

# **ABANDON DES CAVITÉS DE STOCKAGE DANS LE SEL**

**BÉREST Pierre, BROUARD Benoît**  
*Laboratoire de Mécanique des Solides*  
*École Polytechnique, 91128 Palaiseau Cedex*

## INTRODUCTION

Un intérêt croissant est porté aux conséquences pour l'environnement de l'abandon d'ouvrages souterrains. Parmi ces derniers, les stockages souterrains d'hydrocarbures attirent l'attention depuis quelques années, Ehgartner et Linn [1], Bérest et Brouard [2] ; dans le cas des cavernes dans le sel, l'intérêt est accru par plusieurs projets d'utilisation de telles cavernes pour l'enfouissement de déchets, notamment des résidus de la production pétrolière, voir dans le cas du Texas le rapport du Laboratoire National Argonne [3]. Plusieurs auteurs, par exemple Langer, Wallner, Wassmann [4] ont attiré l'attention sur le scénario suivant : même en l'absence de déséquilibre thermique, la pression du fluide contenu (saumure par exemple) dans une caverne fermée augmente du fait du fluage naturel du sel. Un équilibre est en principe atteint, lorsque la pression du fluide devient égale à la pression naturelle des terrains. Mais, le fluide ayant en général une densité plus faible que les terrains, l'équilibre ne peut être assuré simultanément en tout point de la caverne ; surtout si celle-ci est de grande hauteur, un excès de pression significatif existera dans le fluide en haut de la caverne, avec un risque de fracturation du massif, qui pourra tendre à se développer vers le haut, jusqu'à faire débiter la saumure de la caverne dans le premier aquifère surincombant. On va montrer dans la suite que ce risque peut disparaître si on tient compte d'une certaine perméabilité du sel, qui permet une relaxation de la pression du fluide. Le risque est alors limité à la période transitoire pendant laquelle les déséquilibres thermiques initiaux se résorbent.

## EXEMPLES D'ÉVOLUTION DE LA PRESSION DANS UNE CAVERNE FERMÉE

Avant d'évaluer par le calcul l'évolution naturelle de la pression dans une caverne fermée, il est intéressant d'examiner deux cas réels au cours desquels l'évolution a été mesurée :

- La caverne EZ 53 exploitée par Gaz de France est située à 950 mètres de profondeur, son volume est 8 000 m<sup>3</sup> environ. On a fermé cette caverne un an après la fin du lessivage (voir Figure 1) ; avant fermeture la caverne rejetait à l'atmosphère environ 50 litres de saumure par jour ; après fermeture, la vitesse initiale de montée en pression a été de 5 MPa/jour. On a estimé dans ce site la perméabilité (Durup, [5]) à  $K = 6 \cdot 10^{-20}$  m<sup>2</sup>. Une description plus complète de cet essai peut être trouvée dans Hugout, [6].

- Les cavernes Pa 1, 2, 3, 6 du site de Vauvert exploitées par Elf sont situées dans un gisement compris entre 1 800 m et 2 500 m de profondeur. La température de la roche est supérieure à 100°C ; les cavernes Pa 1, 2, 6 sont plus ou moins reliées entre elles, leurs volumes sont de 84 000 m<sup>3</sup>, 68 000 m<sup>3</sup>, 16 000 m<sup>3</sup>, environ. La pente initiale des courbes est beaucoup plus forte que dans le cas précédent (voir Figure 2) ; la pression de la saumure dans la caverne cesse de croître quand la pression géostatique est atteinte.

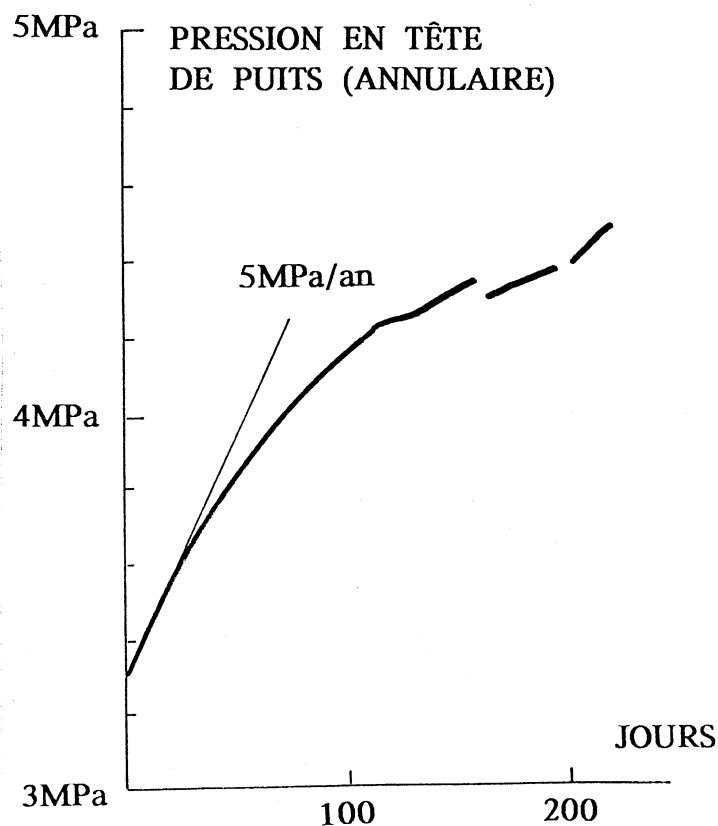


Figure 1 : Évolution de la pression à EZ 53, mesurée sur l'annulaire en fioul, après fermeture.

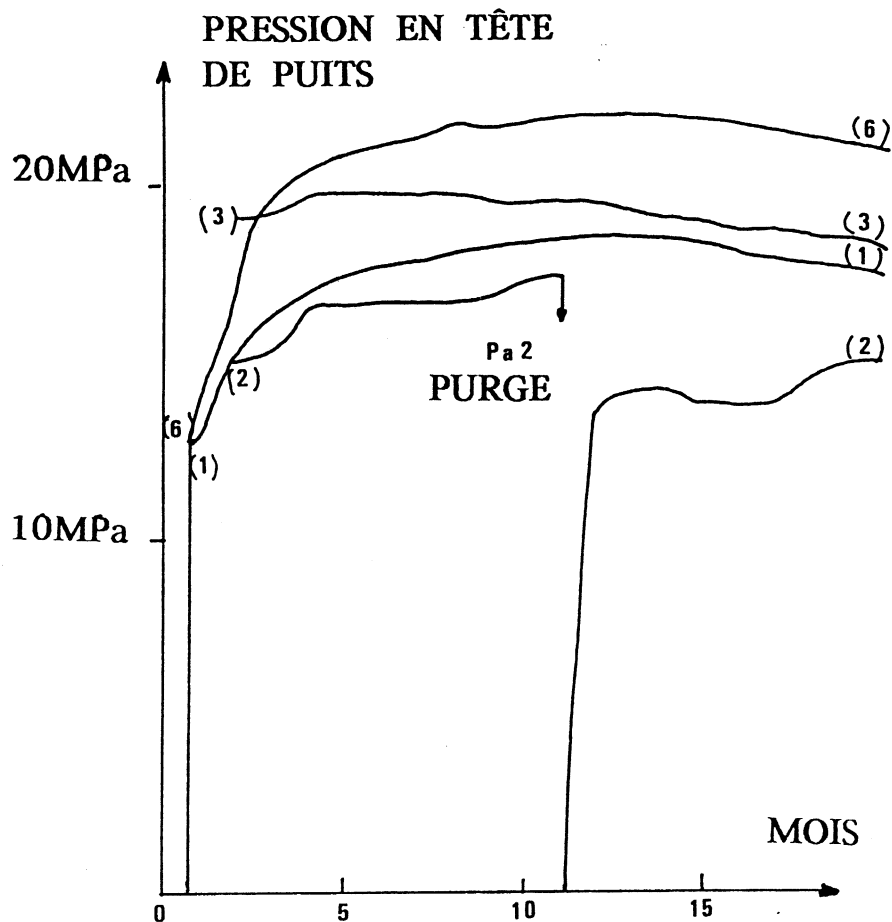


Figure 2 : Évolution de la pression à Vauvert (Pa1, Pa2, Pa3, Pa6).

### COMPRESSIBILITÉ ET DILATATION THERMIQUE

La variation de pression dans une caverne fermée est déterminée par plusieurs phénomènes :

- la compressibilité élastique de la caverne,
- la dilatation thermique de la saumure contenue dans la caverne,
- le fluage du massif de sel,
- la percolation de la saumure de la caverne vers le massif,
- l'évolution de la saturation de la saumure.

On peut résumer cette combinaison de phénomènes par la relation :

$$\beta \cdot \dot{P}_i = \alpha \cdot \dot{T}_i + \dot{\epsilon}_{FL} - \dot{\epsilon}_{PERC} + \dot{\epsilon}_{SAT}$$

1. Lorsque la pression et la température de la saumure évoluent, la concentration de saturation de la saumure au contact de sel se modifie. Il ne s'agit pas d'un phénomène instantané, mais nous considérons des évolutions très lentes : on suppose que l'équilibre est réalisé à chaque instant. Par exemple, si la pression ou la température augmentent, du sel solide se dissout et le volume global sel + saumure diminue. On tient compte de cet effet en utilisant des coefficients  $\alpha$  et  $\beta$  calculés pour une saumure qui demeure saturée à chaque instant, de sorte que le terme  $\dot{\varepsilon}_{SAT}$  peut être omis.

2. Hormis la remarque précédente, le coefficient de compressibilité  $\beta$  de la cavité (l'injection d'un débit  $Q$  dans la cavité augmente sa pression de  $\dot{P} = Q/(\beta V)$ ) est la somme de la compressibilité de la saumure et de celle de la cavité. Une valeur globale  $\beta = 4 \cdot 10^{-10} \text{ Pa}^{-1}$  paraît typique (Boucly [7], Crotofino [8]) mais la présence (assez rare) de petites poches de gaz dans la cavité peut augmenter considérablement cette valeur.

3. Le coefficient de dilatation thermique volumique  $\alpha$  de la saumure (le volume de la cavité n'est en principe pas sensible à la température), à saturation, est de  $4,4 \cdot 10^{-4} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$  (Boucly [7] ; Crotofino donne  $4,5 \cdot 10^{-4} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$  [8]). On en déduit une règle grossière : si tous les autres effets sont négligés (fluage et percolation) une variation de température de  $1^\circ\text{C}$  dans une cavité fermée fait monter sa pression de 1,1 MPa environ. Pourquoi la température de la saumure varie-t-elle ? Une cavité fermée est pleine de saumure qui résulte de l'injection d'eau douce (ou de saumure) venant de la surface du sol, donc sensiblement plus froide que les terrains environnants. Typiquement l'eau douce injectée est à  $12^\circ\text{C}$ , et la température des terrains est  $T_R(^\circ\text{C}) = 12 + 0,03 z$  (mètres) où  $z$  est la profondeur sous la surface (la distribution réelle peut s'écarter de cette loi, surtout dans le sel lui-même où le gradient géothermique est plus faible). À l'issue de l'injection d'eau douce, la température initiale  $T_i(0)$  de la saumure est intermédiaire entre  $12^\circ\text{C}$  et  $T_R$  ; puis cette température évolue sous l'effet de la conduction thermique qui apporte à la saumure de la chaleur provenant du massif et résorbe progressivement l'écart entre  $T_R$  et  $T_i(0)$ . Ce phénomène se calcule aisément. Le temps caractéristique du réchauffement (après lequel 75 % de l'écart initial de température est résorbé) est donné par la relation  $t_c = V^{2/3}/(4k)$  où  $k$  est la diffusivité thermique du sel,  $k = 3 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2 \text{ s}^{-1}$  environ,  $V$  est le volume de la cavité ; pour une cavité  $8\,000 \text{ m}^3$ , on a  $t_c = 1$  an mais pour une cavité de  $512\,000 \text{ m}^3$  on a  $t_c = 16$  ans. Le temps de retour à l'équilibre thermique est assez long, pour une grosse cavité, et soulève un problème difficile du point de vue de l'abandon. Si, pour simplifier, on néglige toute l'histoire thermique de la cavité qui précède la fin de l'injection d'eau dans la cavité, on pourra écrire :

$$\dot{\varepsilon}_{TH} = \alpha \cdot \frac{\partial \varphi}{\partial u}(u = t/t_c) \cdot \{T_R - T_i(0)\}/t_c$$

où  $\varphi(u)$  est une fonction qui peut être déterminée explicitement dans le cas d'une cavité sphérique (P. Bérest, E. Ledoux, B. Legait, G. de Marsily, [9]) et qui est telle que  $\varphi(1) \approx 75\%$ .

On observe en général l'accroissement de température par son effet de dilatation de la saumure. Si la caverne est ouverte, à la surface, il en résulte une expulsion continue d'un débit  $Q = \alpha V \dot{T}$  qui, toutes choses égales d'ailleurs, varie comme  $V^{1/3}$  (c'est-à-dire comme le rayon de la caverne) en raison de l'effet du volume sur l'échelle des temps (voir définition de  $t_c$ ). Si la caverne est fermée et que les autres effets sont négligeables,  $P = \alpha T / \beta$  varie comme la puissance  $-2/3$  du volume. La figure 3 présente le cas exceptionnel d'une mesure de la température dans la caverne après son lessivage. Cette caverne (EZ 53, à Etrez) présente un volume de 8 000 m<sup>3</sup>, une profondeur de 950 mètres ; la température du massif est 45°C. On vérifie que 60 % de l'écart de température est résorbé après 8,5 mois, ce qui est cohérent avec la définition donnée de  $t_c$ .

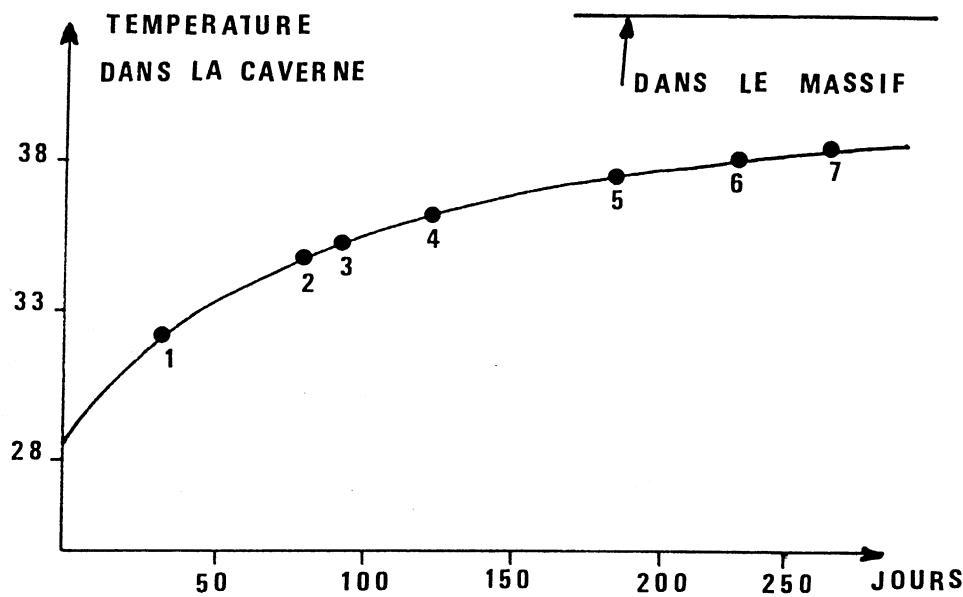


Figure 3 : Température mesurée dans la caverne EZ 53 à différents instants après la fin du lessivage.

## FLUAGE DU SEL

Le comportement mécanique du sel présente une richesse fascinante, reflétée par exemple dans les références Hardy et Langer, [10] et [11]. La plupart des auteurs s'accordent sur les points suivants :

- Le sel se comporte comme un fluide : il s'écoule sous toute charge qui n'est pas purement hydrostatique.
- Le sel est un fluide non newtonien : sa vitesse de déformation est proportionnelle à une puissance élevée (3 à 5 typiquement) de la contrainte déviatorique appliquée (autrement dit, dans une caverne, la vitesse de variation relative du volume,  $\dot{\epsilon}_{FL}$ , augmente très vite avec la diminution de la pression dans la caverne).

- La vitesse de déformation est fortement influencée par la température (elle s'accroît typiquement de 2 à 3 ordres de grandeur quand la température augmente de 100°C).
- A la suite d'une variation de la charge appliquée, la vitesse de déformation est d'abord très rapide puis, selon les auteurs, diminue continûment ou atteint un régime permanent dans lequel (pour une charge donnée) la vitesse devient constante.

Dans la suite, nous retenons cette dernière hypothèse et nous ne considérons pas le fluage transitoire, car les évolutions sont lentes. Pour calculer des ordres de grandeur, on retient qu'une vitesse de diminution de volume en régime permanent (8 ans après la création de la caverne) de  $\dot{\epsilon}_{FL} = 2,5 \cdot 10^{-4} \text{ an}^{-1}$  a été mesurée par P. Bérest, P.A. Blum, [12]) sur la caverne EZ 53 citée plus haut (température de la roche : 45°C ; pression géostatique :  $P_R = 22 \text{ MPa}$  ; pression dans la caverne :  $P_i = 12 \text{ MPa}$ ). Si on estime que cette vitesse varie comme le cube de l'écart des pressions, on peut adopter l'expression :

$$\dot{\epsilon}_{FL} = \dot{V}/V = -A \cdot [(P_R - P_i)/10]^m \cdot \exp[\gamma(z - 1000)]$$

où  $A = 2,5 \cdot 10^{-4} (\text{an})^{-1}$ ,  $m = 3$ , et  $\gamma$ , qui rend compte de l'effet de la température sur le fluage par l'intermédiaire de l'accroissement de profondeur, vaut  $\gamma = 2,5 \cdot 10^{-3} \text{ m}^{-1}$ . Ces valeurs conduisent à multiplier par 100 environ la vitesse de fluage lorsqu'on passe de 1000 m à 2000 m de profondeur ; elles sont purement indicatives et peuvent (sensiblement) varier d'un site à l'autre. On pose dans la suite  $B = B(z) = A \exp[\gamma(z - 1000)]/10^m$ .

## PERCOLATION DE LA SAUMURE

La physique de la percolation de la saumure dans le sel est mal connue, malgré des progrès récents (Peach [13]). On s'appuie dans la suite sur des données empiriques récoltées au cours d'essais en place dans des sondages (Durup [5]) dont les conclusions sont les suivantes : la percolation suit la loi de Darcy ; la pression de pore  $P_0$  est égale à celle résultant du poids d'une colonne de saumure saturée remontant jusqu'à la surface ; une valeur typique, sur le site d'Etrez, pour la perméabilité intrinsèque est  $K = 6 \cdot 10^{-20} \text{ m}^2$  (dans la suite, on considère que  $K$  peut varier d'un site à l'autre entre  $K = 10^{-22} \text{ m}^2$  et  $K = 10^{-20} \text{ m}^2$  typiquement). Ces valeurs "globales" peuvent refléter une réalité de détail mal connue. Il s'agit, en tout état de cause, de valeurs extrêmement faibles ; néanmoins on verra que la perméabilité joue un rôle appréciable dans le contexte de notre problème. Considérant toujours des évolutions lentes, nous examinons seulement le régime permanent ; en assimilant la caverne à une sphère de rayon  $R$ , avec  $V = 4 \pi R^3/3$ , la distribution de pression en régime permanent est en  $1/r$  et

$$\dot{\epsilon}_{PERC} = Q/V = 3K \cdot (P_i - P_0) / (\eta R^2)$$

où  $P_i - P_0$  est l'écart entre la pression dans la caverne et la pression de pore, et  $\eta$  est la viscosité de la saumure,  $\eta = 1,2 \cdot 10^{-3} \text{ Pa.s}$  à 45°C et  $\eta = 0,6 \cdot 10^{-3} \text{ Pa.s}$  à 100°C.

## EFFETS COMBINÉS DU FLUAGE ET DE LA PERCOLATION

Si on néglige les effets de la dilatation thermique, l'évolution de la pression dans une caverne fermée est donnée par :

$$\beta \cdot \dot{P}_i = -3K \cdot [P_i - P_0(z)] / (\eta(z)R^2) + B(z) \cdot (P_R(z) - P_i)^m$$

La pression tend vers une valeur d'équilibre, comprise entre la pression de pore  $P_0$  et la pression géostatique  $P_R$ . Cette pression sera d'autant plus proche de  $P_R$  (et donc d'un risque de fracturation) que la caverne sera grande, la perméabilité petite et la profondeur élevée. Typiquement à 1000 mètres, pour  $V = 225\ 000\ \text{m}^3$  et  $K = 6 \cdot 10^{-20}\ \text{m}^2$ , la pression d'équilibre finale est la moyenne des pressions  $P_0$  et  $P_R$ , soit 17 MPa ; en revanche à 2000 mètres, on a  $P_0 = 24\ \text{MPa}$ ,  $P_R = 44\ \text{MPa}$  et la pression d'équilibre sera 39 MPa. On voit que la prise en compte de la perméabilité empêche la pression de s'approcher de trop près de la pression géostatique, même si la percolation est faible en valeur absolue (les cavernes ne perdent que quelques  $\text{m}^3$  de saumure par an).

## EFFETS COMBINÉS DU FLUAGE, DE LA PERCOLATION, DE LA DILATATION THERMIQUE

Si on tient compte de l'influence de la dilatation thermique, ce qui est presque toujours indispensable pour des temps qui ne sont pas très grands devant  $t_c$ , on a :

$$\beta \cdot \dot{P}_i = B(z) \cdot [P_R(z) - P_i]^m + \frac{1}{R^2} \left\{ \alpha \cdot [T_R(z) - T_i(0)] \cdot \varphi(t/t_c) / C - 3K \cdot [P_i - P_0(z)] / \eta(z) \right\}$$

avec  $C = (4\pi/3)^{2/3} / (4k)$  et  $P_i(0) = P_0(z)$ . A l'instant initial, la dilatation thermique est le phénomène prépondérant pour une caverne assez petite et peu profonde ; le fluage l'emporte dans une grande caverne profonde. Puis l'augmentation de la pression réduit la vitesse de fluage, fait apparaître une percolation significative, pendant que la dilatation thermique perd de son efficacité quand on dépasse des temps de l'ordre de  $t_c$  ; on converge alors vers la même pression limite que celle décrite dans le paragraphe précédent, après passage, pendant l'épisode transitoire, par un maximum de la pression intérieure qui peut excéder la pression géostatique.



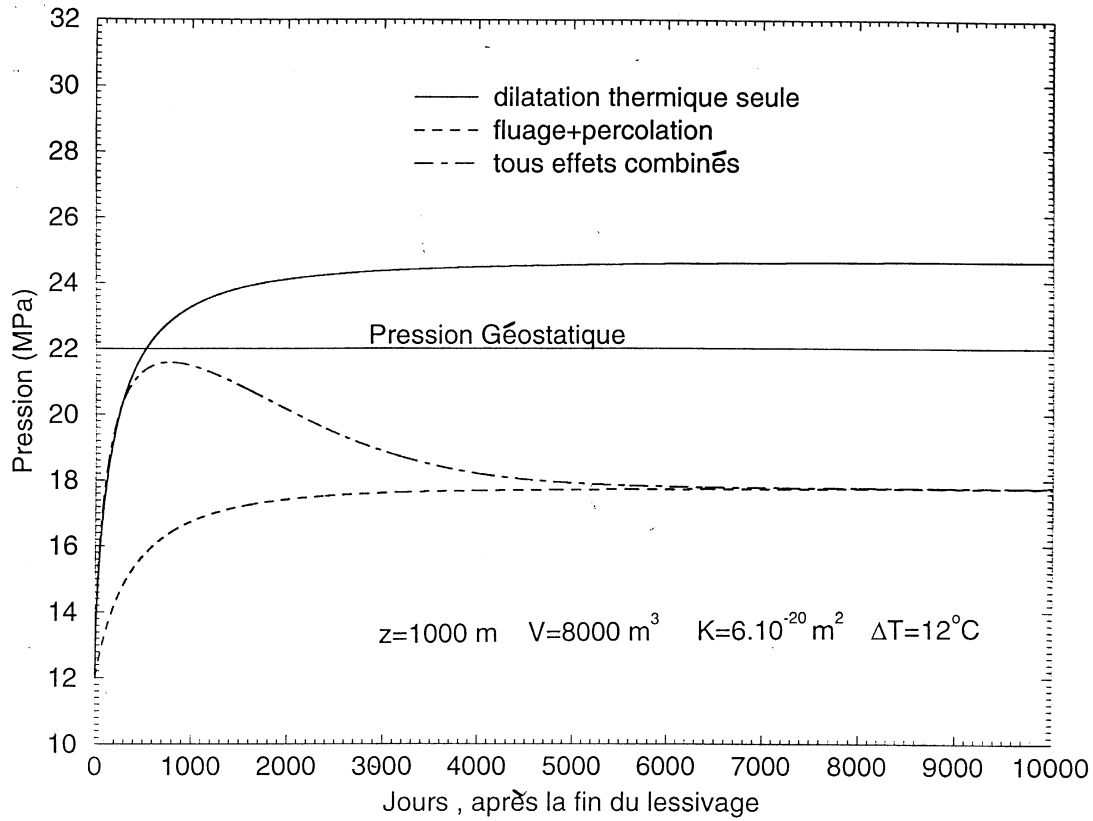


Figure 4 : Évolution de la pression dans une petite caverne peu profonde.

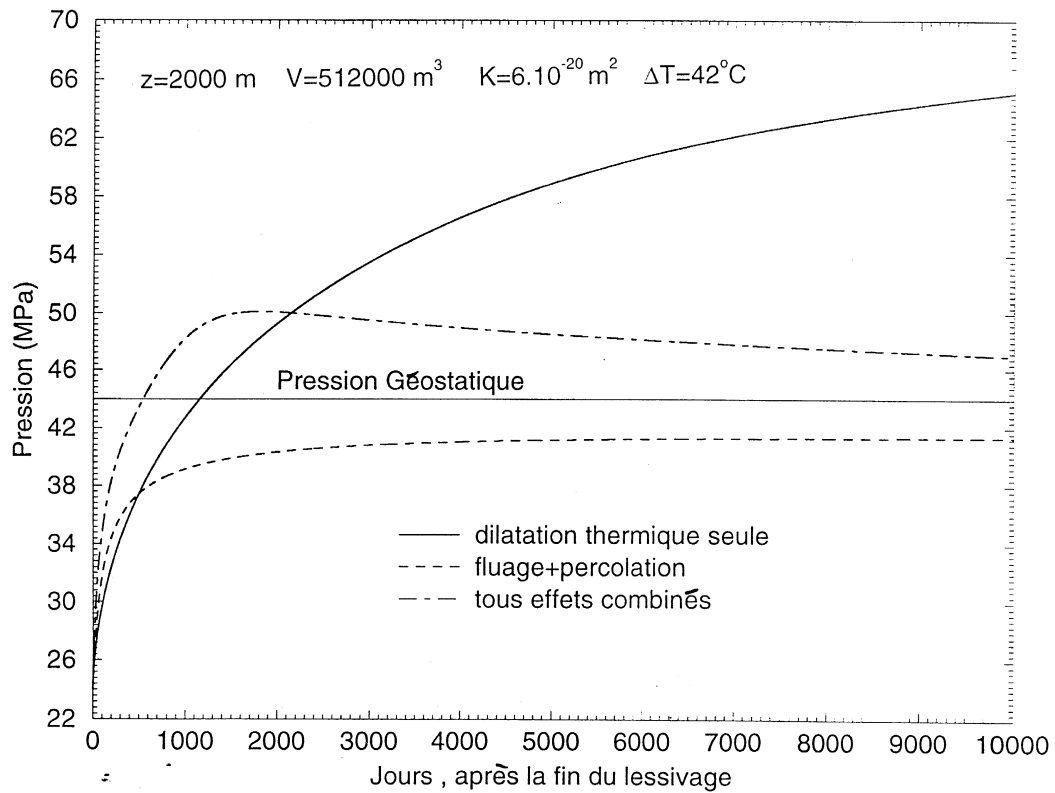


Figure 5 : Évolution de la pression dans une grosse caverne profonde.

Deux exemples illustrent ces idées (dans les deux cas la perméabilité est  $K = 6 \cdot 10^{-20} \text{ m}^2$ ) :

Dans le premier, la profondeur est mille mètres, la caverne est petite : en l'absence de dilatation, la pression évolue lentement vers une pression d'équilibre assez faible ; c'est donc initialement la dilatation thermique qui gouverne à elle seule l'évolution de pression (on a tracé la courbe  $\dot{P}_i = \alpha \dot{T}_i / \beta$  qui traduit la seule influence de la dilatation thermique, mais qui se superpose pratiquement à la courbe qui combine tous les effets). Puis un maximum est atteint quand fluage et réchauffement sont devenus faibles ; la percolation ramène la pression de saumure vers sa valeur d'équilibre. Dans l'exemple donné la pression reste inférieure à la pression géostatique. (Figure 4).

Dans le second exemple, la caverne est profonde et bien plus grosse : l'épisode de réchauffement est plus long et, initialement, c'est le fluage qui gouverne l'évolution de la pression ; puis cette dernière évolue parallèlement à la courbe de dilatation thermique seul ; la pression géostatique est dépassée puis (dans l'hypothèse peu probable où le frac n'apparaît pas) la percolation et le fluage ramènent (très lentement) la pression vers des valeurs plus basses. (Figure 5).

### CONCLUSIONS : Quelques solutions

On a vu que, dès lors que la perméabilité du sel était prise en compte, le risque de frac est limité à un épisode transitoire et lié à l'intensité relative du phénomène d'échauffement. Pour supprimer ce risque ou réduire ses effets, on peut :

1. Différer la fermeture de la caverne pour laisser la saumure se réchauffer (Ehgartner, Linn, [1] ; You et Valette, [14]). Il faut attendre un temps de l'ordre de  $t_c$ , ce qui est beaucoup pour une grosse caverne ( $t_c = 16$  ans pour  $V = 512\,000 \text{ m}^3$ ) et pose un problème de transfert de responsabilité (qui paiera la fermeture si l'exploitant disparaît pendant la période d'attente ?). Si on veut limiter la saumure produite, il est intéressant de fermer la caverne, laisser monter la pression et purger périodiquement.

2. A l'inverse, on peut souhaiter produire le maximum de saumure afin de limiter le volume abandonné lors de la fermeture définitive. On peut à cette fin descendre une pompe immergée et rabattre le niveau de l'interface dans le sondage pour accélérer le fluage. Ce procédé est surtout efficace au-delà de 1 500 mètres de profondeur. Il faut toutefois éviter des descentes trop brutales de l'interface et surveiller la subsidence qui ne manquera pas de se manifester. Une discussion dans un cas particulier peut être trouvée dans Fokker [15].

3. On peut imaginer (B. Legait, communication personnelle) d'injecter un peu de gaz (azote) dans la caverne pour en réduire la compressibilité,  $\beta = 4 \cdot 10^{-10} (1 - x) + x/P$  si  $x$  est la fraction volumique occupée par le gaz,  $P$  sa pression en Pa ; à 1000 mètres de profondeur, 1% de gaz triple la compressibilité  $\beta$  de la caverne et réduit considérablement la pression maximale atteinte.

Dans tous les cas, la discussion doit être conduite en fonction de la géologie et de la géographie locale, qui déterminent l'ampleur éventuelle des risques pour l'environnement et donc des efforts à consentir pour le protéger.

Cette étude a été aidée par Gaz de France (Réservoirs Souterrains) auquel les auteurs souhaitent témoigner leur reconnaissance.

## RÉFÉRENCES

- [1] Ehgartner B.L., Linn J.K., (1994), *Mechanical Behavior of Sealed SPR Caverns*, SMRI Spring meeting, April 25-27, Houston Texas.
- [2] Bérest P., Brouard B., (1995), *Behavior of sealed solution-mined caverns*, SMRI Spring meeting, New Orleans, Louisiane.
- [3] Argonne National Laboratory, (1996), *Preliminary technical and Legal evaluation of disposing of nonhazardous oil field waste into Salt caverns*, prepared for US DOE, à paraître.
- [4] Langer M., Wallner M., Wassmann W., (1984), *Gebirgsmechanische Bearbeitung von Stabilitäts fragen bei Deponiekavernen im Salzgebirge*, Kali und Steinsaltz, S66/76, Verlag Glückhauf.
- [5] Durup G., (1994), *Long term tests for tightness evaluations with brine and gas in salt*, SMRI Fall meeting, Hannover.
- [6] Hugout B., (1988), *Mechanical Behavior of salt cavities -in situ tests- model for calculating the cavity volume evolution*, 2nd Conf. Mech. Behaviour of Salt, Hannover, Hardy and Langer ed., pp. 291-310, Trans. Tech. Pub.
- [7] Boucly P., (1982), *Expériences in situ et modélisation du comportement des cavités salines utilisées pour le stockage de gaz*, Revue Française de Géotechnique, n° 18, pp. 49-57.
- [8] Crotagino F.R., (1984), *Salt Cavern in situ testing from the constructor's and the operator's view point*, 1st Conf. Mech. Behaviour of Salt, Penn State University Trans. Tech. Pub.
- [9] Bérest P., Ledoux E., Legait B., de Marsily G., (1979), *Effets thermiques dans les cavités en couche salifère*, 4th Int. Congress ISRM, Montreux, Vol. 1, pp. 31-35, Balkema.
- [10] Hardy R. Jr, Langer M., (1984), 1st Conf. Mech. Behaviour of Salt, Penn State University, Trans. Tech. Pub.
- [11] Hardy R. Jr, Langer M., (1988), 2nd Conf. Mech. Behaviour of Salt, Hannover, Trans. Tech. Pub.

- [12] Bérest P., Blum P.A., (1992), *In situ tests in salt caverns*, Proc. 7th Int. Symp. on Salt, Kyoto.
- [13] Peach C.J., (1991), *Influence of deformation on the fluid transport properties of salt rocks*, Thesis, University of Utrecht, Holland.
- [14] You Th., Maisons Ch., Vallette M., (1994), *Experimental procedure for the closure of the brine production caverns on the "Saline de Vauvert" site*, SMRI Fall Meeting, Hannover.
- [15] Fokker P.A., (1995), *The behaviour of Salt and Salt caverns*, Ph. D. Thesis, Delft University of Technology.