

EVALUATION DES FUITES AUTOUR DU CUVELAGE D'UNE CAVITE DE STOCKAGE DANS LE SEL

Karimi-Jafari M.¹, Bérest P.¹, Brouard B.², Van Sambeek L.³, Bazargan B.⁴

¹ LMS, Ecole Polytechnique - Route de Saclay, 91128 Palaiseau, France

² Brouard Consulting - 101 rue du Temple, 75003 Paris, France

³ Respec - P.O. Box 725 Rapid City, South Dakota 57709, USA

⁴ BRGM - 3 avenue Claude Guillemin, 45060 Orléans, France

1. Introduction

Le sujet de cet article est l'interprétation des essais d'étanchéité réalisés sur les cavités salines. L'article est basé sur un rapport préparé pour le Solution Mining Research Institute (SMRI) (Van Sambeek *et al.*, 2005).

L'étanchéité des cavités salines est vérifiée au moyen d'essais dits « MIT » (Mechanical Integrity Tests) afin de détecter des fuites éventuelles. Il existe plusieurs types d'essais MIT. Dans cet article, on étudie plus particulièrement l'essai dit « LLT » (Liquid-Liquid Test). Dans cet essai LLT, la cavité est remplie de saumure ; le puits comporte un tube central également rempli de saumure ; l'espace annulaire est rempli par un liquide plus léger que la saumure. L'interface entre le liquide léger et la saumure est positionnée sous le sabot du dernier casing cimenté.

L'essai consiste à mettre rapidement le puits en pression et à observer pendant quelques jours l'évolution de la pression mesurée en tête de puits. La diminution généralement observée de la pression est attribuée à une fuite à travers le ou les casings cimentés et/ou au niveau du sabot du dernier casing.

L'analyse de ce type d'essai montre que d'autres phénomènes peuvent être à l'origine de la diminution observée de la pression. Les effets de ces différents phénomènes peuvent être estimés, ce qui conduit à distinguer trois notions :

- la fuite "apparente", qui est déduite directement de la décroissance de la pression mesurée, $Q_{app} = -\beta V \dot{P}_i$, où \dot{P}_i est la vitesse de décroissance de la pression mesurée et βV est la compressibilité de la caverne (Bérest *et al.*, 1999),
- la fuite "corrigée" qui est obtenue en tenant compte des effets des différents phénomènes contribuant à la fuite apparente, $Q_{corr} = Q_{app} - Q$
- la fuite "réelle".

Cet article a pour objet d'identifier les phénomènes qui peuvent contribuer à la fuite apparente, et de les quantifier aussi précisément que possible de manière à réduire l'écart entre la fuite corrigée et la fuite réelle.

2. IDENTIFICATION DES PHENOMENES PARTICIPANT A LA FUITE APPARENTE

Plusieurs autres phénomènes qui, en plus de la fuite réelle, peuvent contribuer à l'évolution de la pression dans la caverne peuvent être classés en deux groupes :

- Le premier groupe est constitué par les phénomènes préexistants à l'essai : certains peuvent être très importants comme l'expansion thermique de la saumure et le fluage du sel, d'autres effets tels que la variation de la température et de la pression atmosphérique sont plus discrets.

- Le second groupe est constitué des effets engendrés par l'essai lui-même. Il s'agit notamment du fluage transitoire du sel, de la dissolution complémentaire, de la compression adiabatique de la saumure, et de la perméation transitoire de la saumure vers le massif.

Ces différents effets seront expliqués et estimés dans les paragraphes suivants.

3. EXPANSION THERMIQUE DE LA SAUMURE

La température naturelle du massif augmente avec la profondeur, on a par exemple $T_R = 45^\circ\text{C}$ à la profondeur de 1000 m. Les cavités salines sont créées par dissolution (lessivage) en injectant dans la cavité de l'eau douce provenant d'une rivière ou d'une aquifère peu profond ; la température de cette eau est le plus souvent inférieure à la température naturelle du massif à la profondeur de la cavité. A la fin du lessivage, la température de la saumure dans la cavité est inférieure à celle des terrains environnants (Van Sambeek *et al.*, 2005) ; cet écart de température décroît au cours du temps du fait du transfert de la chaleur du massif vers la cavité. Le bilan thermique peut être écrit ainsi :

$$\frac{\partial T}{\partial t} = k_{sel}^{th} \Delta T$$

$$\int_{\Omega} \rho_s C_s \dot{T}_i d\Omega = \int_{\partial\Omega} K_{sel}^{th} \partial T / \partial n da$$

$$T_i(t) = T_{paroi}$$

$$T(t=0) = T_R \text{ et } T_i(t=0) = T_i^o$$

Où T_R est la température naturelle du massif à la profondeur moyenne de la cavité ; T_i est la température moyenne de la saumure dans la cavité. La première équation traduit la diffusion de la chaleur dans le massif (k_{salt}^{th} est la diffusivité thermique du sel, $k_{sel}^{th} \approx 3 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$); la deuxième équation est la condition à la limite à la paroi ($K_{sel}^{th} = k_{sel}^{th} \rho_s C_s$ est la conductivité thermique du sel, $K_{sel}^{th} = 6 \text{ W/m}^\circ\text{C}$ est une valeur typique, et $\rho_s C_s = 4,8 \cdot 10^6 \text{ J/m}^3/\circ\text{C}$ est la capacité thermique volumique de la saumure). La troisième relation indique que la température de la paroi est égale à celle de la saumure dans la caverne. La dernière relation précise les conditions initiales. Le système peut être facilement traité numériquement, avec un accord en général excellent avec les observations faites in situ.

Si la caverne est ouverte, le débit sortant dû à l'expansion thermique est $Q_{th} = \alpha_s V \dot{T}_i$, où α_s est le coefficient de dilatation thermique de la saumure. Dans le cas d'une cavité fermée, l'expansion thermique de la saumure provoque une augmentation de la pression à une vitesse $\dot{P}_i = Q_{th} / \beta V$. Par exemple dans une cavité de volume $V = 8,000 \text{ m}^3$, si on considère un écart initial de température $T_R - T_i^o = 20^\circ\text{C}$ entre le massif et la saumure de la cavité, et si le coefficient de compressibilité de la cavité est $\beta = 4 \cdot 10^{-4} / \text{MPa}$, la vitesse de montée en pression due uniquement à l'expansion thermique est de l'ordre de $Q_{th} \approx 50 \text{ m}^3/\text{an}$ et $\dot{P}_i \approx 0,045 \text{ MPa/jour}$.

En augmentant la pression dans la cavité, l'expansion thermique de la saumure rend la fuite apparente plus petite que la fuite réelle, autrement dit l'expansion thermique masque une partie de la fuite réelle.

4. DISSOLUTION COMPLEMENTAIRE

La quantité du sel qui peut se dissoudre dans une masse donnée d'eau douce est une fonction croissante de la pression et de la température. Une augmentation de pression dans une cavité fermée remplie de saumure saturée provoque une dissolution complémentaire. Au cours de la dissolution, le volume total de la saumure et du sel dissous diminue, ce qui provoque une diminution de la pression dans la cavité. Un nouvel état d'équilibre est atteint au bout de quelques jours.

Au cours de l'essai d'étanchéité, juste après l'injection (monté rapide en pression d'une quantité p_i^1), le principe de Le Chatelier implique qu'une dissolution complémentaire se produit de manière à réduire la pression dans la cavité. Cette dissolution contribue donc à la fuite apparente. On peut calculer ses effets en utilisant l'équation d'état de la saumure et les bilans de masse (Van Sambeek et al., 2005)

Par exemple, si on considère une montée initiale en pression de $p_i^1 = 5$ MPa dans une cavité de volume $V = 50,000$ m³ et de compressibilité $\beta V = 20$ m³/MPa ; alors cette montée en pression nécessite une injection d'un volume $v^{inj} = \beta V \cdot p_i^1 = 100$ m³. La fuite apparente produite par la dissolution est alors d'environ 4,2 m³, et la pression finale après retour à l'équilibre de dissolution est $p_i^f = 4,79$ MPa, soit une diminution de la pression dans la cavité de $4,79 - 5 = -0,21$ Mpa.

5. COMPRESSION ADIABATIQUE

Quand la pression augmente rapidement dans une cavité fermée remplie d'un fluide, la température du fluide augmente dans un processus adiabatique. Même si l'augmentation de température est très petite (une fraction d'un degré centigrade), son effet peut être significatif pour un essai d'étanchéité de courte durée (quelques jours). Quand la mise en pression de la cavité est terminée, il s'en suit un refroidissement de la saumure et par conséquent une chute de sa pression. La variation de température \mathcal{G}_i^1 de la saumure due à la pressurisation p_i^1 peut être calculée par la formule suivante :

$$\mathcal{G}_i^1(^{\circ}\text{C}) = \left(\frac{\alpha_s T_i}{\rho_s C_s} \right) p_i^1 \text{ (MPa)}$$

où $T_i = 300$ K est la température absolue ; une augmentation de pression de 5 MPa engendre un échauffement de 0.15 °C. L'évolution ultérieure de la température est calculée au moyen du système précédent qui décrit le bilan thermique.

6. MICRO-PERMEATION DE LA SAUMURE VERS LE MASSIF

Le sel gemme est très peu perméable, on estime généralement sa perméabilité intrinsèque entre $K_{sel}^{hyd} = 10^{-22}$ et 10^{-20} m². La micro-perméation stationnaire pour une cavité fermée est très lente, mais la perméation transitoire provoquée par une pressurisation rapide peut être significative. On fait les hypothèses suivantes :

1. le sel se comporte comme un milieu poreux pour lequel la loi de Darcy s'applique,
2. les phénomènes mécaniques et hydrauliques sont découplés,
3. la pression de pore naturelle dans la massif est égale à la pression « halmostatique », c'est-à-dire à la pression due à une colonne de saumure saturée (12 MPa à 1000 mètres).

L'évolution de la pression de pore p dans le massif est décrite par le système suivant :

$$\begin{aligned}\frac{\partial p}{\partial t} &= k_{sel}^{hyd} \Delta p \\ Q_{perm} &= \int_{\partial\Omega} K_{sel}^{hyd} \partial p / \partial n \, da \\ p_i(t) &= p_{paroi} \\ p(\infty, t) &= 0 \text{ et } p_i(t=0) = p_i^1\end{aligned}$$

Où K_{sel}^{hyd} (m^2) est la perméabilité intrinsèque du sel, $k_{sel}^{hyd} = K_{sel}^{hyd} / \mu_s \beta' \phi$ est la diffusivité hydraulique du sel, μ_s est la viscosité de la saumure, β' est le coefficient de compressibilité de la matrice rocheuse, ϕ est la porosité du sel, Q_{perm} est le débit de micro-perméation de saumure de la cavité vers le massif de sel. On vérifie facilement que cet effet est faible.

7. FLUAGE STATIONNAIRE ET FLUAGE TRANSITOIRE

7.1 Introduction

De très nombreuses études ont été menées sur le comportement mécanique du sel gemme qui présente une grande complexité (Hardy et Langer, 1984 et 1988 ; Hardy *et al.*, 1996 ; Aubertin, 1998 ; Critescu *et al.*, 1998). On peut récapituler les principales caractéristiques de ce comportement :

- à long terme, le sel gemme flue même sous des contraintes déviatoriques très faibles,
- la vitesse de déformation viscoplastique est une fonction non linéaire de la contrainte et de la température,
- le fluage stationnaire est atteint au bout de quelques mois pour un échantillon sous chargement constant ; ceci se caractérise par une vitesse de déformation constante,
- le fluage transitoire apparaît à la suite d'un changement rapide de la contrainte appliquée. Ceci se caractérise par une vitesse initiale de déformation rapide,
- un fluage inverse du sel peut apparaître, cela se traduit par exemple, suite à une diminution de la contrainte appliquée dans un essai de compression uniaxiale, par un accroissement transitoire de la hauteur d'une éprouvette (Fig.1).

7.2 Fluage stationnaire – Loi de Norton-Hoff

La loi de Norton-Hoff permet de rendre compte des caractéristiques principales du comportement mécanique stationnaire du sel, sa formulation tridimensionnelle est la suivante :

$$\dot{\epsilon}_{ss}^{ij} = A \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) \frac{1}{n+1} \frac{\partial}{\partial \sigma_{ij}} \left[\left(\sqrt{3J_2} \right)^{n+1} \right]$$

Où J_2 est le second invariant du tenseur des contraintes ; A , n , et Q/R sont les paramètres du modèle. On peut trouver dans Brouard et Bérest (1998) les valeurs de ces paramètres pour 12 sels différents ; l'exposant n varie entre 3 et 6, ce qui traduit l'effet non linéaire de la contrainte appliquée sur la vitesse de déformation. Ce modèle de Norton-Hoff ne comporte aucun transitoire rhéologique, néanmoins, si on se place à l'échelle d'une cavité, il existe un transitoire géométrique due au temps nécessaire pour la redistribution des contraintes dans le massif quand la pression évolue dans la cavité.

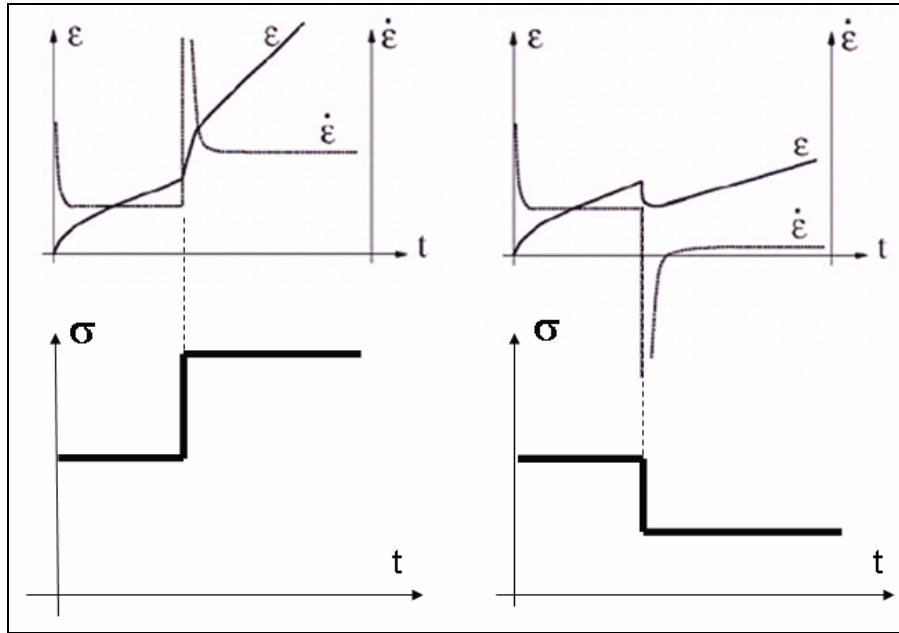


Figure 1 – Evolutions de la déformation ε et de la vitesse de déformation $\dot{\varepsilon}$ au cours d'un déchargement (à gauche) et d'un chargement (à droite), σ est la contrainte déviatorique.

7.3 Fluage transitoire – Loi de Munson-Dawson

Le modèle de Norton-Hoff ne tient pas compte du transitoire rhéologique. Un modèle avec transitoire rhéologique est mieux adapté aux observations expérimentales. Munson et Dawson (1984) ont proposé le modèle suivant:

$$\dot{\varepsilon}_{vp}^{ij} = F \dot{\varepsilon}_{ss}^{ij} \quad \begin{aligned} F &= e^{\Delta(1-\zeta/\varepsilon_i^*)^2} \quad \text{quand } \zeta \leq \varepsilon_i^* \\ F &= e^{-\delta(1-\zeta/\varepsilon_i^*)^2} \quad \text{quand } \zeta \geq \varepsilon_i^* \end{aligned}$$

$$\dot{\zeta} = (F - 1)\dot{\varepsilon}_{ss}, \quad \dot{\varepsilon}_{ss} = A \exp\left(-\frac{Q}{RT}\right) (\sqrt{3}J_2)^n$$

$$\dot{\varepsilon}_{ss}^{ij} = \frac{3\dot{\varepsilon}_{ss}}{2\sqrt{3}J_2} S_{ij}$$

$$\varepsilon_i^* = K_0 e^{cT} \sigma^m \quad \text{et} \quad \Delta = \alpha_w + \beta_w \text{Log}_{10} \sigma / \mu, \quad \delta = \delta_0$$

Ce modèle comporte 9 paramètres indépendants : $A, n, Q/R, K_0, c, m, \alpha_w, \beta_w$, et δ . Des valeurs pour différents sels peuvent être trouvées dans Munson (1999).

Ce modèle rend bien compte du transitoire rhéologique, néanmoins il ne prévoit aucun fluage inverse suite à un déchargement.

7.4 Fluage inverse - Version modifiée du modèle de Munson-Dawson

Munson *et al.* (1992) ont proposé une modification de leur modèle tenant compte du fluage inverse dans le cas d'un déchargement (une pressurisation rapide dans une caverne fermée par exemple). Nous proposons une version légèrement modifiée n'introduisant que deux paramètres supplémentaires sans dimension p_i et k_i :

$$F = 1 - (1 - \zeta/\varepsilon_i^*)^{p_i} / (1 - k_i)^{p_i} \quad \text{quand } \zeta > \varepsilon_i^*$$

Les nouveaux paramètres p_i et k_i ont été estimés par un calcul inverse à partir des résultats d'essais réalisés in-situ.

8. APPLICATION NUMERIQUE

Il s'agit ici de calculer l'évolution de la pression dans une cavité suite à une mise en pression rapide réalisée au début d'un essai d'étanchéité. Tous les phénomènes discutés précédemment (réchauffement de la saumure, refroidissement de la saumure suite à la compression adiabatique, micro-perméation, fluage transitoire et dissolution complémentaire) ont été pris en compte.

Dans cet exemple, on a considéré une caverne de 525,000 m³ située à une profondeur moyenne de 1200 mètres. La caverne a été lessivée en 700 jours et l'essai d'étanchéité est réalisé 5 ans après la fin du lessivage. La pression dans la cavité, à la fin de la mise en pression, est passée de 14,4 MPa à 20,4 MPa.

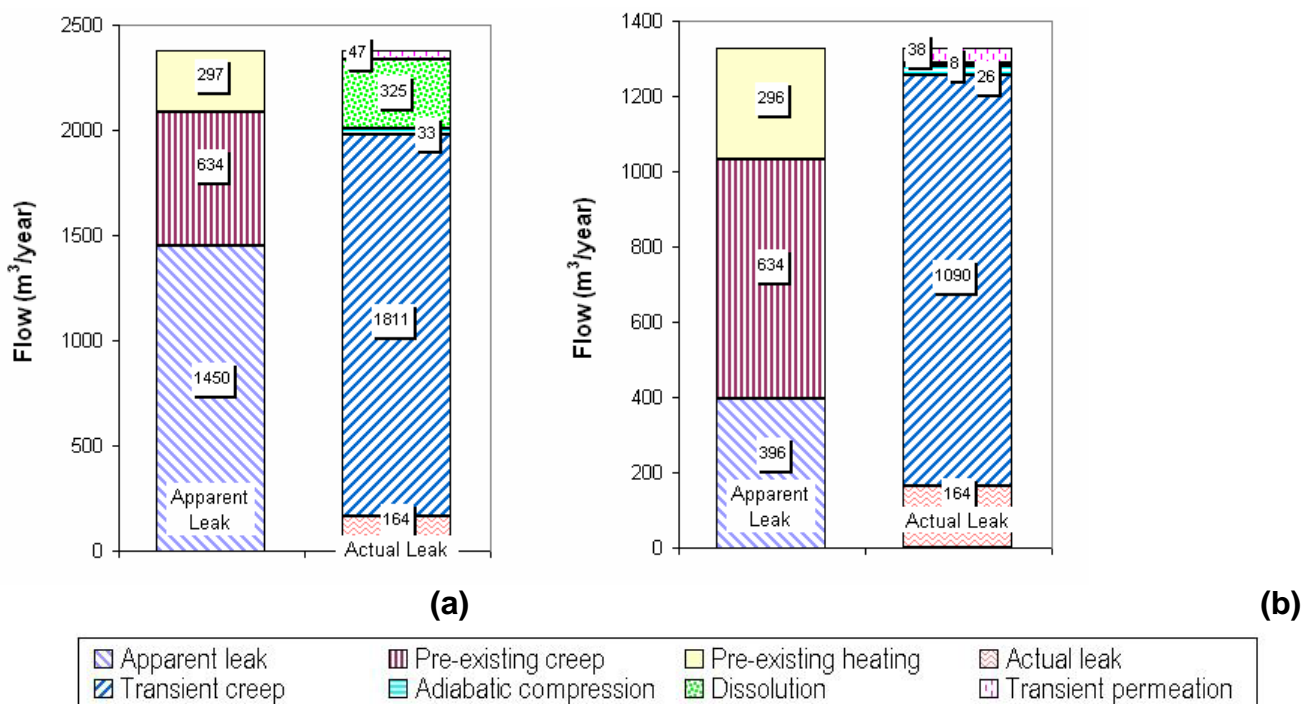


Figure 2 – Débits correspondant aux différents phénomènes en jeu au cours d'un essai d'étanchéité réalisé dans une caverne de 500.000 m³ située à 1200 mètres de profondeur. Il s'agit des débits 3 jours après la mise en pression (à gauche) et 8 jours après la mise en pression (à droite).

Un exemple de résultat est donné sur la Figure 2. Il s'agit d'une comparaison des différents débits 3 jours et 8 jours après la mise en pression. On a pris en compte une fuite réelle (« Actual leak ») égale à 164 m³/an, généralement considérée comme la fuite maximale admissible (Thiel, 1993). Dans les deux graphes (a) et (b), la colonne de droite représente les effets qui contribuent à diminuer la pression pendant l'essai d'étanchéité ; le fluage transitoire et la fuite réelle se trouve notamment dans cette catégorie. La colonne de gauche représente les phénomènes qui contribuent à augmenter la pression, notamment le fluage stationnaire et l'expansion thermique de la saumure.

La différence entre les effets contribuant à diminuer la pression et ceux contribuant à la faire monter est la fuite apparente (« Apparent leak ») qui apparaît en bas de la colonne de gauche. L'intérêt principal de cette étude tient dans la comparaison entre la fuite réelle (164 m³/an ici) et la fuite apparente (1450 m³/an au bout de 3 jours et 396 m³/an au bout de 8 jours).

Dans le cas de cette grande caverne, l'augmentation de pression due au réchauffement de la saumure est toujours important même 5 ans après la fin du lessivage. Les phénomènes transitoires comme le fluage transitoire et la dissolution sont plus grands que la fuite réelle. La fuite apparente (déduite de l'évolution mesurée de la pression) surestime sensiblement la fuite réelle.

9. CONCLUSIONS

Dans le cas d'une grande caverne, la fuite apparente peut être sensiblement différente de la fuite réelle dans un essai d'étanchéité de type LLT (Liquid-Liquid Test). Toutefois les phénomènes à l'origine de cet écart peuvent être identifiés et estimés, et la fuite apparente peut ainsi être corrigée pour une meilleure estimation de la fuite réelle.

REFERENCES

- Aubertin M. et Hardy Jr R.H., editors, (1998). *Proc. 4th Conf. Mech. Beh. Salt*, Trans Tech. Pub., Clausthal-Zellerfeld, Germany.
- Bérest P., Bergues J. et Brouard B. (1999) *Static and dynamic compressibility of deep underground caverns*. Int. J. Rock Mech. & Mining Sci., 36 :1031–1049.
- Brouard B. et Bérest P. (1998). A classification of salt according to their creep properties. *Proc. SMRI Spring Meeting*, New Orleans, 18–38.
- Cristescu N., Hardy R.H. Jr, Simionescu O., editors, (1998). *Proc. 5th Conf. Mech. Beh. Salt*, Trans Tech. Pub., Clausthal-Zellerfeld, Germany.
- Hardy Jr R.H. et Langer M., editors, (1984). *Proc. 1st Conf. Mech. Beh. Salt*, Trans Tech. Pub., Clausthal-Zellerfeld, Germany.
- Hardy Jr R.H. et Langer M., editors, (1988). *Proc. 2nd Conf. Mech. Beh. Salt*, Trans Tech. Pub., Clausthal-Zellerfeld, Germany.
- Hardy Jr R.H., Langer M., Bérest P., et Ghoreychi M., editeurs, (1996). *Proc. 3rd Conf. Mech. Beh. Salt*, Trans Tech. Pub., Clausthal-Zellerfeld, Germany.
- Munson D.E. et Dawson P.R., (1984). *Salt Constitutive Modeling using Mechanism Maps*. Proc. 1st Conf. Mech. Beh. Salt, Trans Tech. Pub., Clausthal-Zellerfeld, Germany, pp.717-737.
- Munson D.E., De Vries K.L., Fossum A.F. et Callahan G.D. (1996). *Extension of the Munson-Dawson model for treating stress drops in salt*. Proc. 3rd Conf. Mech. Beh. Salt, Trans Tech. Pub., Clausthal-Zellerfeld, Germany, pp.31-44.
- Munson D.E. (1999) *Transient Analysis for the Multimechanism-Deformation Parameters of Several Domal Salts*. Proc. SMRI Fall Meeting, Washington DC, pp. 275-298.
- Van Sambeek L., Bérest P. et Brouard B (2005) *Improvements in mechanical integrity tests for solution-mined caverns used for mineral production or liquid-product storage*. SMRI Topical Report RSI-1799, 152 pages.