

Gonflement tridimensionnel et anisotrope des roches argileuses

J. WAKIM
F. HADJ-HASSEN
M. TIJANI
D. GORDINE

École des Mines de Paris,
Centre de Géosciences
35, rue Saint-Honoré
77305 Fontainebleau
jad.wakim@hotmail.fr

Résumé

La mise en contact d'une roche argileuse avec l'eau entraîne l'apparition d'un gonflement qui joue un rôle important dans le comportement des ouvrages creusés dans ce type de terrain. Cette déformation est marquée par un caractère tridimensionnel et anisotrope et fait intervenir plusieurs mécanismes comme l'adsorption, l'osmose ou la capillarité.

Plusieurs travaux de recherche se sont intéressés au gonflement et ont souvent été controversés en raison de la complexité des phénomènes impliqués. Cet article s'inscrit dans le cadre de ces recherches et vise à contribuer à la compréhension du gonflement des roches argileuses lorsqu'elles sont confinées et soumises à l'eau. Pour caractériser le gonflement et identifier les principaux paramètres qui le gouvernent, il était nécessaire, en premier lieu, d'aborder le problème avec une approche expérimentale. De nombreux dispositifs ont alors été mis au point afin de réaliser des essais dans différentes conditions de gonflement.

Les résultats expérimentaux obtenus ont permis le développement d'un modèle rhéologique qui prend en considération le temps, l'anisotropie et le chargement appliqué.

Mots-clés : gonflement tridimensionnel, anisotropie, pression de gonflement, cinétique de gonflement, modélisation.

Three-dimensional anisotropic swelling of argillaceous rock

Abstract

The hydration of argillaceous rocks with water induces a swelling deformation which plays a major role in the behaviour of the structures excavated in this type of grounds. This deformation is marked by a three-dimensional and anisotropic character and involves several mechanisms like adsorption, osmosis or capillarity.

Several researches were dedicated to swelling and were often much debated due to the complexity of the implied phenomena. This paper lies within this framework and aims at contributing to a better understanding of swelling when the rock is confined and hydrated with water.

To characterize swelling and to identify the main governing parameters, it was necessary to use an experimental approach. Devices were then developed to carry out tests under various conditions of swelling.

The experimental results obtained allowed the development of a model which takes into account time, anisotropy and the applied loading.

Key words : three-dimensional swelling, anisotropy, swelling pressure, swelling kinetic, modelling.

NDLR : Les discussions sur cet article sont acceptées jusqu'au 1^{er} septembre 2007.

Introduction

Le gonflement de certains sols ou de certaines roches constitue un phénomène très important en géotechnique car il est à l'origine de nombreux dommages des ouvrages réalisés en surface et en souterrain. Ce phénomène, qui est prépondérant dans les matériaux argileux, dépend des caractéristiques des minéraux argileux et se déclenche lorsque ceux-ci sont mis en contact avec une solution aqueuse.

Différents types d'hydratation induisent le gonflement tels que la capillarité, l'osmose et l'adsorption. Ils sont liés à la non saturation initiale de la roche, à la concentration en sel de la solution et aux propriétés électrochimiques des feuillets argileux. Expérimentalement, ces types d'hydratation sont associés et ne peuvent pas être séparés en vue de l'identification de l'effet de chaque mécanisme. Le gonflement est également influencé par les contraintes appliquées et se caractérise par une anisotropie plus prononcée pour les roches argileuses que pour les sols argileux. Le gonflement normal aux strates est en effet plus important que le gonflement parallèle.

Cet article s'inscrit dans le cadre des recherches entreprises pour expliquer et caractériser le gonflement des roches argileuses lorsqu'elles sont mises en contact avec de l'eau. Il aborde le problème avec une approche globale pour décrire la relation contrainte-déformation en mettant particulièrement l'accent sur le caractère anisotrope du comportement.

Pour mener à bien cette recherche, la voie qui nous a paru la plus appropriée consistait à procéder à des expérimentations spécifiques en laboratoire dans le but de comprendre et de décrire le comportement d'un matériau argileux qui a fait l'objet, dans la littérature, de nombreuses explications souvent contradictoires. Ce choix a nécessité la mise en oeuvre d'essais représentatifs permettant de caractériser les différentes possibilités du gonflement tridimensionnel anisotrope.

Les principaux points examinés étaient, d'une part, l'effet des conditions aux limites latérales sur le gonflement axial (déplacement nul ou contrainte constante) et, d'autre part, l'influence de la contrainte axiale et son historique de déchargement sur le gonflement radial. L'anisotropie du gonflement a été étudiée en effectuant,

pour différentes orientations de l'éprouvette, des essais de gonflement libre, de gonflement empêché et de gonflement uniaxial. Cet éventail d'essais mécaniques a permis d'étudier le gonflement en passant du gonflement maximal au gonflement nul.

Les résultats obtenus ont servi au développement d'un modèle de gonflement qui prend en compte les effets de l'anisotropie et de la contrainte appliquée. Le temps d'hydratation est directement intégré dans la formulation analytique proposée.

Dispositifs expérimentaux

Afin d'étudier le comportement d'une roche argileuse en laboratoire en imposant des conditions radiales différentes (gonflement radial empêché et gonflement radial libre), nous avons mis au point différents dispositifs expérimentaux :

– la *cellule de mesure des déformations libres* (Fig. 1) a pour objectif de mesurer en continu les déplacements axial et radial d'une éprouvette mise en contact avec l'humidité ou avec une solution aqueuse. La variation du diamètre de l'éprouvette est mesurée, uniquement dans le cas où l'éprouvette présente une stratification horizontale, au moyen d'un ruban en laiton encerclant l'éprouvette et légèrement mis en tension et relié à un capteur de déplacement. La variation de la hauteur est mesurée par un capteur de déplacement disposé au centre de la face supérieure de l'éprouvette ;

– la *cellule œdométrique* (Fig. 2) a pour objectif de déterminer, en fonction de la contrainte axiale appliquée, le gonflement axial d'une éprouvette empêchée de gonfler radialement. Elle est composée d'un anneau métallique de forte rigidité permettant d'accueillir une éprouvette de diamètre 36 mm et de hauteur 25 mm. La contrainte axiale est appliquée par un vérin qui la transmet à l'éprouvette à travers un système de ressorts de forte raideur. La saturation de l'éprouvette est assurée par un réservoir d'eau qui transmet le fluide au travers d'une pierre poreuse et d'une membrane en inox percée encerclant l'éprouvette. La circonférence de l'éprouvette ainsi que celle de la membrane en inox ont été graissées afin de réduire le plus possible le frottement latéral ;

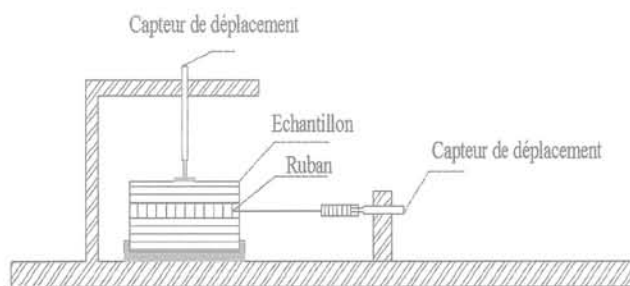


FIG. 1 Cellule de gonflement libre.
Free swelling cell.

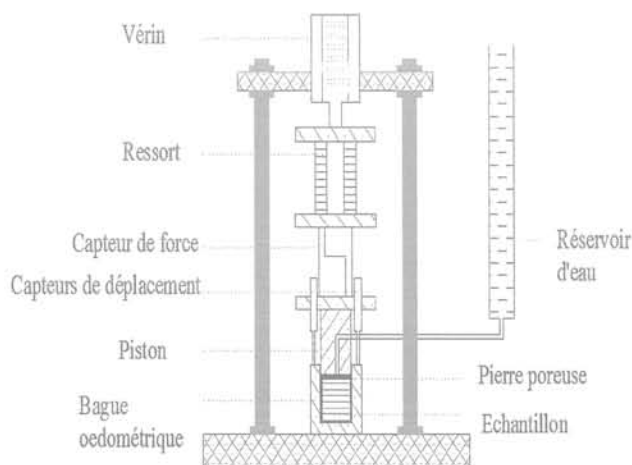


FIG. 2 Cellule œdométrique.
Oedometric cell.

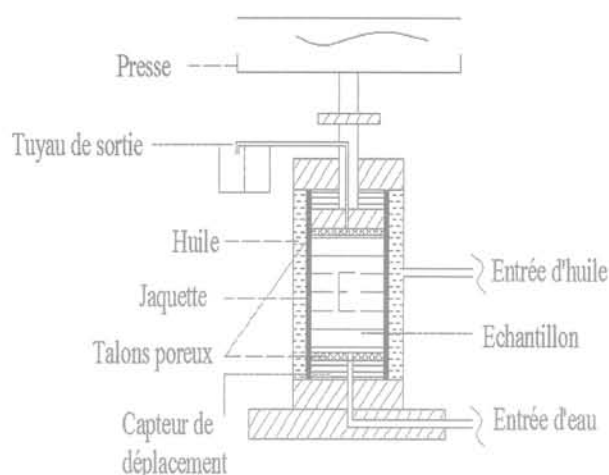


FIG. 3 Cellule triaxiale.
Triaxial cell.

– la *cellule triaxiale* (Fig. 3) permet d'appliquer différents chemins de contraintes axiale et radiale et de suivre le gonflement axial généré. Cette cellule est compatible avec la presse de type MTS (*Mechanics Testing System*). Les éprouvettes sont carottées et découpées de façon à avoir un diamètre de 50 mm et une hauteur de 25 mm. La contrainte axiale est appliquée par un piston hydraulique avec une vitesse de déformation de 120 $\mu\text{m/min}$ et la pression de confinement par un injecteur d'huile. Une fois que la contrainte axiale appliquée est atteinte, on maintient cette contrainte durant la phase de gonflement. La contrainte radiale est transmise à l'éprouvette au moyen d'une gaine de silicone imperméable enrobant l'éprouvette. La saturation de l'éprouvette est assurée par l'injection d'eau de bas en haut à travers les talons poreux déposés de part et d'autre de l'éprouvette.

Au cours des essais réalisés avec cette cellule, on a essayé de déterminer le gonflement radial en mesurant la variation du volume d'huile expulsé. La compressibilité de l'huile, la variation de température et le volume de l'air emprisonné autour de la jaquette ont rendu cette méthode de mesure non valide. Il faut aussi noter que l'utilisation de jauges de déformation collées directement à l'éprouvette n'est pas fiable car les jauges se décollent au contact de l'eau ;

– la *cellule uniaxiale* (Fig. 4) sert à déterminer le gonflement axial et le gonflement radial d'une éprouvette subissant différents chemins de contrainte axiale. Les éprouvettes testées présentent une stratification horizontale pour des mesures axiale et radiale et une stratification verticale pour des mesures axiales parallèles aux strates. Le diamètre des éprouvettes est égal à 50 mm et la hauteur est égale à 35 mm. Le déplacement axial est mesuré par deux capteurs de type LVDT tandis que le gonflement radial est mesuré par un ruban en inox entourant diamétralement l'éprouvette et relié à un capteur de déplacement par une poulie et un ressort. L'imbibition est assurée par immersion de l'éprouvette dans un récipient contenant de l'eau.

Tous les essais ont été réalisés à la température ambiante de 20 °C et ont été effectués sur des éprouvettes présentant une forme cylindrique dont les faces ont été rectifiées de telle manière à ce qu'elles soient parfaitement planes, parallèles entre elles et perpendiculaires à l'axe de l'éprouvette. Les éprou-

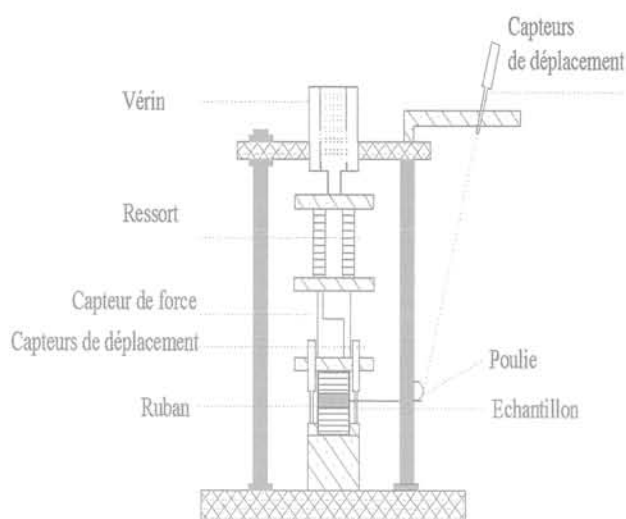


FIG. 4 Cellule uniaxiale.
Uniaxial cell.

vettes ont été carottées et découpées à l'air comprimé puis ont été correctement conservées sous vide dans des sacs hermétiques de manière à préserver leur état hydrique initial jusqu'à la phase de réalisation des essais.

3

Caractéristiques de la roche argileuse testée

L'étude a porté sur les schistes argileux en provenance des mines de charbon des Houillères du Bassin de Lorraine. Les échantillons ont été prélevés dans la mine de la Houve à une profondeur de l'ordre de 900 mètres. La masse volumique de cette roche est de 2,65 mg/m^3 . L'analyse minéralogique, par diffraction de rayons X, a montré que la roche est composée de 70 % de minéraux argileux dont 40/55 % d'illite, 20/45 % de chlorite et 5/35 % de kaolinite, le pourcentage restant étant composé de quartz et de feldspath. La teneur en eau initiale est égale à 1,2 %, cette valeur correspond à des échantillons bien conservés après prélèvement.

Afin d'estimer expérimentalement l'activité de l'eau des pores, on a exposé plusieurs éprouvettes à différentes humidités relatives H_r , puis on a mesuré pour chacune la variation de la masse après stabilisation. L'activité de l'eau des pores (a) est déterminée de manière à ce qu'il n'y ait aucun changement de masse et peut être exprimée, selon Chenevert (1973), comme suit :

$$a = \frac{H_r}{100} \quad (1)$$

Selon la figure 5, l'activité de l'eau des pores est égale à 0,34, ce qui correspond à une humidité relative initiale de 34 %. La roche est donc non saturée initialement et cela a été confirmé sur la figure 6 où la variation de la masse relative en fonction de l'humidité relative présente un comportement typique d'un matériau faiblement poreux et non saturé.

D'un point de vue mécanique, la résistance à la compression simple est de l'ordre de 20 MPa et la résistance à la traction déterminée par un essai brésilien est de 3,7 MPa. Le module d'Young normal aux strates est

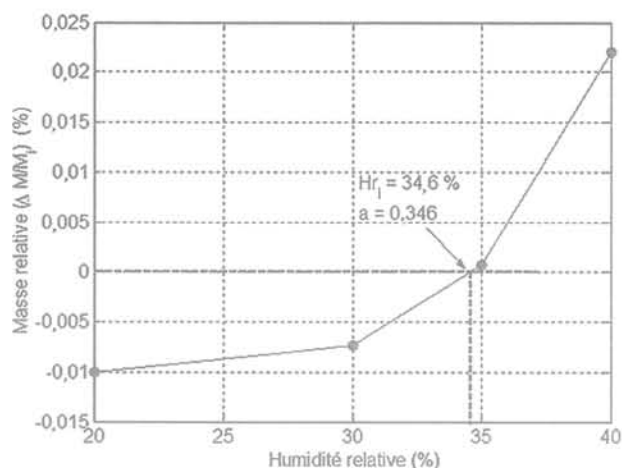


FIG. 5 Estimation de l'activité de la roche.
Estimation of water activity.

égal à 4 000 MPa. Par ailleurs, le comportement mécanique est fortement influencé par la variation de la teneur en eau. Une diminution de l'ordre de 70 % a été constatée au niveau de la résistance à la compression simple et du module de Young lorsque la teneur en eau passe de 1,2 % (état initial) à 5 % (état saturé).

La figure 7 montre que la réduction des propriétés mécaniques dépend de la saturation et également de la contrainte axiale appliquée durant l'hydratation avant la réalisation de l'essai de rupture. La réduction de la résistance en compression simple est élevée dans le cas où l'éprouvette est immergée 48 heures sans application d'une contrainte axiale. Cependant, l'application d'une contrainte axiale de 1 MPa durant l'immersion a pour effet de minimiser la réduction de la résistance à la compression simple. Ce phénomène peut être expliqué par l'ouverture et la création de fissures qui sont d'autant plus prononcées que la contrainte appliquée durant la phase de saturation est plus faible.

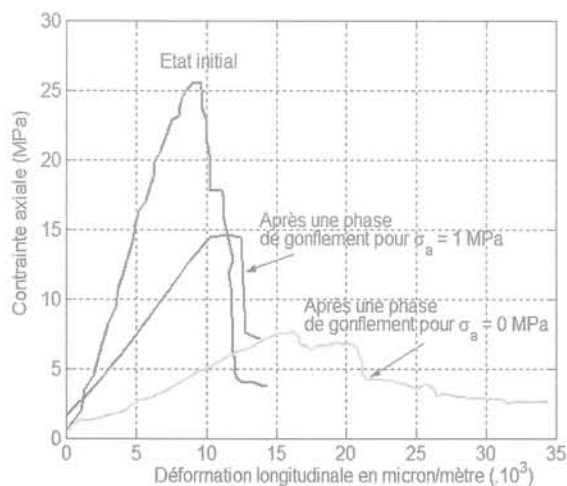


FIG. 7 Influence de la saturation et de la contrainte axiale appliquée sur la réduction de la résistance en compression simple.
Influence of saturation and the applied stress on the reduction of the unconfined compression stress.

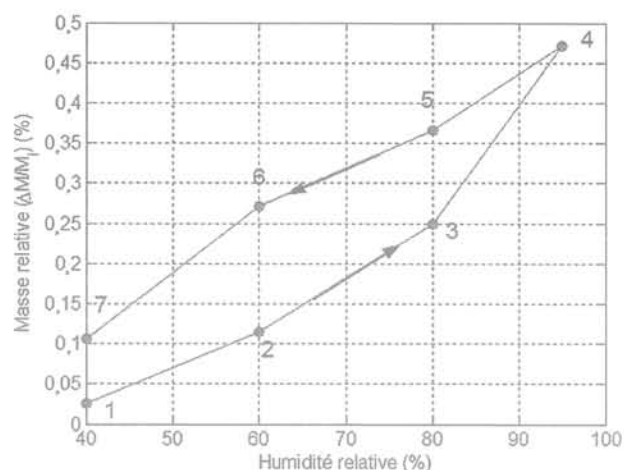


FIG. 6 Masse relative en fonction de l'humidité relative.
Relative weight versus relative humidity.

4

Objectifs et résultats des essais

Étant donné que la roche présente une anisotropie structurale, nous avons commencé par caractériser l'anisotropie de gonflement et l'anisotropie de la pression de gonflement au moyen des essais classiques de gonflement libre et de gonflement empêché. Ces essais ne permettant pas de décrire complètement le comportement, il a été alors nécessaire de comparer la réponse axiale de la roche que ce soit en termes de pression ou de déplacement pour deux conditions différentes de gonflement radial : œdométrique et libre.

Une fois l'influence des conditions latérales sur le gonflement axial établie, nous avons cherché à analyser l'effet de la contrainte axiale sur le gonflement radial. Pour cela, la réalisation des essais uniaxiaux, avec mesures simultanées du gonflement radial et du gonflement axial, s'est avérée nécessaire. Dans le même esprit, la cellule triaxiale a permis de déterminer l'influence de la pression de confinement latéral sur le gonflement axial ainsi que l'influence de la contrainte déviatorique sur le gonflement axial.

Arrivé à ce stade d'expérimentation, nous avons pu caractériser toutes les possibilités de gonflement et confronter nos observations et nos résultats par rapport aux hypothèses contradictoires existantes dans la littérature :

- indépendance du gonflement dans une direction principale des contraintes appliquées suivant les autres directions (Zhou *et al.*, 1992, Kiehl, 1989, Froehlich, 1987) ;
- augmentation du gonflement dans une direction principale avec les contraintes suivant les autres directions (Yesil *et al.*, 1993 ; Windal, 2001) ;
- diminution du gonflement dans une direction principale avec les contraintes suivant les autres directions (Hawlder, 2003 ; Wong et Wang, 1997 ; Lo et Lee, 1989).

Après avoir identifié tous les paramètres influençant le gonflement, nous nous sommes intéressés à l'étude de la pression de gonflement sur laquelle les avis sont également divergents en particulier en ce qui concerne la définition de sa valeur. Les méthodes les plus fréquemment rencontrées sont les suivantes :

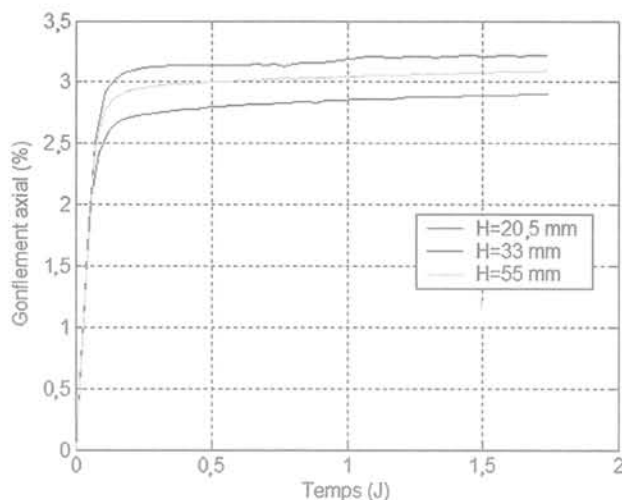
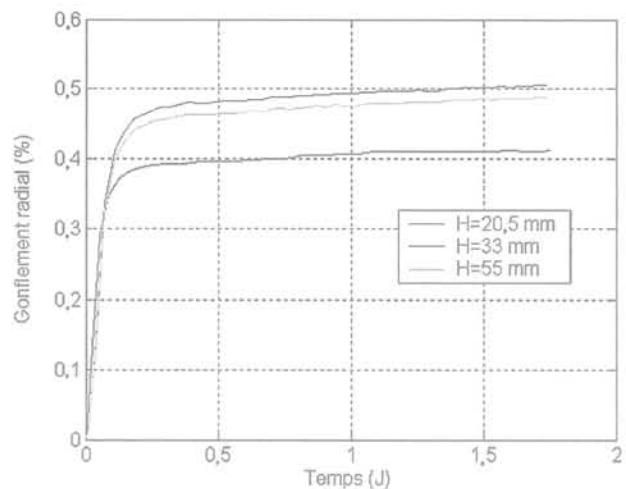


FIG. 8 Gonflement axial et gonflement radial en fonction de la hauteur des éprouvettes.
Axial swelling and radial swelling for different heights of samples.



- la méthode du gonflement empêché ;
- la méthode du prégonflement qui consiste à laisser l'éprouvette gonfler puis à la charger par paliers de contraintes croissantes de telle manière à rattraper le gonflement généré ;
- la méthode d'Huder et Amberg (1970) qui consiste à appliquer initialement sur une éprouvette une contrainte initiale élevée puis à la décharger par paliers de contraintes décroissantes en attendant la stabilisation du gonflement pour chaque palier. La pression de gonflement correspond dans ce cas à l'intersection de la droite d'Huder et Amberg avec l'axe des contraintes.

4.1

Gonflement libre

L'étude expérimentale a commencé par l'analyse du gonflement libre tridimensionnel où l'éprouvette n'est soumise à aucune contrainte axiale et radiale. Lors de cette phase, on s'est intéressé à l'effet de la taille de l'éprouvette sur le gonflement et le lien entre le gonflement volumique et la masse d'eau retenue par l'éprouvette, étant donné que le gonflement ne peut pas s'opérer sans l'existence d'un fluide hydratant.

4.1.1

Effet de la taille de l'éprouvette

L'influence de la hauteur de l'éprouvette sur le gonflement axial et le gonflement radial a été étudiée sur des éprouvettes de stratification horizontale. Les essais ont été réalisés pour des hauteurs de 20,5, 33 et 55 mm et pour un diamètre de 50 mm. Les résultats des essais sont présentés sur la figure 8.

On constate que l'éprouvette augmente de volume à la fois axialement et radialement et présente une anisotropie de gonflement fortement marquée surtout pour une direction normale aux strates.

Pour une hauteur de 20,5 mm, le gonflement axial et le gonflement radial sont les plus élevés alors que, pour une hauteur de 33 mm, ils sont les plus faibles. On peut donc en déduire que la hauteur n'a pas d'influence

sur le gonflement étant donné que, pour une hauteur de 55 mm, le gonflement est intermédiaire. Cette différence de mesure peut être imputée à l'hétérogénéité des éprouvettes.

De la même façon, le diamètre de l'éprouvette n'a pas de conséquence sur le gonflement libre axial et cela a été vérifié pour quatre essais, dont deux de répétitivité, sur des éprouvettes ayant une hauteur de 20 mm et présentant une stratification horizontale (Fig. 9).

Ces résultats montrent que, à l'échelle mésoscopique, le gonflement est indépendant de la taille de l'éprouvette. Malgré la faible perméabilité de la roche, ces essais nous permettent de déduire que l'infiltration de l'eau n'est pas un facteur primordial influant sur le gonflement. Le paragraphe suivant permet de mettre en évidence l'influence de la masse retenue par l'éprouvette sur le gonflement.

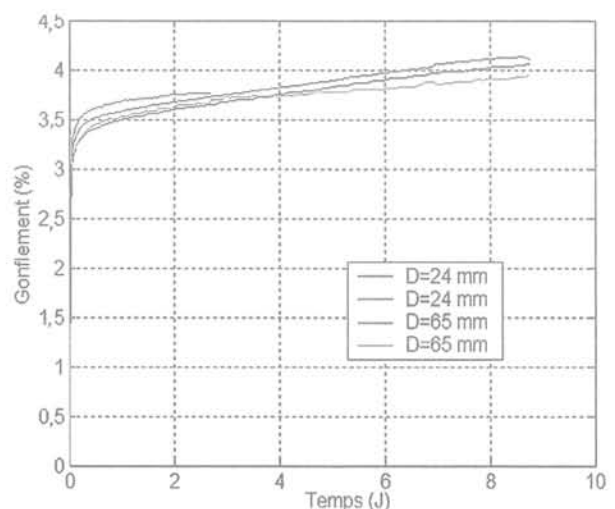


FIG. 9 Gonflement axial en fonction du diamètre des éprouvettes.
Axial swelling for different diameters of samples.

Gonflement volumique et échange massique

L'échange de masse a été étudié sur des éprouvettes libres de gonfler axialement et radialement par imposition de deux types d'hydratation : hydratation par phase liquide et hydratation par phase vapeur.

Chaque type d'hydratation nécessite deux éprouvettes identiques : l'un pour la mesure du gonflement et l'autre pour déterminer l'évolution de la masse.

• *Hydratation par phase liquide* : la figure 10 présente l'évolution du gonflement volumique $\Delta v/v_0$ et de la variation unitaire du volume d'eau $\Delta v_w/v_0$ en fonction du temps d'hydratation. Cette figure représente également l'évolution du rapport $\Delta v/v_w$ en fonction du temps.

On peut constater que le gonflement volumique ne dépend pas d'une manière directe de la quantité d'eau retenue par l'éprouvette. Ce gonflement est inférieur à la masse d'eau retenue par l'éprouvette. En effet, la moitié de cette quantité est responsable du gonflement maximal.

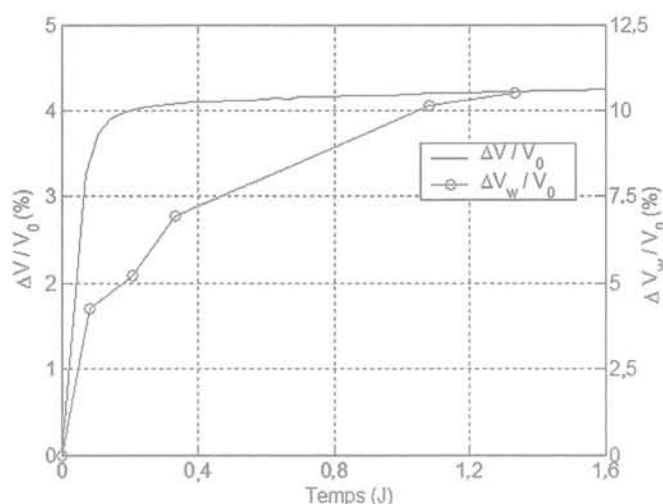


FIG. 10 Variation de $\Delta v/v_0$, $\Delta v_w/v_0$ et $\Delta v/v_w$ en fonction du temps.
Variation of $\Delta v/v_0$, $\Delta v_w/v_0$ and $\Delta v/v_w$ versus time.

Au temps égal à 0,4 jour, on atteint la phase ultime qui conduit au remplissage des pores sans augmentation notable du volume.

Les résultats montrent également que la cinétique du gonflement est plus rapide que l'échange de masse

et que le rapport $\frac{\Delta v}{v_w}$ est inférieur à 1 et diminue avec

le temps d'hydratation.

• *Hydratation par phase vapeur* : un essai d'humidification a été effectué au moyen d'une enceinte hygrométrique de type Votsh VCN 100 pour différents paliers d'humidité relative (50, 70, 90 et 99 %) et les résultats sont présentés sur la figure 11.

Bien que le gonflement et la masse de l'éprouvette augmentent avec l'humidité relative, le rapport $\Delta v/v_w$ diminue avec le temps d'hydratation.

En conclusion, ces essais, effectués pour différents types d'hydratation, confirment que le gonflement volumique n'est pas relié à la quantité d'eau retenue par l'éprouvette.

Cela est dû à la non-saturation initiale de la roche.

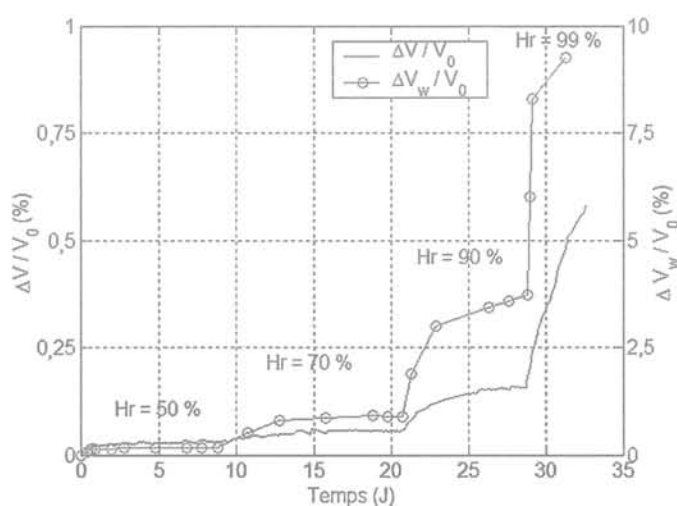
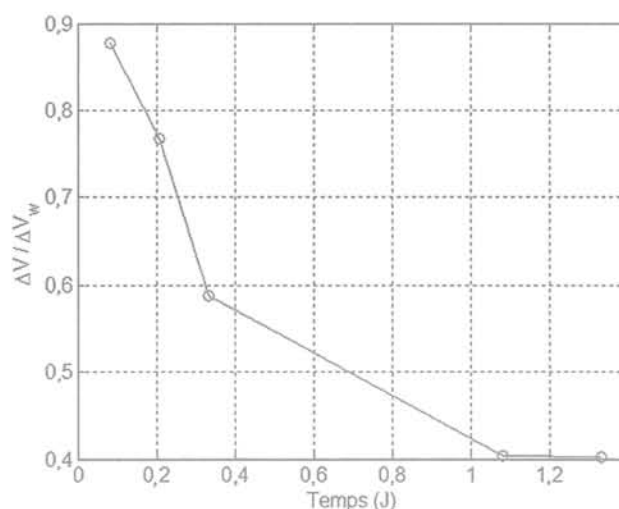
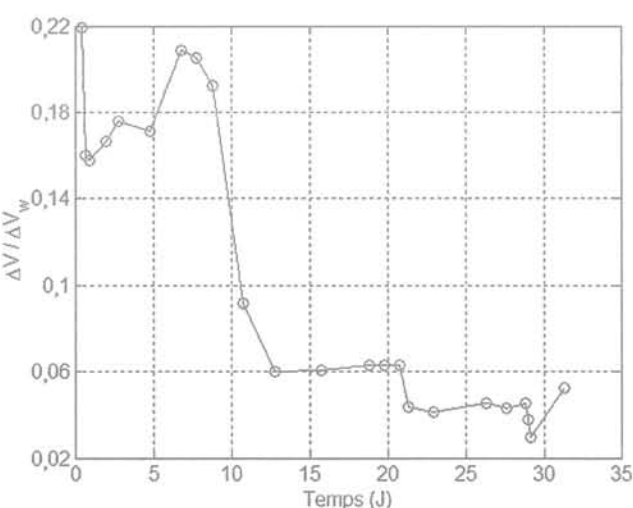


FIG. 11 Variation de $\Delta v/v_0$, $\Delta v_w/v_0$ et $\Delta v/v_0$ en fonction du temps.
Variation of $\Delta v/v_0$, $\Delta v_w/v_0$ and $\Delta v/v_0$ versus time.



Anisotropies du gonflement libre et de la pression de gonflement

L'influence de l'anisotropie du gonflement a été étudiée, à partir des mesures du déplacement axial, sur quatre éprouvettes orientées à 0, 30, 45 et 90°. L'orientation (α) de l'éprouvette correspond à l'angle entre le plan de stratification et le plan horizontal.

L'accroissement de l'orientation a pour effet de réduire le gonflement axial. A la stabilisation, le gonflement parallèle aux strates est le plus faible et le gonflement normal à celles-ci est le plus élevé (Fig. 12). Le coefficient d'anisotropie (rapport du gonflement normal aux strates au gonflement parallèle à celles-ci) est proche de 6,5.

Pour une orientation de 45°, le gonflement est proche de la moyenne des gonflements principaux.

L'anisotropie du gonflement peut être expliquée de deux façons contradictoires :

- puisque la roche présente des propriétés mécaniques anisotropes, une pression de gonflement isotrope se manifeste par un gonflement anisotrope. Cette pression isotrope correspond, selon la loi de Kelvin, à la valeur absolue de la succion initiale de la roche. Elle est égale à 145 MPa pour une humidité relative initiale de la roche de 34,6 % ;
- l'organisation des feuillets argileux est responsable de la formation de la double couche diffuse plus épaisse suivant la direction normale aux strates.

Afin de caractériser l'anisotropie de la pression de gonflement, des essais de mesure de la pression de gonflement axiale ont été réalisés sur deux éprouvettes à différentes orientations (0° et 90°) et sont présentés sur la figure 13. Ces essais ont été effectués dans le cas où le gonflement radial et le gonflement axial sont bloqués ($\epsilon_a = \epsilon_r = 0$). Au temps de stabilisation, la pression de gonflement pour une éprouvette présentant une stratification horizontale est de 0,66 MPa. Pour une stratification verticale, la pression de gonflement obtenue est de 0,25 MPa.

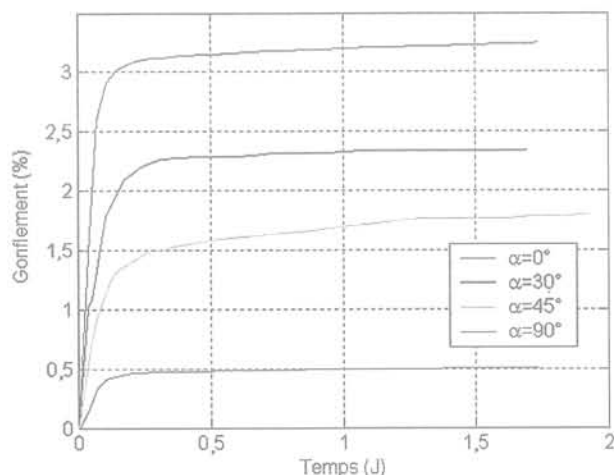


FIG. 12. Gonflement axial pour différentes orientations.
Axial swelling for different orientations.

On constate que la pression de gonflement, mesurée par la méthode du gonflement empêché, n'est pas isotrope. Le coefficient d'anisotropie de la pression de gonflement est de l'ordre de 2,64 et est également inférieur au coefficient d'anisotropie du gonflement libre.

De plus, l'influence de la contrainte axiale sur l'anisotropie de gonflement a été étudiée en effectuant des essais uniaxiaux sur des éprouvettes de stratifications horizontale et verticale. Les contraintes axiales appliquées sont : 0,7 ; 0,4 ; 0,2 et 0,1 MPa.

La figure 14 représente la variation du coefficient d'anisotropie $a_g = \frac{\epsilon(\alpha = 0^\circ)}{\epsilon(\alpha = 90^\circ)}$ en fonction de la contrainte appliquée.

Ce coefficient est donc supérieur à 1 et est plus faible pour une contrainte de 0,1 MPa. Cela est dû au fait que le gonflement, suivant la direction normale aux strates, est très sensible à la contrainte appliquée.

4.3

Influence du confinement latéral

Pour étudier l'influence du confinement latéral sur le gonflement et la pression de gonflement, deux séries d'essais ont été effectuées :

- la première série consiste à effectuer deux essais de gonflement empêché pour deux diamètres différents (Fig. 15) ;
- la seconde série consiste à comparer le gonflement libre au gonflement œdométrique (Fig. 16).

L'influence du blocage du gonflement radial sur la pression de gonflement axiale a été étudiée sur une éprouvette de diamètre inférieur au diamètre de la bague œdométrique.

Le gonflement radial toléré est largement plus élevé que le gonflement radial libre et cela a été justifié après le démontage de la cellule œdométrique où l'éprouvette n'a pas été mise en contact avec l'anneau œdométrique.

Les deux courbes présentées sur la figure 15 représentent deux essais : la première courbe correspond au

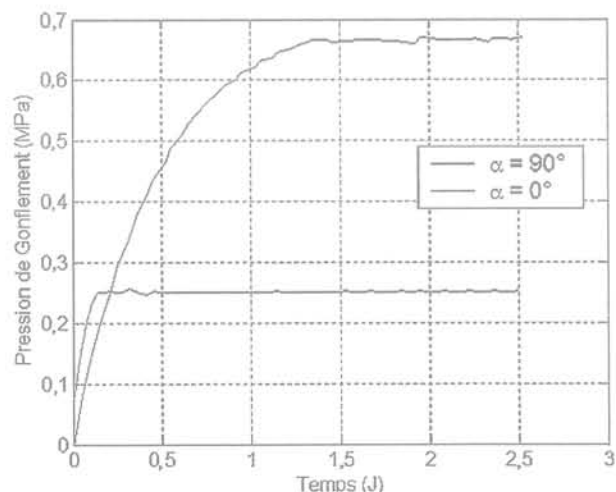


FIG. 13. Pression de gonflement axial pour différentes orientations.
Axial swelling pressure for different orientations.

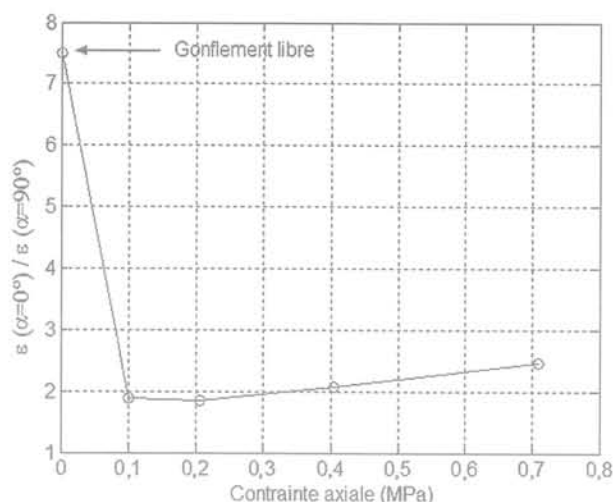


FIG. 14 Anisotropie du gonflement pour différentes contraintes axiales.
Swelling anisotropy versus axial stress

blocage total du gonflement axial et du gonflement radial et l'autre correspond uniquement au blocage du gonflement axial.

On peut constater que les pressions de gonflement, dans le cas où l'on libère ou pas le gonflement radial, sont presque comparables.

L'influence du blocage du gonflement radial sur le gonflement axial a été étudiée sur deux éprouvettes, l'une empêchée de gonfler latéralement et l'autre libre de gonfler latéralement.

Sur la figure 16, on remarque que, quel que soit le confinement latéral, le gonflement axial normal aux strates est presque identique pour les deux essais.

Ces deux séries d'essais montrent que le gonflement axial ainsi que la pression de gonflement axiale ne dépendent pas du gonflement radial.

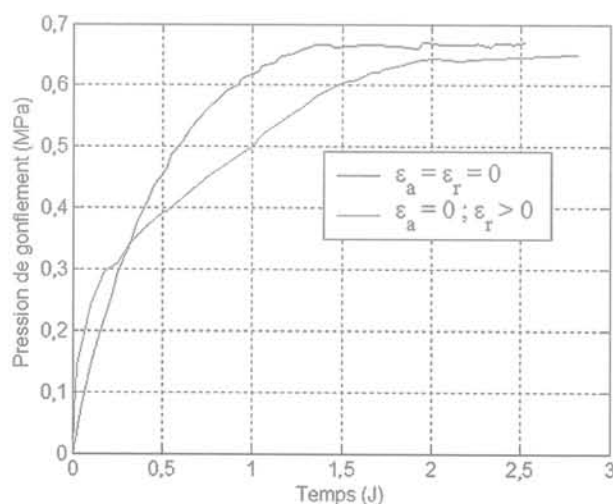


FIG. 15 Pression de gonflement axial pour deux conditions de gonflement latéral.
Axial swelling pressure for two different lateral confinements.

4.4

Influence de la contrainte axiale sur le gonflement radial

Pour étudier l'influence de la contrainte axiale sur le gonflement latéral, deux essais ont été effectués pour différents chemins de déchargement de la contrainte axiale : 1 ; 0,7 et 0,5 MPa puis 0,7 ; 0,4 ; 0,2 et 0,1 MPa.

Sur la figure 17, les déformations élastiques instantanées dues au déchargement ne sont pas représentées. On ne s'intéresse qu'au gonflement après stabilisation.

Bien que le gonflement axial augmente avec la diminution de la contrainte axiale, le déchargement de la contrainte axiale n'induit pas de nouveau gonflement radial. Aucune différence notable de gonflement radial n'a été observée malgré les différents chemins de contraintes parcourus par les éprouvettes. On peut en déduire que le gonflement latéral n'est influencé ni par la contrainte axiale initialement appliquée ni par le chemin de déchargement.

4.5

Influence de la contrainte déviatorique et de la pression de confinement

Les essais effectués ont montré que, pour un même déviateur de contraintes et pour des contraintes principales différentes, le gonflement axial normal aux strates n'est pas le même.

Cependant, le gonflement axial est presque identique pour deux déviateurs de contraintes différents.

Le tableau I résume les résultats des essais.

En ce qui concerne l'influence de la pression de confinement, le tableau II montre que le gonflement axial est indépendant des conditions de confinement latérales.

Ces différentes constatations prouvent que le déviateur de contrainte et la pression de confinement n'ont pas d'influence sur le gonflement axial.

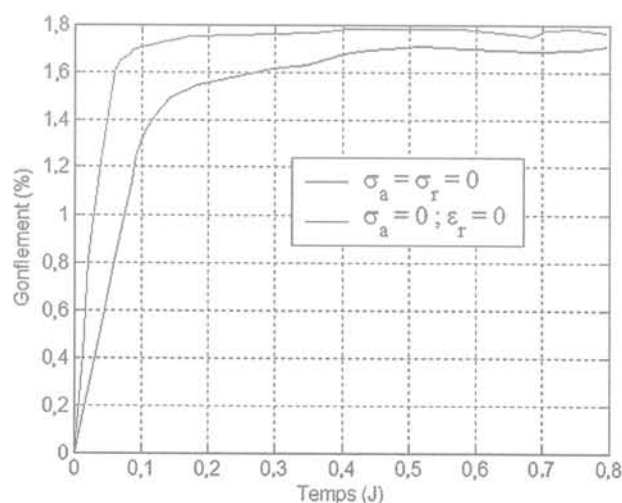


FIG. 16 Gonflement axial pour deux conditions de gonflement latéral.
Axial swelling for two different lateral confinements.

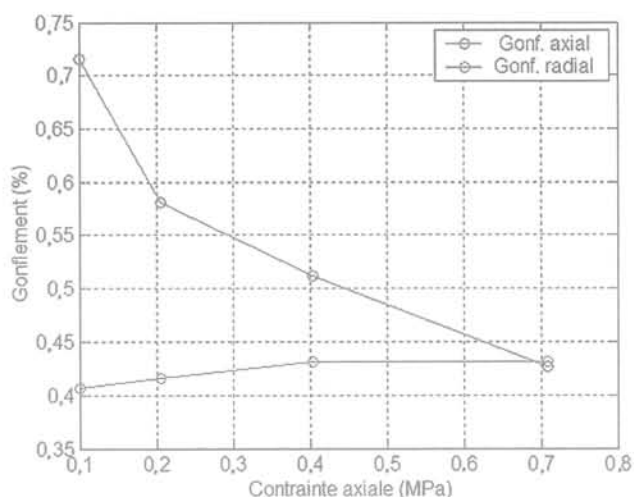
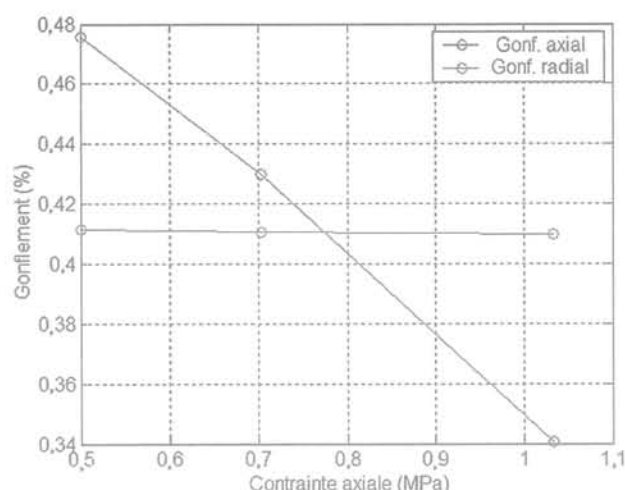


FIG. 17 Gonflements axial et radial pour différents chemins de déchargement de la contrainte axiale.
Axial and radial swelling for different paths of axial stress.

TABLEAU I Influence du déviateur des contraintes sur le gonflement axial.
Influence of deviatoric stress on the axial swelling.

Déviateur de contraintes (MPa)	Contraintes principales (MPa)	Gonflement axial (%)
Q = 0	$\sigma_1 = \sigma_3 = 1$	0,3
	$\sigma_1 = \sigma_3 = 0$	3
Q = 1	$\sigma_1 = 1; \sigma_3 = 0$	0,34

TABLEAU II Influence des conditions radiales sur le gonflement axial.
Influence of radial conditions on the axial swelling.

Contrainte axiale (MPa)	Contraintes radiales	Gonflement axial (%)
$\sigma_1 = 1,5$	$\sigma_3 = 1$ MPa	0,28
	$\varepsilon_r = 0$ (œdomètre)	0,31
$\sigma_1 = 0,1$	$\sigma_3 = 0$ MPa	0,71
	$\varepsilon_r = 0$ (œdomètre)	0,68

4.6

Pression de gonflement

Les essais de gonflement empêché ont donné lieu à une pression de gonflement normale aux strates égale à 0,67 MPa. Une série d'essais composée de deux essais de gonflement œdométriques monopaliers a été réalisée pour des contraintes axiales de 1,2 et de 0,6 MPa appliquées normalement aux strates. D'après ces essais, l'application d'une contrainte de 1,2 MPa, qui est presque deux fois supérieure à la pression de gonflement mesurée, engendre un gonflement de 0,3 %. Ce constat peut être expliqué par le fait que lorsque l'éprouvette garde sa forme initiale, elle génère un gonflement interne qui a pour effet de réduire sensiblement la pression de gonflement.

Ainsi, la pression de gonflement mesurée par la méthode du gonflement empêché ne correspond pas à la contrainte qu'il faut appliquer pour empêcher le gonflement à volume constant. Il s'agit donc à présent d'estimer la valeur de cette contrainte.

4.6.1

Comportement de la roche en chargement

La procédure expérimentale suivie consiste à charger axialement l'éprouvette disposée dans la cellule triaxiale par paliers de contraintes croissantes de telle manière à rattraper le gonflement généré. La pression de gonflement, déterminée par cette procédure, correspond à la pression finale appliquée où l'on n'observe plus de gonflement.

La contrainte initiale appliquée est égale à 1,3 MPa, le chemin de chargement par paliers correspond à 2,5 ; 3,3 et 5,9 MPa et la pression de confinement est égale à 1 MPa. Les résultats de l'essai sont présentés sur la figure 18.

La contrainte à appliquer, nécessaire pour revenir à l'état initial avant imbibition, est égale à 5,9 MPa. Cette contrainte est largement supérieure à la pression de gonflement mesurée par la méthode du gonflement empêché mais ne contredit pas les résultats des essais de gonflement sous contraintes.

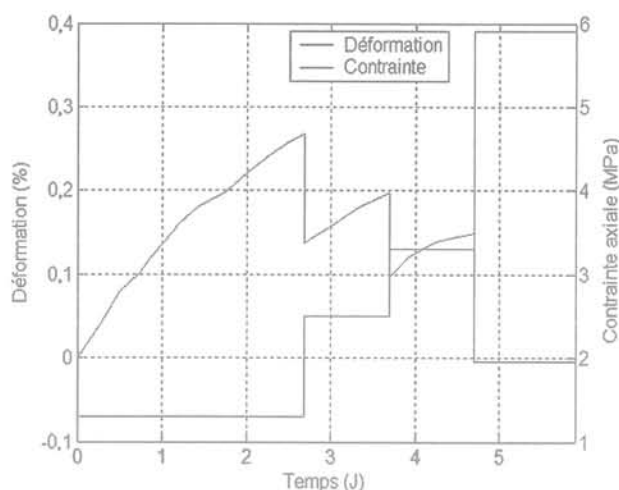


FIG. 18 Gonflement axial en fonction de la contrainte axiale.
Axial swelling versus axial stress.

4.6.2

Droite d'Huder et Amberg (1970)

La méthode utilisée est semblable à celle déterminée par les formulations logarithmiques de type Huder et Amberg (1970) et consiste à présenter le gonflement final de tous les essais dans un repère semi-logarithmique.

Sur les figures 19 et 20, on observe que le gonflement axial suit une fonction logarithmique pour des contraintes supérieures à 0,1 MPa.

Pour une éprouvette de stratification horizontale, l'intersection de la droite d'Huder et Amberg avec l'axe des contraintes correspond à la pression de gonflement qui est égale à 6,7 MPa.

Pour une stratification verticale, la pression de gonflement est égale à 3,3 MPa.

A partir de ces essais, on peut en déduire que les pressions de gonflement déterminées par la méthode de préchargement et par la méthode d'Huder et

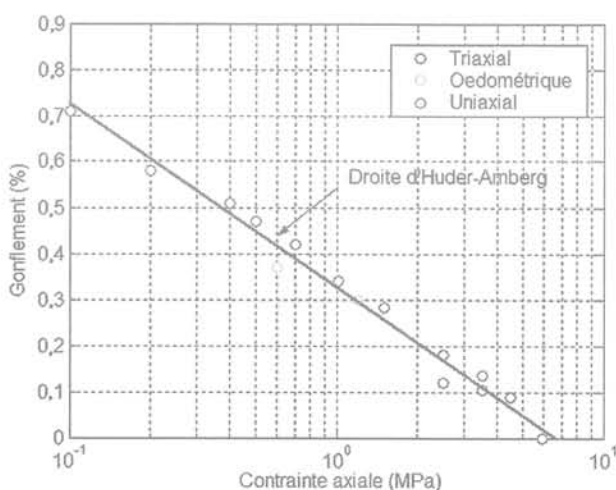


FIG. 19 Pression de gonflement normale aux strates.
Swelling pressure normal to the bedding plane.

Amberg sont presque comparables. Cependant, la méthode de gonflement empêché réduit fortement la pression de gonflement en comparaison avec les autres méthodes.

5

Modélisation du gonflement

Le modèle proposé a été élaboré à partir des résultats des essais en laboratoire présentés ci-dessus. Les caractéristiques du modèle proviennent des constatations principales suivantes :

- les résultats des essais réalisés sur des matériaux isotropes transverses ont clairement montré que le tenseur de déformation de gonflement libre ϵ^g est diagonal dans le repère d'orthotropie et que les deux valeurs propres $\epsilon_1^g = \epsilon_2^g$, dans le plan de l'anisotropie, sont égales. Par ailleurs, le rapport $\epsilon_3^g / \epsilon_1^g$ est constant durant toute la phase d'hydratation ;
- les essais de gonflement réalisés sous contraintes montrent indéniablement que le gonflement parallèle aux strates ϵ_1^g ne dépend que de la contrainte σ_1 et que le gonflement normal aux strates ϵ_3^g ne dépend que de la contrainte σ_3 ;
- dans tous les essais où la contrainte σ_3 est constante par palier, le gonflement ϵ_3^g à tout instant ne dépend que de la dernière valeur de la contrainte ;
- durant les essais de gonflement sous contraintes par palier, on remarque que, dans chaque palier, la déformation $\epsilon^g(t)$ peut être représentée correctement par une fonction exponentielle.

A la stabilisation, le gonflement dans une direction principale « i » est relié à la contrainte par l'équation suivante inspirée du modèle de la double couche de Wong et Wang (2001) :

$$\epsilon_i^{g\infty} = A_i \left[1 - \left(\frac{\sigma_i}{\sigma_i^g} \right)^{c_i} \right] \text{He}(\sigma_i^g - \sigma_i) \quad (i = 1, 2, 3) \quad (2)$$

$\epsilon_i^{g\infty}$ est le gonflement au temps infini, A_i est le gonflement libre, σ_i est la contrainte appliquée, σ_i^g est la pres-

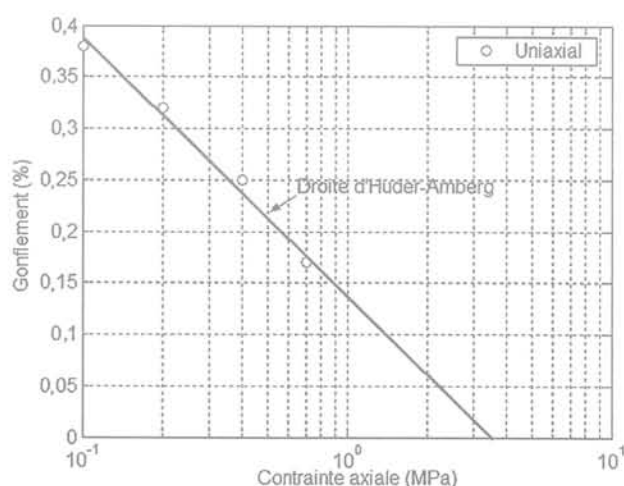


FIG. 20 Pression de gonflement parallèle aux strates.
Swelling pressure parallel to the bedding plane.

sion de gonflement et c est un facteur puissance des contraintes. $He(x)$ est la fonction de Heaviside qui vaut 0 pour $x < 0$ et 1 pour $x > 0$.

Les contraintes principales $\sigma_1, \sigma_2, \sigma_3$ peuvent être déterminées par les composantes du tenseur des contraintes $|\sigma|$ qui est défini dans un repère global car-tésien (x, y, z) et les cosinus directeurs.

Comme les directions du gonflement principal ϵ_i^{gc} coïncident avec celles des contraintes normales principales, le tenseur du gonflement dans le repère global (x, y, z) est obtenu par une transformation géométrique :

$\{\epsilon^{gc}\} = [P] \cdot \{\epsilon_i^{gc}\}$ avec : $[P]$ la matrice du passage,

$$\{\epsilon^{gc}\} = (\epsilon_x^{gc}, \epsilon_y^{gc}, \epsilon_z^{gc}, \gamma_{xy}^{gc}, \gamma_{yz}^{gc}, \gamma_{zx}^{gc})^T \text{ et}$$

$$\{\epsilon_i^{gc}\} = (\epsilon_1^{gc}, \epsilon_2^{gc}, \epsilon_3^{gc}, 0, 0, 0)^T.$$

5.1

Intégration du temps

Dans le repère global, la vitesse de gonflement est exprimée de la manière suivante :

$$\left\{ \dot{\epsilon}^g(t) \right\} = \frac{1}{n_g} \cdot [P] \cdot \left\{ \dot{\epsilon}_i^{gc} \right\} - \left\{ \dot{\epsilon}^g(t) \right\} \quad (3)$$

Concernant la cinétique du gonflement n_g , elle est identique suivant la direction normale aux strates et suivant la direction parallèle à celles-ci.

La figure 21 montre que l'anisotropie du gonflement libre ne dépend pas du temps d'hydratation et conserve une valeur moyenne égale à 6,4. Par voie de conséquence, le gonflement suivant les deux directions principales a la même évolution dans le temps.

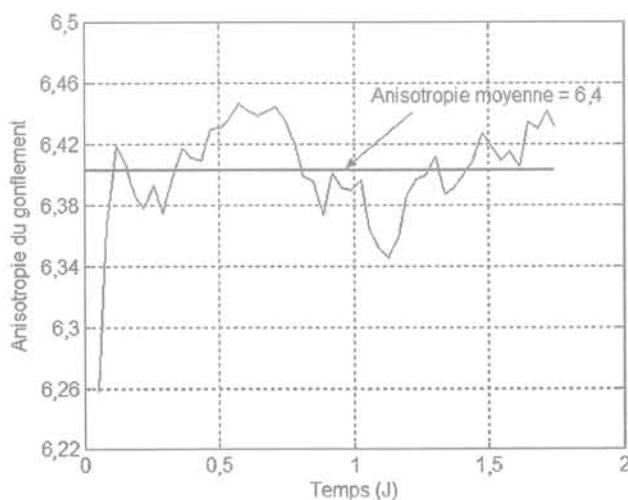


FIG. 21 Indépendance du coefficient d'anisotropie avec le temps d'hydratation.
Independence of anisotropy coefficient versus time of hydration.

5.2

Cas particuliers

5.2.1

Essais triaxiaux et uniaxiaux

Lorsque la roche présente une isotropie transverse, le gonflement dans le repère global est traité pour un seul ou pour plusieurs paliers de chargement.

Afin de faciliter la lisibilité des équations, on suppose que $\{H\} = \{\epsilon^{gc}\}$

H_{ij} est le gonflement pour une direction i et pour le palier de contraintes j .

Pour un seul palier de chargement, on peut déduire le gonflement pour une direction principale « i » :

$$\epsilon_{i,1}^g(t) = H_{i,1} \cdot \left[1 - \exp\left(\frac{-t}{n_g}\right) \right] \quad (i = 1, 2, 3) \quad (4)$$

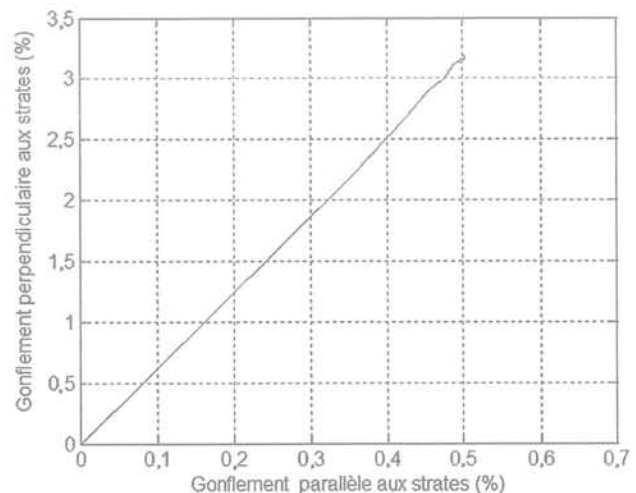
La cinétique du gonflement n_g correspond au temps lorsque :

$$\epsilon_{i,1}^g(n_g) = 0,63 \cdot H_{i,1} \quad (5)$$

Pour plusieurs paliers de déchargement, au temps t , le gonflement $\epsilon_{i,j}^g(t)$ correspondant au palier j et à une direction principale i , peut être écrit de la manière suivante :

$$\epsilon_{i,j}^g(t) = \epsilon_{i,1}^g(t) + \sum_{j=2}^n (H_{i,j} - H_{i,j-1}) \cdot \left[1 - \exp\left(\frac{t_{j-1} - t}{n_g}\right) \right] \cdot He(t - t_{j-1}) \quad (i = 1, 2, 3) \quad (6)$$

t_{j-1} est le temps du début du palier j et n est le nombre total de paliers de contraintes.



Essais œdométriques

Lorsque l'éprouvette présentant une stratification horizontale est empêchée de gonfler radialement, une déformation élastique, due à la pression de gonflement radial $\sigma_1^g(t)$ mesurée dans le cas du gonflement empêché, s'ajoute au gonflement axial normal aux strates $\sigma_3^g(t)$:

$$\varepsilon_3^{go}(t) = \varepsilon_3^g(t) + \frac{\sigma_1^g(t)}{E} \cdot (1 - \nu) \quad (7)$$

$\varepsilon_3^{go}(t)$ est le gonflement œdométrique, E est le module de Young normal aux strates d'une éprouvette saturée et est le coefficient de poisson égal à 0,2.

Au temps de stabilisation, le gonflement additionnel, dû à la pression de gonflement radial (0,26 MPa), est égal à $1,6 \cdot 10^{-3} \%$. Ce gonflement est négligeable par rapport au gonflement déterminé à l'aide des expérimentations. Par la suite, l'influence de la pression de gonflement radiale sur le gonflement axial sera négligée.

5.2.3

Gonflement libre

Lorsque l'éprouvette présentant une orientation α est libre de gonfler suivant toutes les directions, le gonflement axial, au centre de l'éprouvette (lieu de l'emplacement du capteur de déplacement), est le suivant :

$$\varepsilon_z^g(t) = \varepsilon_3^g(t) \cdot \cos^2(\alpha) + \varepsilon_1^g(t) \cdot \sin^2(\alpha) \quad (8)$$

Puisque l'anisotropie du gonflement est indépendante du temps, on peut écrire :

$$\varepsilon_z^g(t) = \varepsilon_3^g(t) \cdot \left[\cos^2(\alpha) + \frac{1}{a_g} \cdot \sin^2(\alpha) \right] \quad (9)$$

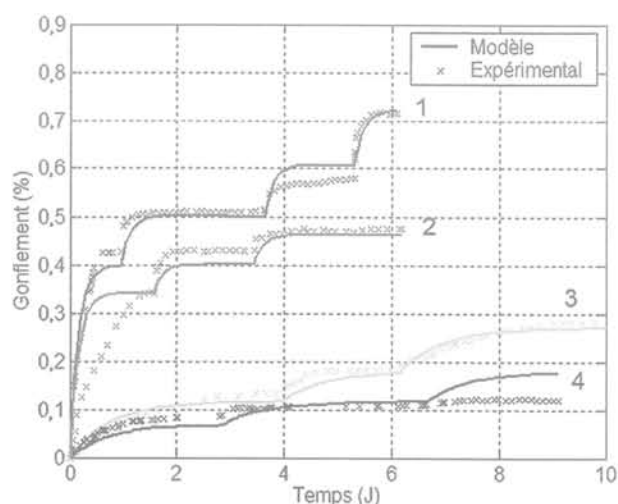


FIG. 22 Essais uniaxiaux et triaxiaux pour $\alpha = 0^\circ$.
Uniaxial and triaxial tests for $\alpha = 0^\circ$.

5.3

Ajustement du modèle sur des essais expérimentaux

L'ajustement global du modèle sur l'ensemble des essais effectués a été réalisé par la méthode des moindres carrés.

Le modèle proposé est composé de six paramètres caractérisant le gonflement final et d'un septième décrivant la cinétique du gonflement n_g . Les six paramètres du gonflement final se décomposent en trois paramètres principaux correspondant respectivement aux deux orientations $\alpha = 0^\circ$ et $\alpha = 90^\circ$:

- gonflement libre ;
- pression de gonflement ;
- facteur puissance des contraintes.

En ce qui concerne la cinétique du gonflement, elle est le seul paramètre qui n'est pas unique pour tous les essais et cela à cause de la façon de saturer l'éprouvette qui varie d'un dispositif à un autre. Par exemple, pour un essai de gonflement libre (éprouvette complètement immergée dans l'eau), le gonflement se stabilise en 5 heures, le gonflement œdométrique (éprouvette saturée à travers sa face supérieure) et le gonflement uniaxial (éprouvette saturée à travers sa circonférence latérale) se stabilisent en 12 heures. Le gonflement par la cellule triaxiale (éprouvette saturée par injection de l'eau de bas en haut) se stabilise en 48 heures.

Le modèle a été ajusté :

1) Sur quatre essais multipaliers, pour $\alpha = 0^\circ$, où chacun dépend du chemin de déchargement de la contrainte axiale (σ_a) et de la pression de confinement (σ_r) (Fig. 22).

- $\sigma_a = 0,7 \rightarrow 0,4 \rightarrow 0,2 \rightarrow 0,1$ MPa et $\sigma_r = 0$ MPa,
- $\sigma_a = 1 \rightarrow 0,7 \rightarrow 0,5$ MPa et $\sigma_r = 0$ MPa,

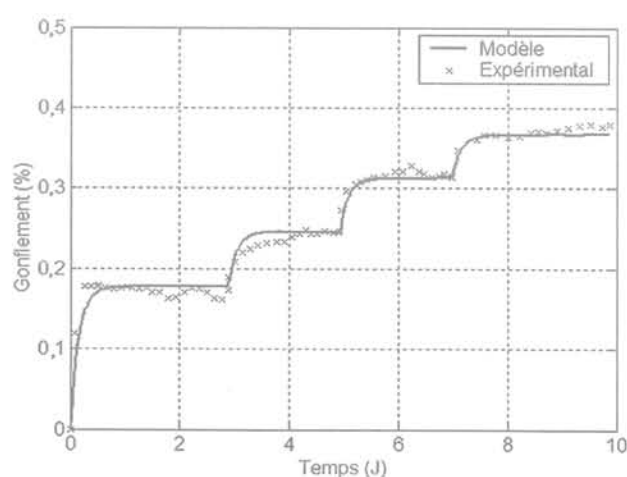


FIG. 23 Essai uniaxial pour $\alpha = 90^\circ$.
Uniaxial and triaxial tests for $\alpha = 90^\circ$.

- $\sigma_a = 3,5 - 2,5 - 1,5$ MPa et $\sigma_r = 1$ MPa,
- $\sigma_a = 4,5 - 3,5 - 2,5$ MPa et $\sigma_r = 1$ MPa,
- 2) Un essai de gonflement uniaxial multipaliers pour $\alpha = 90^\circ$ (Fig. 23) :
- $\sigma_a = 0,7 - 0,4 - 0,2 - 0,1$ MPa et $\sigma_r = 0$ MPa,
- 3) Trois essais de gonflement œdométrique monopulier (Fig. 24) :
- $\alpha = 0^\circ$ et $\sigma_a = 1,2 ; 0,6$ et $0,1$ MPa.
- 4) Quatre essais de gonflement libre (Fig. 25) :
- $\alpha = 0^\circ, 30^\circ, 45^\circ$ et 90° .

Les paramètres du modèle déduits par l'ajustement sont illustrés, pour les deux directions principales, dans le tableau III.

TABLEAU III Paramètres du modèle.
Model parameters.

Paramètres du modèle	Valeurs
Gonflement libre ($\alpha = 0^\circ$)	0,032
Gonflement libre ($\alpha = 90^\circ$)	0,005
Pression de gonflement ($\alpha = 0^\circ$)	6,5 MPa
Pression de gonflement ($\alpha = 90^\circ$)	1,8 MPa
C ($\alpha = 0^\circ$)	0,06
C ($\alpha = 90^\circ$)	0,46
n_g moyenne	0,1

Le modèle proposé reproduit les essais expérimentaux effectués sur des éprouvettes anisotropes et dans différentes conditions de confinement latéral. Les sept paramètres du modèle peuvent être déterminés par un essai de gonflement libre avec mesure du gonflement suivant les deux directions principales et par deux essais uniaxiaux effectués sur des éprouvettes de stratifications horizontale et verticale avec déchargement de la contrainte axiale. Ces essais uniaxiaux permettent de déterminer, par ajustement, la pression de gonflement. Généralement, la réalisation de plusieurs essais uniaxiaux nous permet de bien affiner la pression de gonflement.

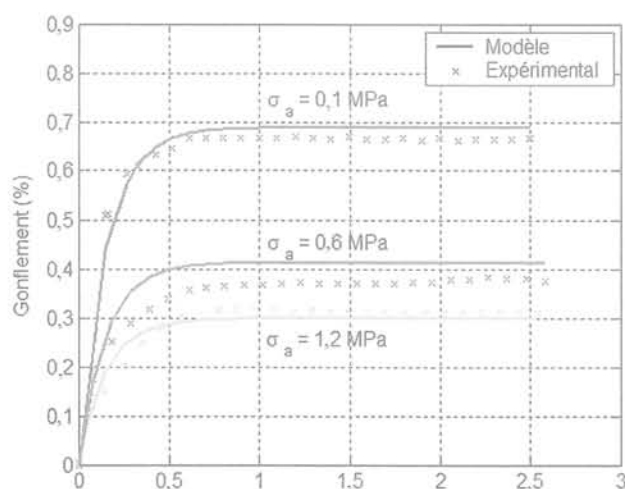


FIG. 24 Essais œdométriques pour $\alpha = 0^\circ$.
Oedometric tests for $\alpha = 0^\circ$.

Conclusion

Le gonflement d'une roche argileuse au contact de l'eau est un problème très complexe car il est le résultat de plusieurs mécanismes associés qui ne peuvent pas être séparés expérimentalement. De même, les déformations engendrées ne sont pas uniformes suivant toutes les directions en raison de l'existence d'une anisotropie structurale au sein du matériau et dépendent principalement de l'état de contrainte appliquée.

L'étude expérimentale conduite en laboratoire a permis d'étudier le gonflement tridimensionnel anisotrope en passant du gonflement maximal au gonflement nul dans différentes conditions de chargement. Les résultats obtenus ont montré que l'application d'une contrainte a pour effet de réduire le gonflement selon la même direction du chargement et que le gonflement, suivant la direction privilégiée, est indépendant du confinement latéral. Ces résultats ont également montré que le gonflement parallèle aux strates est indépendant de la contrainte appliquée normalement aux strates.

L'éventail des expériences effectuées a confirmé par ailleurs que les essais uniaxiaux permettent de décrire convenablement le gonflement de la roche et qu'ils peuvent être mis en œuvre pour étudier plus en détail ce phénomène comme par exemple l'effet d'une solution saline.

En s'appuyant sur les résultats et sur les observations de l'étude expérimentale, les fondements théoriques ont été formulés pour le développement d'un modèle rhéologique. La confrontation des prévisions de ce modèle avec les résultats des essais a permis de mettre en évidence son aptitude à reproduire correctement le gonflement d'une roche argileuse au contact avec l'eau. Ce modèle a été intégré par la suite dans un code numérique par éléments finis et des applications sur des cas simples ont été réalisées pour montrer sa validité.

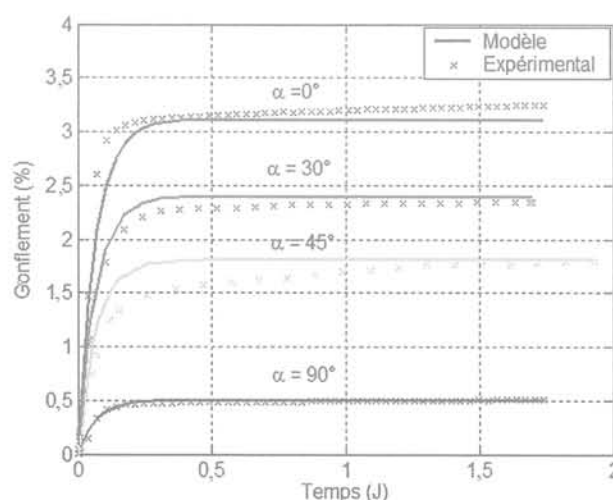


FIG. 25 Essais de gonflement libre pour différentes orientations.
Free swelling tests for different orientations.

- Chenevert M.E. – Control with balanced activity oil continuous muds., *Journal of Petroleum Technology*, 1973, p. 1309-1316.
- Froelich O.B. – Anisotropic swelling behaviour of diagenetic consolidated clays-tone Commision of swelling rock. *Int. Soc. Rock Mech.*, 1978, p. 1487-1488.
- Hawalader B.C., Lee Y.N., Lo K.Y. – Three-dimensional stress effects on time-dependent swelling behaviour of shaly rocks. *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 40, 2002, p. 501-511.
- Huder J., Amberg G. – Quellung in Mergel, Opalinuston und Anhydrit, *Schweizerische Bauzeitung*, vol. 4, 1970, p. 975-980.
- Kiehl J.R. – Ein dreidimensionales quellgesetz Quellgesetz und seine anwendung Anwendung auf den felshohlraumbau-Felshohlraumbau. *Proc. 9th Natn. Felsmechanik Symp.*, Aachen Germany, 1990, p. 185-207.
- Lo K.Y., Lee Y.N. – Time dependent deformation behaviour of Queenston shale. *Canadian Geotechnical Journal*, vol. 27, 1989, p. 461-471.
- Windal T. – *Étude en laboratoire du gonflement des sols : mise au point d'un œdomètre flexible et étude du gonflement tridimensionnel*. Thèse de doctorat, Laboratoire de Mécanique de Lille, Université des sciences et technologie, 2001.
- Wong R.C.K., Wang E.Z. – Three-dimensional anisotropic swelling model for clay shale. A fabric approach. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, vol. 34, n° 2, 1997, p. 187-189.
- Yesil M.M., Pasamehmetoglu A.G., Bozdag T. – Technical Note, A Triaxial Swelling Test Apparatus. *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, vol. 30, n° 4, 1993, p. 443-450.
- Zhou Z.H., Huang R.Z., Chen Y.F. – Constitutive equations of shale and clay swelling : theoretical model and laboratory test under confining pressure. *Society of petroleum engineering*, 22382, 1992, p. 529-540.