

PROBLÈMES POSÉS PAR L'ABANDON DE CAVERNES SOUTERRAINES PROFONDES

P. Bérest

Laboratoire de Mécanique des Solides, Ecole Polytechnique, 91 128 Palaiseau Cedex.

Téléphone : 01 69 33 57 44.

berest@lms.polytechnique.fr

Mots clés : Stockage souterrain, Grandes échelles de temps, Rhéologie du sel gemme, Stockage d'hydrocarbures, Abandon des cavernes souterraines dans le sel

1. INTRODUCTION

Une double évolution a marqué l'utilisation du sous-sol profond depuis une cinquantaine d'années. D'une part, à côté de la *production* traditionnelle d'eau souterraine, d'hydrocarbures et de minerais, l'activité de *stockage* dans le sous-sol s'est considérablement développée. Elle concerne des produits entreposés de façon provisoire (hydrocarbures, air comprimé, hydrogène) et des déchets que l'on veut soustraire durablement de la biosphère (déchets radioactifs et déchets industriels, CO₂). D'autre part, la sensibilité du public aux conséquences à long terme des activités humaines est devenue plus aigüe. L'ingénieur doit donc prendre en compte des échelles de temps bien plus longues. Pour les déchets radioactifs, il s'agit de dizaines de milliers d'années ; pour les déchets chimiques, d'une durée virtuellement infinie ; pour la séquestration du CO₂ en aquifère profond salin, on évoque un confinement nécessaire de plusieurs millénaires. Pour les ouvrages abandonnés (mines, puits pétroliers, stockages d'hydrocarbures) les durées à prendre en compte dépendent des risques envisageables, qui sont à examiner au cas par cas.

De ce fait, les préoccupations techniques et scientifiques se déplacent. Un confinement à long terme étant presque toujours requis, l'attention se porte sur les roches de perméabilité très faible ($K = 10^{-21}$ à 10^{-18} m²) et sur leurs propriétés de transfert : pression d'entrée d'un gaz dans la roche saturée, écoulement bi-phasique et diffusivité des solutés en milieu poreux. La stabilité mécanique des ouvrages demeure une préoccupation importante mais pour une période limitée pendant laquelle il paraît souhaitable que l'ouvrage soit réversible. Les problèmes *nouveaux* posés à la Mécanique sont ceux des relations entre perméabilité et contraintes. Une caractéristique commune aux roches peu perméables est que leur perméabilité peut considérablement augmenter sous l'effet de l'état de contraintes. Ce peut être le cas d'une zone aux parois de l'ouvrage qui a été soumise pendant le creusement à des contraintes déviatoriques (cisaillements) élevées et pourra constituer un court-circuit de la barrière géologique ; ou encore de la partie du massif dans laquelle se développent de fortes pressions de pore, sous l'action des gaz et de la chaleur engendrés par les produits stockés, de sorte que les contraintes effectives (contraintes réelles plus pression du fluide) peuvent devenir des tractions qui engendrent une (micro-) fracturation ou, à l'extrême, un glissement le long de failles préexistantes. A l'inverse, à plus long terme, lorsque les fortes contraintes déviatoriques et les pressions de pore élevées se sont dissipées, des contraintes moyennes élevées, naturelles à grande profondeur, peuvent, aidées par les évolutions physico-chimiques, restaurer en partie au moins les perméabilités initiales dégradées par l'ouvrage.

Plus généralement, à très long terme, en l'absence de sollicitations nouvelles, le système tend à revenir vers un état d'équilibre mécanique, thermique, hydraulique et chimique. On doit alors se préoccuper de petits écarts à l'état isotrope de contraintes, de vitesses de déformation très lentes, d'écarts faibles aux températures, pressions de fluides ou concentrations d'équilibre et donc de cinétiques très lentes s'appliquant pendant des durées très longues. Dans ce contexte, les phénomènes sont fortement couplés et les mécanismes prépondérants peuvent ne pas être ceux qu'on observe à l'échelle du laboratoire.

2. LE CAS DES CAVITÉS SALINES ABANDONNÉES

2.1 Création des cavités

Pour être plus spécifique il faut choisir une famille particulière d'ouvrages, dans cet article, les cavités salines profondes utilisées pour le stockage des hydrocarbures. Ce ne sont pas les ouvrages qui posent les problèmes les plus aigus – le sel, s'il peut rendre l'eau impropre à la consommation, n'est pas pour autant un produit toxique – mais ils sont exemplaires des problèmes nouveaux apparus. Ces cavités sont creusées par circulation d'eau douce dans un massif de sel, puis la saumure formée est remplacée par des hydrocarbures, figure 1. Leur profondeur varie de 200 à 2000 m et leur volume peut atteindre un million de m³. Il existe une petite centaine de telles cavernes en France, plus d'un millier aux USA. Il existe aussi dans le monde des dizaines de milliers de cavernes analogues créées pour la seule production de saumure ; elles posent quelques problèmes particuliers qu'on n'évoquera pas.

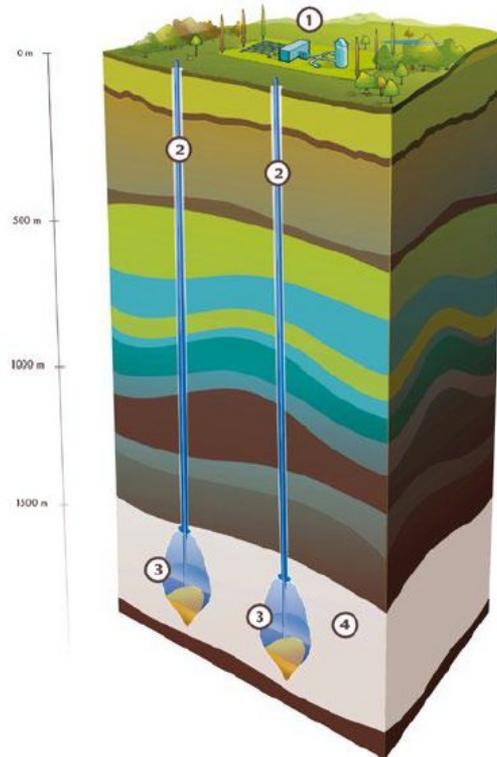


Figure 1 – Création de cavernes souterraines par dissolution d'un massif de sel (Source : Storengy).

A la fin de leur période d'exploitation, avant d'être abandonnées, ces cavernes sont à nouveau remplies de saumure ; puis le puits d'accès est bouché par du ciment. La question posée est celle du devenir de la grosse bulle de saumure saturée – jusqu'à un million de m^3 – ainsi abandonnée : la cavité peut-elle rompre ? la saumure peut-elle migrer vers des niveaux d'eau potable ? Il n'est pas facile de fixer la durée pour laquelle des réponses doivent être apportées ; elle dépend en définitive de la demande sociétale. Il y a cinquante ans ces questions d'abandon étaient pratiquement ignorées. Elles suscitent aujourd'hui de vives polémiques locales en Allemagne (guère en France ni aux USA) à l'occasion des demandes d'extension de stockage de gaz naturel. La profession, à l'échelle internationale, y consacre des recherches collectives depuis une vingtaine d'années (Ratigan, 2003). En France, la réglementation demande que l'abandon soit envisagé dès la création des cavités ; des réflexions sont conduites par les entreprises concernées et, à la demande de l'Administration, par l'Inéris et par Géoderis, l'Agence chargée des questions « d'Après-Mine ». Une sorte de consensus semble s'établir pour dire que l'évolution doit pouvoir être prédite avec précision pendant un siècle et que la tendance ultérieure doit être prévisible (Bérest et al., 2005).

Alors que l'absence d'effondrement se propageant jusqu'à la surface du sol est une préoccupation importante pour les anciennes mines étendues et peu profondes, il paraît solidement établi par l'expérience que les cavernes utilisées pour le stockage d'hydrocarbures sont durablement stables : le rapport diamètre sur profondeur est petit, souvent inférieur à 1 sur 10, de sorte que les cavernes se referment, plus ou moins lentement, sans que la surface du sol soit affectée autrement que par la formation d'une cuvette à pente douce dont la présence sera souvent effacée par les effets des changements naturels de la morphologie de surface. Un accident surprenant survenu en août 2012 à *Bayou Corne* en Louisiane (un cratère rempli d'eau de dimensions horizontales 160 m x 200 m et de profondeur 130 m est apparu au-dessus d'une caverne pleine de saumure abandonnée à une profondeur de 1000 m sur le flanc d'un dôme de sel), encore incomplètement expliqué, montre toutefois que certaines circonstances locales exigent une attention particulière.

En revanche l'étanchéité des cavernes n'est pas forcément assurée à long terme : le risque est qu'elles se vident en expulsant leur saumure vers les terrains proches de la surface où elle pourrait polluer les nappes aquifères.

2.2 L'évolution de la pression de la saumure contenue dans une caverne abandonnée

L'évolution à long terme de la pression de la saumure dans la caverne est donc essentielle. Si le massif est très perméable, la pression ne montera guère mais la saumure, par hypothèse, ne restera pas confinée dans la cavité. Si le massif est parfaitement imperméable, le confinement sera assuré ; toutefois, du fait de la réduction progressive de volume de la cavité par fluage du massif, la pression de saumure augmentera et atteindra plus ou moins vite la valeur de la pression géostatique : il y a alors risque de formation de fractures qui permettront une vidange potentiellement rapide. Il faut donc idéalement se trouver dans une configuration de fluage lent et de perméabilité faible mais non nulle. Ainsi la pression de la saumure sera

maintenue à une valeur plutôt basse, permettant une vidange très progressive de la cavité, sans à-coup, à travers la porosité naturelle de la roche plutôt que par des fractures créées par une augmentation excessive de la pression.

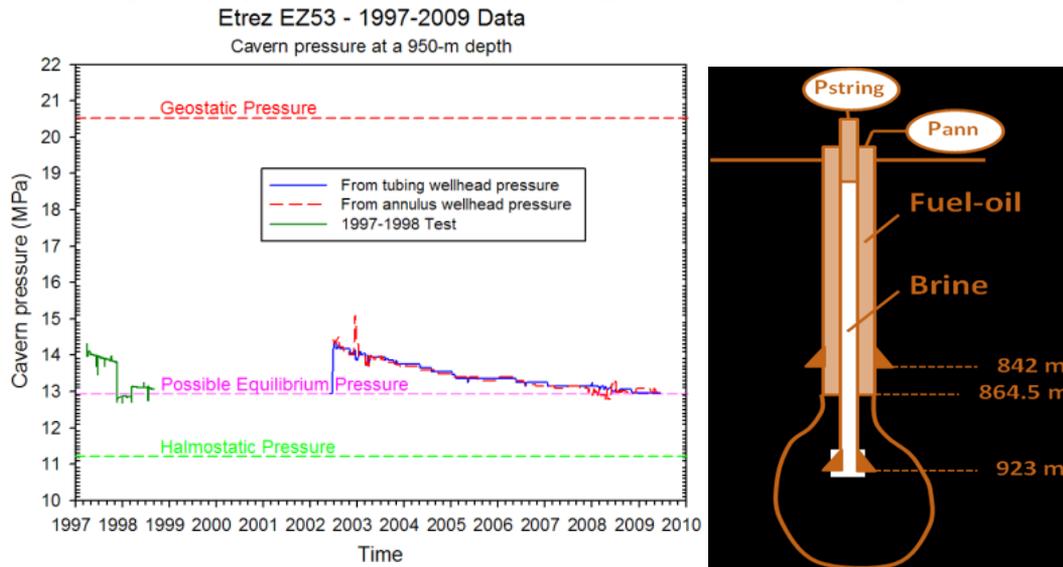


Figure 2– Essai dans une cavité de Storengy à Etrez (Ain). La pression dans la caverne trouve une valeur d'équilibre quand le débit de perméation est égal à la vitesse de perte de volume par fluage, Bérest et al. 2011.

Un exemple de l'évolution recherchée est donné à la figure 2. Il s'agit d'une petite caverne (8000 m³ et 950 m de profondeur) du site d'Etrez exploité par Storengy pour le stockage de gaz naturel. La pression *halmostatique* (11,2 MPa à 940 m de profondeur) est la pression qui règnerait dans la caverne si le puits était rempli de saumure saturée et ouvert à la surface du sol. La pression *géostatique* (20,6 MPa) est le poids des terrains surincombants : si la pression de la saumure la dépasse, une fracturation est possible. Pendant l'essai le puits est équipé d'un tube central (« string »), l'espace annulaire est rempli de fioul, les deux pressions P_{string} et P_{ann} sont mesurées en tête de puits. L'essai vise à montrer que la pression de la saumure atteint une valeur d'équilibre pour laquelle le débit de saumure expulsé vers le massif est exactement compensé par la réduction de volume de la caverne par fluage du sel. La valeur de la pression d'équilibre est ici de l'ordre de 13 MPa ; on le vérifie en imposant de temps à autre une pression initiale plus grande (ou plus basse) et en vérifiant que la pression chute (ou augmente) pendant la phase qui suit. On note que l'essai dure 12 ans, durée qui constitue par elle-même un élément de réponse à la question de l'extrapolation.

2.3 Le problème du déséquilibre thermique initial

Avant de formuler plus précisément le problème, il faut écarter une circonstance souvent présente dans la pratique et qui perturbe ce schéma idéal. La saumure injectée dans la caverne avant son abandon provient en général de la surface du sol ; elle est plus froide que le massif environnant et se réchauffe lentement par apport de chaleur provenant du massif. Un ordre de grandeur s'obtient en remarquant que le massif et la saumure (qui est brassée énergiquement par la convection naturelle) ont des capacités calorifiques volumiques proches : le temps caractéristique du réchauffement est alors $t_c = a^2/k_{sel}$ où a est la dimension caractéristique de la caverne, par exemple le rayon $a = 30$ m, et $k_{sel} = 100$ m²/an est la diffusivité thermique du sel : le temps caractéristique du réchauffement est d'une dizaine d'années. Dans une grosse caverne, l'équilibre thermique est atteint après un siècle.

Dans une caverne fermée, l'augmentation de température entraîne une augmentation de pression du fluide emprisonné. Elle est de l'ordre de $\beta \alpha_s \Delta T$ Pa/°C, $\alpha_s = 4,4 \times 10^{-4} / ^\circ\text{C}$ est le coefficient de dilatation de la saumure, $\beta = 4 - 5 \times 10^{-4} / \text{MPa}$ le coefficient de compressibilité de la caverne (discuté plus loin). On voit qu'on ne peut guère fermer une caverne tant qu'il existe un écart de températures entre saumure et terrains supérieur à 1 ou 2°C. C'est une lourde contrainte.

2.4 Fluage du massif, perméation de la saumure, compressibilité de la caverne

Lorsqu'on suppose l'équilibre thermique atteint, trois facteurs contribuent à l'évolution naturelle de la pression de saumure dans la caverne.

2.4.1 Perméabilité du sel. Le sel est un matériau très peu perméable, qui suit vraisemblablement la loi de Darcy, avec une perméabilité intrinsèque très faible ($K = 10^{-22}$ à 10^{-19} m^2 ; pour comparaison, les hydrogéologues considèrent en général qu'une roche est imperméable quand $K < 10^{-17} \text{ m}^2$). Le débit de saumure expulsée est donc en principe une fonction linéaire de l'écart entre la pression du fluide (P) et la pression de pore naturelle dans le massif, notée P_0 .

2.4.2 Fluage du sel. Le sel est un matériau viscoplastique assimilable, pour les évolutions de long terme, à un fluide non-newtonien, $\dot{\epsilon} = \sigma^n$: on peut montrer qu'une cavité se referme (« fluage ») avec une vitesse qui, en régime permanent, est proportionnelle à l'écart entre la pression géostatique résultant du poids des terrains et proportionnelle à la profondeur, notée P_∞ , et la pression P du fluide contenu dans la cavité porté à la puissance n (typiquement $n = 3$ à 6). La vitesse de fermeture d'une cavité suit donc la loi $\dot{V} \propto (P_\infty - P)^n$. La température influe sur cette vitesse. Il faut de plus se préoccuper des comportements transitoires, soit intrinsèques au comportement du sel (fluage transitoire « rhéologique ») soit liés à la lente (plusieurs décennies) redistribution des contraintes qui suit une modification de l'équilibre (fluage transitoire « géométrique »).

2.4.3 Compressibilité de la cavité et pression d'équilibre. Les deux effets précédents se traduisent par une diminution du volume de la cavité (fluage) ou du volume de la saumure qu'elle contient (perméation). Ces diminutions affectent, en sens opposés, la pression du fluide, qui croît quand la cavité se referme et diminue quand de la saumure sort. La constante de proportionnalité est appelée compressibilité de la cavité (βV), V est le volume de la cavité et β est la somme de la compressibilité de la saumure ($2,7 \times 10^{-4} / \text{MPa}$) et de la compressibilité du « trou » constitué par la cavité, qui dépend de la forme de celle-ci et des propriétés élastiques du massif rocheux ($2 - 3 \times 10^{-4} / \text{MPa}$ est typique). Pour fixer les idées prenons le cas d'une cavité sphérique, rayon a , l'évolution de la pression dans une cavité fermée est donc *a priori* décrite par une équation différentielle :

$$\beta V \dot{P} = - (P - P_0)^n - \frac{3K}{a^2 \mu} (P - P_0) \quad (1)$$

Où $\mu \approx 1,4 \times 10^{-3} \text{ Pa.s}$ désigne la viscosité de la saumure. Quelle que soit sa valeur initiale, la pression de saumure évoluera vers une valeur d'équilibre asymptotique $P_0 < P_{eq} < P_\infty$ pour laquelle : $(P_\infty - P_{eq})^n / (P_{eq} - P_0) = 3K / Aa^2 \mu$, équation qui, hormis les valeurs de la pression géostatique P_∞ , de la pression de pore P_0 et de l'exposant n de la loi de fluage, contient une seule constante où figurent les paramètres des lois de fluage du sel et de perméation de la saumure. Les cavités réelles ne sont pas parfaitement sphériques mais la structure de l'équation qui décrit leur évolution, qu'il faut traiter numériquement, est identique à (1).

3. PRÉVISION POUR DE LONGUES PÉRIODES DE TEMPS

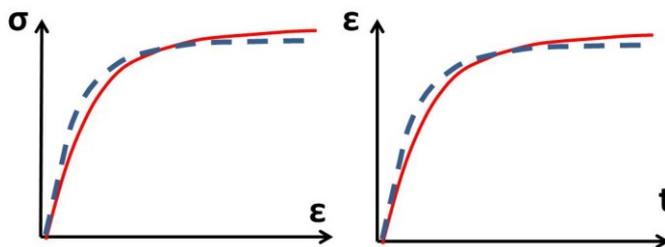


Figure 3 – Essai uniaxial et essai de fluage ; en pointillé, ajustement.

On dispose donc d'un modèle qui met en évidence les phénomènes essentiels susceptibles d'expliquer l'évolution de la pression dans une cavité. Peut-on être assuré qu'on n'a oublié aucun phénomène essentiel ? Quelle valeur faut-il attribuer aux paramètres du modèle ? On veut assurer une prédiction crédible pour quelques siècles, alors que les essais ordinaires de laboratoire, par exemple, ne durent que quelques semaines – 1000 fois moins que les évolutions auxquelles on s'intéresse. Les membres de Mécamat portent un intérêt particulier aux évolutions mécaniques et on s'intéressera principalement à celles-ci. On dispose pour justifier une extrapolation de quelques outils.

3.1 Conduire et interpréter les essais classiques dans la perspective des durées longues.

L'essai mécanique le plus important, quand on s'intéresse aux grandes échelles de temps, est l'essai de fluage dans lequel une charge constante – éventuellement triaxiale – est appliquée sur une éprouvette cylindrique maintenue à température et humidité contrôlées. La durée d'un tel essai est de quelques semaines ou quelques mois : on ne peut qu'exceptionnellement prolonger un essai beaucoup plus longtemps. Il faut éviter quelques pièges d'interprétation. Considérons une courbe σ - ε obtenue au cours d'un essai de chargement rapide. L'ajustement obtenu sur la figure 3 (à gauche) pourra être considéré comme très bon, et susceptible de permettre un dimensionnement correct d'un ouvrage. Supposons que la même courbe représente l'évolution de la déformation $\varepsilon = \varepsilon(t)$ pendant un essai de fluage d'un mois, figure 3 (à droite). Le même ajustement devient très médiocre : on a correctement modélisé l'évolution transitoire, mais l'extrapolation de la courbe à une durée 100 ou 1000 fois plus longue est très incertaine : ce qui importe surtout, dans ce contexte, est la vitesse obtenue à la fin de l'essai. Il est essentiel de prévoir si cette vitesse s'annulera, continuera à décroître indéfiniment sans s'annuler ou atteindra une valeur constante. C'est une question difficile à trancher expérimentalement (Bérest *et al.*, 2008).

3.2 Conduire des essais sous faible charge

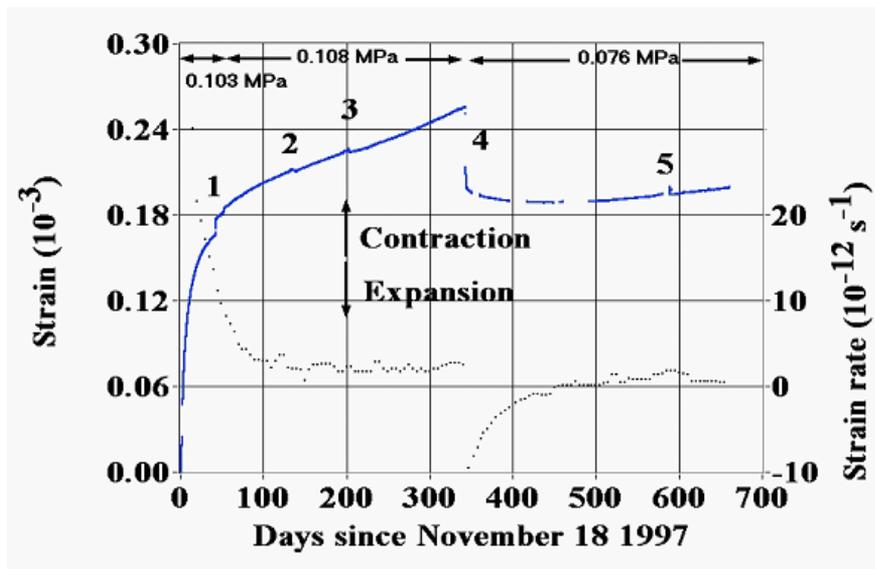


Figure 4 - Déformation et vitesse de déformation (en pointillé) mesurées au cours d'un essai de deux ans. La charge appliquée sur l'éprouvette est 0,103 MPa, puis 0,108 MPa, puis 0,076 MPa. Noter le fluage « inverse » après la réduction de la charge au jour 343 (Bérest *et al.*, 2005).

Le creusement des cavités engendre transitoirement des écarts importants de contraintes à la paroi des cavités. Dans l'exemple d'une cavité sphérique, la contrainte déviatorique « élastique » engendré par un creusement (très) rapide est de l'ordre de $\sqrt{3J_2} = 3(P_\infty - P_h)/2$ si P_h est la pression halmostatique (pression dans la caverne pendant le lessivage, associée à une colonne de saumure saturée remplissant le puits ouvert) soit $\sqrt{3J_2} = 15$ MPa à la paroi d'une cavité de 1000 m de profondeur. Mais la loi de comportement du sel est viscoplastique non-linéaire () de sorte qu'à long terme $\sqrt{3J_2} = 3(P_\infty - P_h)/2n$, soit 3 MPa si $n = 5$. Autrement dit le comportement à long terme est caractérisé par des déviateurs faibles et des vitesses de déformation très lentes. Or les essais classiques de fluage sont effectués sous des contraintes déviatoriques le plus souvent supérieures à 10 MPa : l'extrapolation à long terme est aussi une extrapolation aux petites contraintes dont les essais classiques ne permettent pas d'évaluer les effets. Les essais sous faibles contraintes posent plusieurs problèmes. Si la vitesse de déformation est $\dot{\varepsilon}$, la déformation cumulée quotidienne est $\varepsilon = 10^{-7}$ et si l'éprouvette a 10 cm de haut il faut, pouvoir apprécier une telle déformation, savoir mesurer un déplacement de 10 nm. Mais le problème le plus difficile est dû aux déformations thermoélastiques. Le sel a un coefficient de dilatation thermique de l'ordre de $\alpha = 4 \times 10^{-5} / ^\circ\text{C}$. Des fluctuations de température d'amplitude $\delta T = 0,25^\circ\text{C}$ et de période 24 heures ($\approx 10^5$ s), difficilement évitables au laboratoire, produiront des variations de déformation journalières $\alpha \delta T \approx 10^{-5}$, 100 fois supérieures à celles que l'on veut mesurer. On peut toutefois contourner cette difficulté en plaçant le dispositif de fluage dans une galerie minière isolée de la ventilation (la température n'y fluctue guère plus que d'un centième de $^\circ\text{C}$ par jour). Sur la figure 4 on

voit le résultat d'un tel essai : la charge est de 0,1 MPa environ ; l'essai est effectué sur un bâti disposé au fond d'une galerie en cul-de-sac de la mine de Varangéville, aimablement mise à disposition par la compagnie CSME.

3.3 Identifier les mécanismes de déformation

L'identification des micro-mécanismes qui sont à l'origine du fluage permet en principe de justifier une extrapolation aux longues durées. Langer (1984) souligne que « *Reliable extrapolation of the creep equations over long period of time and at low deformation rates can only be carried out on the basis of deformation mechanisms. The construction of a deformation-mechanism map is an essential preliminary.* » Une telle carte (adaptée de Munson et Dawson, 1984) est représentée sur la figure 5. Le mécanisme de fluage prépondérant est indiqué pour chaque domaine du plan contrainte-vitesse de déformation. On a ajouté deux rectangles. Le rectangle $[0-120^{\circ}\text{C}] \times [5-20\text{MPa}]$ est le domaine dans lequel les essais de laboratoire courants sont effectués. Le rectangle $[0-120^{\circ}\text{C}] \times [0-5\text{MPa}]$ est celui des températures et contraintes le plus souvent rencontrées dans le voisinage d'une caverne souterraine profonde (voir Paragraphe 3.2). Sauf pour la partie supérieure du

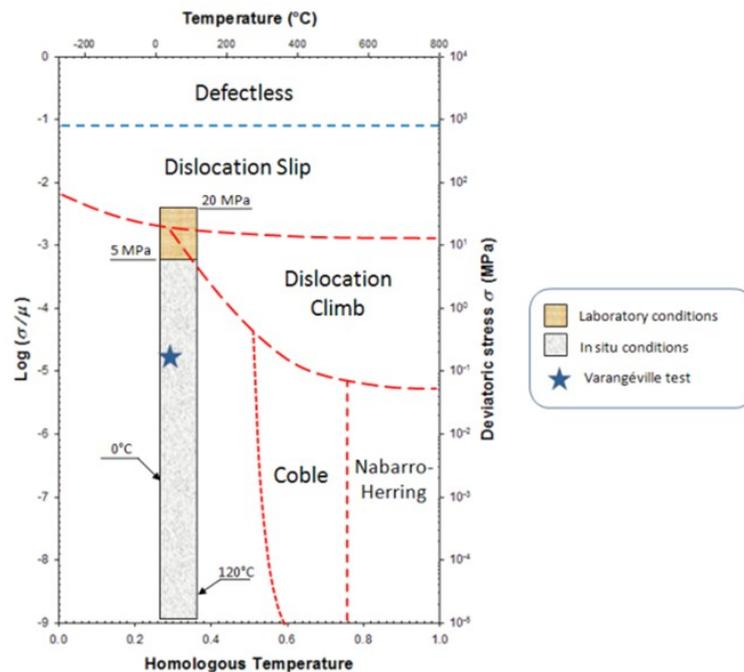


Figure 5. Carte de déformations, d'après Munson et Dawson (1984). La température (absolue) est rapportée à la température de fusion du sel. L'étoile représente les conditions de l'essai de la figure 4.

premier rectangle, le mécanisme prépondérant est inconnu. Toutefois, Spiers *et al.* (1990) ont souligné que le mécanisme de dissolution-précipitation sous contrainte, essentiel pour beaucoup de roches dans la croûte, était particulièrement rapide dans le cas du sel. Pour ce mécanisme, des considérations théoriques suggèrent que la relation entre contraintes déviatoriques et vitesse de déformation est linéaire, de sorte que la vitesse de déformation d'une éprouvette soumise à de faibles contraintes est bien plus rapide que ce qui peut être déduit en extrapolant la loi puissance ajustée sur des essais effectués dans le domaine $\sigma = 5-10$ MPa ; l'essai de la figure 4 le confirme (Quand $\sigma = 10$ MPa, la vitesse de déformation observée au laboratoire est de 10^{-10} s^{-1} environ ; si on admet la loi puissance avec $n = 3$, par exemple, la vitesse de déformation devrait être 10^{-16} s^{-1} quand $\sigma = 0,1$ MPa : la vitesse effectivement mesurée est de quatre ordres de grandeur supérieure).

3.4 Utiliser des analogues naturels

Un autre angle d'approche consiste à induire les paramètres mécaniques des phénomènes géologiques naturels, dont la chronologie peut souvent être établie avec précision. Un exemple simple est celui des dômes de sel, dont la formation résulte de la montée du sel –parfois sur plusieurs kilomètres – due à l'écart entre son poids volumique et celui des terrains surincombants (Par exemple Odé, 1968, tire de l'étude de la cinétique de montée des dômes de sel la loi $\dot{\epsilon} = A \sigma^n$, $n = 1$,

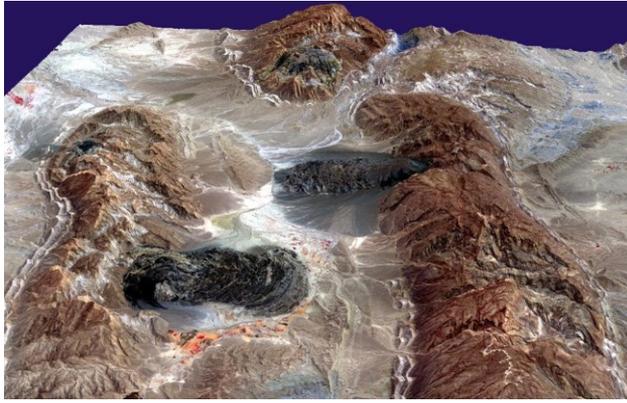


Figure 6. Exemple de glacier de sel, analogue naturel de l'écoulement sous faible contrainte (Remerciements : Pierre Duffaut)

$1/A^* = 10^{17}$ Pa.s, valeurs proches de celles suggérées par l'essai de la figure 4). Li *et al.* (2012) ont aussi examiné la descente naturelle des « radeaux » d'anhydrite, plus lourds que le sel, à l'intérieur de dômes de sel du Zechstein. Les glaciers de sel (figure 6, Desbois *et al.*, 2012), qui constituent en région aride l'affleurement à la surface du sol d'un dôme sous-jacent, constituent un autre analogue intéressant parce que le chargement, d'origine gravitaire, y est modéré et qu'une observation détaillée y est possible.

3.5 Conduire des essais en place, les plus longs possibles

On peut poser comme principe que, pour un ouvrage souterrain, le calcul basé sur des paramètres obtenus au laboratoire sont nécessaires mais jamais suffisants pour une prédiction bien assurée. Le sous-sol présente une complexité particulière qui tient notamment à ce qu'il ne peut être reconnu exhaustivement : en suivant la méthode « du manuel » (essais de laboratoire, écriture d'une loi de comportement, calcul numérique d'évolution de la structure) on peut oublier des phénomènes importants peu visibles, ou les paramètres mesurés sur éprouvette décimétrique peuvent être très distincts de ceux qui s'appliquent à un ouvrage décamétrique. Des essais en place sont indispensables. Dans le cas des cavités à abandonner, l'essai le plus simple consiste à fermer la cavité en tête de puits et à mesurer l'évolution naturelle de la pression en tête de puits. On en a donné un exemple à la figure 2. Cet essai simule exactement l'évolution d'une caverne abandonnée, aux fuites par le puits près, qui n'existeront plus quand celui-ci sera bouché. Mais diverses astuces permettent de mesurer très précisément ces fuites et d'en tenir compte (sur la figure 2, dessin de droite, on remarque qu'on a rempli l'espace annulaire du puits avec du fioul, plus léger que la saumure, de sorte que toute fuite de fioul par le puits déplace l'interface saumure-fioul et modifie l'écart entre les deux pressions mesurées en tête de puits, facile à mesurer ; les fuites mesurées au cours de cet essai étaient extrêmement faibles). Les solutions analytiques ne suffisent plus. L'interprétation des essais est un problème inverse : on conduit le calcul avec une première valeur raisonnable des paramètres que l'on modifie itérativement pour minimiser l'écart entre l'évolution de pression calculée et l'évolution de pression observée *in situ*.

Le premier essai de ce type a été conduit en France pendant deux ans entre 1997 et 1999 (correspondant au début de la période de mesure représentée à la figure 2, Bérest *et al.* 2001) mais on l'a ensuite prolongé pendant dix ans, parvenant ainsi à une durée d'essai qui n'est pas négligeable devant la durée de la période qui nous intéresse (un à quelques siècles). Le Solution Mining Research Institute, un organisme qui regroupe à l'échelle mondiale la quasi-totalité des exploitants de caverne, a inscrit le problème de l'abandon au cœur de son programme scientifique depuis une quinzaine d'années (Ratigan, 2003) et a financé des essais analogues en Allemagne et aux USA ; on dispose aujourd'hui d'essais relatifs à 6 ou 7 sites différents, ce qui permet de construire progressivement un consensus international qui s'appuie sur ces expérimentations faites en place.

3.6 Conduire une étude de sûreté

L'étude de sûreté – une notion qui vient de l'industrie nucléaire – consiste à rassembler périodiquement la description du site, l'état des connaissances, les résultats des essais effectués au laboratoire ou en place et les résultats des calculs numériques conduits, avec leurs incertitudes, pour apprécier les risques qui subsistent. Il ne s'agit pas d'une simple comparaison des résultats de calcul à des critères considérés comme acceptables (par exemple : le débit de saumure susceptible de sortir du massif salin) mais bien d'une évaluation d'ensemble du processus qui a conduit à cette estimation. Ce processus doit être apprécié en tenant compte aussi de critères plus qualitatifs : simplicité et robustesse des démonstrations, poids des incertitudes, effets de scénarios dégradés. Il doit permettre de pointer les incertitudes majeures pour réorienter s'il y a lieu les études ou montrer au contraire que certaines incertitudes résiduelles sont sans importance pour une appréciation correcte du risque.

4. CONCLUSION

Comment peut-on s'assurer que l'on peut faire des prévisions suffisamment certaines des risques attachés au stockage dans le sous-sol de produits potentiellement dangereux pendant de longues périodes ? Il serait présomptueux d'affirmer qu'on possède une réponse universelle et définitive à cette question. On propose en conclusion quelques conditions qui contribuent à créer des conditions favorables :

1. Une communauté scientifique internationale s'intéresse au problème
2. Au sein de cette communauté, une durée suffisante a permis de construire itérativement un consensus
3. Les recherches ont été publiées dans des revues à comité de lecture et discutées dans des forums nationaux et internationaux
4. Des données de laboratoire de qualité et nombreuses sont disponibles
5. Des données d'essais in situ et, plus généralement, les observations faites sur des ouvrages analogues ont été rassemblées
6. Les observations de long terme (phénomènes géologiques, analogues naturels) ont été mises à profit
7. Les modèles de comportement sont basés sur des principes premiers et une compréhension en profondeur des mécanismes rhéologiques, plutôt que sur une approche purement phénoménologique (ajustement de courbes).
8. Les résultats de calculs numériques obtenus par diverses équipes sont proches.
9. Ces résultats ne sont pas très sensibles aux incertitudes qui subsistent sur les paramètres géométriques et rhéologiques
10. On a réalisé périodiquement une étude de sûreté qui permette d'apprécier l'état des connaissances, les risques encourus et les incertitudes principales qui affectent l'évaluation de ces risques pour orienter les recherches ultérieures.

Cet ensemble de conditions permet à l'ingénieur de construire une conviction étayée. Encore faut-il qu'il parvienne à la faire partager par l'ensemble des acteurs concernées ; ce n'est pas le plus facile.

RÉFÉRENCES

- Bérest P., Bergues J., Brouard B., Durup J.G. et Guerber B., "A salt cavern abandonment test", *Int. J. Rock Mech. & Mining Sc.*, **38**, (2001), pp. 357-368.
- Bérest P., Blum P.A., Charpentier J.P., Gharbi H. et Valès F., "Very slow creep tests on rock sample", *Int. J. Rock Mech. Min. Sc.*, **42**, (2005), pp. 569-576.
- Bérest P., Diamond B., Duquesnoy A., Durup G., Feuga B. et Lhoff L., "Salt and brine production methods in France : Main conclusions of the International Group of Experts (IEG) commissioned by the French regulatory authorities". *Congrès Post-Mining 2005, Nancy, France* (2005).
- Bérest P., Brouard B. et Karimi-Jafari M., « Comportement à très long terme des mines et cavernes dans le sel gemme : loi de Norton-Hoff ou loi de Lemaitre ? » *Revue Française de Géotechnique*, **124**, 3^{ème} trimestre, (2008), pp. 45-59.
- Bérest P., Brouard B. et Hévin G., "A 12-year long pressure monitoring in an idle salt cavern – the 1997-1998 Etrez abandonment test revisited", *Int. J. Rock Mech. Min. Sc.*, **45**, 7, (2011), pp. 1025-1043.
- Desbois G., Uraï J.L., Schmatz J., Zavada P. et de Bresser H., "The distribution of fluids in natural rock salt to understand deformation mechanisms", *Proc. Mech. Beh. Salt VII*, (2012), pp. 3-12.
- Langer, M., "The rheological behaviour of rock salt", *Proc. 1st Conf. Mech. Beh. Salt*, (1984), pp. 201-240.
- Li S., Abe S., Uraï J.L., Strozyk F., Kukla P.A. et van Gent H., "A method to evaluate long-term rheology of Zeichstein salt in the Tertiary", *Proc. Mech. Beh. Salt VII*, (2012), pp. 215-220.
- Munson, D.E. et Dawson, P.R., "Salt constitutive modeling using mechanism maps", *Proc. 1st Conf. Mech. Beh. of Salt*. (1984), pp. 717-737.
- Odé H., "Review of mechanical properties of salt relating to salt dome genesis", *Saline deposits, Geological Society of America, Special Paper 88*, (1968), pp.543-595.
- Ratigan J., "The SMRI Cavern Sealing & Abandonment Research Program Summary", *Proc. SMRI Spring Meeting, Houston, Texas*, (2003), pp. 141-164.