



Available online at [www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com)

SCIENCE @ DIRECT®

C. R. Geoscience 336 (2004) 1337–1344



<http://france.elsevier.com/direct/CRAS2A/>

Géomatériaux

## Fluage du sel gemme sous très faibles charges

Pierre Bérest<sup>a,\*</sup>, Pierre-Antoine Blum<sup>b</sup>, Jean-Pierre Charpentier<sup>a</sup>, Hakim Gharbi<sup>a</sup>,  
Frédéric Valès<sup>a</sup>

<sup>a</sup> Laboratoire de mécanique des solides, UMR 7649, École polytechnique, 91128 Palaiseau cedex, France

<sup>b</sup> Département de sismologie, Institut de physique du Globe de Paris, boîte n° 89, 75252 Paris cedex 05, France

Reçu le 6 janvier 2004 ; accepté après révision le 14 septembre 2004

Disponible sur Internet le 28 octobre 2004

Présenté par Jean Salençon

---

### Résumé

On décrit des essais de fluage de longue durée sur des éprouvettes de sel gemme soumises à des chargements mécaniques très faibles ( $\sigma = 0,02$  à  $0,1$  MPa). Le chargement était fourni par des charges mortes ; le déplacement était mesuré par des capteurs de résolution  $\Delta\varepsilon = 10^{-8}$ . On a placé le dispositif d'essai dans une galerie souterraine profonde, où les fluctuations naturelles de température sont de l'ordre du centième de degré Celsius. On a pu ainsi mesurer des vitesses de déformation inférieures à  $10^{-12} \text{ s}^{-1}$ . Les essais montrent qu'on ne peut extrapoler à ces faibles charges les relations de comportement obtenues sous charge plus élevée. *Pour citer cet article : P. Bérest et al., C. R. Geoscience 336 (2004).*

© 2004 Académie des sciences. Publié par Elsevier SAS. Tous droits réservés.

### Abstract

**Creep of rock salt under very small loadings.** Long-term creep tests have been performed under very small uniaxial loadings ( $\sigma = 0.02$  to  $0.1$  MPa). Testing devices were set in an underground gallery, where temperature fluctuations are in the order of one hundredth of a Celsius degree. The mechanical loading was provided by dead weights. The displacements were measured through special sensors whose resolution is  $\Delta\varepsilon = 10^{-8}$ . Strain rates as small as  $\dot{\varepsilon} = 10^{-12} \text{ s}^{-1}$  were measured. The tests prove that constitutive laws deduced from tests performed on rock salt samples under standard mechanical loadings cannot be extrapolated to very small loadings. *To cite this article : P. Bérest et al., C. R. Geoscience 336 (2004).*

© 2004 Académie des sciences. Publié par Elsevier SAS. Tous droits réservés.

*Mots-clés :* sel gemme ; fluage ; faibles vitesses de déformation

*Keywords :* rock salt ; creep ; small strain rates

---

\* Auteur correspondant.

Adresse e-mail : [berest@lms.polytechnique.fr](mailto:berest@lms.polytechnique.fr) (P. Bérest).

### Abridged English version

The behaviour of rock salt, which is essentially a viscoplastic rock, has been studied extensively in the range  $\dot{\epsilon} = 10^{-10}$ – $10^{-6}$  s<sup>-1</sup> [1,4–7]. Studying smaller rates raises difficult experimental problems. Dead-weight loading was used to control the (small) applied stress; a sensor, whose resolution is 1 nm, was especially designed for the tests; tests were performed in a 160-m-deep gallery of the Varangéville salt Mine to take advantage of very stable temperatures.

Fig. 1 shows that daily temperature variations are in the order of 1/100 °C; larger variations are due to the presence of humans in the gallery or to power cuts. Hygrometry slowly increases from 52%RH to 57%RH during a one-year-long period.

Rock samples (diameter 7 cm, height 16 cm) are set between two silica plates (Fig. 2); the upper silica plate bears the dead weight. Four high-resolution sensors set in two vertical planes at a 90° angle are used during each test. A relative rotation of the two silica plates is observed: for instance, when a lamp is switched on, uneven heating of the lateral surface leads to non-uniform thermo-elastic strains and rotation of the upper plate. In the following, the considered axial strain is the average of the strains measured by the four sensors.

A striking correlation between temperature and strain variations measured during Test No. 1 can be observed in Fig. 3; the empirical expansion coefficient is very close to rock-salt thermal expansion coefficient, clearly proving that the correlation originates in the effects of the thermo-elastic behaviour of salt.

Three long-term creep tests were performed. A  $\sigma = 0.103$  MPa stress was applied at the beginning of Test No. 1 (the applied stress was changed twice during this test, which lasted 660 days). A similar loading was applied to a purer salt sample during Test No. 2, which lasted 385 days. A still smaller loading ( $\sigma = 0.021$  MPa) was applied during Test No. 3; this load was built up to  $\sigma = 0.054$  MPa after 177 days.

Results of Test No. 1 are displayed in Fig. 4. The initial load was built up to  $\sigma = 0.108$  MPa (+5%) 42 days after the beginning of the test. Strain experiences a long initial transient evolution, up to day 150, at which time the average strain rate stabilized to  $\dot{\epsilon} = 1.4 \times 10^{-12}$  s<sup>-1</sup> with long-period amplitude fluctuations. A 30% unloading ('stress drop') performed

at day 343 led to an instantaneous axial expansion followed by a long period of time during which a delayed expansion ('inverse creep') can be observed. Strain rates more or less stabilize after day 550, and  $\dot{\epsilon} = 7 \times 10^{-13}$  s<sup>-1</sup>. Test No. 2 provided similar results (Fig. 5); creep rates were slightly faster, a characteristic feature of purer salt, which had been observed during earlier tests [3,12] when 'standard' loadings were applied. Test No. 3 did not provide consistent results till the load was built up to  $\sigma = 0.054$  MPa (Fig. 5).

In other words, the behaviour of salt under small stresses exhibits the same general features as observed under larger stresses. It is generally recognized that a so-called 'Norton–Hoff' law ( $\dot{\epsilon} = A \exp[-Q/(RT)]\sigma^n$ , where  $T$  is the absolute temperature,  $A$ ,  $Q/R$ , and  $n$  are constants [1,4–7]) can be accurately fitted to the creep curves obtained during large-stress ( $\sigma = 5$  to 20 MPa) tests. However, when such a law is extrapolated to the case of small stresses, the calculated strain rates are smaller by five orders of magnitude than the as-observed strain rates. It proves that the standard Norton–Hoff law must be revisited when small loadings are considered.

### 1. Introduction

Le comportement du sel a été largement étudié dans la gamme de vitesses de déformation  $\dot{\epsilon} = 10^{-10}$  à  $10^{-6}$  s<sup>-1</sup> [1,4–7]. Pourtant, la vitesse de fermeture d'une caverne souterraine lessivée dans une couche de sel à 1000 m de profondeur est de l'ordre de  $3 \times 10^{-4}$  par an, ou  $10^{-11}$  s<sup>-1</sup> [2]. Des vitesses de cet ordre n'ont pas été fréquemment mesurées au laboratoire. Hunsche [9, (p. 194)] décrit des essais de fluage dont la durée était de l'ordre de la semaine; la vitesse de déformation,  $\dot{\epsilon} = 7 \times 10^{-12}$  s<sup>-1</sup> était *the lowest reliably determined deformation rate*. Le nombre restreint de références s'explique par les difficultés soulevées par la mesure des faibles vitesses de déformation.

- (1) Quand la vitesse de déformation est de l'ordre de  $\dot{\epsilon} = 10^{-12}$  s<sup>-1</sup>, la déformation observée après 12 jours est  $\epsilon = 10^{-6}$ . Or, le coefficient de dilatation thermique du sel est de l'ordre de  $\alpha = 4,4 \times 10^{-5}$  °C<sup>-1</sup>. Ainsi, le « bruit » constitué par les déformations thermoélastiques engendrées par les fluctuations de température sera souvent plus

grand que le signal à mesurer. Il en est de même pour les fluctuations de l'hygrométrie ambiante, qui présentent une influence sensible sur le fluage du sel [8,10].

- (2) Les faibles vitesses de déformation sont associées à de petits chargements mécaniques. La plupart des dispositifs usuels de mesure du fluage sont conçus pour appliquer des charges déviatoriques de l'ordre de 5 à 20 MPa, trop fortes pour le contexte où l'on s'est placé.
- (3) Plus l'essai est long, plus petites sont les vitesses de déformation que l'on peut mesurer. Mais on souhaite aussi pouvoir apprécier des fluctuations éventuelles de la vitesse de déformation, journalières par exemple. Si la vitesse moyenne de déformation est de l'ordre de  $\dot{\epsilon} = 10^{-12} \text{ s}^{-1}$ , il faut donc pouvoir mesurer précisément des déformations de l'ordre de  $10^{-7}$ , c'est-à-dire une contraction de  $10^{-8} \text{ m}$  pour une éprouvette de dimension décimétrique. Les capteurs doivent avoir une résolution de l'ordre du nanomètre.

Cette note décrit des essais conduits avec des capteurs de haute résolution, en utilisant des charges mortes et en se plaçant dans une galerie souterraine profonde, pour tirer partie d'une stabilité thermique naturelle.

## 2. Moyens de mesure

### 2.1. Capteurs de déplacement

Les capteurs utilisés ont été conçus par P.A. Blum. Un fil vertical de silice est fixé au plateau placé au-dessus de l'éprouvette; il porte à son extrémité basse une goutte de silice dans laquelle est noyé un élément ferritique qui se déplace dans un bobinage magnétique solidaire du plateau inférieur. Un déplacement relatif des extrémités du capteur de  $1 \mu\text{m}$ , que l'on peut étalonner en laboratoire, engendre une tension de 1 mV environ; comme on peut apprécier facilement une tension de  $1 \mu\text{V}$ , le capteur peut mesurer un déplacement de 1 nm, et donc une déformation de l'ordre de  $10^{-8}$  pour une éprouvette de hauteur décimétrique. Cette technique est classique dans son principe (c'est celui du capteur de déplacement à transformateur différentiel de type LVDT), mais l'utilisation de la silice réduit

les effets des perturbations thermiques sur le capteur, déjà limitées par le choix de l'environnement de l'essai. On a mesuré (dans un autre site) la dérive d'un capteur du même type: après 700 jours, elle était de  $1 \mu\text{m}$ , soit, pour un capteur de hauteur décimétrique, une vitesse de déformation apparente moyenne de  $\dot{\epsilon} = 10^{-13} \text{ s}^{-1}$ , vitesse qui constitue donc la limite de résolution du dispositif.

### 2.2. Température et hygrométrie

Les essais ont été réalisés, à 160 m sous la surface du sol, dans une galerie en cul-de-sac de 700 m de long de la mine de Varangéville, près de Nancy, grâce à l'aimable concours de la Compagnie des salins du Midi et des salines de l'Est. Cette galerie est à l'écart de l'exploitation et du circuit de ventilation actuels. La Fig. 1 représente les évolutions de l'hygrométrie et de la température de la galerie, relevées toutes les deux minutes, depuis le 18 novembre 1997 (qui est dans la suite le jour 1) jusqu'en septembre 1998. La température est mesurée avec une résolution de  $1/1000^\circ\text{C}$ ; sa valeur moyenne est  $13,5^\circ\text{C}$ . On observe, à l'échelle de la journée, des variations de l'ordre du  $1/100^\circ\text{C}$ . Des variations saisonnières de quelques  $1/100^\circ\text{C}$  sont aussi

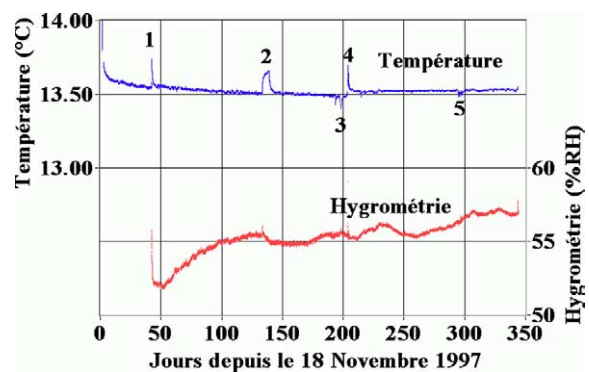


Fig. 1. Température et hygrométrie mesurées dans une galerie de la mine de Varangéville. Les accroissements de température (1) et (4) sont liés à la présence de personnes travaillant dans la galerie. Les diminutions (3) et (5) sont dues à des coupures de courant électrique. L'accroissement de température (2) est dû à une lampe électrique laissée allumée par erreur pendant 6 jours.

Fig. 1. Ambient temperature and hygrometry measured in the Varangéville Mine. Temperature increases (1) and (4) are due to the presence of people working in the test room. Temperature drops (3) and (5) are due to electric cuts. The large temperature increase (2) is associated with a lamp mistakenly switched on for 6 days.

observées. Plus sensibles sont les variations de température d'origine humaine, liées à la présence occasionnelle de personnes dans la galerie (échauffement) ou aux coupures de courant électrique (refroidissement). L'hygrométrie pendant la période représentée sur la Fig. 1 augmente de 52 % RH à 57 % RH. Mais il est difficile d'être certain que les variations mesurées reflètent correctement l'évolution réelle, la précision des hygromètres n'étant probablement guère meilleure que  $\pm 2\%$  RH.

### 3. Programme et conduite des essais

On a conduit des essais de fluage uniaxiaux de longue durée sur des éprouvettes cylindriques de sel gemme. L'éprouvette est placée entre deux plaques cylindriques épaisses de silice (Fig. 2). Pendant chaque essai, quatre extensomètres de haute résolution, décrits plus haut, dont les deux extrémités sont solidaires, respectivement, des plaques supérieure et inférieure, sont disposés parallèlement aux génératrices du cylindre, dans deux plans diamétraux perpendiculaires. Le sel testé, prélevé dans un sondage profond du site de stockage de Gaz de France à Étrez (Ain), avait été étudié auparavant, lors d'essais de fluage sous contraintes ordinaires [3,12].

Le 18 novembre 1997 (jour 1), l'essai n° 1 commence : une éprouvette de sel phénoblastique est mise en charge, avec une contrainte initiale  $\sigma = 0,103$  MPa; cette charge sera modifiée deux fois ( $\sigma = 0,108$  MPa, puis  $\sigma = 0,076$  MPa). Au jour 204 débute l'essai n° 2; le sel est de meilleure pureté et la charge appliquée est  $\sigma = 0,102$  MPa. Au jour 343, une troisième éprouvette de sel, de qualité intermédiaire entre les deux précédentes, est chargée avec  $\sigma = 0,021$  MPa (essai n° 3); cette charge est portée à  $\sigma = 0,054$  MPa au jour 520. Les essais n° 2 et n° 3 sont arrêtés respectivement après 384 et 245 jours. L'essai n° 1 dure 660 jours.

#### 3.1. Mesure des déplacements

La présence de quatre capteurs pour une même éprouvette assure une certaine redondance, rendue nécessaire par la fragilité des capteurs. De plus, elle permet d'apprécier une rotation relative des deux plaques de silice placées sous et au-dessus de l'éprouvette. Une

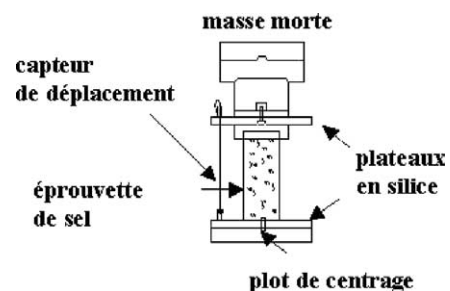


Fig. 2. Dispositif de mesure de fluage du sel. Les échantillons ont une hauteur de 16 cm et un diamètre de 7 cm. Quatre capteurs de déplacement analogues à celui représenté sur la figure sont utilisés pendant l'essai; ils sont placés de part et d'autre de l'éprouvette dans deux plans diamétraux perpendiculaires.

Fig. 2. Rock-salt testing device. Samples are 16 cm high and 7 cm in diameter. Four displacement sensors are used during a test. They are set in two vertical planes at a  $90^\circ$  angle.

telle rotation est observée quand une lampe est allumée dans la galerie : la face éclairée devient rapidement plus chaude, ce qui engendre une dilatation ther-

moélastique qui n'est pas uniforme dans toute l'éprouvette, et donc une rotation relative des plateaux, qui est visible après quelques minutes d'éclairage. Plus généralement, au cours d'un essai, les quatre capteurs d'une même éprouvette montrent des déplacements différents, l'essentiel de la différence étant acquis pendant les premiers jours de l'essai ; mais les deux déplacements calculés en faisant la moyenne des valeurs relatives à deux capteurs diamétralement opposés sont pratiquement égaux, de sorte que les différences peuvent être raisonnablement attribuées à une rotation relative des deux plaques de silice. Cette rotation peut être provoquée par un chargement non uniforme ou, plus vraisemblablement, par l'état des faces supérieure et inférieure de l'éprouvette (la rectification laisse des irrégularités d'une dizaine de microns de hauteur, et le parallélisme des deux faces ne peut être assuré à mieux qu'une centaine de microns de variation de la hauteur de l'éprouvette ; ces irrégularités expliquent peut-être les difficultés rencontrées quand le chargement est extrêmement faible, voir plus loin lors de l'essai n° 3). On utilise donc dans la suite la moyenne des déplacements des quatre capteurs lors de l'interprétation des essais. Les vitesses de déformation sont calculées respectivement sur un intervalle de temps de 5 j pour l'essai n° 1 et de 2 j pour les essais n° 2 et n° 3.

### 3.2. Correction des effets thermoélastiques

La Fig. 3 montre l'évolution simultanée, pendant une phase de l'essai n° 1, de la déformation axiale de l'éprouvette et de la température, qui apparaissent corrélées. On observe notamment, pendant les jours 133 à 139, une dilatation importante de l'éprouvette, liée à un accroissement de température provoqué par une lampe laissée allumée par erreur pendant cette période (les contractions sont comptées positivement). Le coefficient de corrélation empirique est  $\alpha = 4,4 \times 10^{-5} \text{ } ^\circ\text{C}^{-1}$ , valeur très proche de celle du coefficient de dilatation thermique du sel, ce qui confirme que, pour leur part, les capteurs sont peu influencés par la température. C'est donc la courbe corrigée des variations de température qui est utilisée lors de l'interprétation. Les variations de température affectent en principe aussi la vitesse de déformation viscoplastique ; mais l'estimation que l'on peut faire au moyen de la loi de Norton–Hoff, rappelée plus loin, montre que cet effet reste faible, même pour la variation de

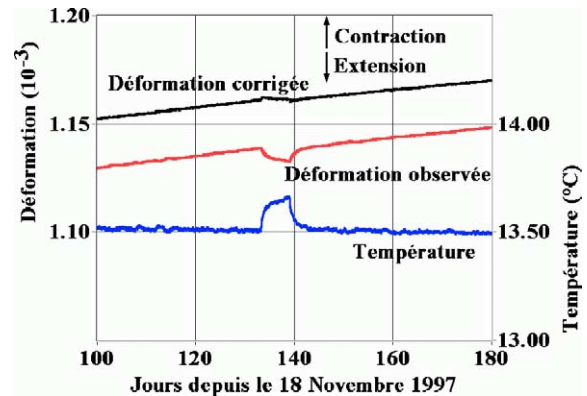


Fig. 3. Évolutions, pendant les jours 100 à 180 de l'essai n° 1, de la température et des déformations observées et corrigées (la hauteur de l'éprouvette est 16 cm). La corrélation est nettement visible, notamment pendant l'incident des jours 133 à 139 (une lampe est restée allumée par erreur). La courbe de la déformation corrigée des variations de température est décalée d'une déformation arbitraire de  $2,5 \times 10^{-5}$  pour faciliter la lecture.

Fig. 3. As-observed and corrected axial strains, and temperature variations, during days 100–180, Test No. 1. An inverse correlation is observed, especially during the lamp-on incident of days 133 to 139. A strain offset of  $2.5 \times 10^{-5}$  is applied to the corrected strain-versus-time curve to make the figure easier to read.

0,15 °C observée pendant l'épisode de la lampe restée allumée à partir du jour 133 (Fig. 3).

Les effets des variations de l'hygrométrie sont a priori plus sensibles. Hunsche et Schulze [10] en ont proposé une estimation, dont on déduit qu'une variation d'hygrométrie relative de 1 % RH au voisinage de la valeur moyenne  $\varphi_m = 55\%$  RH mesurée pendant les essais engendrerait une variation relative de la vitesse de déformation stationnaire de  $d\dot{\epsilon}/\dot{\epsilon} = 9 \times 10^{-2}$ . Cette modification est appréciable, puisque les fluctuations de l'hygrométrie mesurées sont de l'ordre de  $\pm 2\%$  RH. On n'a toutefois pas tenté d'effectuer la correction, car la mesure de l'hygrométrie est affectée d'une incertitude qui est du même ordre de grandeur que les fluctuations observées.

## 4. Résultats et interprétation préliminaire

### 4.1. Résultats des essais

Au cours de l'essai n° 1, la contrainte uniaxiale moyenne de compression initialement appliquée à l'échantillon ( $\sigma = 0,103$  MPa) a été portée à  $\sigma = 0,108$  MPa (+5%) après 42 j, puis diminuée jusqu'à

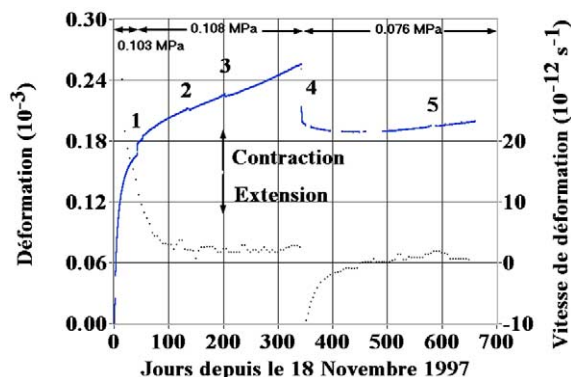


Fig. 4. Évolutions de la déformation (corrignée de la température) et de la vitesse de déformation pendant l'essai de fluage n° 1. La vitesse est calculée tous les 5 j; il s'agit de la vitesse moyenne sur un intervalle de 10 j. La contrainte appliquée initialement est  $\sigma = 0,103$  MPa; elle est portée à  $\sigma = 0,108$  MPa au jour 42 (1), puis à  $\sigma = 0,076$  MPa au jour 343 (4). L'essai n° 2, monté sur la même table, commence au jour 204 (3). Les événements (2) et (5) sont associés respectivement à l'incident de la lampe restée allumée (voir Fig. 3) et à une coupure de courant.

Fig. 4. Strain-versus-time and strain rate-versus-time during Test No. 1. The strain rate is averaged every 5 days on a 10-day-long time interval. Strains are corrected for temperature variations. The initial applied stress is  $\sigma = 0,103$  MPa; it is built up to  $\sigma = 0,108$  MPa after 42 days (1) and to  $\sigma = 0,076$  MPa after 343 days (4). Test No. 2 begins at day 204 (3). Events (2) and (5) are associated with the switch-on lamp incident (see Fig. 3) and to an electric cut, respectively.

$\sigma = 0,076$  MPa (–30%) après 343 j. La Fig. 4 montre la déformation et la vitesse de déformation, corrigées des déformations thermoélastiques, observées en fonction du temps pendant 650 j. On observe des discontinuités de la pente de la courbe, qui sont commentées dans la légende de la Fig. 4. Les déformations connaissent un épisode initial de fluage transitoire pendant 150 jours. La vitesse de déformation est alors stabilisée à une valeur de l'ordre de  $\dot{\epsilon} = 1,4 \times 10^{-12} \text{ s}^{-1}$ , avec des fluctuations de longues périodes d'une amplitude de  $\pm 20\%$ . Le déchargement de l'ordre de 30% effectué au jour 343 conduit à une dilatation axiale rapide (il faut noter qu'avec l'échelle de temps retenue sur la figure, on ne peut apprécier le module d'élasticité, qui doit être mesuré en considérant la dilatation instantanée), suivie d'une longue période de temps pendant laquelle on observe une dilatation axiale transitoire, ou fluage inverse, qui se poursuit jusqu'au jour 450 environ. Ce fluage inverse a déjà été observé par plusieurs auteurs [9,11]. Après le jour 550, la vitesse

de déformation se stabilise à une valeur de l'ordre de  $\dot{\epsilon} = 7 \times 10^{-13} \text{ s}^{-1}$ .

Pendant l'essai n° 2, la contrainte appliquée était  $\sigma = 0,102$  MPa. L'éprouvette était constituée de sel « pur », au sens précisé dans [12] (Fig. 5). Pendant les 140 premiers jours (jours 202 à 343), les vitesses de déformation décroissent, pour se stabiliser à une valeur supérieure à celle observée au cours de l'essai n° 1, effectué sur une éprouvette de sel « phénoblastique » [12]. Cette différence est conforme à ce que l'on sait d'essais conduits antérieurement avec des contraintes appliquées plus élevées sur les deux types de sel [12]. Au jour 343 (jour de la modification de charge pour l'essai n° 1; les deux dispositifs sont placés sur des tables différentes, mais la présence humaine peut engendrer un petit déplacement de table ou un effet thermique), puis aux alentours du jour 500 (plus progressivement dans ce dernier cas), tout se passe comme si la charge avait été rapidement augmentée: la vitesse de déformation augmente rapidement, puis diminue progressivement. On n'a pas d'explication certaine pour ces phénomènes. À la fin de l'essai, la vitesse de déformation mesurée est de l'ordre de  $\dot{\epsilon} = 1,8 \times 10^{-12} \text{ s}^{-1}$ .

L'essai n° 3 a été conduit sur un sel de qualité « intermédiaire », sous une charge uniaxiale de  $\sigma = 0,021$  MPa, portée à  $\sigma = 0,054$  MPa après 177 jours; aucune déformation différée n'a pu être mesurée avec certitude pendant les 177 jours du premier palier de charge. On pense que la charge est trop petite pour qu'une répartition uniforme sur les faces inférieure et supérieure soit assurée, ce qui fait jouer un rôle important aux irrégularités de surface. En revanche, quand la charge est portée à  $\sigma = 0,054$  MPa (Fig. 5), on observe une évolution plus normale, avec décroissance progressive de la vitesse de déformation, qui atteint une valeur moyenne de  $\dot{\epsilon} = 1,2 \times 10^{-12} \text{ s}^{-1}$ , avec des fluctuations de  $\pm 0,3 \times 10^{-12} \text{ s}^{-1}$ . Ici encore, c'est la moyenne des mesures des quatre capteurs qui est représentée; les nombreux « sauts » observés sont dus à un seul capteur et ne traduisent sans doute pas le comportement réel de l'éprouvette.

#### 4.2. Comparaison avec des essais conduits sous plus forte charge

Qualitativement, le comportement différé du sel soumis à un chargement uniaxial faible ( $\sigma \approx 0,1$  MPa)

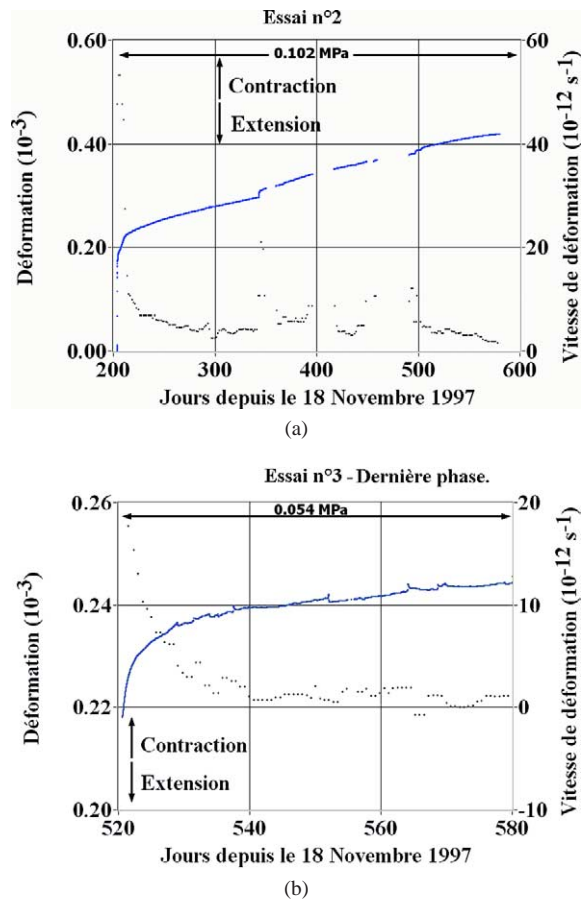


Fig. 5. Évolution de la déformation (non corrigée de la température) et de la vitesse de déformation pendant les essais de fluage n° 2 (a) et n° 3 (b). Pendant l'essai n° 2, la contrainte appliquée est  $\sigma = 0,102$  MPa. Les vitesses de déformation sont plus rapides qu'au cours de l'essai n° 1. On ne sait pas expliquer les croissances rapides de la vitesse de déformation observées aux jours 343 et 500 (sauf peut-être par une présence humaine liée à une intervention au jour 343). On n'a représenté que la fin de l'essai n° 3. Au jour 520, la contrainte appliquée, qui était antérieurement  $\sigma = 0,021$  MPa, est portée à  $\sigma = 0,054$  MPa.

Fig. 5. Strain-versus-time and strain rate-versus-time during Tests No. 2 (a) and No. 3 (b). During Test No. 2, the applied stress is  $\sigma = 0,102$  MPa. Strain rates are faster than during Test No. 1. No convincing explanation was found for the day 343 and day 500 strain-rate rapid increases. Only the final part of Test No. 3 is displayed. At day 520, the applied load is built up from  $\sigma = 0,021$  to  $0,054$  MPa.

montre les mêmes traits généraux que lorsqu'il est soumis à des chargements plus importants (disons,  $\sigma \approx 5$  à  $10$  MPa) : un accroissement rapide de la contrainte appliquée engendre un fluage transitoire, au

cours duquel la vitesse de déformation décroît, avant d'atteindre une valeur stabilisée, avec des fluctuations de longue période autour d'une valeur moyenne (fluage stationnaire). Une diminution de la contrainte appliquée engendre un fluage inverse transitoire.

On utilise souvent, pour décrire le fluage stationnaire du sel, la loi de comportement dite de « Norton–Hoff » :  $\dot{\epsilon} = A \exp[-Q/(RT)]\sigma^n$ , où  $\sigma$  est la contrainte appliquée,  $T$  est la température absolue,  $A$ ,  $n$  et  $Q/R$  sont des constantes. L'exposant  $n$  est compris entre 3 et 5. Dans le cas du sel d'Étrez, Pouya [12] propose pour ces paramètres les valeurs suivantes :  $A = 0,64 \text{ MPa}^{-n} \text{ année}^{-1}$ ,  $Q/R = 4100 \text{ K}$ ,  $n = 3,1$ . Ces valeurs sont conformes aux données que l'on trouve dans la littérature, et rendent compte correctement des résultats d'une mesure en place du fluage d'une cavité à Étrez [2]. Lorsqu'on extrapole la loi de Norton–Hoff aux conditions de l'essai n° 1 ( $\sigma = 0,108 \text{ MPa}$ ,  $T = 286,5 \text{ K}$ ), avec ces valeurs des paramètres, la vitesse de déformation calculée, soit  $\dot{\epsilon} = 10^{-17} \text{ s}^{-1}$ , est plus faible de cinq ordres de grandeur que la vitesse de déformation mesurée, qui est de  $\dot{\epsilon} = 1,4 \times 10^{-12} \text{ s}^{-1}$ . Cette observation suggère que la loi de Norton–Hoff, avec les valeurs des constantes déduites dans le cas des charges élevées, ne peut absolument pas être extrapolée au cas des faibles charges. Cette remarque va dans le sens d'observations déjà faites par Spiers et al. [13], qui mettent en exergue le rôle sous faible charge de mécanismes tels que la dissolution–cristallisation, pour laquelle l'exposant  $n$  de la loi de fluage serait égal à 1. La base de données disponible (deux essais complètement réussis) ne permet guère d'aller plus loin ; il manque notamment des essais conduits avec des températures différentes. Les conclusions déjà obtenues encouragent toutefois à accroître cette base.

## 5. Conclusions

Le dispositif utilisé de mesure du fluage (capteurs de haute résolution, charge morte, température stable au  $1/100^\circ\text{C}$  et mesurée au  $1/1000^\circ\text{C}$ ) sous faible chargement mécanique ( $\sigma \sim 0,02$  à  $0,1 \text{ MPa}$ ) permet d'apprécier pendant des durées supérieures à l'année des vitesses de déformation inférieures à  $10^{-12} \text{ s}^{-1}$ . Dans le cas du sel gemme, le comportement est qualitativement analogue à celui observé sous plus forte charge, mais les vitesses sont bien plus élevées qu'il

n'est prédit par les relations établies sous plus forte charge; les vitesses stationnaires sont de l'ordre de  $\dot{\epsilon} = 1,4 \times 10^{-12} \text{ s}^{-1}$  quand  $\sigma = 0,108 \text{ MPa}$  et  $\dot{\epsilon} = 0,7 \times 10^{-12} \text{ s}^{-1}$  quand  $\sigma = 0,076 \text{ MPa}$ , avec un long épisode de fluage inverse après que la charge a été diminuée. Ces premiers résultats ouvrent un large champ à l'étude du fluage des roches sous faible chargement mécanique, pour lequel l'importance respective des divers mécanismes de déformation est vraisemblablement différente, les mécanismes associés à un transfert de matière devenant prépondérants en comparaison des mécanismes de type plastique associés aux plus fortes charges. Les résultats expérimentaux obtenus invitent à identifier plus précisément ces mécanismes spécifiques aux faibles charges.

## Remerciements

Les essais décrits auraient été impossibles sans l'aimable concours de la Compagnie des salins du Midi et des salines de l'Est, exploitant de la mine de Varangéville, et de collègues du laboratoire LAEGO de Nancy, qui ont effectué certains relevés au cours des essais. Les auteurs remercient les rapporteurs de cette note pour leurs commentaires.

## Références

- [1] M. Aubertin, R.H. Hardy Jr (Eds.), Proc. 4th Conf. on the Mechanical Behavior of Salt, Clausthal-Zellerfeld, Germany, Trans Tech. Publ., 1998.
- [2] P. Bérest, J. Bergues, B. Brouard, J.G. Durup, B. Guerber, A salt-cavern abandonment test, *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* 38 (2) (2001) 343–355.
- [3] J.-P. Charpentier, Creep of rock salt at elevated temperature, in: Proc. 2nd Conf. on the Mechanical Behavior of Salt, Clausthal-Zellerfeld, Germany, Trans Tech. Publ., 1988, pp. 131–136.
- [4] N. Cristescu, R.H. Hardy Jr, R.O. Simionescu (Eds.), Proc. 5th Conf. on the Mechanical Behavior of Salt, Swets & Zeitlinger, Lisse, The Netherlands, 2002.
- [5] R.H. Hardy Jr, M. Langer (Eds.), Proc. 1st Conf. on the Mechanical Behavior of Salt, Clausthal-Zellerfeld, Germany, Trans Tech. Publ., 1984.
- [6] R.H. Hardy Jr, M. Langer (Eds.), Proc. 2nd Conf. on the Mechanical Behavior of Salt, Clausthal-Zellerfeld, Germany, Trans Tech. Publ., 1988.
- [7] R.H. Hardy Jr, M. Langer, P. Bérest, M. Ghoreychi (Eds.), Proc. 3rd Conf. on the Mechanical Behavior of Salt, Clausthal-Zellerfeld, Germany, Trans Tech. Publ., 1996.
- [8] S.T. Horseman, Moisture Content – A major uncertainty in storage cavity closure prediction, in: Proc. 2nd Conf. on the Mechanical Behavior of Salt, Clausthal-Zellerfeld, Germany, Trans Tech. Publ., 1988, pp. 53–68.
- [9] U. Hunsche, Measurement of creep in rock salt at small strain rates, in: Proc. 2nd Conf. on the Mechanical Behavior of Salt, Clausthal-Zellerfeld, Germany, Trans Tech. Publ., 1988, pp. 187–196.
- [10] U. Hunsche, O. Schultze, Humidity induced creep and its relation to the dilatancy boundary, in: Proc. 5th Conf. on the Mechanical Behavior of Salt, Swets & Zeitlinger, Lisse, The Netherlands, 2002, pp. 73–88.
- [11] D. Munson, P. Dawson, A transient model for salt during stress loading and unloading, SAND 82–0962, Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM, USA, 1982.
- [12] A. Pouya, Correlation between mechanical behavior and petrological properties of rock salt, in: J.C. Roegiers (Ed.), Proc. 32nd US Symp. on Rock Mechanics, Balkema, Rotterdam, 1991, pp. 385–392.
- [13] C.J. Spiers, J.L. Urai, G.S. Lister, The effect of brine (inherent or added) on rheology and deformation mechanisms in salt-rock, in: Proceedings of Second Conference on the Mechanical Behavior of Salt, Clausthal-Zellerfeld, Germany, Trans Tech. Publ., 1988, pp. 89–102.