

tions cumulées deviennent importantes, il est difficile d'assurer que le glissement au contact entre les faces inférieure et supérieure et les talons est parfait et les contraintes peuvent cesser d'être homogènes dans l'éprouvette. Cet effet a été discuté par Wawersick et Preece (1984). De même, Tijani (1987) a montré que dans un essai à vitesse de déformation contrôlée cet effet engendrait des contraintes de traction au voisinage du contact avec les talons. Une éprouvette au cours d'un essai réel de laboratoire est déjà une structure, siège d'effets complexes susceptibles de faire apparaître des non linéarités dans la relation déformation fonction du temps, même dans l'hypothèse de N-H.

5.2

Effets de la température

Pour discuter l'effet des fluctuations de température, on peut considérer l'ajustement des essais de Charpentier (1988) proposé par Pouya (1991) pour du sel de la formation supérieure d'Étrez (Ain) dans laquelle Gaz de France exploite des cavités de stockage de gaz. Pouya utilise un ajustement par une loi de Norton-Hoff,

$$\dot{\epsilon}^{vp} = -A_0 \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) |\sigma|^n \text{ avec } A_0 = 0,64 \text{ MPa}^{-n} \text{ an}^{-1},$$

$Q/R = 4100 \text{ K}$, $n = 3,1$. Avec cette loi, un essai de fluage uniaxial pour une contrainte axiale appliquée de $\sigma = -10 \text{ MPa}$ doit conduire après deux à trois mois (durée des essais de Charpentier qui ont servi à l'ajustement) à une vitesse de déformation axiale de $\dot{\epsilon}_{11} = -2,10^{-4} \text{ an}^{-1}$, soit environ $-0,6 \cdot 10^{-11} \text{ s}^{-1}$ ou $-5,5 \cdot 10^{-7} \text{ jour}^{-1}$. Le coefficient de dilatation thermique du sel est de l'ordre de $\alpha_{th} = 4,10^{-5}/^\circ\text{C}$. Il n'est pas facile, même dans une pièce fermée, d'éviter des fluctuations journalières de température de l'ordre du degré Celsius. Autrement dit les fluctuations de la vitesse de déformation d'origine thermo-élastique sont de l'ordre de $\dot{\epsilon}^{th} = \alpha_{th} \dot{T} \approx 10^{-5} \text{ jour}^{-1}$, et sont beaucoup plus grandes que la vitesse moyenne de déformation en fin d'essai. On peut évidemment, lorsque l'essai est assez long, mesurer la température de la salle d'essai (ou mieux, de l'éprouvette) et rechercher une corrélation entre température et déformation pour quantifier les effets thermo-élastiques et corriger de ces effets la déformation observée. Ce n'est pas très facile. D'une part il existe un décalage temporel entre variation de température extérieure et déformation, la conduction thermique n'étant pas instantanée (pour une éprouvette de diamètre $D = 10 \text{ cm}$, le temps caractéristique pour l'uniformisation de la température dans l'éprouvette est de l'ordre de $\tau = D^2/k$, où $k = 3,10^{-6} \text{ m}^2\text{s}^{-1}$ est la diffusivité thermique du sel, soit $\tau = 1 \text{ h}$). D'autre part une variation de la température a également un effet sur la vitesse de déformation viscoplastique, $\delta\dot{\epsilon}^{vp}/\dot{\epsilon}^{vp} = Q\delta T/RT^2$. Avec $Q/R = 4100 \text{ K}$, un accroissement de température de $\delta T = 1^\circ\text{C}$ de la température moyenne, par exemple $T = 286 \text{ K}$, entraîne un accroissement relatif $\delta\dot{\epsilon}^{vp}/\dot{\epsilon}^{vp} = 5 \%$ de la vitesse de fluage stationnaire. Enfin il est assez difficile, sauf conditions spéciales, de mesurer la température moyenne d'une éprouvette avec une résolution meilleure que $\delta T = 1/10^\circ\text{C}$, de sorte que l'incertitude pour le calcul de la vitesse sur une durée de $\delta t = 30 \text{ jours}$ (par exemple) sera $2\alpha\delta T/\delta t = 2,7 \cdot 10^{-7} \text{ jour}^{-1}$, c'est-à-dire la moitié de la vitesse qu'on souhaite mesurer : le risque est d'interpréter par de « l'écrouissage » une faible variation non détectée de la température moyenne.

D'une manière plus générale un changement de température de l'environnement de l'éprouvette peut affecter d'autres processus (par exemple l'hygrométrie relative) et influencer indirectement les phénomènes de fluage ; il n'est donc pas facile de distinguer tous les effets des variations de température, qui peuvent ne pas se réduire aux effets thermo-élastiques et à l'accélération de la vitesse de déformation viscoplastique, pris en compte pour leur part dans l'écriture du modèle de comportement.

5.3

Effet de l'hygrométrie

Les effets de l'hygrométrie sur la vitesse de fluage du sel sont également importants, comme l'ont souligné Horseman (1988) et Hunsche et Schulze (1996, 2002). Dans un essai uniaxial, l'éprouvette n'est pas toujours isolée de l'atmosphère de la pièce. Pour fixer les idées, sur le plateau de Saclay en région parisienne l'hygrométrie extérieure passe de $\Phi = 70 \%$ - 75% RH l'été à $\Phi = 80 - 90 \%$ RH l'hiver. L'hygrométrie est sensiblement inférieure dans une galerie isolée d'une mine de sel, et probablement élevée dans une caverne de stockage de gaz. Hunsche et Schulze (2002) ont proposé une relation entre vitesse de déformation stationnaire et humidité relative sous la forme :

$$\dot{\epsilon}_s = \dot{\epsilon}_{s0} (1 + w \text{sh}(q \Phi)) \quad (13)$$

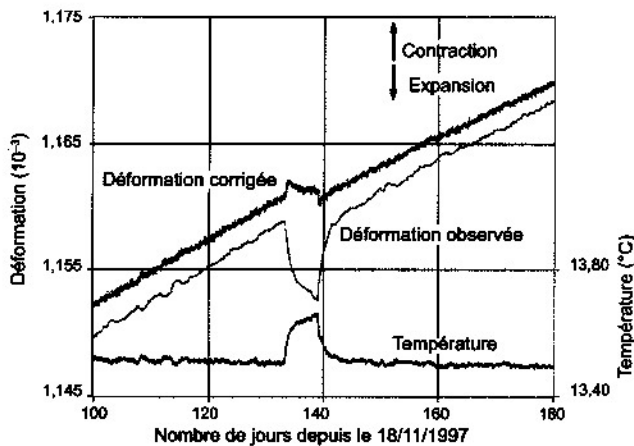
où Φ est l'humidité relative (en %RH) ; q et w sont deux constantes respectivement égales à $q = 0,1$ et $w = 0,1$. Si on se place à une humidité relative moyenne de $\Phi_0 = 55 \%$ RH (cas de l'essai décrit à la figure 3), une variation d'humidité relative de $\delta\Phi = 1 \%$ engendre une variation relative de la vitesse de déformation $\delta\dot{\epsilon}/\dot{\epsilon} = 0,09$: il serait prématuré au vu des résultats bruts d'un essai de conclure à un écrouissage sans avoir soigneusement mesuré l'humidité relative. Dans un essai triaxial, l'éprouvette est isolée de l'atmosphère extérieure et il est vraisemblable que la petite quantité d'air piégée entre l'éprouvette et la jaquette se mette à l'hygrométrie d'équilibre avec la saumure saturée contenue dans les pores de l'éprouvette, qui est de l'ordre de 75% RH et varie peu avec la température.

5.4

Charge appliquée

On peut faire une remarque analogue pour la charge appliquée. Celle-ci résulte du fonctionnement d'un système hydraulique qui applique sur un piston une pression de fluide pilotée pour rester égale à une pression de consigne. Wawersick et Preece (1984) estiment, pour les essais (reconnus comme de très grande qualité) qu'ils ont effectués aux Sandia National Laboratories, que la contrainte déviatorique appliquée est contrôlée avec une précision de l'ordre de $\pm 2 \%$; cette valeur est relativement grande puisqu'elle doit être multipliée par l'exposant n de la loi puissance pour obtenir l'incertitude induite sur la vitesse de déformation stationnaire. On doit de plus craindre que, sur une longue durée, ces systèmes connaissent une dérive du fait du vieillissement de l'électronique ou d'un grip-page.

Un exemple



Variations de la déformation et de la température observées et déformation corrigée des effets thermo-élastiques pendant l'essai n° 1 dit de Varangéville. La charge appliquée était 0,108 MPa. Un décalage arbitraire de $2,5 \cdot 10^{-6}$ de la déformation corrigée est appliqué pour faciliter la lecture (Bérest et al., 2005).

As-observed axial strain and temperature variations during the Varangéville Test n° 1, together with the strain variations corrected for temperature variations. The applied load was 0.108 MPa. An arbitrary strain offset of $2,5 \cdot 10^{-6}$ was applied to the corrected strain curve to make the figure easier to read (Bérest et al., 2005).

Un exemple est présenté sur la figure 3. Le bâti de fluage à charge morte avait été placé, avec l'aimable concours de la société CSME, dans une galerie souterraine profonde (160 m) éloignée du système de ventilation de la mine pour bénéficier d'une température et d'une hygrométrie aussi constantes que possible (Bérest et al., 2005). La figure représente 80 jours d'essai. Les températures sont enregistrées toutes les deux minutes avec une résolution de l'ordre du millième de degré Celsius. Les fluctuations de température sont de l'ordre de un à quelques centièmes de degré Celsius (ces fluctuations sont vraisemblablement dues aux variations de pression atmosphérique qui engendrent une compression ou une détente de l'air contenu dans la galerie (Perrier et al., 2001)). De plus, au jour 132, une lampe est restée allumée par erreur, provoquant un accroissement de température de l'ordre de 0,15 °C jusqu'à ce que la lampe brûle, six jours plus tard. On note la corrélation inverse très nette, due au comportement thermo-élastique, entre déformation et température. La correction thermo-élastique permet d'obtenir une courbe nettement plus régulière. On ne réussit pas toutefois à effacer complètement les effets de l'épisode de la lampe allumée, sans doute à cause de l'influence de la température sur les déformations viscoplastiques, ou des variations de l'humidité relative. On observe pendant la période considérée (hiver) un lent refroidissement (de l'ordre de 0,01 °C en 80 jours) qui rend la déformation observée (contraction) un peu plus grande que la déformation d'origine purement mécanique.

On retiendra en conclusion qu'il est important, pour la présentation des résultats d'un essai de fluage, de donner, en plus du tracé de la déformation au cours du temps, le tracé de l'évolution de la vitesse de déformation, de la température et de l'hygrométrie, et de préciser la date du début de l'essai.

Apport des observations en place

Pour trancher entre les formulations de N-H et de L-M-S, des essais très longs pourraient être utiles. Toutefois, il est difficile de mobiliser un bâti pendant une dizaine d'années, et le risque d'un incident qui ruine tous les efforts consentis est d'autant plus probable que l'essai est plus long. En revanche les ouvrages réels (caverne, mine, sondage) restent en général ouverts pendant plusieurs dizaines d'années et on peut, souvent à coût faible, y faire des observations pendant des durées longues. Celles-ci pourraient, en principe, permettre de discriminer les lois de comportement. En fait il n'en est rien.

La forme géométrique d'une chambre ou d'une caverne est moins simple que celle d'une éprouvette cylindrique, l'état de contraintes n'y est pas homogène, il n'atteint pas immédiatement une valeur constante (qui, au contraire, est réalisée instantanément dans un essai de fluage de laboratoire – au moins idéalement) et le massif contient en général de multiples hétérogénéités naturelles. On a établi ainsi au paragraphe 4.3 que, même lorsqu'on retient la loi de N-H qui ne décrit aucun fluage transitoire, une cavité dont la pression est portée à l'instant initial de la pression géostatique à une valeur constante plus basse est le siège d'un comportement global transitoire lié à la lente redistribution des contraintes dans le massif.

Plus généralement, un ouvrage est le siège de multiples phénomènes transitoires, dont les phénomènes transitoires mécaniques ne sont qu'un exemple ; la qualité des mesures, ou même la connaissance que l'on a des autres phénomènes, n'est pas toujours suffisante pour qu'on puisse extraire du signal enregistré la part qui revient à chacun d'entre eux.

Essais à caverne fermée (Shut-in pressure test)

Dans le cas des cavernes l'essai le plus simple consiste à fermer la caverne, remplie de saumure, et à suivre l'évolution naturelle de la pression au cours du temps. Même si cette évolution n'était régie que par des phénomènes mécaniques, l'interprétation serait délicate. En effet dans une caverne fermée le fluage du sel engendre une diminution de volume de la caverne, une contraction de la saumure contenue dans la caverne fermée et un accroissement de sa pression. La vitesse de fermeture décroît donc au cours du temps, quelle que soit la loi de comportement mécanique retenue, en raison de l'augmentation de la pression dans la caverne. L'évolution de la structure constituée par la caverne fermée étant transitoire par nature, il est difficile de distinguer nettement la part qu'y prend le comportement transitoire du matériau.

De plus, sauf peut-être pour une caverne laissée longtemps au repos, ou pour une caverne très profonde, l'évolution de la pression est en fait déterminée pour l'essentiel par le retour à l'équilibre thermique de la saumure contenue dans la caverne (les cavernes sont créées au moyen d'eau froide provenant de la surface ; la saumure qu'elles contiennent est donc initialement hors d'équilibre thermique avec le massif environnant ; le réchauffement est très lent, il dure plusieurs décennies dans une caverne de volume supérieur

à 100 000 m³). Ce réchauffement engendre une dilatation de la saumure, et un accroissement de sa pression quand la caverne est fermée. Ce phénomène d'origine thermique est souvent prépondérant et masque le phénomène mécanique, dont la part est difficile à préciser. La figure 4 présente un exemple. Le 15 septembre 2005, la pression de la caverne fermée SPR2 du site de Carresse (exploitée par Total) est portée de 4,63 MPa à 4,83 MPa par injection d'huile dans l'espace annulaire (Brouard Consulting *et al.*, 2006) (l'augmentation de la pression en tête de puits, représentée sur la figure 4, est bien entendu plus grande, la colonne d'huile formée étant plus légère que la colonne de saumure qu'elle remplace).

Pendant un mois environ la pression diminue, sous des effets déclenchés par l'accroissement initial de pression (les effets les plus importants sont la dissolution additionnelle : la concentration de la saumure à saturation est une fonction croissante de la pression et de la température et la dissolution s'effectue avec diminution de volume ; et le fluage « inverse » : le volume de la caverne augmente pendant quelques semaines, bien que la pression y soit plus faible que la pression géostatique. Une estimation de ces effets peut être trouvée dans Bérest *et al.*, 2007). Puis la pression dans la caverne atteint un plateau avant de croître de nouveau (la courbe est tracée jusqu'en mars 2007) : cette croissance est due à l'échauffement de la saumure, qu'on a pu évaluer à 0,1 °C/an pendant cette phase.

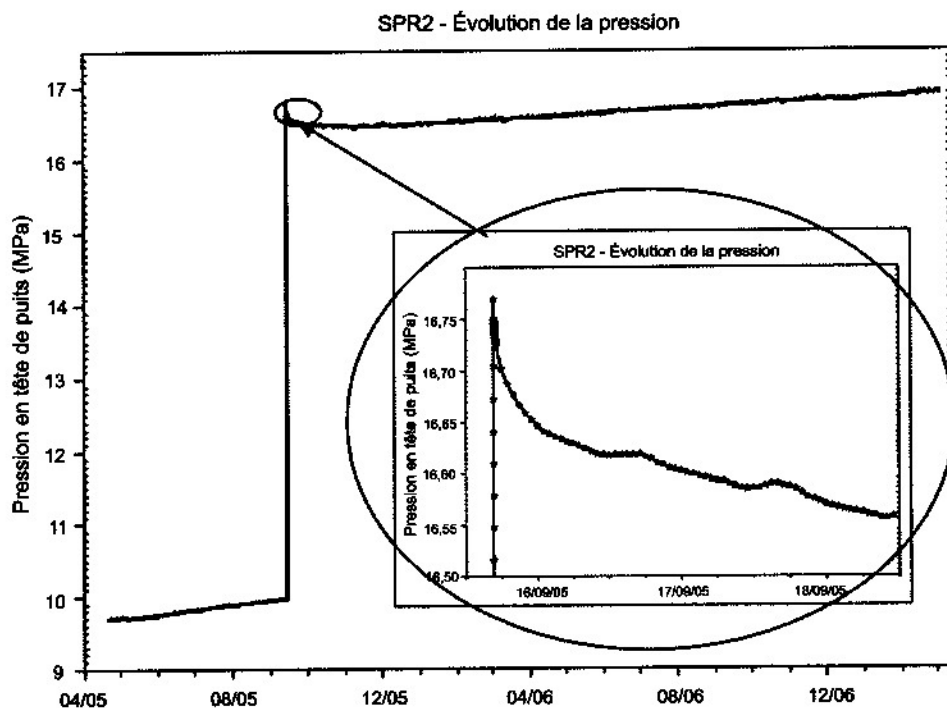
En l'absence d'échauffement, la pression chuterait car le volume de saumure perdu par perméation dans le massif est un peu plus grand que la perte de volume des cavernes par fluage (Brouard Consulting *et al.*, 2006). Il est difficile dans ce contexte d'inférer une conclusion assurée quant à l'écriture de la loi de comportement mécanique pour les temps très longs bien que la perturbation thermique, source des incertitudes, soit très faible.

Lorsque les phénomènes thermiques sont devenus négligeables (c'est le cas après quelques années dans une petite caverne, par exemple de volume inférieur à 10 000 m³, pour fixer les idées) les phénomènes de perméation (écoulement de la saumure vers le massif ou micro-fuites par la cimentation du puits) peuvent acquérir à leur tour une importance décisive et rendre difficile l'interprétation (Bérest *et al.*, 2001).

6.2

Essai à cavité ouverte (Liquid outflow test)

On peut aussi envisager de réaliser un essai « à pression constante dans la caverne » en laissant la tête de puits ouverte et en recueillant la saumure (ou l'hydrocarbure, dans certains cas) que le puits expulse naturellement. De manière équivalente, on peut laisser la tête de puits fermée et soutirer périodiquement de la cavité le volume de liquide nécessaire pour maintenir la pression dans la cavité égale à une valeur de consigne. De tels essais sont plus contraignants qu'un essai à cavité fermée, car il faut recueillir et mesurer au moins une fois par jour le débit de saumure (ou d'hydrocarbure) expulsé ; ils ont l'avantage de présenter une certaine analogie avec un essai de fluage au laboratoire, pendant lequel la contrainte appliquée est maintenue constante, en évitant notamment certains phénomènes transitoires. De tels essais ont été décrits par Clerc-Renaud et Dubois (1980), Hugout (1984), Gaulke *et al.* (2007). L'essai décrit par Hugout a été réalisé sur la petite (8000 m³) caverne EZ53 du site d'Étrez (Ain) exploité par Gaz de France (Fig. 5). Le puits contient un tube rempli de saumure saturée, ouvert en tête de puits ; l'annulaire, fermé en tête de puits, est rempli d'un hydrocarbure liquide, plus léger que la saumure, et dont la pression en tête de puits est donc supérieure à la pression atmosphérique. Trois mois après la fin du



Essai à caverne fermée sur la cavité SPR2 de Total à Carresse (Pyrénées-Atlantiques).
Shut-in Pressure Test in the SPR2 cavern of the Carresse site (Pyrénées-Atlantiques) operated by Total.

lessivage, au jour 93, le débit de saumure expulsé est de l'ordre de 100 litres/jour. On ouvre alors l'annulaire à la surface du sol : la pression dans la caverne chute de 11,4 MPa à 8,4 MPa, l'interface air/saumure descend dans le tube central, et de l'hydrocarbure est progressivement expulsée par l'annulaire (Fig. 6, cartouche de gauche). L'essai consiste à compter ce débit d'hydrocarbure. On observe un accroissement initial violent du débit expulsé, qui doit être attribué pour l'essentiel au fluage transitoire. Puis le débit décroît, mais il n'est pas aisé de faire la part respective du transitoire mécanique rhéologique, du transitoire mécanique géométrique et du ralentissement du réchauffement. Ce dernier est certainement important car après le jour 254 on rétablit la pression initiale, un débit négatif est d'abord observé (dû au fluage « inverse » et à la dissolution complémentaire) puis le débit se stabilise à une valeur de l'ordre de 50 l/jour, soit sensiblement la moitié de la valeur observée avant l'essai : la mesure de la température dans la caverne montre que le réchauffement s'est considérablement ralenti (une analyse complète peut être trouvée dans Van Sambeek *et al.*, 2005).

6.3

Essai en sondage

Un essai en sondage (ne débouchant pas dans une caverne) présente l'avantage d'éliminer pratiquement les effets thermiques : l'équilibre entre le massif et la saumure dans le sondage est très vite atteint compte tenu des faibles dimensions horizontales du trou (il s'agit d'un équilibre global, la saumure est le siège d'une convection naturelle due au gradient géothermique). Le même argument de dimension indique toutefois que les effets de perméation prennent un poids important : alors que la perte relative de volume par fluage est indépendante des dimensions, le débit relatif de perméation de saumure varie comme l'inverse du carré de celles-ci.

Dans un sondage fermé dont le découvert est creusé dans un milieu peu perméable et visqueux comme le sel, la pression converge en quelques années vers une pression constante, plus élevée que la pression halmotatique et dont la valeur résulte d'un équilibre entre la perméation, réglée par les propriétés hydrauliques, et

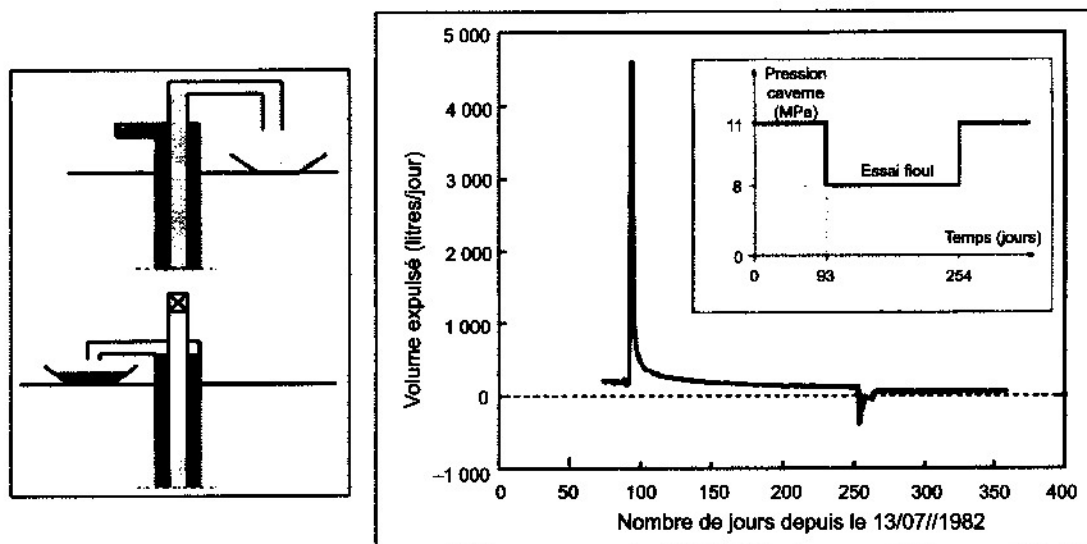
la convergence, réglée par les propriétés mécaniques, de sorte qu'il ne renseigne qu'indirectement sur ces dernières.

Dans un sondage ouvert, comme dans une cavité ouverte, les effets de perméation sont moindres. À 1 000 m de profondeur, on peut attendre une vitesse de déformation du découvert de l'ordre de $\dot{V}/V = -3.10^{-11} s^{-1}$, ou $5,5 \cdot 10^{-7} \text{ jour}^{-1}$, soit un débit de saumure en tête de puits de l'ordre de 1,2 cl/jour si le découvert a un volume de 4 m³. C'est un débit faible mais tout à fait mesurable, et l'essai mériterait d'être conduit. Le signal serait perturbé par les marées terrestres, dont la période est un peu supérieure à 12 heures, et qui engendrent des déformations de l'ordre de $\epsilon = 10^{-8}$ à 10^{-7} .

6.4

Mines

Dans une mine exploitée par chambres et piliers on peut attendre, dans un quartier qui a cessé d'être exploité depuis plusieurs années, que la charge sur les piliers devienne constante. On peut ainsi bénéficier, en mesurant la hauteur des piliers et leur évolution, d'un essai « naturel » dans des conditions géométriques apparemment assez simples (et en bénéficiant d'une très grande constance de la température et de l'hygrométrie, si le quartier est éloigné de l'exploitation actuelle et du circuit de ventilation). Un ajustement de la loi de fluage des piliers d'une mine de potasse suivant la description de L-M-S a été proposé récemment par Campos de Orellana (1996). Dans une vieille mine comme celle de Varangéville, près de Nancy, exploitée par la compagnie CSME, on dispose de plus d'une estimation assez fiable de la hauteur initiale des piliers, creusés pour certains il y a plus d'un siècle. Mais ici aussi les conditions sont moins idéales que dans un laboratoire. Les piliers sont « encastrés » dans le toit et dans le mur, et ne réalisent donc pas les conditions de glissement parfait au contact entre l'éprouvette et les plateaux de la presse qu'on s'efforce de réaliser au laboratoire. De ce fait les piliers se déforment « en tonneau », et la distribution de contraintes est complexe au sein du pilier, Van Sambeek (1996), Laouafa et Ghoreychi (2006).

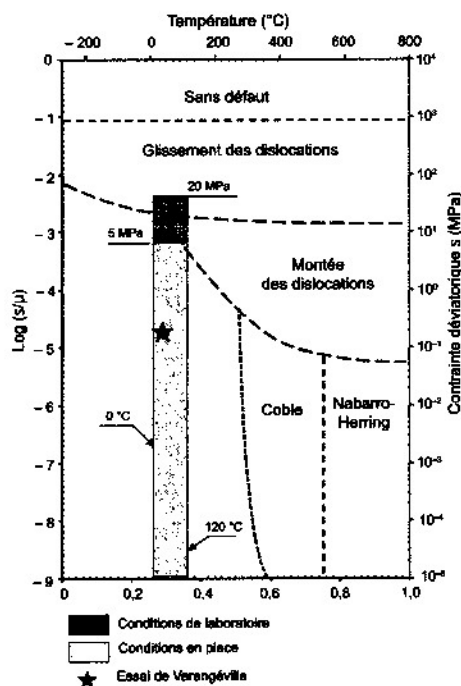


Essai à cavité ouverte dans la caverne EZ53 de Gaz de France, d'après Hugout, 1984.
Liquid outflow test in the Gaz de France EZ 53 cavern, after Hugout, 1984.

Apport des observations géologiques

Les observations géologiques peuvent apporter des indications, d'autant que les formations salifères sont souvent affectées de déformations importantes. Notamment des dômes de sel se forment fréquemment à partir de couches qui étaient horizontales au moment du dépôt, sous l'effet des seules forces gravitaires : la compaction progressive des terrains sus-jacents rend leur poids volumique sensiblement plus grand que celui du sel, engendrant ainsi une situation instable : une intumescence quelconque au toit de la formation salifère tend à croître spontanément, et le sel remonte vers la surface du sol avec des vitesses qui peuvent être de l'ordre du mm/an ou même du cm/an. Les déplacements verticaux cumulés peuvent être d'ordre kilométrique. Il est toutefois difficile de tirer des conclusions définitives quant à la loi de comportement mécanique du sel, pour la même raison que dans le cas d'un ouvrage souterrain : on est très loin du cas élémentaire d'une éprouvette de laboratoire soumise à un chargement constant. Lorsque le dôme commence son ascension, les déséquilibres dus aux forces gravitaires, qui sont de l'ordre de grandeur de l'écart entre les poids volumiques multipliés par la hauteur du dôme, croissent avec le temps ; le dôme rencontre des obstacles divers (couches raides par exemple) qui peuvent ralentir pour un temps son développement. A supposer qu'on puisse reconstituer exactement la chronologie de la formation du dôme, il resterait des incertitudes quant à la part que prennent dans les étapes de cette chronologie la rhéologie du sel, l'accroissement des dimensions du dôme, la poursuite de la compaction, l'histoire des distributions de température et les circonstances extérieures comme l'érosion à la surface du sol.

Micromécanismes



Carte de mécanismes, d'après Munson et Dawson, 1984.

Mechanism Map, after Munson and Dawson, 1984.

En principe, les prédictions relatives au comportement à long terme des roches devraient être basées sur une compréhension fine des mécanismes qui gouvernent ce comportement à petite échelle. Comme l'indique Langer (1984) : « *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.* » De telles cartes des mécanismes de déformation sont présentées par Munson et Dawson (1984), Langer (1984), Blum et Fleischmann (1988). La température (absolue) est rapportée à la température de fusion ($T_f = 1077$ K pour NaCl) et la contrainte déviatorique est rapportée au module de cisaillement (μ). Le sel cristallise en système cubique et un échantillon est constitué d'un très grand nombre de grains : les mécanismes sont *a priori* associés aux mouvements des dislocations, aux glissements suivant les directions données par le réseau cristallin et aux phénomènes affectant les joints de grains. Divers domaines apparaissent sur la carte, à l'intérieur desquels tel ou tel mécanisme de déformation est dominant (les frontières tracées correspondent au lieu des points où deux mécanismes ont une contribution égale à la vitesse de déformation). Les conditions de température et de contrainte dans un stockage de déchets radioactifs ou une caverne de stockage d'hydrocarbures sont inscrites dans le rectangle de la figure 6, limité par 25 °C et 200 °C, d'une part, 0,2 MPa et 20 MPa, d'autre part. Dans ce rectangle le mécanisme de déformation est « indéfini », même si on dispose d'un grand nombre de données empiriques. Les auteurs cités attribuent un modèle de comportement de Norton-Hoff à ce domaine ; Munson et Dawson indiquent qu'il n'y a pas de raison de penser que les mécanismes qui régissent le comportement transitoire soient distincts, de sorte que le fluage établi résulte d'un équilibre entre processus pour lequel aucun argument ne milite en faveur d'une modification au cours du temps. Malgré leur pertinence, ces arguments ne convaincront peut-être pas complètement les ingénieurs, d'autant que d'autres mécanismes ont été proposés par Pennock et al. (2006) pour décrire le comportement sous très faible contrainte déviatorique (de l'ordre de 0,1 MPa pour fixer les idées).

Comportement à très long terme d'une caverne fermée

Hormis les deux paramètres élastiques E et ν , qui sont identiques quel que soit le modèle retenu, à température fixée le modèle de L-M-S comporte trois constantes (A^* , n^* , α^*) et le modèle de N-H deux constantes (A et n) auxquelles il faut ajouter les constantes du modèle transitoire de M-D. Dans un essai uniaxial sans diminution du chargement, quatre constantes de ce modèle jouent un rôle : K_p , m , α et β . Il est facile d'ajuster les trois constantes du modèle de L-M-S et les six constantes du modèle de N-H complété par M-D pour que les deux modèles donnent des descriptions pratiquement indiscernables du même essai de fluage. Un exemple est donné à la figure 7 : on a simulé un essai d'une durée de 100 jours, la température est de 45 °C et la charge appliquée est 10 MPa. Le module élastique est $E = 25\,000$ MPa, le coefficient de Poisson est $\nu = 0,25$. Les paramètres du modèle de L-M-S sont

$A^* = \kappa \cdot n^* \cdot 5,6 \times 10^{-8} / \text{MPa}^{4,82} / \text{jour}^{0,058}$, $n^* = 4,82$ et $\alpha^* = 0,058$. Pour le modèle de N-H on a retenu $A = 2,6 \times 10^5 / \text{MPa}^{5,5} / \text{jour}$, $n = 5,5$. Pour le modèle de M-D on a $K_0 = 3,3 \cdot 10^{-7}$, $m = 3$, et $\beta = -7,74$.

On a ensuite considéré le problème d'une cavité fermée et abandonnée. Du point de vue de la protection de l'environnement, il est important de prévoir comment la pression de la saumure contenue dans la cavité évoluera au cours du temps. Il ne faut pas, notamment, qu'elle dépasse ou même approche de trop près la valeur de la pression géostatique, afin que soit écarté le risque d'une fracturation du massif de sel qui pourrait conduire à expulser de la saumure saturée vers des horizons aquifères.

Il a été montré qu'à très long terme (plusieurs siècles après la fermeture de la caverne) l'évolution de cette pression résulte de deux phénomènes aux effets antagonistes : la fermeture de la caverne, qui résulte du fluage du sel, d'autant plus lente que la pression dans la caverne est élevée ; et la (micro) perméation de la saumure vers le massif de sel, qui est d'autant plus rapide que la pression est élevée. Lorsque ces deux phénomènes sont exactement équilibrés, la pression reste stationnaire (Bérest *et al.*, 2001).

On admet en général que le débit de (micro) perméation est proportionnel à l'écart entre la pression de la caverne et la pression de pore dans le massif, ou, autrement dit, qu'il suit la loi phénoménologique de Darcy, même si les mécanismes de cette perméation sont incomplètement compris. Durup (1994) a vérifié, au cours d'un long essai dans un puits creusé dans la formation salifère d'Étrez, que cette hypothèse était raisonnable. Dans les calculs décrits plus loin on a retenu une valeur de la perméabilité égale à $k^{hyd} = 6 \times 10^{-22} \text{ m}^2$ et une diffusivité hydraulique de $k^{hyd} = 4 \times 10^{-7} \text{ m}^2/\text{jour}$.

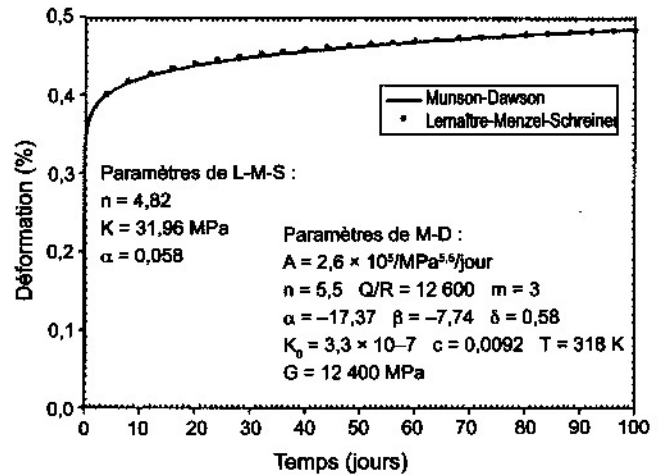
On a alors considéré une caverne de forme sphérique, d'un volume de $33\,500 \text{ m}^3$ à $1\,500 \text{ m}$ de profondeur, lessivée en 100 jours, fermée puis abandonnée. On a simulé son comportement de très long terme en utilisant les deux jeux de paramètres qui avaient permis de décrire l'essai uniaxial. A la profondeur de la caverne la température était estimée à $60 \text{ }^\circ\text{C}$, avec un gradient géothermique moyen de $0,03^\circ\text{C}/\text{m}$. La température du massif n'étant pas la même que celle de l'éprouvette, on a adopté une dépendance identique des paramètres A et A^* avec la température :

$$A(T) = A_{318} \exp\left\{-\frac{Q}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{318}\right)\right\} \quad A^*(T) = A^*_{318} \exp\left\{-\frac{Q}{R} \left(\frac{1}{T} - \frac{1}{318}\right)\right\}$$

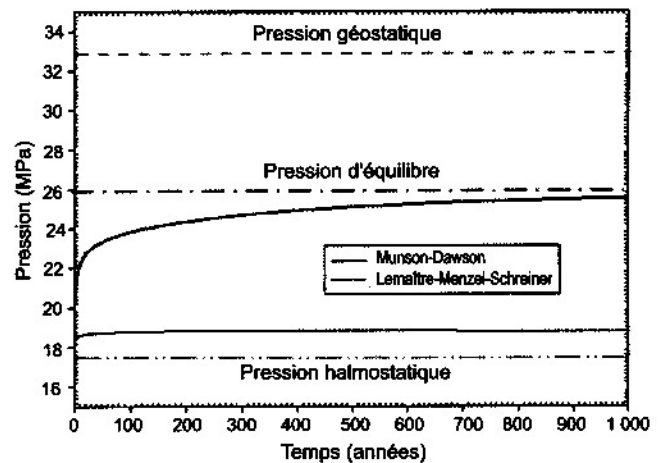
où $Q/R = 12\,600 \text{ K}$ a la même valeur pour les deux modèles. De même il a fallu compléter les quatre constantes du modèle de M-D utilisées pour le modèle uniaxial par les deux nouvelles constantes $c = 0,0092$ (qui décrit l'influence de la température sur la déformation ϵ) et $\delta = 0,58$ (qui décrit le comportement au déchargement). Ces deux constantes nouvelles n'ont toutefois pas un très grand poids dans l'évolution à long terme.

Les deux lois mécaniques de comportement donnent alors au comportement global de la caverne deux allures qualitativement distinctes :

- dans le cas de la loi de N-H (complétée par la loi de M-D pour la description de l'épisode transitoire) la pression dans la caverne croît lentement vers une valeur d'équilibre (un peu inférieure à 26 MPa) comprise entre la pression géostatique ($P_\infty = 33 \text{ MPa}$) et la pression halmostatique ($P_h = 18 \text{ MPa}$). Cette pression



Essai de fluage simulé par la loi de L-M-S et la loi de N-H et M-D. La charge sur l'éprouvette est 10 MPa et la température est $45 \text{ }^\circ\text{C}$.
 A creep test simulated by the L-M-S law and the N-H and M-D law. The applied load is 10 MPa and the temperature is $45 \text{ }^\circ\text{C}$.



Comportement à long terme de la pression dans une caverne fermée et abandonnée pour les deux modèles adoptés pour décrire l'essai uniaxial représenté à la figure 7.
 Long-term behaviour of a sealed and abandoned cavern. The rheological models are identical to those considered when describing the uniaxial test shown on figure 7.

d'équilibre, atteinte à mi-hauteur de la caverne, peut être considérée comme sûre car même au sommet de la caverne la pression de la saumure est significativement plus faible que les contraintes régnant dans les terrains à la même profondeur : le risque d'une fracturation naturelle peut être écarté. Ce critère serait plus difficilement vérifié par une cavité de grande hauteur et de grandes dimensions ;

- dans le cas de la loi de L-M-S la pression dans la caverne reste beaucoup plus faible et décroît même après une période de 600 ans.

Les essais d'abandon réalisés dans des cavernes souterraines tendent à montrer l'existence d'une pression d'équilibre, comme le prévoit la loi de N-H (Bérest *et al.*, 2001 ; Brouard consulting *et al.*, 2006). Toutefois, ces essais ne constituent, pas plus que les autres essais en place décrits dans les paragraphes précédents, une

preuve décisive : leur durée a été de un an et demi et de quatre ans, respectivement. A la fin de tels essais, les évolutions deviennent suffisamment lentes pour qu'une extrapolation à des durées de plusieurs siècles soit inévitablement incertaine. Le choix ne peut être dicté en définitive, dans l'état actuel des connaissances, que par une considération qui relève de la précaution : en l'absence d'arguments décisifs, il faut essayer les divers modèles et retenir le modèle qui donne les résultats les moins favorables. Pour le problème de l'abandon d'une caverne, c'est donc le modèle de N-H qui doit être retenu.

10

Conclusion

Il est difficile d'extrapoler à de très longues périodes de temps, de l'ordre du millénaire, les résultats d'essais de fluage conduits pendant une période de l'ordre d'une année. De tels essais peuvent être interprétés de manière également convaincante au moyen de lois de comportement différentes. En effet les essais de laboratoire et les mesures faites dans les ouvrages souterrains, étant affectés d'une incertitude résiduelle dont l'ordre de grandeur est comparable à l'écart entre les prévisions faites par les divers modèles, ne permettent pas de les discriminer. En revanche les modèles peuvent conduire à des conclusions très distinctes quant au comportement à long terme d'une cavité abandonnée.

Cette situation ne laisse pourtant pas complètement désarmé. On peut attendre un progrès régulier dans la qualité des mesures de laboratoire et en place, d'autant que ce problème de l'extrapolation est commun à de nombreux projets nouveaux d'utilisation du sous-sol (enfouissement de déchets, stockage du CO₂) auxquels des moyens importants sont consacrés. La compréhension des micro-mécanismes à l'origine des déformations des roches, servie par des moyens d'observation à diverses échelles, fait des progrès rapides.

Il faut aussi garder à l'esprit qu'une connaissance parfaite du comportement à long terme n'est pas toujours strictement indispensable. Il faut vérifier, pour chaque ouvrage concret, les conséquences des incertitudes qui subsistent. On observe parfois que les objectifs de sécurité des personnes et de l'environnement peuvent rester satisfaits quand on conduit les calculs en faisant varier dans une très large gamme les valeurs des paramètres des modèles, ou même les modèles eux-mêmes. Les résultats des calculs permettent de pointer les incertitudes qui jouent un rôle majeur et de porter l'effort sur la réduction de celles-ci.

Un tel processus exige la confrontation régulière des opinions, par les publications dans les revues et les réunions internationales. L'ambition du présent article est de contribuer à cette discussion.

Les auteurs remercient Gérard Vouille qui leur a fait part de nombreuses remarques et les collègues des entreprises CSME, Gaz de France, Geostock et Total avec lesquels ils ont partagé de fructueuses discussions et la conduite de plusieurs essais en place.

- Abel J.-F. - « Rock Mechanics : can it pay its way ? » *Proceedings of the 3rd Symposium on Salt*, Northern Ohio Geological society Inc., 1970, p. 197-207.
- Aït Chalal A. - « A comparison of the responses of the Munson-Dawson and the Lemaitre Model ». *Proceedings of the 3rd conference on the mechanical behavior of salt*, Trans Tech Pub, 1996, p. 67-74.
- Aubertin M., Sgaoula J., Servant S., Julien M.R. - « An up-to-date version of Suvic-D for modelling the behaviour of salt ». *Proceedings of the 4th conference on the mechanical behavior of salt*, Trans Tech Pub, 1998, p. 205-220.
- Baar C.A. - *Applied salt-rock mechanics. Developments in geotechnical engineering. 16-A*. Elsevier Science, vol. I, 1977.
- Bérest P., Bergues J., Brouard B., Durup J.G., Guerber B. - « A salt-cavern abandonment test ». *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* n° 38 (2), 2001, p. 343-355.
- Bérest P., Brouard B., Feuga B. - « Abandon des mines de sel : faut-il enlever ? ». *Revue française de géotechnique*, n° 106-107, 2004, p. 53-71.
- Bérest P., Blum P.A., Charpentier J.-P., Gharbi H., Valès F. - « Very slow creep tests on rock samples ». *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.* n° 42, 2005, p. 569-576.
- Bérest P., Brouard B., Karimi-Jafari M., Van Sambeek L. - « Transient behaviour of salt caverns. Interpretation of Mechanical Integrity Tests ». *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, n° 44, 2007, p. 767-786.
- Bérest P. - « Questions on the Prediction of the long-term behaviour of underground openings ». *Proceedings 11th ISRM Congress, Lisbonne*, 2008, vol. 3, p. 1413-1425.
- Blum W., Fleisemann C. - « On the deformation-mechanism map of rock salt ». *Proceedings of the 2nd conference on the mechanical behavior of salt*, Trans Tech Publ., 1988, p. 7-22.
- Brouard B., Bérest P. « A tentative classification of salts according to their creep properties ». *Proceedings of the SMRI Spring Meeting*, New Orleans, Louisiana, 1998, p. 18-38.
- Brouard Consulting, Institute für Unterirdisches Bauen (IUB), École polytechnique, Total E&P France, Géostock - Salt-Cavern Abandonment Field Test in Carresse. SMRI RFP 2003-2-B, Final Report, April 2006.
- Campos de Orellana A.J. - « Pressure solution creep and non-associated plasticity in the mechanical behavior of potash mine openings ». *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, vol. 33, n° 4, 1996, p. 347-370.
- Charpentier J.-P. « Creep of rock salt at elevated temperature ». *Proceedings of the 2nd conference on the mechanical behavior of salt*, Trans Tech Pub., 1988, p. 131-136.
- Clerc-Renaud A., Dubois D. - « Long-term operation of underground storage in salt ». *Proceedings of the 5th Symposium on Salt*, Northern Ohio Geological society Inc., vol. II, 1980, p. 3-10.
- Cristescu N.D., Hunsche U. - *Time Effects in Rock Mechanics*. John Wiley & Sons Ltd., 1998.
- DeVries K.L., Mellegard K.D., Callahan G.D. - « Cavern design using a salt damage criterion : proof-of-concept research final report ». *Proceedings of the SMRI Spring Meeting*, Houston, Texas, 2003, p. 1-18.
- Durup J.G. - « Long term tests for tightness evaluations with brine and gas in salt ». *SMRI Fall Meeting*, Hannover, Germany, 1994.
- Durup G., Xu J. - « Comparative Study of Certain constitutive Laws used to describe the rheological deformation of salts ». *Proceedings of the 3rd conference on the mechanical behavior of salt*, Trans Tech Pub, 1996, p. 75-83.
- Gaulke K, Rokhar R., Staudmeister K., Zander-Schiebenhofer D. - « Reassessment of the creep behaviour of the Rüstringen salt dome for optimization and future development of the crude oil cavern storage facility ». *Proceedings of the SMRI Fall Meeting*, Halifax, Canada, 2007, p. 155-172.
- Horseman S.T. - « Moisture content. A major uncertainty in storage cavity closure prediction ». *Proceedings of the 2nd conference on the mechanical behavior of salt*, Trans Tech Pub, 1988, p. 53-68.
- Hugout B. - « Mechanical behavior of salt cavities - in situ tests- model for calculating the cavity volume evolution ». *Proceedings of the 2nd conference on the mechanical behaviour of salt*, Trans Tech Pub, 1988, p. 291-310.
- Hunsche U., Schultze O. - « Effect of humidity and confining pressure on creep of rock salt ». *Proceedings of the 3rd conference on the mechanical behaviour of salt*, Trans Tech Pub., 1996, p. 237-248.
- Hunsche U., Schultze O. - « Humidity induced creep and its relation to the dilatancy ». *Proceedings of the 5th conference on the mechanical behaviour of salt*, Balkema, 2002, p. 73-87.
- Karimi-Jafari M. - *Sur le comportement transitoire des cavités salines profondes*. Thèse de doctorat de l'École polytechnique, 12 novembre 2007.
- Laouafa F., Ghoreychi M. - « Salt pillar creep analysis ». *Proceedings of Eurock 06, european regional ISRM symposium, Liège, Belgique*, 2006, p. 381-388.
- Langer M. - « The rheological Behaviour of Rock salt ». *Proceedings of the 1st conference on the mechanical behavior of salt*, Trans Tech Pub, 1984, p. 201-240.
- Lux K.H., Heusermann S. - « Creep tests on rock salt with changing load as a basis for the verification of theoretical material laws ». *Proceedings of the 6th International Symposium on Salt*. The Salt Institute, 1983, vol. I, p. 417-35.
- Mandel J. - « Généralisation non linéaire des corps de Maxwell et de Kelvin. Fluage et relaxation ». *Colloque international de rhéologie*, Publications du CNRS, 1960.
- Munson D.E., Dawson P.R. - « Salt constitutive modeling using mechanism maps ». *Proceedings of the 1st Conference on the Mechanical Behavior of Salt*. Trans-Tech Pub, 1984, p. 717-737.
- Munson D.E., Fossum A.F. - « Approach to first model prediction of measured WIPP *in situ* room closure in salt ». *Proceedings of the 30th US symposium on Rock Mechanics*, West Virginia University, 1989.
- Nguyen Minh D., Pouya A. - « Une méthode d'étude des excavations souterraines en milieu viscoplastique. Prise en compte d'un état stationnaire des contraintes ». *Revue Française de Géotechnique*, n° 59, 1992, p. 5-14.
- Pennock G.M., Drury M.R., Peach C.J. et Spiers C.J. « The influence of water on deformation microstructures and textures in synthetic NaCl ». *Journal of Structural Geology*, n° 28, 2006, p. 1-14.
- Perrier F., Morat P., Le Mouél J.-L. - « Pressure induced temperature variations in an underground quarry ». *Earth Planet Science Letters* n° 191, 2001, p. 145-156.
- Popp T., Wiedeman M., Kansy A., Pusch G. - « Gas transport in dry rock salt-implications from laboratory investigations and field studies ». *Proceedings of the 6th conference on the mechanical behavior of salt*, Taylor & Francis Group, 2007, p. 17-26.
- Pouya A. - « Correlation between mechanical behaviour and petrological properties of rock salt ». *Proceedings of the 32nd US Symposium on Rock Mechanics*, Balkema, 1991, p. 385-392.
- Pouya A. - *Comportement rhéologique du sel gemme. Application à l'étude des excavations souterraines*. Thèse de doctorat de l'École nationale des ponts et chaussées, 18 octobre 1991.
- Ratigan J.L., Van Sambeek K.L., De Vries K.L., Nieland J.D. - *The influence of seal design on the development of the disturbed rock zone in the WIPP alcove seal tests, RSI-0400*, Report prepared by RE/SPEC Inc. Rapid City, SD, for Sandia National Laboratories, Albuquerque, NM, 1991.
- Ratigan J. - « The SMRI cavern sealing & abandonment research program Summary ». *Proceedings of the SMRI Spring Meeting*, Houston, Texas, 2003, p. 141-164.
- Serata S. - « Application of continuum mechanisms to design of deep potash mines in Canada ». *Int. J. Rock Mech. Min. Sci.*, 1968, p. 293-314.
- Spiers, C.J., Peach C.J., Brzesowsky R.H., Schutjens P.M.T.M., Liezenberg J. L., Zwart H.J. - *Long Term Rheological and Transport Properties of Dry and Wet Salt Rocks*, EUR 11848, prepared for Commission of the European Communities, by University of Utrecht, Utrecht, The Netherlands, 1988.
- Tijani M. - « Zones de traction au cours d'essais de compression ». *Comptes rendus du 6^e Congrès de la Société internationale de mécanique des roches*, Balkema, vol. 1, 1987, p. 1279-1282.
- Tijani S.M., Vouille G., Hugout B. - « Le sel gemme en tant que fluide visqueux ». *Comptes rendus du 7^e Congrès de la Société internationale de mécanique des roches*, 1983, p. 241-246.
- Van Sambeek L.L. - « Salt Pillar Design Equation ». *Proceedings of the 4th conference on the mechanical behavior of salt*. Trans Tech Pub, 1996, p. 495-508.
- Van Sambeek L.L., Bérest P., Brouard B. - *Improvements in mechanical integrity tests for solution-mined caverns used for mineral production or liquid-product storage*. SMRI Research Project Report 2005-1. 142 p.
- Vouille G., Tijani S.M., de Grenier F. - « Experimental determination of the rheological behavior of Tersanne rock salt ». *Proceedings of the 1st conference on the mechanical behavior of salt*. Trans Tech Pub, 1984, p. 407-420.
- Wawersik W.R., Preece D.S. - « Creep testing of salt : Procedures, problems and suggestions ». *Proceedings of the 1st conference on the mechanical behavior of salt*. Trans Tech Pub, 1984, p. 421-449.