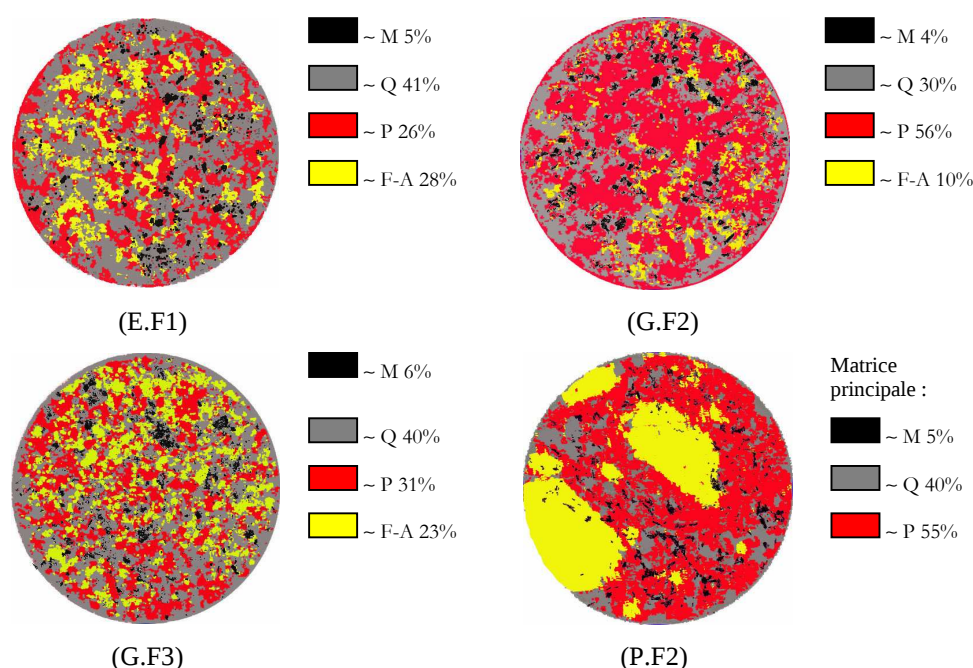


Figure 1 : Analyse pétrographique des roches étudiées, diamètre des éprouvettes est de 40mm.

## 2.2. PROCEDURE EXPERIMENTALE

Les essais de compression sont réalisés à une vitesse de chargement constante de l'ordre de 9kN/min ce qui vaut approximativement à 7MPa/min pour des éprouvettes Ø40×H60 mm. Chaque éprouvette étudiée est instrumentée de jauges de déformations collées dans le sens longitudinal et le sens transversal.

Lors des essais, la perméabilité au gaz est mesurée parallèlement à l'axe de compression qui est la direction préférentielle de la fissuration de l'échantillon. Dans ce cas, il convient d'assurer le passage du gaz à travers les faces inférieure et supérieure de l'éprouvette tout en exerçant la compression sur ces faces. Pour cela, le piston et l'embase inférieure de la cellule de perméabilité sont munis de stries radiales et diamétrales dont la profondeur et la largeur sont inférieures à 1mm. Ces stries assurent une bonne répartition du gaz sur la face de percolation et une collecte optimale du flux gazeux à la sortie de l'échantillon de mesure.

Pour les mesures acoustiques, un capteur piézoélectrique est fixé par un support fileté dans le métal de la pièce de compression supérieure qui est appliquée sur l'éprouvette. Les bruits collectés par le capteur acoustique peuvent venir des microruptures, mais aussi de bruits de surface ou de l'appareillage de compression. Pour estimer l'importance de ces derniers, nous avons remplacé l'éprouvette de roche par une éprouvette d'acier et constaté l'absence totale de bruits jusqu'à des charges très élevées. On peut donc estimer que les bruits au contact des plateaux ainsi que les bruits du système de compression sont négligeables. Les bruits très faibles (microbruits) produits par l'ouverture des microdiscontinuités doivent toujours être amplifiés. Le système acoustique réalisé comprend donc des dispositifs de détection, d'amplification et d'enregistrement.

## 3. RESULTATS ET DISCUSSIONS

### 3.1. ANALYSE DES COURBES CONTRAINTE - PERMEABILITE

Les courbes donnant l'évolution de la perméabilité ou du débit gazeux en fonction de l'augmentation de la contrainte mécanique présentent une allure générale qui comporte souvent quatre phases (voir figure 2). Ces phases sont liées au développement de la fissuration connectée et leurs importances relatives diffèrent suivant la nature de la roche. La première phase (I),  $\sigma < \sigma_{k-s}$ , correspond à une diminution de la perméabilité lorsque la contrainte mécanique augmente. La deuxième phase (II),  $\sigma_{k-s} < \sigma < \sigma_{k-caol}$ , est un domaine intermédiaire où la perméabilité reste quasi-constante malgré l'augmentation de la contrainte. La troisième phase (III),  $\sigma_{k-caol} < \sigma < \sigma_{k-pi}$ , correspond à une augmentation progressive de la perméabilité. La dernière phase (IV),  $\sigma > \sigma_{k-pi}$ , est la partie critique du comportement de la roche sous charge où la perméabilité varie plus significativement.

### 3.2. ANALYSE DES COURBES CONTRAINTE - DEFORMATIONS

L'analyse des courbes contrainte-déformations obtenues à partir des essais de compression uniaxiale permet également d'identifier un certain nombre de phases caractérisant le processus de microfissuration (voir figure 2). Les courbes contrainte-déformations axiales ont une portion de courbe initialement concave avant de devenir linéaire au point  $\sigma_{cc}$ . Cette phase correspond à la fermeture initiale des pores et des microfissures préexistantes. La deuxième phase correspond à la phase linéaire de la courbe contrainte-déformations ( $\sigma > \sigma_{cc}$ ). La quatrième phase marque le début de l'amorçage et

la propagation stable de la microfissuration à partir de la contrainte  $\sigma_{ci}$ . Elle se caractérise par la perte de linéarité de la courbe contrainte-déformation transversale ou radiale. Cependant, à ce stade de déformation les courbes contrainte-déformations axiales sont encore linéaires. La dernière phase marque le début de la propagation instable de la microfissuration ; elle débute au point de virage ( $\sigma_{cd}$ ) sur la courbe contrainte-déformation volumique.

### 3.3. SYNTHÈSE DU COMPORTEMENT SOUS CHARGE ET APPORT DE L'ÉMISSION ACOUSTIQUE

Dans les paragraphes précédents nous avons examiné le comportement des matériaux d'une part à l'aide de la courbe contrainte-perméabilité et d'autre part à l'aide des courbes contrainte-déformations. Dans chaque cas nous avons identifié des points singuliers qui caractérisent l'endommagement progressif du matériau. Nous nous proposons de faire la synthèse de ces deux modes de caractérisation en les complétant par les données des événements acoustiques enregistrés simultanément au cours du chargement des éprouvettes. Sur la [figure 2](#), nous avons mis côte à côte les différentes courbes obtenues au cours du chargement. Nous avons d'autre part représenté sur la [figure 3](#) les événements acoustiques enregistrés simultanément au cours de l'essai. Les microbruits ont été enregistrés chaque 100ms avec une fréquence d'échantillonnage de l'ordre de 20 Mhz. Chaque signal ainsi enregistré, est ensuite intégré pour déterminer l'énergie acoustique libérée lors de la fissuration de l'échantillon.

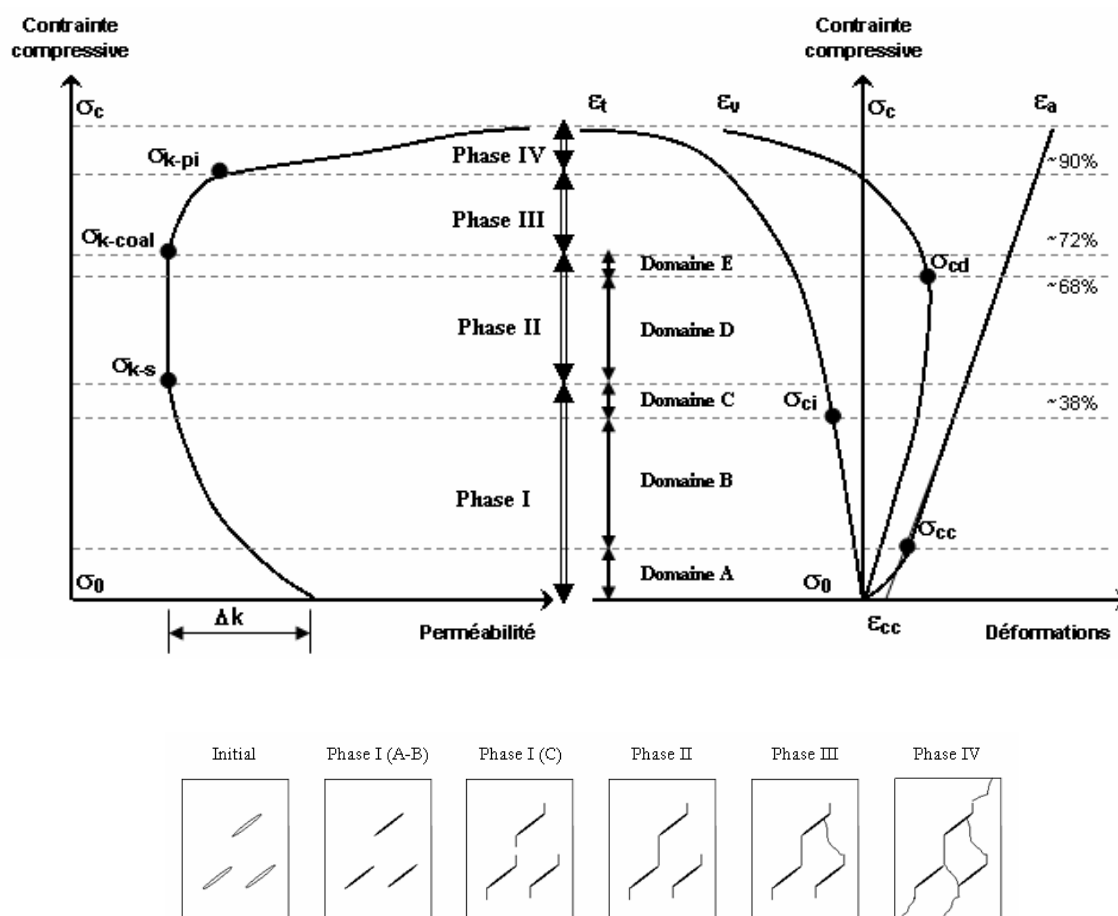


Figure 2 : Les différentes phases de microfissuration déterminées à partir de l'analyse des mesures sous charge.

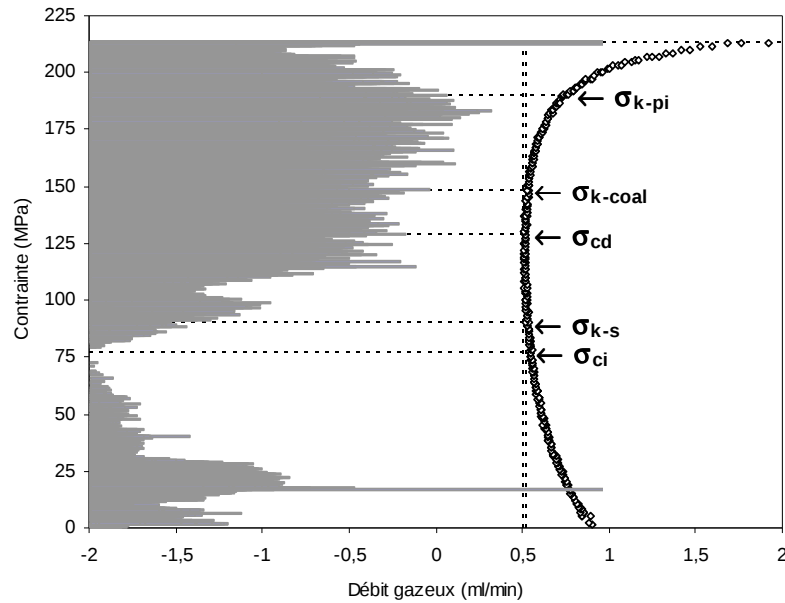


Figure 3 : Courbe contrainte - perméabilité et histogramme acoustique pour un échantillon de granite chargé en compression uniaxiale.

Ces trois graphiques illustrent parfaitement la nécessité de recourir à une caractérisation multiphysique si l'on veut bien saisir le processus de ruine des matériaux. On observe en effet sur la [figure 3](#), que la phase de tassement caractérisée par la diminution de perméabilité est en réalité ponctuée par de nombreux microbruits qui mettent en évidence l'écrasement de la roche sur ces vides préexistants. Dans cette phase, les microbruits se manifestent dès la mise en charge et leur intensité augmente rapidement, puis tend à diminuer progressivement. En fait, l'activité acoustique lors de cette première phase est attribuée au frottement sur les fissures fermées et au contact des grains.

On observe également très clairement sur la [figure 2](#) que la phase de serrage de la courbe contrainte-perméabilité s'étend bien au-delà du domaine concave (domaine A) de la courbe contrainte-déformation longitudinale. Cette phase de serrage englobe une partie du domaine de déformation élastique linéaire (domaine B) et recouvre déjà une perte de linéarité de la courbe contrainte-déformation transversale (domaine C). C'est dans ce dernier domaine qu'apparaissent les premiers microbruits relatifs à l'initiation des microfissures. Au total, le domaine classique de linéarité de la courbe contrainte-déformation longitudinale intègre en réalité à la fois la déformation de la matrice, la déformation des vides existants mais également une part de microfissuration.

Au-delà de la contrainte  $\sigma_{ci}$ , la microfissuration induite par le chargement mécanique se poursuit progressivement et l'énergie acoustique libérée augmente avec la contrainte appliquée. Les microfissures d'abord isolées s'interconnectent progressivement mais elles sont aussitôt maintenues fermées sous l'effet du chargement de sorte que la perméabilité reste quasi-constante dans la phase comprise entre  $\sigma_{k-s}$  et  $\sigma_{k-caol}$ . L'existence de cette microfissuration partiellement interconnectée est clairement mise en évidence lorsqu'on décharge l'éprouvette dans le domaine (D). La fin de la phase de stabilisation de perméabilité intègre déjà un début de propagation instable de la microfissuration

marquée par le virage observé sur la courbe contrainte-déformation volumique. L'éprouvette passe alors du comportement contractant vers un comportement dilatant.

A partir de la contrainte  $\sigma_{k-caol}$ , la microfissuration instable se propage et s'interconnecte rapidement. L'orientation principalement verticale de cette fissuration fait qu'elle ne se referme pas sous l'effet du chargement. La perméabilité augmente donc progressivement et les signaux acoustiques sont nettement plus puissants et de durées plus longues.

La phase finale de la fissuration, menant à la ruine de l'échantillon, est décelée à la fois par l'augmentation significative de la perméabilité au point  $\sigma_{k-pi}$  et par le dernier pic acoustique de forte énergie (voir figure 3). Ce pic est suivi, dans la majorité des cas, par une décroissance de l'EA avant qu'elle augmente brutalement au moment de la rupture. Ceci, est en adéquation avec les résultats obtenus par Fei (1993) qui a étudié l'évolution de l'énergie acoustique lors de la mise en charge d'un échantillon de pépite. L'auteur montre que la rupture survient après un pic d'émission acoustique suivi d'une période de décroissance. Par ailleurs, nous avons noté que ce pic d'EA enregistré sur les histogrammes acoustiques coïncide souvent avec le niveau de contrainte  $\sigma_{k-pi}$  déterminé à partir des courbes contrainte-perméabilité. En se basant sur cette observation, la contrainte  $\sigma_{k-pi}$  peut être considérée comme étant le seuil de localisation finale des déformations initiant la rupture de l'éprouvette.

#### 4. CONCLUSIONS

L'identification expérimentale du processus de fissuration d'un échantillon de roche soumis à un chargement mécanique dépend fortement des paramètres de caractérisation mis en œuvre. Ainsi nous avons montré à travers cette étude que les mécanismes de fissuration mis en jeu sont très nombreux et ne peuvent pas être identifiés à partir d'une mesure unique.

Dans cette étude, nous avons associé les mesures de déformations qui sont couramment utilisées dans l'étude du comportement sous charge des matériaux rocheux à l'enregistrement des variations de perméabilité et des événements acoustiques émis lors de l'essai de compression uniaxiale. L'analyse combinée des courbes contrainte-déformations, contrainte-perméabilité et des histogrammes d'énergie acoustique a permis d'identifier plusieurs phases qui marquent l'endommagement progressif des échantillons soumis un essai de compression. Ces phases sont caractérisées par les niveaux de contraintes et les paramètres suivants :

1.  $\sigma_{cc}$  : seuil de serrage apparent ;
2.  $\varepsilon_{cc}$  : déformation résiduelle de serrage ;
3.  $\sigma_{ci}$  : seuil d'initiation de la microfissuration et de sa propagation stable ;
4.  $\sigma_{k-s}$  : seuil de serrage maximal ;
5.  $\Delta k$  : diminution de la perméabilité au serrage maximal ;
6.  $\sigma_{cd}$  : seuil de propagation instable ;
7.  $\sigma_{k-coal}$  : seuil de coalescence et d'intensification des microfissures ;
8.  $\sigma_{k-pi}$  : seuil de localisation.

Au total, le comportement mécanique de la roche est intimement lié aux différents seuils définis ci-dessus. Dans le cas des roches étudiées nous avons noté une très bonne proportionnalité entre, d'une part, la résistance à la rupture en compression ( $\sigma_c$ ) et les seuils  $\sigma_{k-coal}$  et  $\sigma_{k-pi}$  et, d'autre part, la

résistance ultime ( $\sigma_c$ ) des échantillons et le seuil  $\sigma_{ci}$ . Par ailleurs, il a été montré qu'il existe une proportionnalité positive entre le taux de la déformation de serrage ( $\sigma_{cc}$ ), la diminution de la perméabilité ( $\Delta k$ ) lors du serrage et la porosité communicante des matériaux de l'étude.

## 5. BIBLIOGRAPHIE

- Laniz R.E., Stevens R.V., Norman M.B. (1964) « Staining of plagioclase feldspar and other minerals with F. D. and C » *red n°2. U. S. Geol. Survey Prof, Paper 501(B)*, p.152-153.
- Menedez B., Zhu W., Wong T.-F. (1996) « Micromechanics of brittle faulting and cataclastic flow in berea sandstone » *Journal of structural Geology*, Vol. 18, n°1, p. 1-16.
- Nishiyama T., Chen Y., Kusuda H., Ito T., Kaneko K., Kita H., Sato T. (2002) « The examination of fracturing process subjected to triaxial compression test in Inada granite » *Engineering Geology*, vol. 66, p. 257-269.
- Prikryl P. (2001) « Somme microstructural aspects of strength variations in rocks » *International Journal of Rocks Mechanics and Mining Sciences*, vol. 38, p. 671-682.
- Raynaud S. (1995) « Fracturation et dissolution sous contrainte des roches », Thèse de doctorat, Université de provence - Aix-Marseille I.
- Seo Y.S., Jeong G.C., Kim J.S., Ichikawa Y. (2002) « Microscopic observation and contact stress analysis of granite under compression » *Engineering Geology*, vol. 63, p. 259-275.