



HAL
open science

Adaptation du mode opératoire pour la réalisation d'essais en compression " vraie " sur les roches

Amine El Bied, Jean Sulem

► **To cite this version:**

Amine El Bied, Jean Sulem. Adaptation du mode opératoire pour la réalisation d'essais en compression " vraie " sur les roches. Revue française de Géotechnique, 2003, 103, pp.43-60. hal-00699606

HAL Id: hal-00699606

<https://hal.science/hal-00699606>

Submitted on 21 May 2012

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.

Adaptation du mode opératoire pour la réalisation d'essais en compression « vraie » sur les roches

A. EL BIED et J. SULEM¹

CERMES - Ecole Nationale des Ponts et Chaussées / LCPC, France

RESUME : Sur la base d'une étude approfondie de la littérature et d'un programme d'essais sur le grès de Fontainebleau, les artefacts expérimentaux rencontrés dans la réalisation des essais de compression triaxiale sont analysés. En particulier, on montre que le frottement à l'interface de l'éprouvette et des plateaux de chargement modifie l'allure des courbes contrainte-déformation, affecte le mode de rupture ainsi que les caractéristiques des bandes de cisaillement (orientation, épaisseur). Un protocole d'essais visant à supprimer ces artefacts est proposé et validé. Celui-ci consiste en une lubrification efficace de l'interface associée à la mise en place d'une protection imperméabilisante permettant d'éviter la pénétration du lubrifiant dans la roche.

ABSTRACT : *On the basis of a literature review and a testing program on Fontainebleau sandstone, experimental artefacts as encountered in triaxial compression tests are analysed. In particular, it is shown that the friction at the interface between the loading platens and the specimen modify the stress-strain curves, the failure mode, and the shear-bands characteristics (orientation and thickness). A testing procedure is proposed and validated for suppressing these artefacts. It consists in an efficient lubrication of the interface associated with an impervious protection to avoid the penetration of the lubricant into the rock.*

MOTS-CLES: mécanique des roches, essai, compression uniaxiale, compression triaxiale, contraintes, grès de Fontainebleau, frottement, interface, rupture.

KEY WORDS: rock mechanics, rock testing, uniaxial compression test, triaxial compression test, stress, Fontainebleau sandstone, friction, interface, failure.

¹Auteur pour correspondance

Adresse postale : CERMES, Ecole Nationale des Ponts et Chaussée, 6 et 8 avenue Blaise Pascal, Cité Descartes, Champs-sur-Marne, 77455, Marne-La-Vallée, cedex 2, France.
Tél : + 33 1 64 15 35 45, Fax : + 33 1 64 15 35 62, Email : sulem@cermes.enpc.fr

1. Introduction

L'essai de compression triaxiale axisymétrique est couramment utilisé en mécanique des roches pour la caractérisation du comportement d'un matériau. La réalisation expérimentale de cet essai est cependant délicate et peut donner lieu à une grande dispersion des résultats en fonction du mode opératoire choisi. Certains auteurs (Bernaix, 1969) attribuent la dispersion des résultats expérimentaux au caractère hétérogène des roches, ce qui pose la question de la possibilité de considérer l'essai triaxial comme un essai élémentaire. Les effets de taille et de forme rapportés dans la littérature sont-ils dus au comportement intrinsèque de la roche ou aux artefacts expérimentaux ?

La nature du contact à l'interface entre l'échantillon de roche et les plateaux de chargement de la presse influence de manière sensible la réponse en déformation de l'échantillon, la contrainte au pic de chargement, le mode de rupture de l'éprouvette ainsi que les caractéristiques des bandes de cisaillement observées sous confinement (orientation, épaisseur).

L'objet de cet article est d'analyser, à partir d'une étude approfondie de la littérature et d'une campagne d'essais sur une roche modèle présentant des propriétés mécaniques homogènes et isotropes (grès de Fontainebleau), l'influence des conditions d'essais sur la réponse expérimentale. En particulier, nous souhaitons promouvoir l'idée que la réduction du frottement à l'interface roche-plateaux est indispensable pour assurer une bonne homogénéité des déformations de l'échantillon dans la phase pré-localisation et étalonner correctement une loi de comportement intrinsèque de la roche. Nous présentons dans cet article une étude bibliographique du problème du contact roche-plateaux . Celle-ci inclut l'influence du frettage sur les modes de rupture et la description des techniques d'anti-frettage par modification de la géométrie des éprouvettes ou par la mise en place d'inserts solides ou fluides à l'interface. Les inconvénients des différentes techniques sont discutés. Pour réduire les effets du

frottement à l'interface, la technique de la lubrification (Papamichos, 1992, Labuz et Bridell, 1993, Pellegrino et al, 1997, Bésuelle, 1999) apparaît comme la plus efficace, une fois résolu le problème de la pénétration du lubrifiant dans l'échantillon et de la fragilisation de la roche qui en résulte. Ceci est en effet le principal inconvénient de cette technique et l'argument majeur mis en avant par la Société Internationale de Mécanique des Roches (SIMR) pour recommander d'éviter tout insert fluide entre les plateaux et la roche (Fairhurst et Hudson, 1999). Un mode opératoire est proposé et validé sur une campagne d'essais triaxiaux. Celui-ci combine l'utilisation d'un lubrifiant et d'une protection imperméabilisante adaptée. Les questions de l'influence de la géométrie et de la taille des éprouvettes sont également abordées dans la dernière partie de cet article.

2. Description du dispositif expérimental

2.1. Matériau et préparation des échantillons

Choix du matériau :

Le matériau de référence choisi pour notre étude est le grès de Fontainebleau. Cette roche granulaire a déjà été utilisée en laboratoire (Bourbie et al., 1987 ; Ikogou, 1990 ; Sayehi, 1992 ; Haïed et al., 1997). Elle est initialement isotrope, ce qui permet d'obtenir des déformations d'échantillon les plus homogènes possibles dans la phase qui précède la localisation des déformations. Elle est composée à plus de 99.8 % de quartz pur, ce qui est un avantage pour l'étude microscopique du phénomène de la localisation des déformations. En effet, le grès de Fontainebleau (comme d'autres grès) présente sous fortes déformations un changement de coloration au niveau de la bande de cisaillement, qui est dû au broyage et à la décohésion des grains de quartz caractérisant la localisation. Une coloration blanche est nettement visible à l'œil nu au niveau de la bande, ce qui permet d'évaluer de façon précise

l'épaisseur et l'orientation des bandes de cisaillement. Le diamètre moyen des grains de quartz est d'environ 230 μm .

Carottage:

Une fois les roches mères prélevées, ces dernières sont traitées avec le plus grand soin au sein du laboratoire, à l'abri de chocs mécaniques (secousses), thermiques (soleil), chimiques (pluie) ou de moisissures. Les essais de compression sont réalisés sur des cylindres droits à bases circulaires. Le diamètre de l'échantillon doit être au moins 20 fois celui du grain le plus grand. (Fairhurst et Hudson, 1999). On choisit un diamètre d'échantillon de 40 mm. Les normes de la SIMR sont donc respectées. L'éclatement d'un échantillon est par définition son rapport hauteur / diamètre. Une fois le carottage effectué sur ces roches, les éprouvettes sont taillées pour trois valeurs de l'éclatement 1, 1.5 et 2.

Rectification :

Les différentes faces de l'échantillon sont rectifiées sous l'eau dans une rectifieuse plane avec meule pour les rendre planes et parallèles. La tolérance des imperfections du polissage des surfaces de chargement lors de la confection des éprouvettes est très stricte. L'erreur de parallélisme entre les deux surfaces de chargement planes ne doit pas dépasser 0,03 mm pour une hauteur d'échantillon de 60 mm, si l'on se réfère aux recommandations de la SIMR (Fairhurst et Hudson, 1999) pour les tests de compression. Les faces extrêmes de l'échantillon ont également été vérifiées au niveau de l'orthogonalité par rapport à la face latérale et à l'axe de symétrie de l'échantillon. La préparation des échantillons est cruciale pour obtenir des conditions de chargement homogènes. Torrenti et Boulay (1993) ont mis en évidence l'effet d'une mauvaise rectification des échantillons de béton sur la résistance. La résistance moyenne obtenue sur cinq éprouvettes bien rectifiées est de 102 MPa, celle obtenue sur cinq éprouvettes mal rectifiées est de 82 MPa.

2.2. Matériel de mise en pression

La cellule triaxiale utilisée est de type Hoek. Une presse hydraulique asservie permet d'assurer le chargement axial. La surface des plateaux de charge de la presse dont on vérifie précisément le parallélisme est rectifiée et polie afin de minimiser la résistance frottante avec l'échantillon. Par ailleurs, il est préférable que la surface des plateaux de charge soit plus grande que la surface de base de l'échantillon (Fairhurst et Hudson, 1999). Grâce à cette géométrie particulière, lors de l'écrasement, la force axiale reste correctement appliquée sur les faces supérieures et inférieures de l'échantillon même si ce dernier voit son diamètre augmenter lors de l'essai en raison de la déformation radiale. On évite ainsi les problèmes de bords liés à l'effet de poinçonnement des plateaux de même diamètre.

3. Le problème du contact roche-plateaux

3.1. Observations

Le contact direct entre les extrémités de l'échantillon et les plateaux de chargement est la condition limite la plus communément utilisée au sein des laboratoires. Toutefois, ce problème des conditions limites doit être considéré avec beaucoup de prudence. L'interprétation des essais est classiquement basée sur les hypothèses suivantes : l'échantillon matériel est homogène, la distribution de contrainte uniaxiale est uniforme à l'intérieur des échantillons, l'état du champ de déformation de l'échantillon est homogène, il n'y a pas de changement significatif de la géométrie de l'échantillon durant le test et les surfaces de chargement sont toujours les plans principaux.

Comme le font remarquer Peng et Johnson (1972), il est évident que l'utilisation d'un critère de rupture ou de constantes dérivées, appliqués à des conditions de contraintes connues comme étant non uniformes et en supposant malgré cela, une distribution de contrainte uniforme, serait tout à fait trompeur. Néanmoins, ajoutent-ils, c'est exactement ce qui arriva

pendant des années. Même si le souci principal de l'expérimentateur concerne l'uniformité des champs de contraintes et de déformations imposés à l'éprouvette, cette condition d'uniformité n'est généralement pas respectée durant le chargement de compression. Il est reconnu, au moins depuis un siècle (Mohr, 1900), que la distribution des contraintes dans les échantillons cylindriques est non uniforme et dépend des conditions limites à l'interface entre la roche et les plateaux de chargement. Dès le début du chargement, un état non uniforme de contraintes et de déformations à l'intérieur de l'échantillon se développe dû à la présence de frottement à l'interface entre le système de chargement et les faces extrêmes de l'échantillon. Un grand nombre de chercheurs ont souligné ces perturbations induites par le frottement à l'interface (Mohr, 1900 ; Filon, 1902 ; Pickett, 1944 ; D'Appolonia et Newmark, 1951 ; Conway, 1963 ; Kirkpatrick et Belshaw, 1968 ; Brady, 1971b ; Hudson et al., 1971 ; Vutukuri et al., 1974 ; Al-Chalabi et Huang, 1974 ; Deman, 1975 ; Drescher et Vardoulakis, 1982 ; Hettler et Vardoulakis, 1984 ; Read et Hegemier, 1984 ; Vardoulakis et Drescher, 1985 ; Vinegar et al., 1991 ; Papamichos, 1992). Les contraintes de frottement à l'interface tendent à empêcher l'expansion radiale d'un échantillon en compression. L'échantillon cylindrique est alors mis en tonneau. En raison des contraintes de cisaillement, l'axe de contrainte principale ne coïncide pas avec l'axe de l'échantillon. L'effet du frottement à l'interface fait augmenter la résistance de la roche dans cette région. Cette dernière s'étend à l'intérieur de l'échantillon sous la forme d'un cône.

Cette non-uniformité des déformations a déjà été mise en évidence par différents moyens d'investigations. La tomographie au scanner permet par exemple de détecter ces effets de bords. Les images scanner que Colliat et al. (1988), Desrues et Mokni (1991), Mokni (1992) ont obtenues sur des échantillons de sable comprimés au triaxial montrent l'effet de cône de frottement. Sobolev et al. (1978) ont testé des plateaux de pyrophyllite sous conditions biaxiales. L'interféromètre holographique a révélé qu'au delà de 50 % de la résistance ultime,

l'échantillon développe une croix joignant les quatre coins du plateau et subissant de grandes déformations, tandis que les zones situées près des plateaux subissent de plus faibles déformations.

La forme conique de l'échantillon après rupture est due non pas au comportement réel et aux caractéristiques intrinsèques de la roche, mais plutôt aux contraintes de cisaillement à l'interface. Les résultats expérimentaux sont largement influencés par les défauts dans le système de chargement (Rice, 1980; Drescher et Vardoulakis, 1982). Les écarts souvent observés dans les résultats de l'essai triaxial obtenus par différents expérimentateurs sont le plus souvent dus aux conditions expérimentales mises en oeuvre et aux défauts indésirables introduits durant les tests (Hegemier et Read, 1985 ; Santarelli, 1992 ; Brady et Brown, 1985 ; Vardoulakis et Sulem, 1993, 1995). Dans ce cas, le comportement mesuré des échantillons de laboratoire dépend du système expérimental et comme la réponse observée est due aux conditions limites inconnues, les données expérimentales obtenues ne peuvent être utilisées pour l'étalonnage d'une loi constitutive (Hegemier et Read, 1985).

Un autre mode de rupture en compression uniaxiale a également été observé dans la littérature, une rupture de cisaillement locale et macroscopique de l'échantillon testé le long d'un seul plan oblique. Ce mode de rupture est comme la rupture en cône étroitement lié aux problèmes de frottement à l'interface roche–plateau (Bieniawski, 1967; Vardoulakis et al., 1998). Paul et Gangal (1966) affirment que cette rupture ne serait rien d'autre qu'une rupture en cône particulière où les macrofissures se joignent aux deux extrémités. Notons que ce mode de rupture peut également se produire dans le cas où le chargement axial est non uniforme. La rupture oblique est due alors à un défaut dans les conditions d'essai, soit à une mauvaise préparation au niveau de la rectification, en termes de planéité et de parallélisme des surfaces de contact, soit à un mauvais centrage de l'éprouvette par rapport aux plateaux de la presse. Hardy (au 8th Symposium de mécanique des roches, 1966) partage ce point de vue

puisqu'il affirme qu'il y a deux facteurs d'importance dans le chargement de compression de l'échantillon: les forces frottantes dans les surfaces extrêmes de l'échantillon et l'uniformité du chargement axial dans ces surfaces extrêmes. Ces deux facteurs, selon lui, influencent le mode de rupture de l'échantillon. Hardy ajoute que les ruptures obliques sont dues à un chargement non uniforme ou à une orientation préférentielle de plans existants de faiblesse (weakness) dans la roche anisotrope. Hawkes et Mellor (1970) pensent que la rupture oblique est due à la rotation ou à la translation relative des plateaux. Selon eux, ce type de rupture est caractéristique du système de chargement.

Notons que l'effet sensible du frottement à l'interface sur le pic de résistance a souvent été constaté (Hawke et Mellor, 1970 ; Labuz et Bridell, 1993 ; Pellegrino, 1995). Znanski (1954) a réalisé des tests de compression sur des échantillons d'argilite d'élanement 2 avec et sans frottement aux extrémités et a trouvé que la résistance en compression avec frottement est de 107 MPa et sans frottement de 50 MPa. Brown (1974) montra que l'utilisation de système à peignes réduit la résistance maximum. Il étudia sur du marbre le rapport entre la résistance maximum mesurée dans le test biaxial et la résistance en compression uniaxiale conventionnelle. Pour un plateau solide, le rapport est de 1,39 et pour un plateau avec système à peigne, le rapport est de 1,19. Papamichos et al. (2000) ont réalisé des essais de compression triaxiale conventionnels, d'extension triaxiale et de compression biaxiale (en déformation plane) sur des échantillons de grès rouge de Wildmoor. Ils montrent que la résistance au cisaillement du grès est indépendante de la contrainte principale intermédiaire et suit un critère de résistance de type Mohr-Coulomb, ce qui suggère aussi qu'en conditions de contact lubrifié, les valeurs de résistance obtenues expérimentalement ne correspondent pas seulement à un type de test sur un échantillon donné mais représentent les valeurs de résistance intrinsèques de la roche. Par ailleurs, Paul et Gangal (1966) affirment que la valeur de résistance à la compression est plus grande dans le cas d'extrémités non lubrifiées. En

réalisant des tests sur le calcaire d'Indiana, ils ont obtenu une résistance à la compression de 37 MPa pour les extrémités lubrifiées et de 78 MPa pour les extrémités non lubrifiées. Peng et Johnson (1972) ont comparé la résistance à la compression d'échantillons de granite de Chelmsford pour différentes conditions limites imposées. Ils ont obtenus que la résistance de cette roche dépend des conditions limites. Les cinq conditions limites sont présentées dans un ordre décroissant de résistance atteinte: confinement parfait, contact direct, chargement uniforme, inserts de téflon et inserts de néoprène. Suivant les conditions limites imposées, on peut obtenir pour le cas uniaxial une résistance à la compression qui varie du simple au double. Le rapport entre les valeurs de résistance en compression obtenues en conditions "confinement parfait" et en conditions "inserts néoprène" est de l'ordre de 2 en compression uniaxiale, et tend à diminuer lorsque le confinement augmente.

3.2. Simulations numériques

Des analyses théoriques et numériques ont été réalisées dans le but de mieux comprendre les effets du frottement à l'interface roche-plateau (Filon, 1902 ; Pickett, 1944 ; D'Appolonia et Newmark, 1951 ; Kotte et al., 1969 ; Brady, 1971a-c ; Hawkes et Mellor, 1970 ; Peng, 1971 ; Al-Chalabi et Huang, 1974 ; Drescher et Vardoulakis, 1982; Bordia, 1971).

Avec le logiciel de calcul par éléments finis CESAR, Pellegrino (1995) a testé trois conditions de contact entre la roche et les plateaux de chargement, le contact direct roche-acier, une interface de contact lubrifiée et enfin un glissement libre de la roche par rapport aux plateaux sans aucune contrainte de frottement. Les calculs montrent que les éprouvettes solidaires des plateaux développent toujours un cône élastique de frottement au contact des plateaux (Drescher et Vardoulakis, 1982). En cas de lubrification, le frottement partiel produit un petit cône élastique. Pour des éprouvettes comprimées dans des conditions d'expansion libre, le cône ne se forme plus et l'échantillon présente une plastification uniforme. Des résultats similaires ont été obtenus avec le programme ABAQUS par Sheng et al. (1997).

4. Les techniques anti-fretage

Différentes techniques d'anti-fretage ont été développées pour éliminer ou au moins atténuer le frottement à l'interface. Mise à part l'utilisation d'une pression de fluide, c'est à dire d'un chargement hydraulique aux extrémités de l'échantillon (Schock et Duba, 1972 ; Handin, cité par Hardy au 8th symposium de mécanique des roches, 1966), on peut distinguer deux modes différents de conception du système anti-fretage : soit modifier la forme géométrique de l'échantillon, soit placer au niveau de l'interface roche-plateau un matériau solide ou fluide de nature et de forme géométrique variables.

4.1. Modification de la géométrie des éprouvettes

Les effets de fretage peuvent être réduits si on adopte un élancement assez grand. Quand la longueur de l'échantillon augmente, une plus grande proportion du volume d'échantillon dans la partie centrale de ce dernier est sujette à un état approximativement uniforme de contrainte uniaxiale (Hawkes et Mellor, 1970). C'est pour cette raison essentielle que la SIMR (Fairhurst et Hudson, 1999) prescrit d'utiliser dans l'essai de compression des cylindres circulaires droits avec un rapport entre la hauteur et le diamètre compris entre 2 et 3. L'utilisation d'inserts fluides ou solides (capping materials) ou de tout traitement de surface d'extrémité autre que la rectification sont exclus dans les recommandations de la SIMR. Un élancement dans la gamme moyenne de 2,5 à 3 pour des mesures faites dans les portions centrales de l'échantillon est également recommandé par Vutukuri et al. (1974). Il faut toutefois noter que le choix d'un élancement d'échantillon trop grand peut mener à des instabilités telles que le flambage, qui font rompre prématurément l'échantillon (Sulem, Vardoulakis, 1990). De plus, comme le font remarquer Vutukuri et al. (1974), il est très difficile d'obtenir des échantillons avec ce rapport pour des roches tendres et friables.

On peut mentionner également le choix de géométries particulières d'échantillons comme le double T pour les essais en déformation plane (Brace, 1964a ; Brace, 1964b ; Mogi, 1966, Tillard (1992)) ou le cylindre à section centrale réduite (Murell, 1965; Brace, 1964b ; Hoek 1965). Cependant cette technique présente de nombreux inconvénients liés à l'hétérogénéité du champ de contraintes à l'intérieur de l'échantillon et à la difficulté de préparation des échantillons, ce qui conduit à une mauvaise répétabilité des essais.

4.2. Mise en place d'inserts solides ou fluides

4.2.2 Jeux d'inserts ou embases spéciaux :

Les perturbations induites par le frottement à l'interface peuvent être éliminées en insérant une plaque de matériau souple entre l'échantillon et le plateau. De nombreux matériaux ont été utilisés comme le téflon, le bois, l'aluminium, l'acier. Cependant l'utilisation d'inserts souples tend à promouvoir la rupture en clivage axial par le phénomène d'extrusion (Brady, 1971b ; Peng et Johnson, 1972, Vinegar et al. 1991). Certains expérimentateurs (Cook, 1962; Hallbauer et al., 1973; Hoek, 1965; Peng et Johnson, 1972) ont choisi des matériaux ayant le même rapport ν/E que la roche afin d'assurer une expansion radiale uniforme. Une fois que la fissuration commence dans l'échantillon, le module d'élasticité E et le coefficient de Poisson ν changent. Par conséquent, la condition d'égalisation n'est plus satisfaite. Il n'est donc pas possible d'étendre ce concept à la région ductile de la courbe contrainte-déformation (Wawersik et Fairhurst, 1970). On peut également mentionner les systèmes à peignes (brush platens) faits d'une assemblée d'épingles flexibles en acier de faible section (Brown, 1974 ; Brown et Gonano, 1974 ; Brady et Brown, 1985. Ces systèmes présentent de sérieux inconvénients. Ils sont trop difficiles à préparer pour être utilisés dans des tests de routine. De plus, ils peuvent conduire à des problèmes d'indentation de l'échantillon en fonction du type de roche et du niveau de contraintes.

4.2.3 Lubrification :

La lubrification de l'interface reste un problème ouvert en mécanique des roches. Vicat (1834), Föppl (1900), Mohr (1900), (cités par Vardoulakis et al., 1998) ont abordé ce problème et étaient favorables à la lubrification des plateaux pour éviter le frottement. Toutefois, au sein des laboratoires et suivant les recommandations de la SIMR, les essais sont le plus souvent frettés. La littérature montre qu'un état de déformation homogène peut être obtenu en utilisant un lubrifiant approprié (Mohr, 1900 ; Föppl, 1900 ; Hardy, 1966 ; Hawkes et Mellor, 1970 ; Al-Chalabi et Huang, 1974). Parmi les lubrifiants couramment utilisés, on peut citer le graphite, le tungstène disulfide, l'huile de paraffine, le molybdenum disulfide (poudre grise), le téflon, le spray de silicone et l'acide stéarique (acide gras) mélangé avec de la vaseline ou du talc. Pour mesurer le coefficient de frottement, Labuz et Bridell (1993) ont utilisé un appareil de double cisaillement direct et ont réalisé également des tests de compression uniaxiale sur différentes roches. Le plus faible coefficient de frottement (de l'ordre de 0,02) a été mesuré pour l'acide stéarique de formule chimique $(\text{CH}_3 (\text{CH}_2)_{16} \text{CO}_2 \text{H})$ mélangé en quantité égale avec de la vaseline.

Papamichos (1992) a réalisé des essais de compression en déformation plane sur du grès de Berea. Il a procédé à la lubrification de toutes les surfaces d'échantillon en contact avec les plateaux. Le lubrifiant est composé d'un mélange d'acide stéarique et de vaseline non polarisée à proportions massiques égales de 1:1 pour une application facile dans les surfaces de frottements. Ce mélange est préparé en plaçant une quantité égale de cristaux d'acide stéarique et de vaseline dans un four chauffant à 70°C, qui est la température de mélange des cristaux d'acide stéarique. En fait, nous conseillons de chauffer le mélange à 75°C pour faciliter et accélérer la réaction. Dans ce but également, il n'est pas inutile de mélanger quelques fois la préparation, l'acide a en effet tendance à se déposer en bas du flacon. Le mélange est total dès qu'on obtient un liquide incolore et homogène. Après mélange complet, la surface extérieure du gobelet est refroidie rapidement avec de l'eau pour que les molécules

d'acide stéarique ne se séparent pas de la vaseline. On laisse refroidir le lubrifiant jusqu'à solidification complète. Cela donne un mélange uniforme solide gras à température ambiante. C'est une substance de couleur blanche avec une texture savonneuse. Notons que ce lubrifiant a été utilisé depuis par Pellegrino (1995) et Bésuelle (1999). La technique de la lubrification semble être d'un très grand intérêt. Elle ne présente aucun des inconvénients majeurs relevés pour les autres techniques anti-fretage présentées. Nous allons dans la suite de l'article valider cette technique en comparant les résultats obtenus pour le cas des essais frettés et lubrifiés.

5. Etude expérimentale de la lubrification du contact roche-plateaux

5.1. Description des essais réalisés

Des essais de compression uniaxiale et triaxiale à faible pression de confinement ont été réalisés sur le grès de Fontainebleau. Ils ont été effectués sur des échantillons secs d'éclatement 1, 1.5 et 2 prélevés dans trois blocs de roche notés B (porosité 14-15 %), F (porosité 14-15 %) et K (porosité 21-22 %). Les essais ont été effectués en chargement monotone ou cyclique et en conditions frettées ou lubrifiées en utilisant le mélange d'acide stéarique et de vaseline proposé par Papamichos (1992). Papamichos et al. (2000) recommandent l'utilisation d'une faible quantité de lubrifiant afin d'éviter une trop grande pénétration de celui-ci à l'intérieur de la roche poreuse. Cependant, comme l'a observé Pellegrino et al (1997), sans une quantité suffisante de lubrifiant, le frottement résiduel reste encore important. Nous avons tenté de résoudre ce point par l'utilisation d'une protection imperméabilisante insérée entre le lubrifiant et l'échantillon. Différents types de protections imperméabilisantes ont été testés. Les essais réalisés ont pour but de choisir la meilleure protection imperméabilisante et d'évaluer la performance du lubrifiant en tant que réducteur

du frottement. On contrôle l'homogénéité des déformations radiales en plaçant des jauges sur deux sections. Trois jauges radiales sont placées à mi-hauteur de l'éprouvette le long de trois génératrices espacées à 120°. Trois autres jauges radiales sont placées sur les mêmes génératrices mais très près d'une des extrémités de l'éprouvette, au voisinage des plateaux. Trois jauges de déformation axiales sont également placées au niveau de ces trois génératrices, à mi-hauteur de l'éprouvette.

Cette disposition des jauges (Fig. 1) permet d'étudier en détail l'effet du lubrifiant et de la protection imperméabilisante sur l'homogénéité de la déformation de l'échantillon. En suivant les recommandations de Labuz et Bridell (1993) et Papamichos et al. (2000), nous effectuons au début de chaque essai trois petits cycles de charge-décharge à 8 MPa pour éliminer l'excès de lubrifiant et pour « mettre en place » la rotule.

La liste des essais réalisés dans le but de valider le procédé de la lubrification et de choisir un élanement d'échantillon optimal est présenté dans le tableau 1.

5.2. Artefacts induits par l'utilisation d'une lubrification

Le problème de la pénétration du lubrifiant :

La nature et l'amplitude des contraintes locales autour des défauts microscopiques sont fortement affectées par tout fluide ou matériau sous pression qui a accès à ces défauts. C'est le cas lorsque la pénétration du lubrifiant à l'intérieur de l'échantillon et sa mise en pression interstitielle peut induire dans les pores du matériau des contraintes de traction suffisantes pour permettre la propagation des fissures préexistantes. Ce type de rupture s'apparente à la rupture par intrusion décrite par Brace (1964a) lorsque la membrane entourant un échantillon pénètre à l'intérieur de celui-ci. Pour cette raison, la Commission sur les méthodes d'essais de la SIMR (Fairhurst et Hudson, 1999) a recommandé d'éviter tout traitement des extrémités de l'échantillon autre qu'une simple rectification (voir aussi Hawkes et Mellor, 1970 ; Jaeger et Cook, 1979).

Dans les essais que nous avons réalisés sur le grès de Fontainebleau, nous avons effectivement observé dès la mise en place du lubrifiant sur les extrémités de l'échantillon une forte pénétration de celui-ci à l'intérieur de la roche. Cette pénétration est encore plus marquée lorsque l'échantillon est mis en charge, et l'effet du lubrifiant sur la réduction du frottement s'en trouve diminué. Cela peut conduire comme l'a observé Pellegrino (1995) à des modes de rupture combinant la formation d'un cône de frottement et un clivage axial de l'éprouvette. On observe également, à cause de la pénétration du lubrifiant, une rupture précoce de l'échantillon et une perturbation des mesures des jauges proches du plateau due au contact des circuits de la jauge avec le lubrifiant (Fig. 2).

Il apparaît nécessaire d'utiliser une protection imperméabilisante qui bouche les pores des faces de l'échantillon et empêche le lubrifiant de pénétrer. Nous avons testé différentes protections imperméabilisantes: du latex, du spray de graisse silicone, une plaque de téflon, un film plastique, du mastic rubson blanc, une plaque d'aluminium, du spray de téflon, une double plaque de téflon (sans lubrifiant entre les plaques), un carton.

Choix de la protection imperméabilisante :

Le critère essentiel pour le choix de la protection imperméabilisante optimale est la réduction de l'influence des défauts de préparation de la surface de l'échantillon, en termes de rectification et de parallélisme et cela dans le but d'obtenir une distribution du chargement la plus uniforme possible.

Les protections autres que le latex conduisent à une grande dispersion des mesures des différentes jauges axiales et radiales, ce qui traduit que ces inserts induisent une mauvaise répartition de l'effort axial. Il en résulte un champ de déformation non-uniforme dans l'échantillon. Sur la Fig. 3 on donne l'exemple de la réponse obtenu avec une protection en graisse de silicone (essai B36). En comparaison, on présente sur la Fig. 4 la réponse de

l'échantillon B80 testé avec une protection en latex. Ces graphes montrent une bonne uniformité des mesures des jauges.

Le pic de résistance en compression uniaxiale pour les essais lubrifiés sans protection (B13.1 et B12.2) a une valeur moyenne de 40,9 MPa. Pour les essais lubrifiés avec une protection en latex (B80, B43, B6.2, B26, B32 et B13.2) cette valeur est de 50,7 MPa. La pénétration du lubrifiant affecte donc de façon sensible la résistance apparente de la roche. Cette influence n'est pas due à une réaction chimique entre l'acide stéarique et la silice liant les grains du grès de Fontainebleau. Elle est due à une pression interne exercée par le lubrifiant fluide à l'intérieur de la roche.

En ce qui concerne le mode de rupture des échantillons, la présence du film plastique (B33), du spray de silicone (B36), du spray de téflon (B16.2), du carton (B5.2) ou du mastic rubson (B21) induit une fissuration axiale de l'échantillon initiée au niveau des plateaux et se propageant plus ou moins dans l'échantillon. Pour un insert d'aluminium (essai B29) on a observé une rupture en cône caractéristique de l'effet de frettage. L'essai comportant une plaque de Téflon (B23.2) présente une rupture caractéristique par extrusion (Fig. 5) où la rupture est localisée au niveau des plateaux alors que le reste de l'échantillon est intact. La Fig. 6 montre que les déformations radiales sont plus importantes au niveau des plateaux qu'au centre de l'échantillon à l'inverse d'un essai fretté. Ce mode de rupture est dû aux contraintes radiales induites par l'extrusion de l'insert de téflon qui est plus souple que la roche. Ce phénomène a été observé par plusieurs auteurs pour différents types d'inserts (Seldenrath et Gramberg, 1958 ; Grosvenor, 1963 ; Wawersik, 1968 ; Kartashov et al., 1970 ; Brady, 1971b ; Peng et Johnson, 1972 ; Jaeger, cité par Fairhurst, 1966).

Ce phénomène d'extrusion n'a été observé sur aucun des tests que nous avons réalisés en utilisant le lubrifiant composé d'acide stéarique et une protection imperméabilisante autre que la plaque de téflon. Dans le cas où une double plaque de téflon est utilisée, on a observé que la

plaque de téflon en contact avec le plateau subit de très grandes déformations alors que l'échantillon reste apparemment intact. Dans le cas d'une protection en latex, on observe une rupture verticale en clivage axial suivant trois axes symétriques à 120° (Fig. 7). Dans le cas d'une lubrification directe sans protection, nous avons obtenu également ce mode de rupture, mais ce dernier est moins propre et moins net que dans le cas avec protection.

En conclusion, de toutes les protections testées, le latex apparaît comme étant la protection imperméabilisante la plus adaptée.

5.3. Validation de l'utilisation d'un lubrifiant avec une protection en latex

5.3.1. Déformabilité des échantillons

A/ Uniformité de la déformation radiale dans l'axe de l'échantillon

La figure 8 présente la comparaison de la réponse moyenne des jauges de déformation radiale placées au centre de l'échantillon et au voisinage du plateau de chargement pour des essais réalisés sur des échantillons d'éclatement 1,5 lubrifiés avec une protection en latex (B80) et non lubrifiés (B15.1). On constate que, pour l'essai non lubrifié, les déformations radiales au niveau des plateaux sont moins importantes que celles de la partie médiane de l'échantillon.

En revanche, quand on applique le lubrifiant avec la protection en latex, les déformations radiales centrales et au niveau du plateau se superposent bien. La lubrification de l'interface améliore nettement l'homogénéité de la déformation de l'échantillon en éliminant les contraintes de frottement. Le coefficient δ est défini comme le rapport de la déformation radiale mesurée au milieu et à l'extrémité. Ce coefficient est tracé en fonction de la contrainte axiale (Fig. 9). Il est proche de l'unité quand on applique le lubrifiant, les échantillons gardent donc leur forme originale durant le chargement.

B/ Module d'Young et coefficient de Poisson apparents

En comparant les courbes de déformations radiales et axiales de l'essai non lubrifié (B15.1) et de l'essai lubrifié avec protection en latex (B80), on constate que les déformations axiales

pour les deux essais sont superposées ; le frottement ne modifie donc pas l'évaluation du module d'Young (Fig. 10). En revanche, la déformation radiale est moins importante pour le cas non lubrifié, traduisant donc un coefficient de Poisson ν apparent plus faible dans ce cas, le frottement empêchant l'échantillon de se déformer librement dans la direction radiale.

C/ Effet de la pression de confinement

En comparant la réponse moyenne des jauges de déformations radiales et axiales pour des essais réalisés avec une pression de confinement de 14 MPa sur des échantillons d'élanement 1.5 (Fig. 11), on constate que l'influence du frottement à l'interface sur la déformation radiale reste sensible, même en présence d'un confinement. En revanche, le frottement n'a pas d'effet sur la déformation axiale et cela jusqu'à l'approche du pic.

5.3.2. Pic de résistance

Pour évaluer l'influence du frottement à l'interface sur le pic de résistance en compression uniaxiale et triaxiale, des essais ont été réalisés sous différentes conditions d'interface sur des échantillons d'élanement 1,5. Les résultats sont présentés sur le tableau 2.

La moyenne de pic de résistance en compression uniaxiale pour les essais non lubrifiés est de 104,6 MPa, ce qui correspond au double de celle des essais lubrifiés avec une protection en latex (50,7 MPa). Le frottement au niveau des plateaux, pour un contact grès/acier des plateaux équivaut donc à un confinement qui renforce l'échantillon et fait surestimer du simple au double le pic de résistance en compression uniaxiale. La surestimation d'un facteur deux de la résistance apparente dans le cas d'une compression uniaxiale est également rapporté par Mohr (1900), Vardoulakis et Sulem (1993), Pellegrino (1995), Papamichos et al. (2000). Ces derniers ont montré également dans le cas de plateaux non lubrifiés et d'un élanement égal à 2, ce qui correspond donc aux recommandations de la SIMR, que la valeur de la résistance en compression uniaxiale du grès rouge de Wildmoor déduite des essais à

faibles pressions de confinement est surestimée de 40 % tandis que celle déduite des essais à fortes pressions de confinement n'est que de 15%.

Pour des essais de compression triaxiale avec une pression de confinement de 14 MPa en conditions non lubrifiées (F26.2), le pic de résistance obtenu est de 255,4 MPa. Pour des conditions lubrifiées avec une protection en latex (F13.2), le pic est de 199,7 MPa. En présence d'un confinement, le rapport entre les pics de résistance correspondants au cas lubrifié et non lubrifié est plus faible.

En conclusion, nous observons que le frottement entre l'échantillon et les plateaux a une influence notable sur la résistance mécanique apparente des échantillons. La présence du frottement aux plateaux exerce un léger confinement radial aux extrémités des éprouvettes conduisant à une valeur plus importante de la contrainte au pic de résistance. Quand on applique une pression de confinement, le frettage a un effet moins marqué sur la résistance de l'échantillon testé. La pression de confinement a tendance à réduire l'influence du frottement. Comme l'expérimentateur dans un essai de compression uniaxiale réalisé en conditions non lubrifiées ne contrôle pas l'intensité du frettage, cette dernière peut être plus ou moins importante d'un essai à un autre (et a fortiori d'un laboratoire à un autre). Cela est une des causes de la grande dispersion des données de résistance souvent observée dans l'essai de compression uniaxiale. Comme l'a observé Bernaix (1969) cette dispersion observée en compression uniaxiale tend à disparaître pour les essais confinés. Cela peut être attribué aux effets sensiblement réduits du frettage pour les essais sous pression de confinement.

5.3.3. Mode de rupture

La géométrie de la rupture dépend fortement de la pression de confinement et du type de roche testée. A partir des observations des éprouvettes rompues, il a été possible de distinguer différents types de rupture dans la gamme étudiée de pression de confinement. L'examen visuel des échantillons testés confirme le fait que les conditions d'interface jouent un rôle

fondamental dans le processus de rupture. Suivant l'intensité du frottement, différents modes de rupture peuvent se produire pour une même pression de confinement.

A/ Essai de compression uniaxiale :

Quand on élimine les effets de frottement par l'utilisation d'un système anti-frottement efficace, l'échantillon est théoriquement dans un état homogène de compression pure. De nombreux auteurs observent un développement de fissures parallèles à la direction de contrainte maximale appliquée (Griggs, 1936; Terzaghi, 1945 ; Griggs et Handin, 1960; Wawersik et Fairhurst, 1970 ; Hakami, 1988 ; Santarelli et Brown, 1989). Comme le fait remarquer Wawersik (Wawersik et Fairhurst, 1970 ; Wawersik et Brace, 1971), c'est un mode intrinsèque de rupture dans les matériaux fragiles en réponse à une contrainte compressive macroscopiquement homogène. Les macrofissures se forment avec une densité uniforme à peu près partout dans l'échantillon et elles s'alignent dans l'axe du cylindre. Comme le notent Paul et Gangal (1966), ces macrofissures s'unissent finalement pour former une rupture macroscopique par séparation le long d'une surface plane normale à la direction de contrainte principale mineure. Vutukuri et al. (1974) parlent de façon similaire d'un développement d'une ou plusieurs fissures majeures (principales) parallèles à la direction d'application de la force compressive résultant en une séparation de l'échantillon en colonnes. L'échantillon se fragmente dans la direction de l'axe de chargement le long de plans axiaux. Ce type de rupture est appelé « slabbing » (Fairhurst et Cook, 1966), « axial cleavage fracture », « vertical splintering » (Rinehart, 1966; Wawersik et Fairhurst, 1970), « axial splitting » (Paul et Gangal, 1966), « extension fracture » (Griggs et Handin, 1960 ; Paterson, 1978). Ce phénomène est connu sous le nom de rupture en clivage axial (axial splitting) ou encore rupture en extension. Ce qui est en accord avec la classification classique de Jaeger et Cook (1979) communément acceptée pour la rupture macroscopique des roches par rapport à la pression de confinement, où en compression uniaxiale et en compression triaxiale pour une

pression de confinement très faible, on a une rupture axiale. Par exemple, Paul et Gangal (1966) affirment que si les extrémités des échantillons de calcaire d'Indiana sont soigneusement lubrifiés pour prévenir la formation de forces de frottement latérales, l'échantillon se rompt en compression par clivage axial. Bieniawski (1967) a obtenu également une rupture en clivage axial dans des tests uniaxiaux sur la norite et la quartzite réalisés avec des plateaux de chargement égalisés de même diamètre que celui de l'échantillon testé. Paul (cité par Fairhurst, 1966), en utilisant deux plaques minces de téflon avec de la graisse entre les deux, a observé systématiquement une rupture axiale (splitting). Peng et Johnson (1972) ont réalisé des essais sur le granite de Chelmsford en utilisant une technique d'inserts égalisés pour obtenir un chargement uniforme. Ils ont observé que les fissures sont orientées parallèlement à l'axe des échantillons et que ces derniers se rompent typiquement par clivage longitudinal. Ils ont affirmé également que les positions et le nombre de séparations (splits) sont variables d'un échantillon à un autre. Les échantillons se fendent typiquement le long d'une ou plusieurs ruptures verticales. Fairhurst et Cook (1966) ont également rapporté que les échantillons cylindriques se rompent selon la direction verticale et se fendent en colonnes. Kondo et al. (1988) ont observé des ruptures axiales dites « en colonnettes » qui se développent parallèlement à la direction de contrainte principale majeure. Ces ruptures s'accompagnent d'une forte dilatance dans le matériau. Santarelli (1987) observe également une rupture verticale avec formation de colonnettes. Haïed et Kondo (1997) ont observé un clivage axial en réalisant des essais uniaxiaux sur des échantillons prismatiques de grès de Fontainebleau.

Dans le cas des essais que nous avons réalisés avec une protection en latex, on observe une rupture verticale en clivage axial suivant trois axes symétriques à 120° (Fig. 7).

Pour le mode de rupture obtenu avec la protection imperméabilisante en latex, on peut utiliser le terme de clivage axial, car ce mode de rupture est en accord avec la définition donnée par

Wawersik et Fairhurst (1970) du clivage axial dans le sens où l'échantillon de laboratoire se fend axialement en deux ou plusieurs segments. Ce mode de rupture traduit une symétrie de révolution des déformations. L'échantillon a une déformation homogène. Il subit une augmentation des déformations radiales et casse en extension. Cette rupture est obtenue avec une assez bonne répétabilité. On obtient également quelquefois un autre mode de rupture axiale suivant un seul axe privilégié séparant l'échantillon en deux. Notons qu'une rupture suivant trois axes obtenue avec un centre d'intersection des trois axes décalé par rapport à l'axe du cylindre est due forcément à un mauvais centrage de l'échantillon.

Ce mode de rupture en clivage axial a été obtenu systématiquement et indépendamment de la porosité de l'échantillon (15 % ou 21 %), et de l'élançement (1, 1.5 ou 2) (Fig. 12). Par ailleurs des essais lubrifiés avec une protection en latex ont été réalisés sur d'autres types de roches: le marbre, le granite, le gypse et le calcaire, on a obtenu dans tous les cas ce mode de rupture en clivage axial. Ce n'est donc pas une caractéristique du grès de Fontainebleau. Le mode de rupture en clivage axial que nous avons obtenu dans nos essais apparaît donc comme un mode de rupture intrinsèque en compression uniaxiale.

Si l'échantillon est placé directement en contact avec les plateaux de la presse, on constate systématiquement un mode de rupture en cônes dont les axes coïncident avec celui de l'échantillon (Fig. 13).

Le frottement à l'interface produit des contraintes radiales centripètes qui contrecarrent la propagation des fissures aux extrémités de l'échantillon. Les régions en dehors de cette zone développent un réseau de fissures orientées principalement suivant la direction axiale. Après le pic, la propagation de ces fissures mène à une perte de cohésion et à la rupture totale de l'échantillon. On observe un détachement de plaques et une production importante de sable. Ce sable provient essentiellement du centre de l'éprouvette et correspond à plus de la moitié du volume original de l'échantillon. Seules les extrémités de l'échantillon près des plateaux

sont intacts et forment deux zones de forme conique (cônes de frottement). Ce mode de rupture en cône a souvent été observé, citons par exemple Vicat (1834) et Santarelli (1987).

B/ Essai de compression triaxiale :

La présence d'une pression de confinement conduit classiquement à un mode de rupture en cisaillement. Cependant la transition d'une rupture en clivage axial à une rupture par cisaillement se fait progressivement avec l'augmentation de la pression de confinement. (Griggs, 1936 ; Heard, 1960 ; Jaeger, 1960a ; Wawersik et Fairhurst, 1970 ; Wawersik et Brace, 1971 ; Vutukuri et al., 1974 ; Paterson, 1978 ; Jaeger et Cook, 1979). Dans les essais que nous avons réalisés en conditions lubrifiées avec une protection en latex, à une faible pression de confinement de 4 MPa, nous avons observé un « mode de rupture en Y » des échantillons (B18.2) (Fig. 14).

Ce mode de rupture fait apparaître deux surfaces de rupture conjuguées faiblement inclinées par rapport à la direction axiale. On note un endommagement prononcé de l'extrémité pouvant être dû au frottement résiduel à l'interface malgré la lubrification.

A plus fortes pressions de confinement, dans une gamme allant de 7 MPa à 42 MPa (essais K73, K25 et K99), on observe en conditions lubrifiées la formation d'une bande de cisaillement unique clairement visible en raison de la coloration blanche de cette zone. Cette bande est nettement formée et a une épaisseur constante tout le long de l'échantillon (Fig. 15). Elle traverse tout l'échantillon.

Si les effets du frettage sont moindres dans les essais confinés, nous avons cependant observé pour les essais réalisés en conditions frettées une rupture combinée comportant simultanément une bande de cisaillement et une formation de cônes rigides (Fig. 16). L'orientation et l'épaisseur de la bande de cisaillement sont affectées par le frettage. La formation de cônes de frottement dans les essais triaxiaux réalisés en conditions frettées empêche la propagation de la bande de cisaillement jusqu'aux extrémités de l'échantillon. Il est difficile de tirer de

informations précises sur les caractéristiques de la bande de cisaillement (épaisseur, orientation) sur de tels essais.

A fortes pressions de confinement dans la transition du régime fragile au régime ductile, le frettage induit une mise en tonneau de l'échantillon comme rapporté par exemple dans les essais de Paterson (1978).

6. L'essai triaxial peut-il être considéré comme un essai élémentaire ?

L'essai triaxial sur un échantillon de roche peut-il être considéré comme représentant le comportement d'un élément de volume représentatif du matériau ? Les effets de la géométrie et de la taille des éprouvettes sur leur réponse en chargement triaxial sont largement mentionnés dans la littérature. Dans cette section, nous analysons sur la base à la fois de nos essais et des essais rapportés dans la littérature, l'influence de l'hétérogénéité des contraintes induite par le frettage sur ces effets de géométrie et de taille ainsi que l'influence de l'élancement sur l'initiation d'un mode de flambement de l'éprouvette.

6.1. Effets de l'élancement

Jaeger (1973) et Jaeger et Cook (1976) ont montré les effets de l'élancement sur la résistance sous différentes conditions de chargement non uniforme. Ils ont mis ainsi en évidence que la raison de l'influence de l'élancement est très clairement liée aux perturbations du champ de contrainte par les effets des contraintes de frottement au contact avec les plateaux. Historiquement, les essais étaient réalisés sur des échantillons d'élancement 1 (Evans et Pomeroy, 1958). Toutefois, il est clair que le comportement des échantillons courts est fortement affecté par le contact avec les plateaux de chargement. Filon (1902) montra que pour des cylindres d'élancement 1 la concentration de contrainte au contact est d'un rapport de 1,69.

Augmenter l'élançement de l'échantillon revient à diminuer le rôle du frottement. Ceci a été couramment observé dans des essais de compression uniaxiale pour lesquels aucune technique anti-fretage n'est utilisée (Obert, Windes et Duvall, 1946 ; Hobbs, 1964a ; Herel, 1966 ; Mogi, 1966a ; Bordia, 1971 ; Green et Perkins, 1972 ; Starfield et Wawersik, 1972 ; Dhir et Sangha, 1973 ; Hawkes et Mellor, 1970 ; Vukuturi et al, 1974 ; Ikogou, 1990). Nous pouvons également mentionner les travaux historiques de Vicat (1834).

Nous avons testé en conditions non lubrifiées des échantillons d'élançements 1, 1.5 et 2. Les réponses présentées sur la figure 17 et le tableau 3 montrent que pour l'élançement 1 (B9), la rigidité apparente est plus faible et la contrainte de pic plus forte (114,6 MPa). Ces effets peuvent être attribués à l'action plus sensible du fretage pour un faible élançement. Les échantillons d'élançement 1,5 et 2 donnent des réponses semblables tant pour le pic de résistance (tableau 3) que pour les déformations. Les déformations axiales sont bien superposées pour les élançements 1,5 et 2 mais l'échantillon d'élançement 2 développe des déformations radiales importantes pouvant être attribuées à une instabilité par flambement (Sulem et Vardoulakis, 1990 ; Chau, 1993).

Pour les essais lubrifiés (tableau 4) les échantillons d'élançement 1 et 2 montrent clairement une résistance plus faible. Les échantillons d'élançement 2 sont plus sensibles à un mode d'instabilité par flambement qui se traduit ici par une résistance plus faible. Ce phénomène est plus marqué lorsque l'interface est lubrifiée car la hauteur libre de l'échantillon est plus grande que lorsqu'il y a fretage.

6.2. Effets du volume de l'échantillon

L'effet de taille exprime classiquement la dépendance du comportement d'un matériau en fonction du volume de l'échantillon testé. Il est généralement observé que celle-ci décroît avec la taille des éprouvettes. On peut citer les travaux Mogi (1962), Lundborg (1967), Burkartz et Kreuger (1968), Bieniawski (1968), Kostak et Bielenstein (1971), Pratt et al, (1972), Swolfs

(1983). Un effet de taille peut se manifester lorsque la taille caractéristique de la structure de la roche (taille des grains, tailles des défauts, distance caractéristique entre les fissures) est comparable à la taille de l'échantillon. Se pose alors la question de la représentativité de l'échantillon choisi pour réaliser un essai élémentaire. Paterson (1978) citant les travaux de Durelli et Parks (1962) et Jaeger et Hoskins (1966) affirme que les effets d'échelle sont faibles dans un régime de contraintes homogènes. Lorsque l'on est en présence d'un état de contraintes inhomogène, des gradients locaux de contraintes influencent la résistance de la roche. Comme l'avait remarqué Mindlin (1963), en présence de forts gradients de contraintes, la résistance apparente est plus forte. L'effet du frettage dans l'essai triaxial ou tout autre défaut dans les conditions d'essais induisant un état de contraintes inhomogène, peut alors faire apparaître un effet de taille dans la réponse de l'échantillon. Habib et Vouille (1966) ont constaté sur le calcaire de Marquise que l'effet d'échelle disparaît complètement dans le cas d'essais triaxiaux à grandes contraintes de confinement (100 MPa). L'application d'une pression de confinement réduit tout aussi bien les effets de contact aux extrémités de l'échantillon que les défauts liés à l'aspect aléatoire de l'échantillonnage et aux discontinuités existantes dans l'échantillon (Habib et Bernaix, 1966). Il existe à ce jour peu de données sur l'effet de taille dans des essais triaxiaux munis d'un système d'anti-frettage.

Dans le cadre des modèles continus avec microstructure, l'existence d'une ou plusieurs longueurs internes dans la formulation des lois constitutives permet de décrire les effets d'échelle en fonction du rapport entre la taille de l'échantillon et la longueur interne du matériau. On montre alors que l'effet d'échelle est sensible lorsque ce rapport est compris entre 1 et 10 et devient négligeable au delà (Sulem et Vardoulakis, 1990). Pour des essais induisant de forts gradients de contraintes tels que les essais de dureté et d'indentation, l'effet d'échelle est marqué lorsque la taille de l'indenteur est un faible multiple de la taille des

grains. Une approche par la théorie de Cosserat permet d'en rendre compte (Sulem et Cerrolaza, 2000).

7. Conclusion et recommandations

Dans cet article, nous avons mis en évidence l'influence des conditions à l'interface roche-plateaux sur l'évaluation du comportement d'une roche et sur le mode de rupture de l'échantillon. L'analyse de la littérature et de nos propres essais nous conduisent à proposer un protocole expérimental différent de celui proposé par la SIMR.

La lubrification de l'interface avec un mélange d'acide stéarique et de vaseline combinée à la mise en place d'une protection imperméabilisante de latex s'avère efficace. Même si le frettage n'est pas totalement éliminé, l'homogénéité de la répartition des champs de contrainte et de déformation à l'intérieur des échantillons est nettement améliorée. De plus, au niveau du choix de l'élanement, il faut trouver un compromis satisfaisant entre l'exigence d'éviter les effets de frettage à l'interface par l'utilisation d'échantillons longs et la possibilité d'apparition d'instabilités par flambement. Pour éviter le flambement, Vardoulakis et Sulem (1993) et Papamichos et al. (2000) recommandent de réaliser les essais de compression en conditions lubrifiées sur des échantillons d'élanement 1. Nous avons mis en évidence dans les essais présentés dans cet article les problèmes de conditions limites pour un élanement faible. C'est pourquoi nous préconisons l'utilisation d'éprouvettes d'élanement 1,5 et des plateaux de chargement plus larges que l'échantillon testé. On obtient dans ce cas un comportement de l'éprouvette plus stable.

Remerciements

Les auteurs remercient MM. E. Massieu, L. Martinet, F. Martineau pour l'aide apportée à la réalisation de l'étude expérimentale et M. J.-H. Delahousse pour la réalisation des

photographies présentées dans l'article. Ils remercient aussi la Commission Européenne pour le soutien apporté dans le cadre du contrat DGLAB-CORINTH, EVRI-CT-2000-40005.

Références

- AL-CHALABI M., HUANG C.L. 1974. Stress distribution within circular cylinders in compression. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci. & Geomech. Abstr* ; 11, pp. 45-56.
- BERNAIX J. 1969. New Laboratory methods of studying the mechanical properties of rock. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 6, pp. 43-90.
- BESUELLE P. 1999. Déformation et rupture dans les roches tendres et les sols indurés : comportement homogène et localisé. Thèse de Doctorat à l'Université Joseph Fourier, Grenoble I, France.
- BIENIAWSKI Z.T. 1967. Mechanism of brittle fracture of rock. Part I. Theory of the fracture process ; Part II. Experimental studies ; Part III. Fracture in tension and under long-term loading. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 4, pp. 395-430.
- BIENIAWSKI, Z.T. 1968. The compressive strength of hard rocks. *Tydskrif vir Natuurwetenskappe*, Vol. 8, n^{os}. 3-4, pp. 163-182.
- BORDIA S.K. 1971. The effects of size and stress concentration on the dilatancy and fracture of rock. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 8, pp. 629-640.
- BOURBIE T., COUSSY O, ZINSZNER N. 1987. Acoustique des milieux poreux. Publication de l'IFP, collection : Science et Technique du Pétrole, n° 27.
- BRACE W.F. 1964a. Brittle fracture of rocks. In : *State of Stress in the Earth's Crust*. Judd, W.R. (ed.) ; New York : Elsevier, pp. 111-178.
- BRACE W.F. 1964b. Indentation Hardness of Minerals and Rocks, *N. Jahrbuch F ; Mineralogie*, pp. 257-269.
- BRACE W.F. 1981. The Effect of Size on Mechanical Properties of Rock. *Geophysical Research Letters*, Vol.8, n°. 7, pp 651-652.
- BRADY B.T. 1971a. The effect of confining pressure on the elastic stress distribution in a radially end-constrained circular cylinder. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 8, pp. 153-164.
- BRADY B.T. 1971b. Effects of inserts on the elastic behavior of cylindrical materials loaded between rough end-plates. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 8, pp. 357-369.
- BRADY B.T. 1971c. An exact solution to the radially end-constrained circular cylinder under triaxial loading. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 8, pp. 165-178.
- BRADY B.G.H, BROWN E.T. 1985. *Rock Mechanics for Underground Mining*. Georges Allen & Unwin, London.
- BROWN E.T. 1974. Fracture of rock under uniform biaxial compression. *Advances in Rock Mechanics, Proc. 3rd Congr. Int Soc. Rock Mech., Notional Academy of Science, Washington D.C., Vol 2*, pp. 111-117.
- CHAU, K.T. 1993. Anti-symmetric bifurcations in a compressible pressure-sensitive circular cylinder under axisymmetric tension and compression. *J. Appl. Mech.*, 60, pp. 282-289.
- COLLIAT J.L., DESRUES J., FORAY P. 1989. Triaxial testing of granular soil under elevated cell pressure. In *Advanced triaxial testing of soil and rock, ASTM STP977* (edited by Donaghe R.T., Chaney R.C. and Silver M.L), Philadelphia : A.S.T.M. pp. 209-310.
- CONWAY J.C. 1963. An Investigation of the stress Distribution in a Circular cylinder under Compressive Load for varying Boundary Conditions, M.S. Thesis, Pennsylvania State University.
- COOK, N.G.W. 1962. A Study of failure in the Rock Surrounding Underground Excavations, Thesis, University of Witwatersrand.

- D'APPOLONIA E., NEWMARK N. M. 1951. A Method for the solution of the Restrained Cylinder under Compression, Proceeding of the First U.S. congress of applied Mechanics, pp. 217-226.
- DEMAN F. 1975. Achsensymmetrische Spannungs-rund Verformungsfehler in trockenem Sand. Dissertation, Universität Karlsruhe, Veröffentlichungen IBF, Nr.62. Department of mining and Mineral Sciences, Leeds University, LEEDS LS2 9JT.
- DESRUES J., MOKNI M., MAZEROLLE F. 1991. Tomodensitométrie et la localisation sur les sables. 10th E.C.S.M.F.E., Florence, Balkema eds, pp. 61-64.
- DHIR R.K., SANGHA C.M. 1973. Relationship between size, deformation and strength for cylindrical specimens loaded in uniaxial compression. Int. J. Rock Mech. Min. Sci. 10, 699-712.
- DRESCHER A., VARDOULAKIS I. 1982. Geometric softening in triaxial tests on granular material. Géotechnique, 32, 291-303.
- DURELLI A.J., PARKS, V. 1962. Relationship of size and stress gradient to brittle failure stress. Proc. 4th U.S. Nat. Cong. Appl. Mech., pp. 931-938.
- EL BIED A. 2000. Etude expérimentale et modélisation du comportement des roches granulaires : écrouissage, radoucissement et rupture en mode localisé. Thèse de doctorat de l'Ecole Nationale des Ponts et Chaussées.
- FAIRHURST, C. 1966. Failure and breakage of rock. Proc. of the 8th Symp. on Rock Mechanics, University of Minnesota, 1966.
- FAIRHURST C., COOK N.G.W. 1966: The phenomenon of rock splitting parallel to the direction of maximum compression in the neighborhood of a surface. Proc. 1st Cong. Int. Soc. Rock Mech., Lisbon, Vol. 1, pp. 687-692.
- FAIRHURST C.E., HUDSON J.A. 1999. Draft ISRM suggested method for the complete stress-strain curve for intact rock in uniaxial compression. International Journal of Rock Mechanics and Mining Sciences 36, pp. 279-289.
- FILON N.G. 1902. On the Elastic equilibrium of circular cylinders under certain practical systems of load. Phil. Trans. R. Soc. A198, pp. 147-233.
- FOPPL A. 1900. Abhängigkeit der Bruchgefahr von der Art des Spannungs-zustandes. In : Mitth. Mech.-tech, Lab. K. Tech. Hochsch. München, No. 27. München : Ackermann, pp. 1-35.
- GREEN S.J., PERKINS R.D. 1972. Uniaxial compression tests at varying strain rates on three geologic materials. In : Basic and Applied Rock Mechanics. Gray, K.E. (ed.). Proc. 10th Symp. Rock Mech., Austin, Texas, New York : A.I.M.E., pp. 35-54.
- GRIGGS D.T. 1936. Deformation of rocks under high confining pressures. I. Experiments at room temperature. J. Geol., Vol. 44, n° 5, pp. 541-577.
- GRIGGS D., HANDIN J. 1960. Observations on fracture and on Hypothesis of Earthquakes. In: Rock Deformation; Griggs, D., Handin, J. (eds). Geol. Soc. Am., Memoir 79, pp. 347-364.
- GROSVENOR N.E. 1963. Specimen proportion – Key to better compressive strength tests. Min. Eng., Vol. 15, n° 1, pp. 31-33.
- HABIB P., VOUILLE G. 1966. Sur la disparition de l'effet d'échelle aux hautes pressions. C.R. Acad. Sci. Paris 262, pp. 715-717.
- HABIB P., BERNAIX J. 1966. La fissuration des roches. In : Proc. 1st Congr. Int. Soc. Rock Mech., Lisbon, Vol. I, pp. 185-190.
- HAIED A., KONDO D. 1997. Strain localization in Fontainebleau sandstone : macroscopic and microscopic investigations Int. J. Rock Mech & Min. Min. Sci. Vol. 34, No. 3-4, Paper No. 161..
- HAIED A., KONDO D., HENRY J.P. 1997. Caractérisation expérimentale de la rupture en mode localisé d'un grès, Revue Française de Géotechnique, n°78, pp. 21-29.

- HALLBAUER D.K., WAGNER H., COOK N.G.W. 1973. Some observations concerning the microscopic and mechanical behavior of quartzite specimens in stiff, triaxial compression tests. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 10, pp. 713-726.
- HARDY H.R. 1966. Discussion on uniformity of end loading in session on rock failure. In : *Failure and Breakage of Rock*. Fairhurst, C. (ed.). Proc. 8th Symp. Rock Mech., Minnesota, New York : A.I.M.E., pp. 154-158.
- HAWKES I, MELLOR M. 1970. Uniaxial testing in rock mechanics laboratory. *Engng Geol.* 4, pp. 177-285.
- HEARD H.C. 1960. Transition from brittle fracture to ductile flow in Solenhofen limestone as a function of temperature, confining pressure. In : *Rock Deformation* . Griggs, D., Handin, J. (eds.). *Geol. Soc. Am., Memoir 79*, pp. 193-226.
- HEGEMIER G.A., READ H.E. 1985. On deformation and failure of brittle solids : some outstanding issues. *Mechanics of Materials* 4, pp. 215-259.
- HEREL J. 1966. Festigkeits-und Formänderungsverhalten charakterisierender Eigenschaften der Magnesite, die an den Probekörpern von verschiedenem Schlanheitsgrad festgestellt wurden. *Proc. 1st Congr. Int. Soc. Rock Mech.*, Lisbon, Vol. 1, pp. 503-507.
- HETTLER A, VARDOULAKIS I. 1984. Behavior of dry sand tested in a large triaxial apparatus, *Géotechnique* 34, 2, pp. 183-197.
- HOEK E. 1965. Rock fracture under Static stress conditions, National Mechanical Engineering Research institute, CSIR, Pretoria, Report MEG 383.
- HOBBS D.W. 1964. Rock compressive strength. *Collierv Eng.* 41, pp. 287-292.
- HODGSON K., COOK N.G.W. 1970. The effect of size and stress gradient on the strength or rock. *Proc. 2nd Congr. Int. Soc. Rock Mech*, Belgrade, Vol 2, pp. 3-5.
- HUDSON J.A., E.T. BROWN, C. FAIRHURST 1971. Shape of the complete stress-strain curve for rock. *Stability of Rock Slopes*, Proc. 13th Symp. On Rock Mech., (E.J. Cording, ed.), A. S. C. E, New York, pp. 773-79.
- IKOGO S. 1990. Etude expérimentale et modélisation du comportement d'un grès. Thèse de Doctorat, Université de Lille I, France.
- JAEGER J.C. 1960. Rock failures at low confining pressures. *Engineering* 189, pp. 283-284.
- JAEGER J.C. 1973. Crushing under non-uniform loading . In : *National Symposium on Rock Fragmentation*, Adelaide, Feb. 1973. Storr, E.D. (ed.). Australian Geomechanics Soc., Inst. Eng. Aust., pp. 74-80.
- JAEGER J.C., HOSKINS E.R. 1966. Stresses and failure in rings of rock loaded in diametrical tension or compression. *Br. J. appl. Phys.* 17, pp. 685-692.
- JAEGER J.C and COOK N.G.W. 1979. *Fundamentals of Rock Mechanics*. 3rd edition, Chapman and Hall, London.
- KARTASHOV Yu. M., MAZUR-DZHURILOVSKII, YU D., GROKHOLSKII A.A. 1970.: Determination of the uniaxial compressive strength of rocks. *Sov. Min. Sci.*, n° 3, pp.339-341.
- KIRKPATRICK W.M., D.J. BELSHAW D.J. 1968. On the interpretation of the triaxial test. *Géotechnique*, 18, pp. 336-350.
- KOSTAK, B., BIELENSTEIN H.U 1971. Strength distribution in hard rock. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 8, pp. 501-521..
- KOTTE J.J., BERCZES Z.G., GRAMBERG J., SELDENRATH T. R. 1969. Stress-strain relations and breakage of cylindrical granitic rock specimens under uniaxial and triaxial loads. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 6, pp. 581-595.
- LABUZ J.F., BRIDELL J.M. 1993. Reducing frictional constraint in compression testing through lubrication. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* Pp. 451-455.
- LAMA R.D. 1966. Elasticity and strength of coal seams in situ and an attempt to determine the energy in pressure bursting of roadsides. D., Sc. Tech. Thesis, Faculty of Mining,

- Academy of Min & Metall., Cracow, Poland.
- LUNDBORG N. 1967. The strength size relation of granite. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 4,, pp. 269-272.
- MINDLIN RD. 1963. The influence of couple stresses on stress concentrations. *Experimental Mech.*, 3, pp. 1-7.
- MOGI, K. 1962. The influence of the dimensions of specimens on the fracture strength of rocks. *Bull Earthquake Res. Inst. Tokyo., Univ.* 40, pp. 175-185.
- MOGI, K. 1966. Pressure dependence of rock strength and transition from brittle fracture to ductile flow. *Bull. Earthquake Res. Inst. Tokyo., Univ.* 44, pp. 215-232.
- MOHR, O 1900. Welche Umstaendnde Bedingen dir Elastizitaetsgrenze und den Bruch eines Materials? *Zeitschrift des Vereines deutscher Ingenieure* 44, pp. 1-12.
- MOKNI M. 1992. Relations entre le comportement en masse et la localisation de la déformation dans les matériaux granulaires, Thèse de Doctorat de l'Université J. Fourier de Grenoble, France.
- MURELL S.A.F. 1965. The Effect of Triaxial stress systems on the strength of rocks at atmospheric temperatures. *Geophys. J.R. Astron. Soc.* 10. Pp. 231-281.
- PAPAMICHOS E. 1992. Surface Instability and Fracture : Theory and Experiment, Ph.D. Thesis, University of Minnesota.
- PAPAMICHOS E., TRONVOLL J., SKJAESTEIN A. , UNANDER T.E. , LABUZ J.F., VARDOULAKIS I., SULEM J. 2000. Constitutive testing of a weak sandstone, *Mechanics of Cohesive-Frictional Materials*, 5, pp. 1-40.
- PATERSON M.S. 1978. *Experimental rock deformation-the brittle field.* Berlin Heidelberg New York : Springer-Verlag.
- PAUL B., GANGAL M. 1966. Initial and subsequent fracture curves for biaxial compression of brittle materials. *Proc. 8th Symp. Rock Mech., Minneapolis, Minnesota*, pp. 113-141.
- PELLEGRINO A. 1995. Comportement fragile des roches : dégradation des propriétés élastiques et anisotropie induite par les contraintes. Thèse de doctorat, Ecole Nationale des Ponts et Chaussées, Paris.
- PELLEGRINO A., SULEM J., BARLA G. 1997. The effects of slenderness and lubrication on the uniaxial behavior of a soft limestone. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 34, 2, pp. 333-340.
- PENG S. S., JOHNSON A. M. 1972. Crack growth and faulting in cylindrical specimens of Chemsford granite. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 9, pp. 37-86.
- PICKETT G.R 1944. Application of the Fourier method to the solution of certain boundary problems in the theory of elasticity. *Trans. Am. Soc. Mech. Engrs* 66, pp. A176-A182.
- PRATT H.R., BLACK A.D., BROWN W.S., BRACE W.F. 1972. The effect of specimen size on the mechanical properties of unjointed diorite, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 9, pp. 513-529.
- PRICE N.J. 1960 The compressive strength of coal measure rocks. *Coll. Eng.*, Vol. 37, pp. 283-292.
- READ H.E., HEGEMIER G.A. 1984. Strain softening of rock, soil and concrete: a review article. *Mech. Mat.*, 3, pp. 271-294.
- RICE J. 1980. The mechanics of earthquake rupture. *Physics of the earth's interior.* A.M. Dziewonski and E. Boschi (eds.), , North-Holland, Amsterdam, pp. 555-649.
- RINEHART J.S. 1996. Fracture of rocks. *Int. J. Fracture Mech.*, Vol. 2, pp. 534-551.
- SANTARELLI F.J. 1992. Quelques réflexions sur les biais d'observation lors des essais sur les modèles réduits de forage. *Revue Française de Géotechnique* n° 59, pp. 33-41.
- SANTARELLI F.J., BROWN E.T. 1989. Failure of three sedimentary rocks in triaxial and hollow cylinder compression tests. *Int. J. Rock Mech. Min Sci.*, 26, 5, pp. 401-413.
- SAYEHI M. 1992. Etude expérimentale de l'endommagement du grès de fontainebleau.

- Thèse de doctorat, Université de Lille I., France..
- SCHOCK R.N., DUBA, A.G. 1992. Quasistatic deformation of solids with pressure. *J. Appl. Phys.* 43, pp. 2204 – 2210.
- SELDENRATH Th.R., GRAMBERG J. 1958. Stress-strain relations and breakage of rocks. In : *Mechanical Properties of Non-Metallic Brittle Materials*. Walton, W.H. (ed.). London : Butterworths, pp. 79–102.
- SHENG D., WESTERBERG B., MATTSSON H., AXELSSON K. 1997. Effects of End Restraint and Strain Rate in Triaxial Tests. *Computers and Geotechnics*, Vol. 21, n°. 3, pp. 163-182.
- SOBOLEV G., SPETZLER H., SALOV B 1978. Precursors to failure in rocks while undergoing anelastic deformations, *J. Geophys. Res.*, Vol. 83, pp. 269-274.
- STARFIELD A.M., WAWERSIK W.R. 1972. Pillars as structural components in room-and-pillar design. In : *Basic and Applied Rock Mechanics*. 10th Symp. Rock Mech., Austin, Texas, May 1968. Gray, K.E. (ed.). New York : A.I.M.E., pp. 793–809.
- SULEM J., VARDOULAKIS I. 1990. Analysis of the triaxial test on rock specimens. A Theoretical model for shape and size effect. *Acta Mechanica*, 83, pp. 195–212.
- SULEM J., CERROLAZA M 2002. Finite element analysis of the indentation test on rocks with microstructure, *Computers and Geotechnics*, 29, 2, pp. 95-117.
- SWOLFS H.S. 1983. Aspects of the size strength relationship on unjointed rocks. *Rock Mechanics : Theory, Experiment, Practice*, Proc. 24th U.S. Symp. On Rock Mech., (C.C. Mathewson, ed.), Assoc. Engng. Geologists, pp. 501–510.
- TERZAGHI K 1945. Stress conditions for the failure of saturated concrete and rock; Proc. Am. Soc. Test. Mat., Vol. 45, pp. 777-801.
- TILLARD D. 1992. Etude de la rupture dans les géomatériaux cohésifs. Application à la marne de Beaucaire. Thèse de Doctorat, Université Joseph Fourier, Grenoble, France.
- TORRENTI J.M., BOULAY C. 1993. Résultats récents concernant l'essai de compression du béton *Annales de l'Institut Technique du Bâtiment et des Travaux Publics*. n° 513série: Essais et Mesures 244.
- VARDOULAKIS I. and DRESCHER A. Behaviour of granular soil specimens in the triaxial compression test. In: *Developments in Soil Mechanics and Foundation Engineering*, Vol. 2, 215–252, Elsevier, 1985.
- VARDOULAKIS I., SULEM J. 1993. Application of bifurcation theory to rock mechanics problems. In : *Comprehensive rock mechanics*, ed. J. Hudson, Pergamon Press, Vol. 1, chap. 23, pp 575-609.
- VARDOULAKIS I., SULEM J. 1995. *Bifurcation Analysis in Geomechanics*. Blackie Academic and Professional.
- VARDOULAKIS I., LABUZ J.F, PAPAMICHOS E., TRONVOLL J. 1998. Continuum fracture mechanics of uniaxial compression on brittle materials. *Int. J. Solids Structures* Vol. 35, n°s 31-32, pp. 4313-4335.
- VICAT 1834. Observations adressées à l'Académie des Sciences sur le rapport lu à cette académie, le 23 septembre 1833, par M. Girard, l'un de ses membres, concernant un mémoire de M. Vicat, sur la résistance des matériaux. *Annales des Ponts et Chaussées*, I, N° CLXXXI pp. 305.
- VINEGAR H.J., De WAAL J.A., WELLINGTON S.L. 1991. CT studies of brittle failure in Castlegate sandstone, *Int. J. Rock Mech. Sci. and Geomech. Abstr.*, 28, 5, pp. 441–448.
- VUTUKURI V.S., LAMA R.D., SALUJA S.S. 1974. *Handbook on mechanical properties of rocks*, Vol. I Testing techniques and results, Trans Tech. Publications, Clausthal, Germany.
- WAWERSIK W. 1968. Detailed Studies of Rock Fracture in Compression. Ph. D. Thesis, Univ. Of Minnesota.
- WAWERSIK W.R., BRACE WF. 1971. Post-failure behaviour of granite and diabase, *Rock*

mechanics, Vol. 3, pp. 61-85.

WAWERSIK W.R., FAIRHURST C. 1970. A study of brittle rock fracture in laboratory compression experiments. *Int. J. Rock Mech. Sci.*, 7, pp. 561.

ZNANSKI J. 1954. Sklonnosi skal do tapania. *Archiwum Gornictwa i Huntictwa*, tom 2.

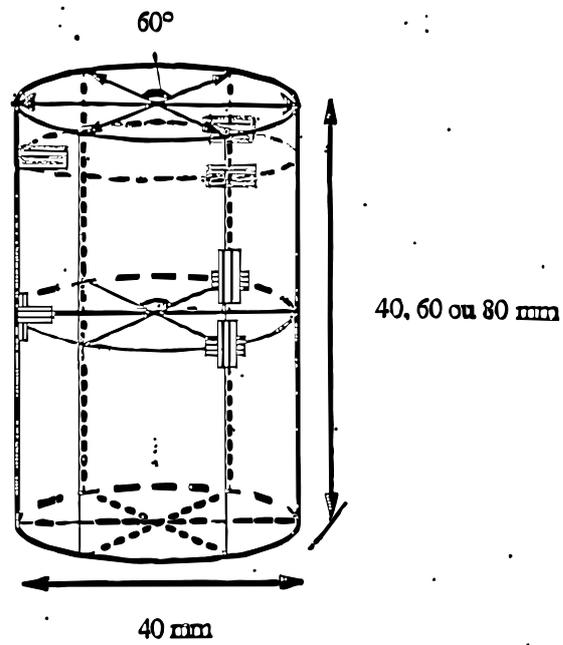


Fig. 1 : Disposition des jauges de déformations radiales et axiales
Position of radial and axial strain gages

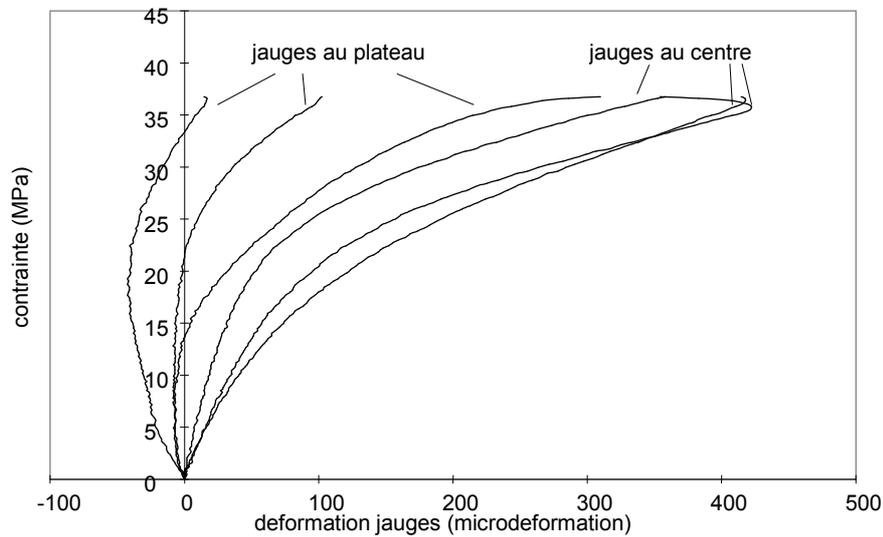


Fig. 2: Essai B13.1, lubrifié directement sans protection sur un échantillon d'élancement 1,5 :
Perturbation des jauges de déformation radiale près du plateau due à la pénétration du
lubrifiant

*Test B13.1, direct lubrication with no protection on a sample with a 1.5 slenderness.
Perturbation of the electric circuit of the radial strain gages close to the platen due to the
penetration of the lubricant*

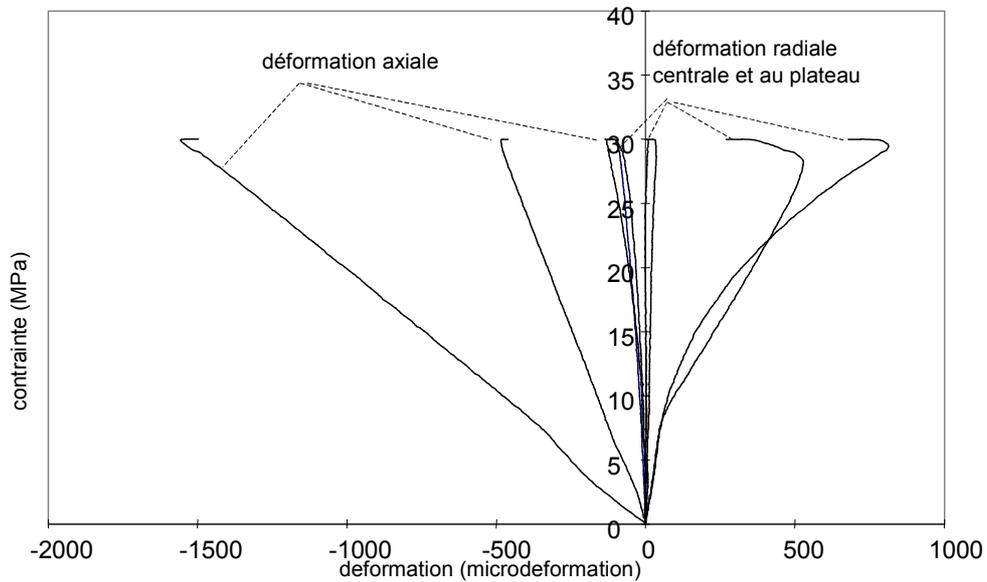


Fig. 3 : Essai B36, lubrifié avec une protection en spray graisse silicone et réalisé sur un échantillon d'élongement 1,5. Comparaison des réponses au centre l'échantillon et près des plateaux.

Test B36, lubricated with a protection of a spray of silicone fat on a sample with 1.5 slenderness. Comparison of the response of the strain gages at the centre of the sample and close to the platens

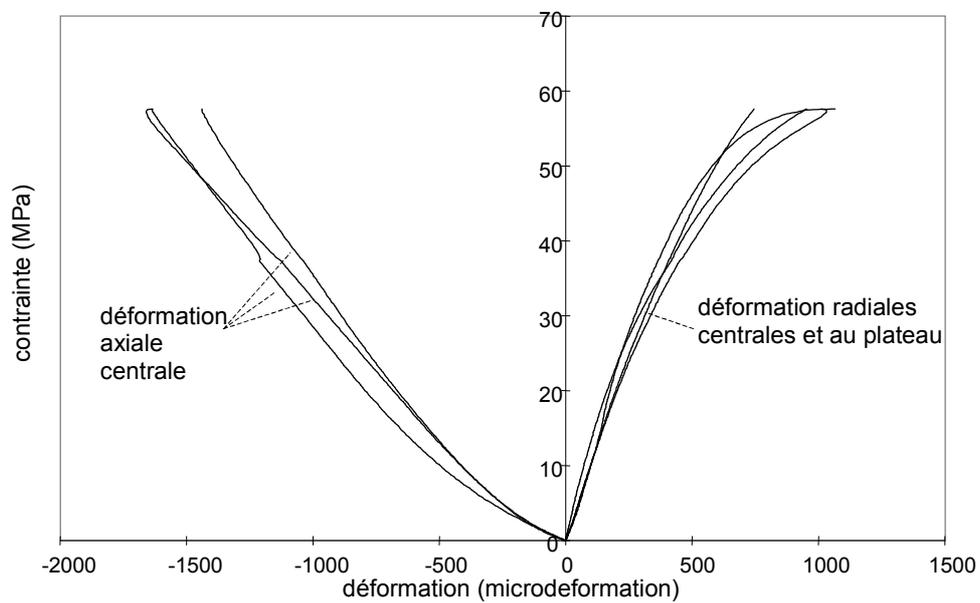


Fig. 4 : Essai B80, lubrifié avec une protection en latex et réalisé sur un échantillon d'élancement 1,5. Comparaison des réponses au centre de l'échantillon et près des plateaux.
Test B80, lubricated with a protection of latex on a sample with 1.5 slenderness. Comparison of the response of the strain gages at the centre of the sample and close to the platens



Fig. 5 : Essai B23.2 ; Rupture au niveau des extrémités d'un échantillon testé en conditions lubrifiées avec une protection en plaque de Téflon.

Test B23.2; Failure at the ends of a lubricated sample with a protection of Teflon

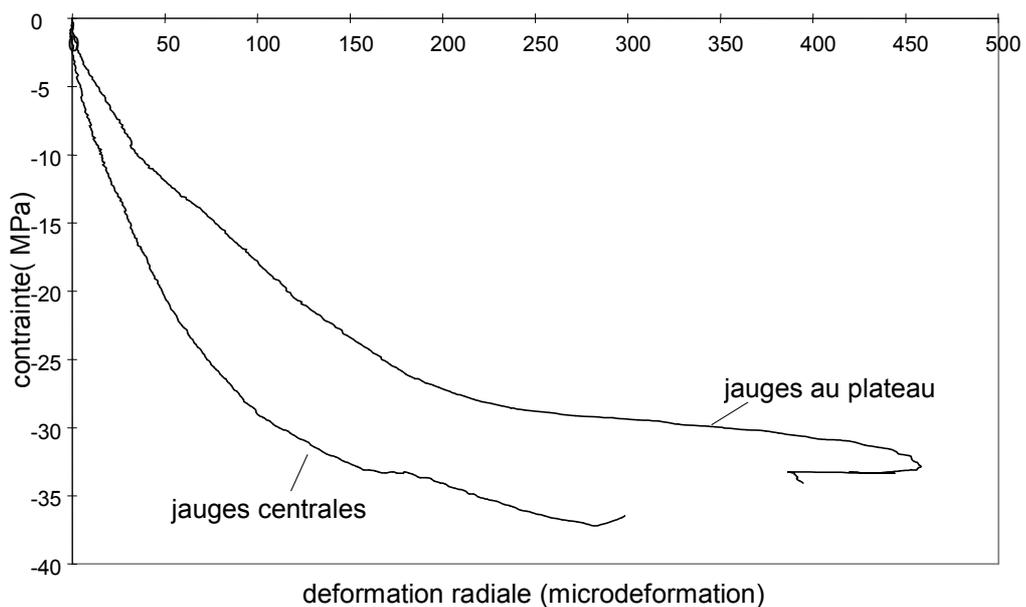


Fig. 6 : Essai B23.2 ; Phénomène d'extrusion pour un échantillon avec une protection en plaque de Téflon (B23.2). Déformation radiale au centre de l'échantillon et près des plateaux.
Test B23.2 Phenomenon of extrusion for a sample with a protection of Teflon. Radial strain at the centre of the sample and close to the platens

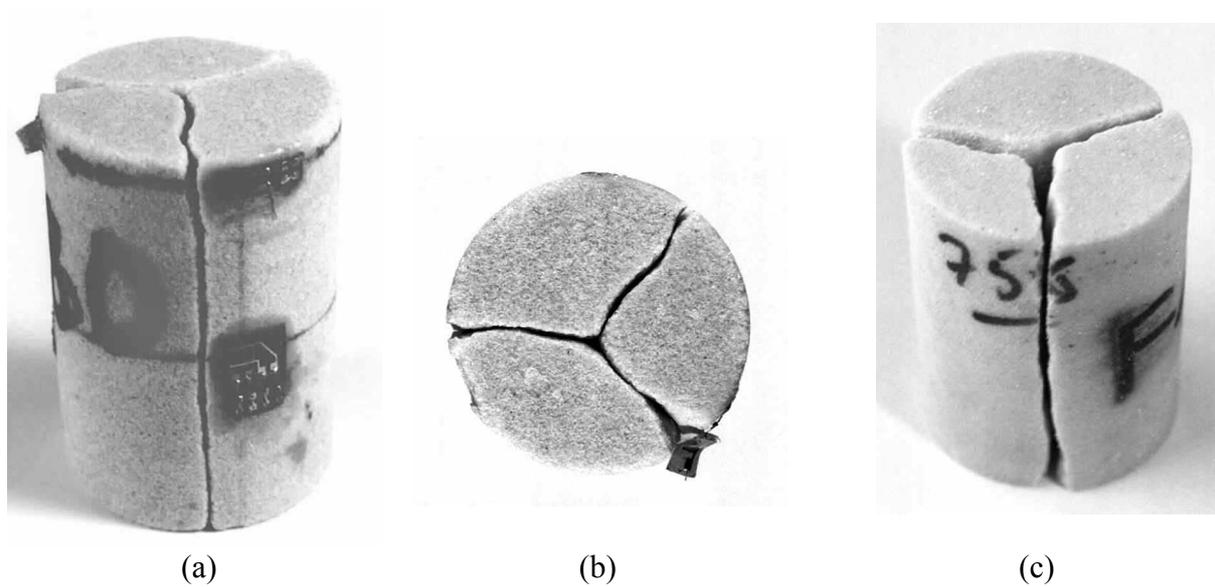


Fig. 7 : Echantillons de grès de Fontainebleau chargé en compression uniaxiale en conditions lubrifiées ; Rupture en clivage axial suivant trois axes symétriques à 120° ; (a) et (b) échantillon B80 , (c) échantillon F21.1

Samples of Fontainebleau sandstone loaded in uniaxial compression with lubrication; Axial splitting along three symmetrical axes with an angle of 120° ; (a) & (b) sample B80, (c) sample F21

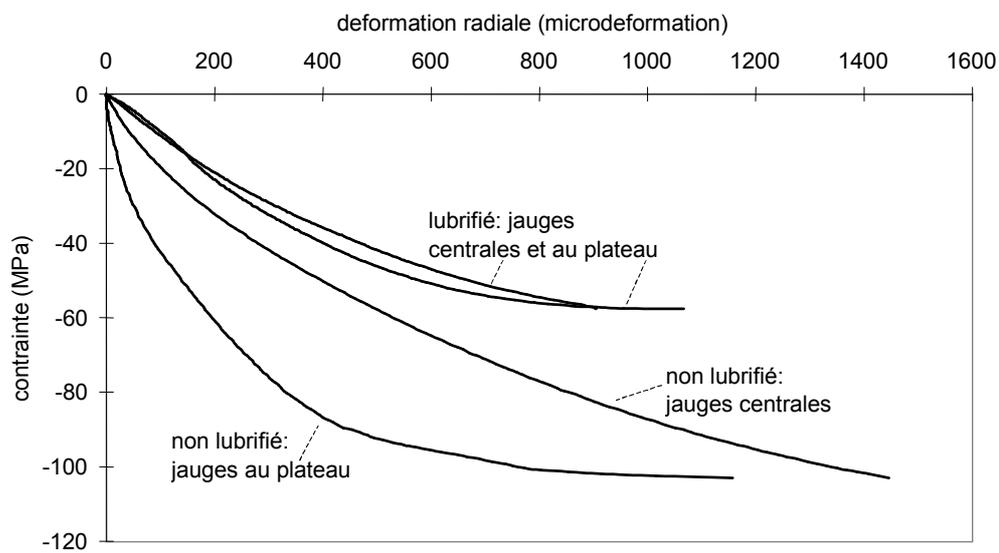


Fig. 8 : Effets de la lubrification sur les déformations radiales.
Effect of lubrication on radial strains

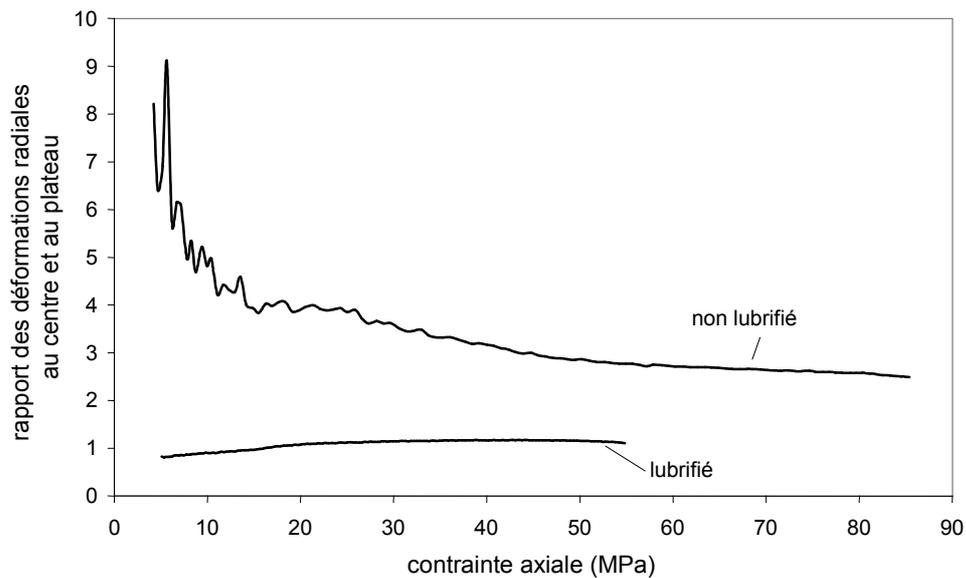


Fig. 9 : Effets de la lubrification sur le coefficient de la déformation radiale. Essai lubrifié (B80) et essai non lubrifié (B15.1).

Effect of lubrication on radial strains ratio. Lubricated sample B80 and non lubricated sample B15.1

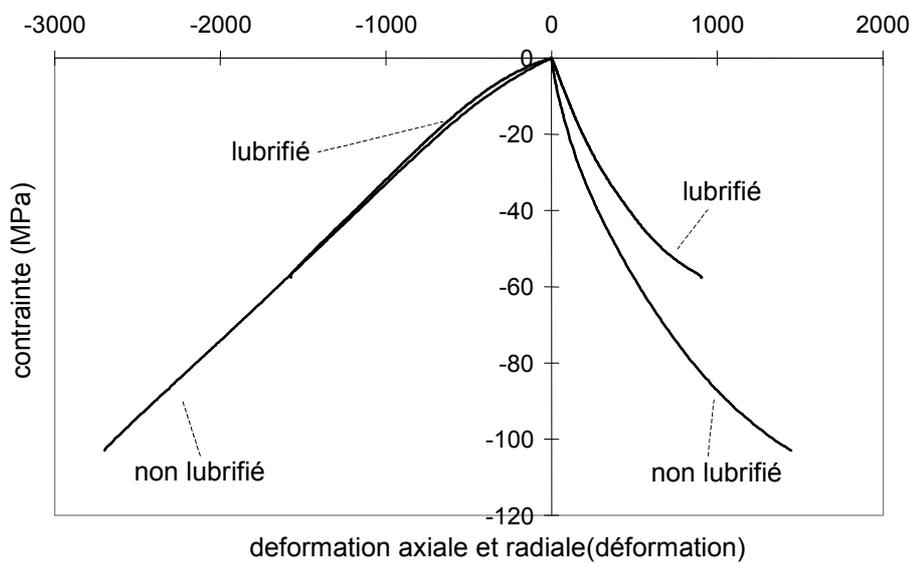


Fig. 10 : Effets de la lubrification sur la déformation radiale et axiale de l'échantillon.
Effect of lubrication on radial and axial strains

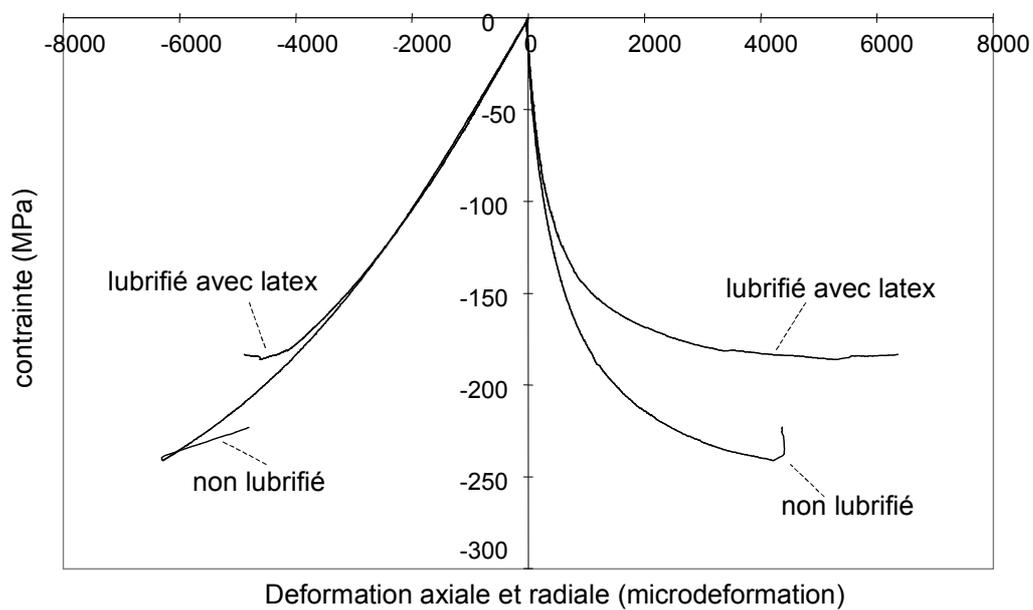


Fig. 11 : Comparaison de la réponse des jauges centrales de déformation radiale et axiale, pour des essais réalisés sur des échantillons d'élanement 1,5 en conditions lubrifiées (F13.2) et non lubrifiées (F26.2) sous un confinement de 14MPa.

Comparison of the response of radial and axial strain gages at the centre of samples with 1.5 slenderness in lubricated conditions (F13.2) and non lubricated conditions (F26.2) for a confining pressure of 14 MPa.

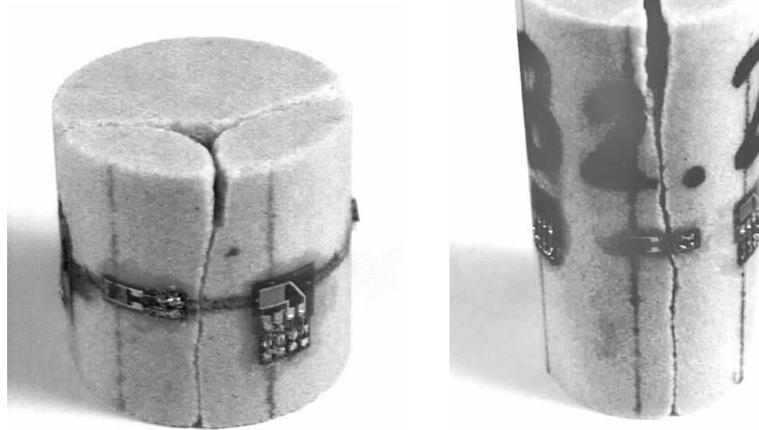


Fig. 12 : Mode de rupture en clivage axial suivant trois axes symétriques à 120° pour des échantillons d'élanement 1 (B57) et 2 (B2.2).
Axial splitting failure mode along three symmetrical axes with an angle of 120° for samples with a slenderness of 1 (B57) and 2 (B2.2)



Fig. 13 : Rupture en cône de l'échantillon B15.1
Failure with formation of a frictional cone for sample B15.1

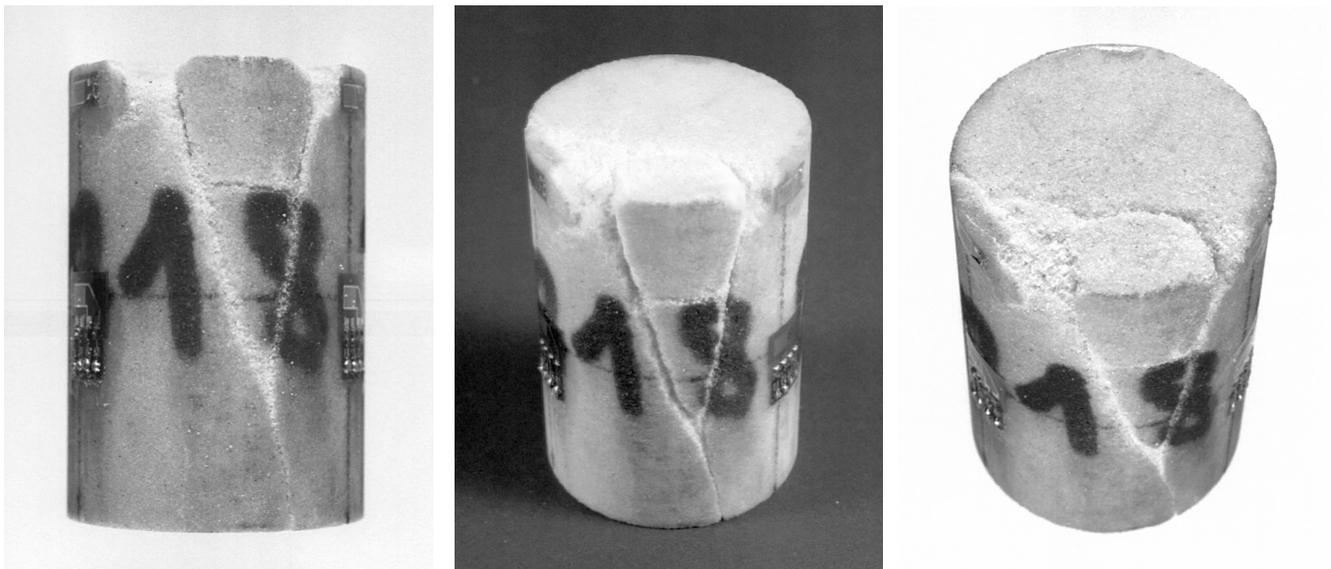


Fig. 14 : Mode de rupture mixte en Y pour un échantillon (B18.2) testé en compression triaxiale à une pression de confinement de 4 MPa en conditions lubrifiées avec une protection en latex.

Failure mode in Y for a sample (B18.2) tested in triaxial compression with a confinement of 14 MPa in lubricated conditions with a latex protection

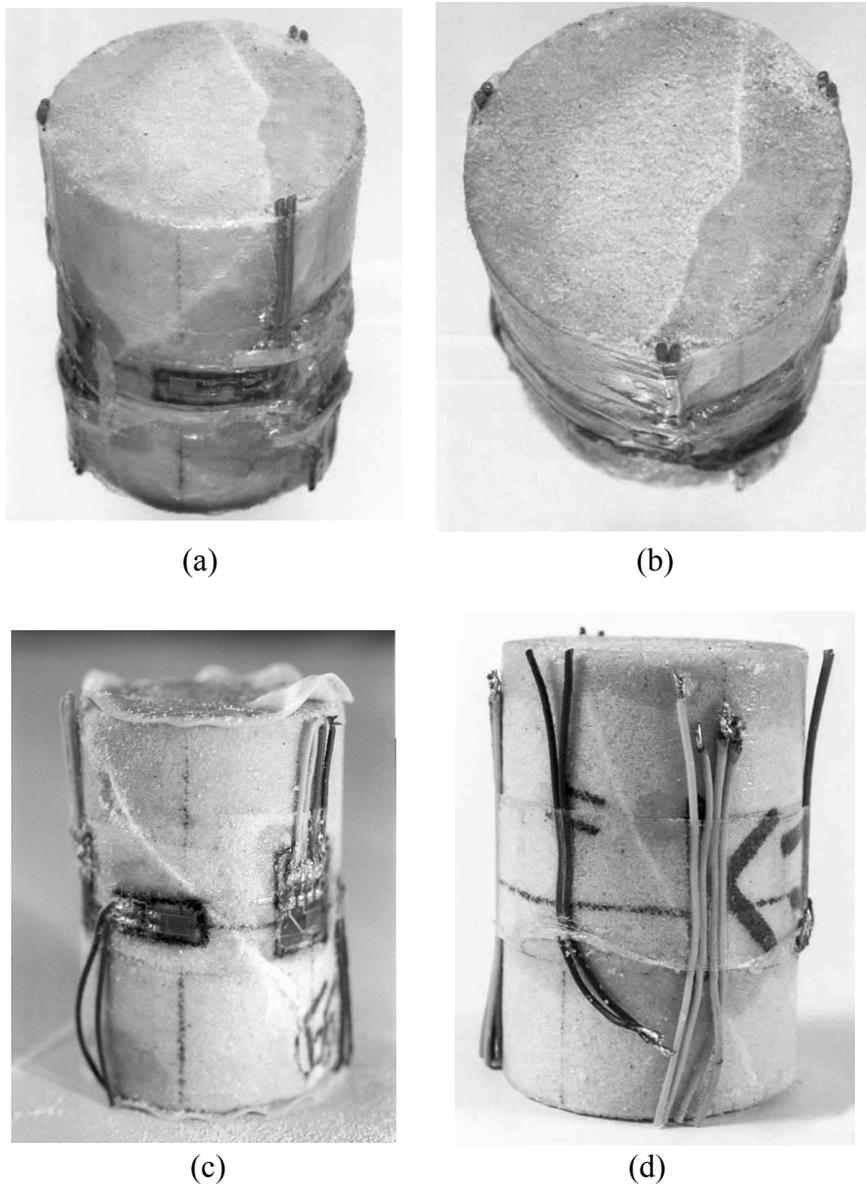


Fig. 15 : Bande de cisaillement formés pour des essais lubrifiés. (a) (b) Confinement de 28 MPa sur un échantillon saturé (K25) ; (c) Confinement de 42 MPa sur un échantillon sec (K99) ; (d) Confinement de 7 MPa sur un échantillon sec (K73).

Shear bands formed for lubricated samples: (a) & (b) Confining pressure of 28 MPa on a saturated sample (K25); (c) Confining pressure of 42 MPa on a dry sample (K99); (d) Confining pressure of 7 MPa on a dry sample (K73).

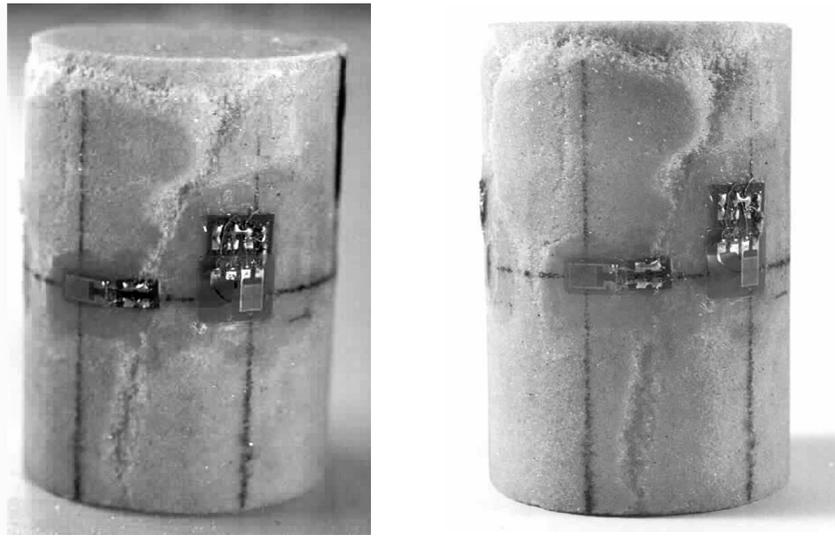


Fig. 16 : Essai réalisé en conditions frettées sous un confinement de 14MPa (F26.2) : Rupture combinée avec bande de cisaillement associée à la formation de cônes aux extrémités.
*Test performed with frictional interfaces with a confining pressure of 14 MPa (F26.2):
Combined failure mode with the formation of a shear band and a cone at the ends*

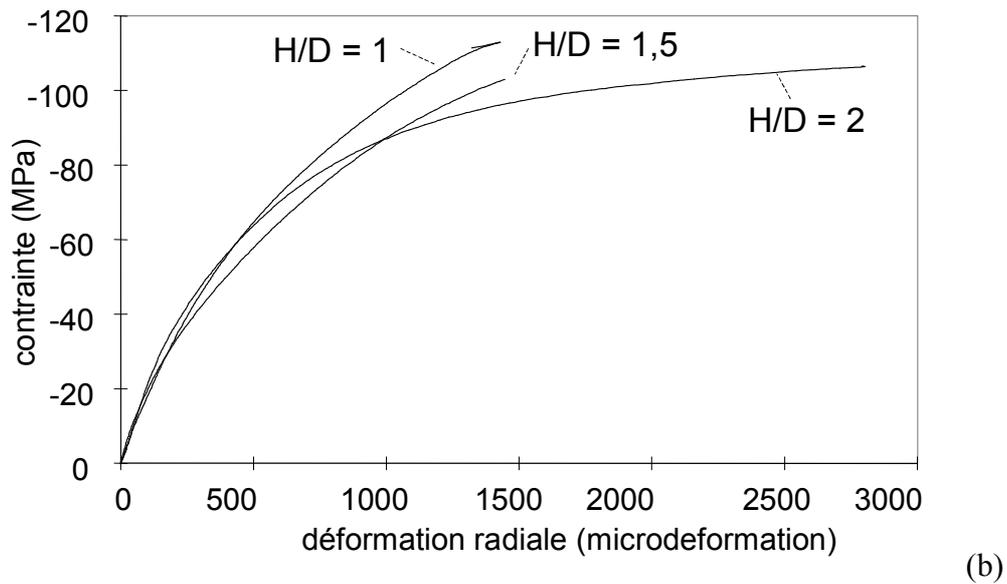
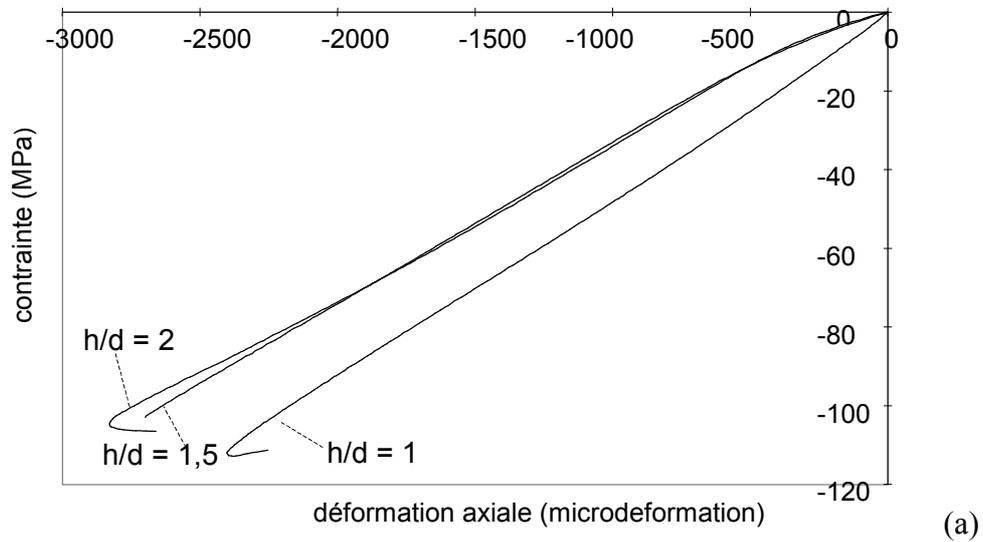


Fig. 17 : Comparaison de la réponse des jauges de déformations axiales (a) et radiales (b) pour les essais en conditions non lubrifiées sur des échantillons d'élanement 1 (B9), 1,5 (B15.1) et 2 (B10).

Comparison of the response of axial (a) and radial (b) strain gages for tests with no lubrication on samples with a slenderness of 1 (B9), 1.5 (B15.1) and 2 (B10).

nomenclature de l'essai	pression de confinement (MPa)	type de chargement	élancement	lubrification	Type de protection imperméabilisante
B13.1, B12.2	0	monotone	1.5	oui	aucune
B15.1, B24.1	0	monotone	1.5	non	aucune
B80, B35, B43, B6.2, B18.1, B17.1, B26	0	monotone	1.5	oui	latex
B32, B31, B13.2	0	cyclique	1.5	oui	latex
B18.2	4	monotone	1.5	oui	latex
B3	4	cyclique	1.5	oui	latex
B10	0	monotone	2	non	aucune
B2.2, B8.1	0	cyclique	2	oui	latex
B46	0	monotone	1	oui	aucune
B57, B60	0	monotone	1	oui	latex
B70	0	cyclique	1	oui	latex
B9	0	monotone	1	non	aucune
B69	4	monotone	1	oui	latex
B36	0	monotone	1.5	oui	spray graisse silicone
B23.2	0	monotone	1.5	oui	plaque de téflon
B33	0	monotone	1.5	oui	film plastique
B21	0	monotone	1.5	oui	mastic rubson blanc
B29	0	monotone	1.5	oui	plaque aluminium
B16.2	0	monotone	1.5	oui	spray de téflon
B19.1	0	monotone	1.5	oui	double plaque de téflon
B5.2	0	monotone	1.5	oui	carton
F21.1	0	monotone	1.5	oui	latex
F13.2	14	monotone	1.5	oui	latex
F26.2	14	monotone	1.5	non	aucune
K73	7	monotone	1.5	oui	latex
K25	28	cyclique	1.5	oui	latex
K99	42	cyclique	1.5	oui	latex

Tableau 1 : Nomenclature et description des essais triaxiaux.

Conditions d'interface	Confinement (MPa)	Essais réalisés	Pic de résistance (MPa)	Moyenne du pic de résistance (MPa)
lubrifié avec latex	0	B80 B43 B6.2 B26 B32 B13.2	58.8 61.2 46.9 48.5 44.5 43.7	50,7
non lubrifié	0	B15.1 B24.1	104.24 105.04	104,6
lubrifié avec latex	4	B18.2	103.4	103,4
lubrifié avec latex	14	F13.2	199.7	199,7
non lubrifié	14	F26.2	255.4	255,4

Tableau 2: Influence du frottement à l'interface sur le pic de résistance en compression uniaxiale et triaxiale.

Nomenclature de l'essai	Élancement	Confinement (MPa)	Conditions d'interface	Pic de résistance (MPa)
B10	2	0	non lubrifié	107,4
B15.1	1,5	0	non lubrifié	104,6
B9	1	0	non lubrifié	114,6

Tableau 3 : Pic de résistance pour des essais non lubrifiés réalisés sur des échantillons de différents élancements.

Nomenclature de l'essai	Elancement	Confinement (MPa)	Conditions d'interface	Pic de résistance (MPa)	Moyenne de pic de résistance (MPa)
B2.2	2		lubrifié avec latex	35.8	
B8.1	2	0		34.9	35.35
B57	1			26.1	
B60	1	0	lubrifié avec latex	22.45	23.3
B70	1			21.32	
B80	1.5			58.8	
B43	1.5			61.2	
B6.2	1.5		lubrifié avec latex	46.9	
B26	1.5	0		48.5	50,7
B32	1.5			44.5	
B13.2	1.5			43.7	

Tableau 4 : Pic de résistance pour des essais lubrifiés avec une protection de latex sur des échantillons de différents élancements.