



HAL
open science

FLUAGE DU SEL GEMME SOUS CHARGEMENT CYCLIQUE

Hippolyte Djizanne, Pierre Valli

► **To cite this version:**

Hippolyte Djizanne, Pierre Valli. FLUAGE DU SEL GEMME SOUS CHARGEMENT CYCLIQUE. Journées Nationales de Géotechnique et de Géologie de l'Ingénieur JNGG2014, Jul 2014, Beauvais, France. hal-01969005

HAL Id: hal-01969005

<https://hal.science/hal-01969005v1>

Submitted on 3 Jan 2019

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.

FLUAGE DU SEL GEMME SOUS CHARGEMENT CYCLIQUE

SALT CREEP UNDER CYCLIC LOADING

Hippolyte DJIZANNE¹, Pierre VALLI¹

1 LMS, Ecole Polytechnique ParisTech, Palaiseau, France

RÉSUMÉ — Dans le cadre du projet SACRE (Stockage d’Air Comprimé pour le Réseau Electrique) du programme STOCK – E 2010 (Stockage innovant de l’énergie) de l’Agence Nationale de la Recherche (ANR), des essais mécaniques sont réalisés sur des éprouvettes de sel gemme au Laboratoire de Mécanique des Solides (LMS) à l’Ecole Polytechnique. L’objectif de ces essais est de mieux comprendre le fluage en extension du sel sous chargement cyclique. Le comportement rhéologique du sel est supposé élasto–viscoplastique et très sensible aux variations de température. Le choix de faire des essais en extension au cours desquels la pression de confinement est supérieure à la force axiale est argumenté. La méthode expérimentale, les matériaux et les équipements utilisés sont décrits ; quelques résultats sont ensuite interprétés et enfin les difficultés rencontrées et les perspectives scientifiques sont présentées.

ABSTRACT — In the framework of project SACRE (Compressed Air Storage for Electric Network) program of STOCK - E 2010 (Innovative Energy Storage) of the National Research Agency (ANR), mechanical tests are carried out on specimens of rock salt in the Laboratory of Solid Mechanics (LMS) at the Ecole Polytechnique. The objective of these tests is to better understand the creep of salt under cyclic loading in extension. The rheological behavior of salt is assumed elasto-viscoplastic and very sensitive to temperature variations. The choice to conduct extension tests in which the confining pressure is greater than the axial force is argued. Experimental methods, materials and equipment used are described, and some results are then interpreted and finally, the difficulties encountered and scientific perspectives are presented.

1. Introduction

Des essais de laboratoire sont réalisés sur des éprouvettes de sel gemme provenant d’Allemagne et des Etats Unis (section 4.2). Pour mieux comprendre le fluage du sel gemme sous sollicitations cycliques, des essais triaxiaux cycliques sont réalisés en extension. Dans cet article, on s’intéresse aux effets de la déformation irréversible différée du sel sous chargement cyclique constant. L’éprouvette de sel gemme est donc soumise jusqu’à la rupture à des cycles de chargement en faisant varier la force axiale, la pression de confinement étant fixée. L’amplitude des sollicitations est variable et on enregistre le déplacement axial, le déplacement radial, la température et le déviateur de contrainte. Une phase de pré-test est réalisée pour caractériser

l'éprouvette de sel du point de vue de sa géométrie, de ses propriétés élastiques, de ses résistances à la compression simple et à la traction simple. Les résultats de l'essai de fluage sont discutés.

2. Contexte

La détermination des propriétés mécanique du sel soumis à des chargements cycliques permet de fournir ou d'ajuster les paramètres du dimensionnement des cavités salines sous sollicitation de type HFGSSC (High Frequency Gas Salt Storage Cavern) ou AA-CAES (Advanced Adiabatic Compressed Air Energy Storage). Les raisons qui emmènent aujourd'hui à s'intéresser à l'exploitation multi cyclique des cavités salines sont multiples.

- Les besoins énergétiques sans cesse croissants qui entraînent un besoin grandissant en stockage avec des modes d'exploitations différents.
- La libéralisation du marché énergétique européen et sa directive d'application 2003/55/EG. Et tout récemment, pour ce qui concerne la France, le rapport de la commission innovation 2030 dit "Rapport Lauvergeon, 2013".

3. Revue de la littérature

Les premiers essais de fluage monotones et cycliques sur le sel gemme ont été réalisés lors des études de faisabilité des premiers CAES entre 1972 et 1984. L'état de l'art ne permettait pas encore de bien circonscrire la question et beaucoup de questions ouvertes demeuraient ; Hardy et Langer (1981). Avec les nouveaux développements en mécanique des matériaux, le fluage cyclique, la rupture, la dilatance, et la fatigue sont mieux compris. Les essais de fluage sur le sel sont généralement réalisés en compression $0 > \sigma_{\theta\theta} = \sigma_{rr} > \sigma_{zz}$. Cependant, l'essai triaxial en « extension » $0 < \sigma_{zz} < \sigma_{\theta\theta} = \sigma_{rr}$, qui est rarement utilisé, révèle un intérêt particulier pour révéler les effets d'un chargement cyclique en cavité saline. En effet, lorsque la pression du gaz dans la cavité est faible, la contrainte normale σ_{rr} est sensiblement plus petite que les deux contraintes tangentielles. L'essai en extension permet une meilleure compréhension et une évaluation plus complète du fluage jusqu'à la rupture, ce qui a un effet significatif sur le calcul de la stabilité à long terme des cavités salines; Thoms et Martinez (1978). Les chargements cycliques couplés à la déformation différée du sel ont été étudiés par Senseny, (1981); Thoms et Gehle (1982) ; Matei et Critescu (2000) ; Allemandou et Dusseault (1996), Fuenkajorn et Phueakphum (2009), Düsterloh et Lux (2010), Bauer et al. (2010, 2011), Arnold et al. (2011), Dresen et Lux (2011), Düsterloh et al. (2012), Mellegard (2013).

Dresen et Lux (2011) ont réalisé des essais de fluage cyclique d'une période allant de 2 à 60 jours sur des éprouvettes de sel provenant de deux gisements allemands. Dans leurs expériences, ils ont observé que le fluage transitoire n'apparaît qu'au chargement initial de la contrainte déviatorique et que sous chargement cyclique, aucun fluage transitoire significatif n'est noté. Pour eux, le chargement répété ne produira pas de dommage structurel tant qu'il se situe sous la résistance à

l'endommagement. Ils concluent que pour des cycles journaliers ou mensuels, le sel peut être considéré comme un matériau avec mémoire.

Bauer et al. (2010) ont observé pendant les chargements cycliques des changements significatifs de la déformation volumique et du module de Young. Ils ont montré que les chargements cycliques, même à faible amplitude, provoquent des microfissurations dans le sel qu'ils ont mesurées par émission acoustique. Pour eux, le module de Young déterminé sur la base des décharges cycliques diminue légèrement suite à une augmentation de la force axiale, du chargement, et du temps.

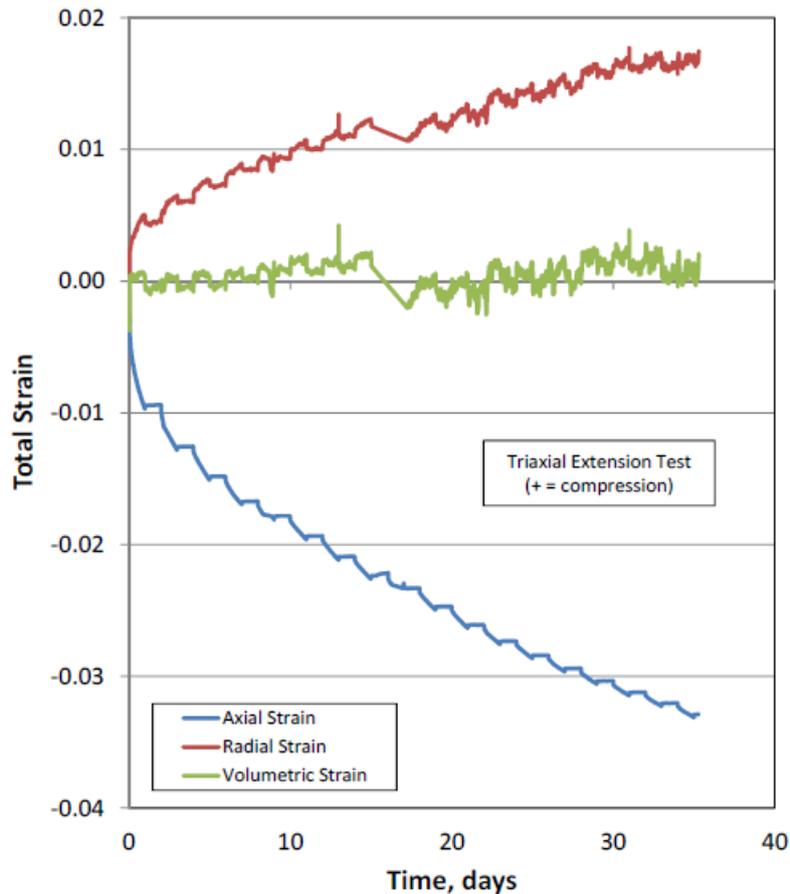


Figure 1. Résultats de l'essai triaxial cyclique en extension - Tracé des déformations, axiale, radiale et volumique en fonction du temps; Mellegard,(2013).

A la suite des essais de fluage cyclique en compression qui ont été réalisés pour le compte du SMRI (Solution Mining Research Institute); Mellegard, (2013) a effectué des essais de fluage cyclique en extension sur du sel d'Avery Island. L'objectif était d'évaluer l'effet que peut avoir ce changement d'état de contrainte (compression/extension) sur le comportement du sel sous chargement cyclique. Dans ces essais, il observe que la déformation volumique reste proche de zéro (Figure 1), ce qui indique que les éprouvettes ne se dilatent pas. Il conclue que la charge cyclique en extension n'est pas plus sujette aux dommages que la charge cyclique en compression, du moins pour le sel et conditions expérimentales

considérés. Plus généralement, le chargement cyclique ne cause pas de dommage dans le sel au-delà de ce qui pourrait être prévu pour un chargement statique.

4. Equipements, Matériaux et Méthodes

4.1. Equipements

Pour réaliser des essais triaxiaux cycliques sur le sel gemme, on dispose de machines triaxiales avec une gamme de force comprise entre 5 kN et 25 kN pour des tailles d'éprouvettes cylindriques allant de 50 à 100 mm de hauteur et de 78,5 à 314 cm² d'aire de la section. Ces machines sont principalement constituées d'une presse triaxiale classique, d'une cellule triaxiale et d'une chaîne de mesure.

La presse asservie permet de réaliser l'essai triaxial cyclique en extension, contrôlé en contrainte axiale ou déformation axiale. Elles ont été majoritairement montées et adaptées au laboratoire.

La cellule triaxiale accueille en son sein une éprouvette de sel préalablement conditionnée pour l'essai. Elle est placée sur le plateau de la presse et permet de faire fonctionner le vérin dans les gammes de forces souhaitées. La mise en pression de la cellule remplie d'huile permet d'appliquer la contrainte de confinement.

La chaîne de mesure permet l'acquisition des données. Le système de mesure est principalement constitué de cinq capteurs : un extensomètre pour la mesure du déplacement axial, une jauge circonférentielle pour la mesure du déplacement radial, un capteur de force axiale, un capteur de pression de confinement et un thermocouple pour la mesure de la température. A la sortie de ce système, les paramètres mesurés sont envoyés au système d'acquisition. L'association d'un ordinateur permet la commande des paramètres de chargement en fonction du type d'essai ainsi que leur suivi via un logiciel spécifique conçu sous Labview©.

4.2. Matériaux (sels et provenance)

Le sel de Bokeloh : L'entreprise allemande Kali und Salz GmbH a fourni plusieurs blocs de sel extraits de la mine de potasse Sigmund Hall Kalibergwerk. Cette mine est située dans le dôme de sel de Bokeloh appartenant à la formation saline du Zechstein. Les blocs irréguliers qui ont été sélectionnés pour les essais provenaient d'une galerie à 1150 mètres de profondeur. Le sel de Bokeloh est appelé en abrégé « BK » dans les codes des éprouvettes. Il est de couleur rose clair et ses grains sont fins et homogènes.

Le sel d'Avery Island : Le bureau d'étude américain RESPEC a également fourni plusieurs blocs de sel extraits de la mine de sel d'Avery Island en Louisiane aux Etats Unis. Cette mine est l'une des plus anciennes au monde encore exploitée et est située dans le dôme de sel d'Avery Island sur la côte du Golfe du Mexique. Les blocs retenus pour l'expérience sont prélevés à 274 m de profondeur. Le sel d'Avery Island est appelé en abrégé « AI » dans les codes des éprouvettes. Il a une apparence plus claire que le sel de Bokeloh car il comporte moins de 2% d'impureté.

4.3. Méthodes

4.3.1. Préparation et montage des éprouvettes

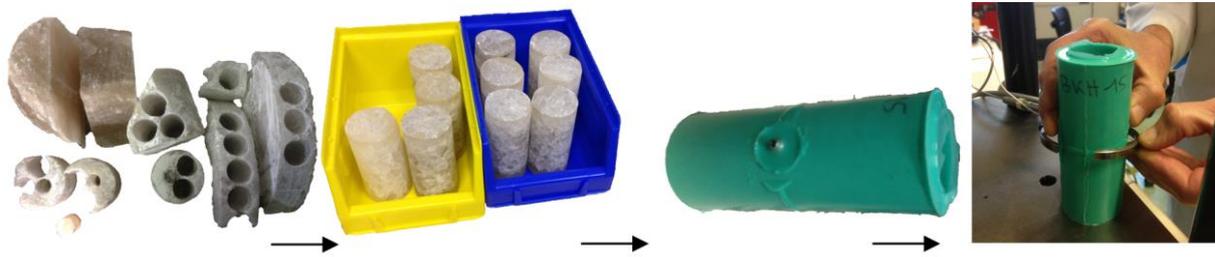


Figure 2. Préparation des éprouvettes

A partir des blocs irréguliers de sel gemme, les éprouvettes sont carottées à l'air comprimé. L'air comprimé évacue la chaleur due aux frottements d'usinage afin de protéger l'outil et l'éprouvette. Après le carottage, les éprouvettes sont sciées afin de supprimer les zones proches des faces inférieure et supérieure de l'éprouvette soumises à des effets de bord (réarrangement granulaire en surface). Ensuite, une rectifieuse permet d'obtenir un bon état de planéité et de parallélisme des faces. Les éprouvettes obtenues ont une forme cylindrique avec un élancement de 2 ; soit un diamètre moyen de 36 mm et une hauteur moyenne de 72 mm (sauf pour l'essai brésilien où l'élancement est de 0,2). Leur masse moyenne est de 160 grammes. La géométrie simple de l'éprouvette (de forme cylindrique) permet une distribution de contraintes que l'on peut comparer avec des calculs analytiques et numériques. Lors du montage, une membrane en silicone est préfabriquée pour accueillir en son sein l'éprouvette et les bras d'acquisition du capteur radial. Les faces sont collées sur les talons pendant l'essai en extension. La Figure 2 présente quelques étapes de la préparation des éprouvettes.

4.3.2. Les essais triaxiaux

a) La phase de pré confinement isostatique

DeVries et Mellegard (2010) ont montré qu'il était important de faire une phase de confinement isostatique avant les essais de fluage. Ceci au moyen d'essais de laboratoire pour lesquels les éprouvettes conditionnées pendant 10 jours à 20 MPa commençaient à se dilater à des niveaux de contraintes d'environ 12% plus élevées que ceux qui ont été conditionnés en 1 jour et 21% supérieures à celles qui n'avaient pas été conditionnées. Les éprouvettes non confinées se dégradent donc plus rapidement que les éprouvettes confinées et cumulent plus de déformations irréversibles avec le temps.

Le confinement isostatique se fait à température ambiante ($\sim 20^{\circ}\text{C}$). C'est un essai préalable qui consiste à conserver l'éprouvette de sel gemme sous contraintes (axiale et radiale) uniformes et égales pendant une certaine durée avant de commencer les essais cycliques. L'atteinte de la consigne isostatique est effectuée

par paliers afin de ne pas créer des déviateurs important dans l'éprouvette parceque la pression de confinement et la contrainte axiale sont appliqués successivement. L'effet de la polymérisation de la colle sur la mesure du déplacement radial doit être pris en compte.

Sous réserve d'un essai parfaitement réalisé et si le comportement est parfaitement élastique linéaire alors les déformations axiale et radiale sont égales :

$$\varepsilon_a = \varepsilon_r = \frac{(1-2\nu)}{E} \sigma_a \quad (1)$$

Pour une roche initialement fissurée, il est possible d'observer une légère différence entre les déformations axiales et radiales à l'acquisition, mais à la fin de l'essai, quand le chargement est élevé, la déformation volumique sera :

$$\varepsilon_v = \frac{\Delta V}{V} = \varepsilon_a + 2\varepsilon_r = 3 \frac{(1-2\nu)}{E} \sigma_a \quad (2)$$

b) Le fluage cyclique en extension

Dans les essais triaxiaux cycliques en extension, la force axiale varie tandis que la pression de confinement est fixée. Cette dernière est supérieure à la valeur absolue de la contrainte axiale. Dans ce programme, l'amplitude des sollicitations est variable (de 1 à 5 MPa, voir Figure 3) et on enregistre le déplacement axial, le déplacement radial, la température, et déviateur de contraintes. EDF R&D propose des cycles de pression pour les cavernes, qu'il faut convertir en cycles expérimentaux. Les cycles sont sinusoïdaux et ont une période de 8 heures (soit 4 heures de charge et 4 heures de décharge). Pour réaliser un essai de fluage cyclique en extension, on décharge l'éprouvette depuis son chargement isostatique initial jusqu'à un chargement en extension où la force axiale appliquée correspond à la pression moyenne du cycle souhaitée. Ensuite on cycle entre deux valeurs minimale $|\sigma_a^m| = 8$ MPa et et maximale $|\sigma_a^M| = 11$ MPa de la contrainte axiale par exemple.

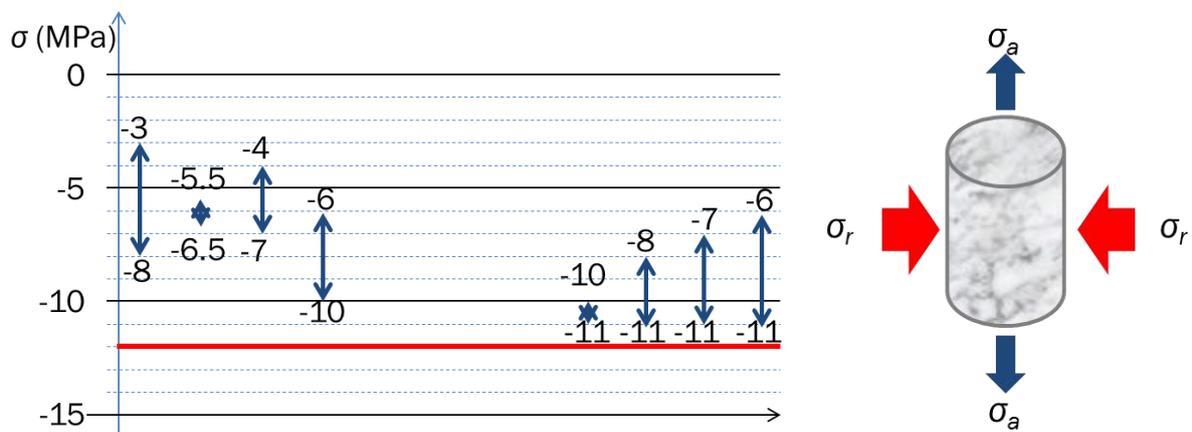


Figure 3. Amplitude des cycles de chargement en contrainte axiale réalisés

5. Résultats expérimentaux et interprétations

Dans cette partie, quelques résultats sont présentés et interprétés.

5.1. Caractérisation des échantillons

5.1.1. Résistance à la compression

Le comportement du sel gemme sous compression uniaxiale ne se différencie pas des autres roches. Tout commence par une première phase de confinement où les fissures préexistantes sont resserrées, suivie de la phase élastique, puis de la phase de dilatance où s'initient et se développent de nouvelles fissures et à la fin on arrive la rupture. La résistance à la compression simple est calculée à partir de la section initiale de l'éprouvette. La résistance à la compression simple obtenue des éprouvettes provenant des mines de Bokeloh et d'Avery Island est respectivement de 27 MPa et de 21 MPa. Ces résultats sont bien comparables à ceux présents dans la littérature.

5.1.2. Résistance à la traction

L'essai brésilien ou essai de traction indirecte a été réalisé sur 6 éprouvettes de sel gemme à la vitesse de 0,2 kN/s. La résistance à la traction obtenue des éprouvettes provenant des mines de sel de Bokeloh et d'Avery Island est respectivement de 0,9 MPa et de 1 MPa. Ces résultats sont comparables à ceux présents dans la littérature.

5.2. Essais triaxiaux cyclique en extension

5.2.1. Chargement isostatique

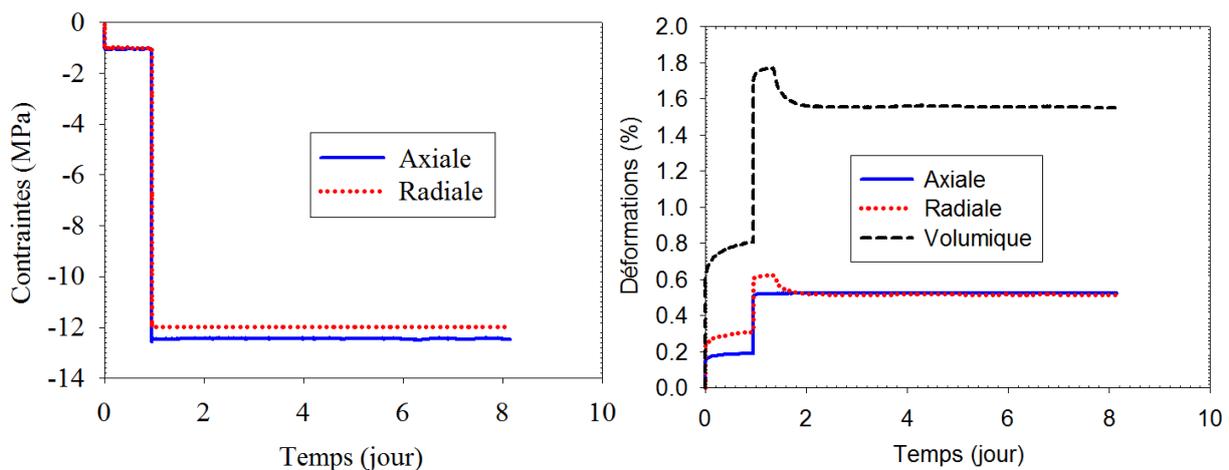


Figure 4. Eprouvette AI#13 – Confinement isostatique

Lorsque le sel gemme est soumis à un chargement triaxial isostatique, il se déforme de façon élastique tant que le chargement n'est pas suffisamment élevé pour sortir de son enveloppe élastique. Dans un cristal parfait, la déformation élastique consiste à rapprocher ou à éloigner les atomes du réseau cristallin sans en modifier sa structure, ce qui est difficilement observable dans un cristal naturel. Dans cet essai, on mesure le déplacement axial et radial de l'éprouvette et on calcule la déformation volumique $\varepsilon_v = \varepsilon_a + 2\varepsilon_r$. La Figure 4 présente les résultats d'un essai de confinement isostatique réalisé sur l'éprouvette AI#13 qui a duré 8 jours et où on obtient à la fin une déformation axiale égale à la déformation radiale, comme dans l'analyse théorique. Pendant cet essai, il est possible de vérifier l'élasticité linéaire par un cycle rapide de chargement/déchargement, la réponse en déformation est suffisante pour le montrer.

5.2.2. Chargement cyclique

Pendant l'essai de fluage, l'éprouvette est soumise à des séquences de cycles successives. Sur la Figure 5, l'éprouvette se rompt après 45 jours soit 135 cycles. On observe avec l'ensemble des résultats que, plus la vitesse de chargement imposée au matériau est lente, moins le matériau est radoucissant dans la phase post-pic. L'examen des éprouvettes cassées montre des lignes d'arrêts autour de la zone de rupture. Les phénomènes observés pendant un chargement cyclique sont: la mobilité cyclique (influence du déviateur cyclique sur l'apparition de la rupture) et la rupture (critère de rupture).

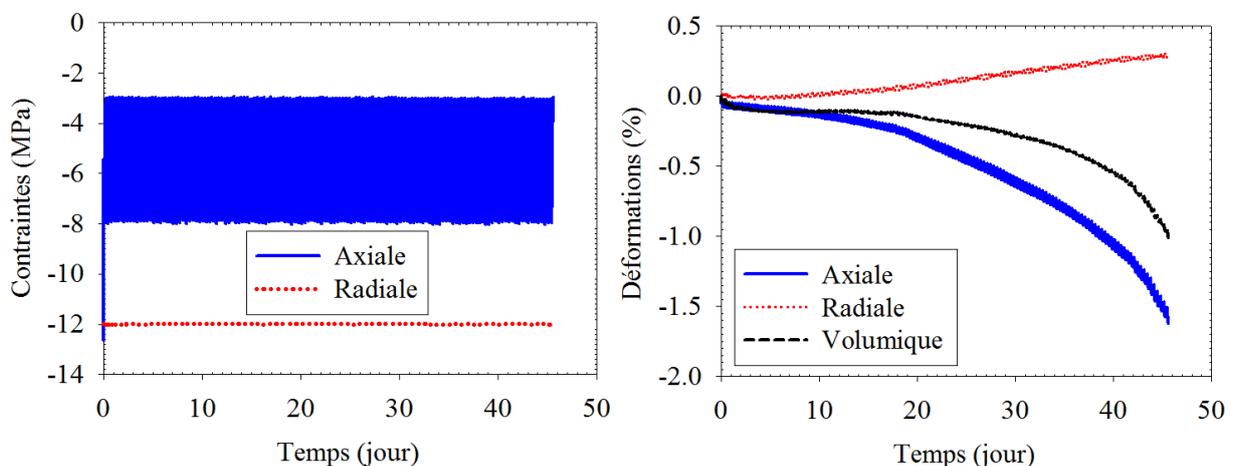


Figure 5. Epreuve BK#01 – Courbes du chargement et des résultats en déformations obtenues.

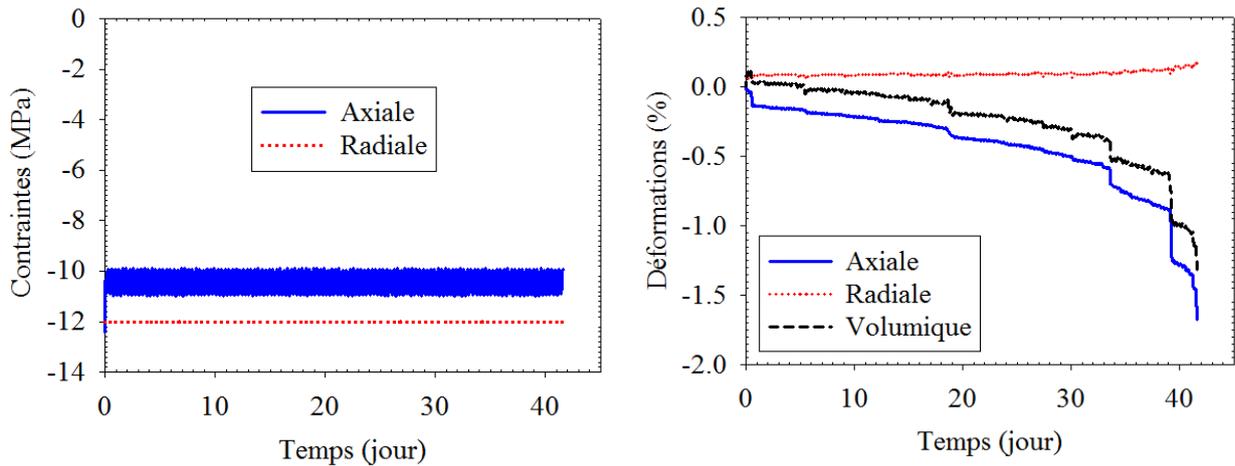


Figure 6. Eprouvette US#11 – Courbes du chargement et des résultats en déformations obtenues.

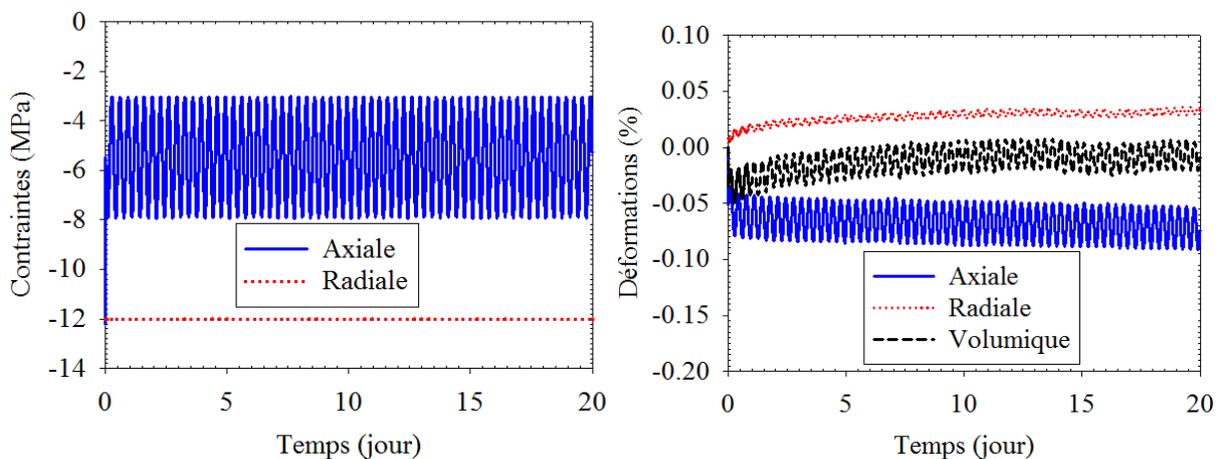


Figure 7. Eprouvette BK02 – Courbes du chargement et des résultats en déformations obtenues.

Le fluage peut être défini comme une augmentation des déformations (axiale et radiale) malgré la stabilisation de la pression. La réponse expérimentale comporte trois étapes qui sont bien visible sur la Figure 5 : le fluage transitoire où la vitesse des déformations décroît avec le temps; le fluage stationnaire où la vitesse des déformations est constante au cours du temps; le fluage tertiaire où la vitesse de déformation augmente avec le temps, l'apparition de l'endommagement sensible à l'échelle macroscopique s'en suit (adoucissement ou diminution de sa résistance). La fissuration du sel gemme, se traduit aussi par l'accélération du fluage tertiaire. La fatigue est un mode de rupture différé qui se produit lorsque l'éprouvette est soumise à des chargements cycliques, et cela même pour des contraintes inférieures à sa limite d'élasticité et à des températures faibles. Il existe 3 domaines principaux pour les mécanismes de rupture par fatigue : Le domaine de fatigue oligo-cyclique (faible nombre de cycles); le domaine de fatigue à grand nombre de cycles et le domaine de l'endurance. La configuration dans laquelle ont été réalisés les essais de fluage

cyclique porte à 500 le nombre de cycle maximal atteint avant rupture. Comme dans la plupart des matériaux, on observe aussi 3 stades d'endommagement par la fatigue: la phase d'amorçage des fissures; la phase de propagation des fissures et la phase de rupture brutale (fragile ou ductile). En raison de l'absence ou de la faiblesse des forces de cohésion entre ses grains, le sel peut s'écouler comme un liquide. Contrairement aux liquides ordinaires, l'écoulement des grains s'accompagne de changements de volume: on parle donc de dilatance. La dilatance est l'augmentation du volume de la roche en raison d'un changement de la déformation. Les critères d'apparition de la dilatance sont en révision pour s'adapter aux chargements cycliques. Les travaux sur la dilatance ne seront pas présentés ici.

La fatigue de l'échantillon survient au-delà de 1% et la rupture se produit à environ 1,5% de la déformation axiale. Les effets de la variation de l'amplitude des cycles de chargement sont aussi observés. Selon que nous sommes au-dessus ou en dessous d'une contrainte limite supposée. Les résultats montrent que, au-dessus de cette contrainte limite, le matériau est plus stable à faible amplitude de la contrainte déviatorique qu'à grande amplitude, tandis qu'en-dessous de cette contrainte limite, le matériau est beaucoup moins stable pour de faible amplitude du déviateur. Le chargement cyclique entraîne la rupture, même à faibles valeurs du déviateur et diminue la résistance du sel.

6. Difficultés rencontrées

Les modes opératoires: Les difficultés rencontrées lors de l'application des normes et recommandations des essais peuvent déboucher sur une révision du mode opératoire. Hétérogénéité et anisotropie: Le sel utilisé est naturel. L'hypothèse de l'homogénéité et de l'isotropie prise pour interpréter les résultats n'est donc pas toujours valide. Le capteur diamétral: Le problème reste d'actualité lorsqu'on utilise une petite cellule triaxiale et de petites éprouvettes. Les principales difficultés étant que : le capteur et l'éprouvette se trouvent à l'intérieur de la cellule triaxiale remplie d'huile; l'éprouvette obligée de rester sèche et enfin le contact entre le capteur et l'échantillon se faisant par effleurement dans notre cas.

Remerciements

Ce travail se place dans le cadre de l'action coopérative SACRE financée par l'ANR et consacrée au stockage adiabatique d'air comprimé en cavité saline qui regroupe le LMS, EDF, Géostock et les laboratoires PROMES (Perpignan) et L2EP (Lille).

Références bibliographiques

Arnold R. D., DeVries K. L., Nieland J. D., Tiruneh H. (2011). Cyclic fatigue effects on mechanical properties of salt. Proc. of the SMRI Spring Technical Conference, Galveston, Texas, USA, 51–64.

Bauer S., Broome S., Bronowski D. (2010). Experimental Deformation of Salt in Cyclic Loading. Proc. of the SMRI Spring Technical Conference, Grand Junction, Colorado, USA, 185-198.

- DeVries K. L., Mellegard K. D. (2010). Effect of Specimen preconditioning on salt dilation onset. Proc. of the SMRI Fall Technical Conference, Leipzig, Germany, 59-65.
- Dresen R., Lux K.-H. (2011). Method for design of salt cavern with respect to High Frequency Cycling of storage gas. Proc of the SMRI Spring Technical Conference, Galveston, Texas, USA, 65–82.
- Fuenkajorn K., Phueakphum D. (2009). Effects of Cyclic Loading on the Mechanical Properties of Maha Sarakham Salt, Suranaree J. Sci. Technol, Thailand, April, 16(2):91–102.
- Hardy R. H., Langer M. (1981). The mechanical behaviour of salt, Proc. of the first conference. Trans tech publication, 901p.
- Mellegard K. (2013). High Frequency Cavern Cycling—Phase 2-B: Extensional Cyclic Fatigue Testing of Salt. SMRI Research Report RR2013-2, 27 p.
- Thoms R. L., Martinez J. D. (1978). Preliminary long-term stability criteria for compressed air energy storage caverns in salt caverns. Prepared for Battelle Pacific Northwest Laboratories, Richland, Washington, 8-54804-A-L, EY-76-C-06-1830, 90 p.