

Une mesure de la perméabilité et du fluage d'une caverne dans le sel

A measurement of creep and permeability of a salt cavern

Pierre Bérest^{a*}, Jean Bergues^a, Benoît Brouard^a, Gérard Durup^b, Benoît Guerber^b

^a LMS, École polytechnique, 91128 Palaiseau cedex, France

^b DR/DRS/SIM, Gaz de France, 361, avenue du Président-Wilson, BP 33, 93211 La-Plaine-Saint-Denis cedex, France

(Reçu le 18 décembre 1998, accepté après révision le 25 mai 1999)

Abstract — Rock mass properties differ significantly from those measured on samples in the laboratory. A test has been performed on a deep brine-filled cavern, with the objective of measuring the equilibrium pressure reached when the cavern was closed. Such an equilibrium is reached when salt mass creep, which leads to cavern shrinkage, balances brine permeation through the cavern wall. A $K = 2 \cdot 10^{-19} \text{ m}^2$ value of the average in situ intrinsic permeability has been deduced from the test; it is significantly higher than the intrinsic permeability measured in a well or in the laboratory. This result supports cavern abandonment scenarios in which the risk of natural fracturation due to high brine pressures is alleviated. (© Académie des sciences / Elsevier, Paris.)

cavern / salt / permeability / creep / in situ tests

Résumé — Les propriétés d'un massif rocheux sont en général différentes de celles mesurées au laboratoire sur un échantillon. On a cherché la pression d'équilibre à laquelle se stabilise la saumure contenue dans une cavité souterraine profonde fermée. Cet équilibre résulte de l'action du fluage du massif, qui tend à refermer la cavité, et de la perméation de la saumure à travers les parois de la cavité. On déduit de la valeur d'équilibre mesurée une perméabilité intrinsèque moyenne de l'ordre de $K = 2 \cdot 10^{-19} \text{ m}^2$, sensiblement plus forte que les valeurs estimées antérieurement sur des échantillons ou dans un puits. Ce résultat permet de construire un scénario du comportement de la caverne après abandon, qui exclut le risque de fracturation naturelle. (© Académie des sciences / Elsevier, Paris.)

caverne / sel / perméabilité / fluage / essais in situ

Abridged version

Rock mass properties often differ significantly from those measured on samples in the laboratory; this is particularly true for creep properties and permeability, as will be proved by the test described, performed on a salt cavern leached out from the Bresse salt basin. The test was motivated by concerns about the behaviour of deep (300–2 500 m) sealed and abandoned caverns. It is generally considered that the major safety problem to be tackled is the long term behaviour of the brine 'bubble'

contained in the cavern. When brine pressure exceeds the geostatic pressure, hydrofracturing can occur, leading to possible brine migration to overlying aquifers.

The pressure build-up in a closed cavern is due to two main phenomena: (i) thermal expansion of the brine, by far the predominant phenomenon during a period of several years, (ii) cavern creep which is a function of the rock temperature (T) at

Note présentée par Jean Salençon

* berest@lms.polytechnique.fr

cavern depth and of the difference between lithostatic pressure (P_{∞}) and brine pressure in the cavern (P_1). Formula (2) provides the relative volumetric strain rate (\dot{V}/V) for a spherical cavern in a rock mass whose rheological behaviour satisfies the generally accepted simplified form (1). Conversely (iii) salt permeability to brine (or K), even if very small, leads to cavern pressure release. Formula (3) gives steady-state brine outflow in the simplified case of a spherical cavern, radius a , when the rock-mass pore pressure is P_0 . If thermal expansion can be disregarded, (ii) and (iii) together yield to a pressure evolution in a closed cavern which is described by (4) where βV is the cavern compressibility. An equilibrium pressure ($\dot{P}_1 = 0$) is reached when cavern creep rate ($\dot{V}(P_1)$) exactly balances brine seepage $Q_s(P_1)$.

In order to validate this notion, a pressure build-up test was performed. The test was supported by the Solution Mining Research Institute (SMRI). The Ez53 cavern of the Etrez site was selected, for this small (7 500 m³) and old (leached out in 1982) cavern had reached thermal equilibrium. When the cavern is opened and the well filled with saturated brine, the cavern pressure (at a depth of 950 m) is 11.2 MPa, while the lithostatic pressure at the same depth is 20.5 MPa. The objective of the test was to prove that when the cavern is sealed, the cavern pressure reaches a figure intermediate between these two values.

This figure was determined in situ by a step-by-step approach. First (see *figure 1*), cavern pressure was submitted to a pressure slightly lower (14.12 MPa) than the expected equilibrium value (14.35 MPa), resulting in a slow pressure decrease from 27 March 1997 (day 1) to 19 November 1997 (day 238). Then, pressure was lowered by approximately 1 MPa by withdrawing brine from the closed cavern, resulting in a slow

pressure build-up from 20 November 1997 (day 239) to 10 March 1998 (day 348). Following this, cavern pressure was increased again by approximately 0.3 MPa by injecting fuel oil, resulting in a slow pressure decrease from 10 March 1998 (day 348) to 16 June 1998 (day 446).

From 16 June 1998 (day 446) to 18 September 1998 (day 540) several fluid movements were performed in order to check the fuel-oil volume, resulting in significant pressure changes. When cavern pressure is lower than 13 MPa (days 446 to 468) pressure rate is positive; when cavern pressure is larger than 13 MPa (days 481 to 540), pressure rate is negative.

To interpret these results correctly, it was necessary to ensure that no (or very small) leaks occurred in the well itself. This objective was met by lowering fuel-oil columns both in the annular space and in the central tubing (*figure 2*). Accurate measurements of the differential pressure evolution (between the annular and tubing pressures at the well head) then allowed determination of fuel-oil/brine interface movement. This system has proven to be extremely effective. For instance *figure 3* displays the pressure decreases as measured at the well head in the central tubing and annular space (respectively) during days 112 to 146 (after the beginning of the test). The two evolutions are quite parallel, precluding any significant interface displacement and then any fuel seepage. The small daily perturbations clearly visible in *figure 3* are attributed to earth tides and variations of the atmospheric temperature.

A simple interpretation can be reached through formula (4) in which brine permeation through the rock mass (Q_s) is supposed to exactly balance cavern volume shrinkage due to creep (\dot{V}). The back-calculated average permeability of the salt formation is then $K = 2 \cdot 10^{-19} \text{ m}^2$.

1. Introduction

On a réalisé, sur une caverne souterraine creusée artificiellement par dissolution dans le massif de sel gemme de Bresse, un essai qui permet d'estimer les valeurs en place des paramètres caractérisant les propriétés de fluage et de perméabilité du massif. Il existe dans le monde plusieurs milliers de telles cavernes, utilisées pour la production de saumure ou le stockage des hydrocarbures. La plupart seront abandonnées après avoir été remplies de saumure, en bouchant le sondage qui permet d'y accéder ; on envisage, dans certains cas, d'y enfouir des déchets industriels. On doit examiner l'évolution de la pression de la « bulle » de fluide ainsi créée. La discussion doit tenir compte des spécificités de chaque site, mais il est possible de dégager une problématique générale (Bérest et al., 1998). La pression du fluide dans une cavité fermée croît au cours du temps. Dans les premières années, le réchauffement de la saumure (produite avec de l'eau relativement froide prélevée à faible profondeur) et la dilatation qui l'accompagne sont les causes majeures de l'accroisse-

ment de pression ; ce phénomène a souvent été observé et il peut être facilement modélisé (Bérest et al., 1998). Ces effets peuvent être évités en attendant, avant de fermer la caverne, que l'équilibre thermique soit atteint, ce qui peut être assez long. En revanche, les effets du fluage subsistent tant que la pression de la saumure est inférieure à la pression lithostatique, même s'ils décroissent très vite quand l'écart entre ces deux pressions se résorbe. Bérest et al. (1998) ont fait observer que, si le massif présente une certaine perméabilité, même très faible (que les calculs précédemment publiés ne prennent pas en compte), la cavité se vide lentement dans le massif environnant, avec un débit qui est une fonction croissante de la pression de la saumure dans la caverne. Il existe alors une pression d'équilibre de la saumure, inférieure à la pression lithostatique, pour laquelle le débit expulsé de la caverne équilibre exactement la perte de volume de la caverne par fluage. Une modélisation simple permet de préciser cette idée.

Le fluage du sel suit des lois complexes, comme en témoigne l'abondante littérature qui lui est consacrée,

notamment Hardy et Langer (1984, 1988), Hardy et al. (1996), Aubertin et Hardy (1997). On approche de manière assez satisfaisante le comportement de fluage établi par une loi de Norton-Hoff dont l'expression uniaxiale est :

$$\dot{\varepsilon} = A \exp \left[- \frac{Q}{R T} \right] \sigma^n \quad (1)$$

où T est la température absolue, σ la contrainte axiale appliquée, $\dot{\varepsilon}$ le taux de déformation ; A , n , Q/R sont des paramètres du modèle. On peut généraliser cette expression au comportement à 3 dimensions, en tenant compte de ce que le fluage établi se fait sans variation de volume ; on peut alors calculer simplement la vitesse de diminution du volume relatif d'une caverne sphérique de volume V :

$$\dot{V}(P_i)/V = - A \exp \left[- \frac{Q}{R T} \right] \frac{3}{2} \left[\frac{3}{2n} (P_\infty - P_i) \right]^n \quad (2)$$

où A , n , et Q/R sont les mêmes que précédemment ; P_∞ est la pression lithostatique à la profondeur moyenne de la caverne ; P_i est la pression (variable) de la saumure contenue dans la caverne.

Le sel gemme est une roche très peu perméable. Pour calculer des ordres de grandeur, on admet que la loi de Darcy y est vérifiée et que la notion de pression de pore y a un sens. Si on note K sa perméabilité intrinsèque, μ la viscosité dynamique de la saumure, P_o la pression de pore ou pression naturelle de la saumure dans la roche à la profondeur considérée ($P_o < P_\infty$), le débit de saumure expulsé par une caverne sphérique de rayon a ($V = 4 \pi a^3 / 3$) en régime permanent s'écrit :

$$Q_s(P_i) = 4 \pi a K (P_i - P_o) / \mu \quad (3)$$

On note βV la compressibilité de la caverne. Cette compressibilité est en principe facile à mesurer (on observe la variation de pression δP mesurée en tête de puits à la suite de l'injection ou du soutirage d'un volume δV connu de liquide, et $\beta V \delta P = \delta V$), mais les conditions expérimentales et la définition de la compressibilité doivent être précisées, en raison notamment des échanges possibles de masse entre la saumure et le massif de sel (Bérest et al., 1997). L'évolution de la pression est alors régie par l'équation différentielle :

$$\beta V \dot{P}_i + Q_s(P_i) - \dot{V}(P_i) = 0 \quad (4)$$

et il existe une valeur $P_i = P_{eq}$ de la pression, comprise entre P_o et P_∞ , pour laquelle un équilibre $\dot{P}_i = 0$ et $Q_s(P_{eq}) = \dot{V}(P_{eq})$ est possible. L'essai présenté visait à mesurer cette pression d'équilibre dans une caverne réelle ; cet essai fournit en même temps une estimation de la perméabilité K , en place, à une échelle sensiblement plus grande que celle d'un puits, puisque, comme on le verra, les autres paramètres figurant dans (2) et (3) sont assez bien connus.

2. Préparation de l'essai

La conduite de l'essai envisagé exige qu'on dispose d'une cavité ayant atteint l'équilibre thermique. Le réchauffement de la saumure est régi par la conduction thermique dans le massif de sel. Son temps caractéristique dépend du volume V (en m^3) de la caverne et de la diffusivité thermique k du sel (environ $100 m^2 \cdot an^{-1}$), soit t_c (années) = $V^{2/3} / 4 k$. Il faut donc disposer d'une caverne petite et/ou lessivée depuis longtemps. La cavité Ez53, appartenant au site d'Etrez exploité par Gaz de France, lessivée au printemps 1982 (donc 15 ans avant l'essai), d'un volume de $7 500 m^3$ environ, correspond bien à cette description ; son temps caractéristique de réchauffement est de l'ordre de $t_c \approx 1$ an ; son histoire thermique, au cours de la première année après le lessivage, est connue (Hugout, 1988) et confirme que le réchauffement est assez rapide, comme le prévoit le calcul ; un profil de température, relevé en février 1996 (Bérest et al., 1996) a établi que l'équilibre thermique était atteint. Dès lors, le comportement de la caverne fermée n'est plus régi que par le fluage du massif et la perméation de la saumure à travers les parois de la caverne, que des essais antérieurs ont permis de reconnaître.

Le sel de la couche supérieure de sel d'Etrez (dans laquelle est réalisée la cavité) a été étudié au laboratoire par Charpentier (1984) et par Pouya (1991), qui a proposé les valeurs suivantes des paramètres du modèle :

$$A = 0,64 \text{ MPa}^{-n} \cdot \text{an}^{-1} \quad Q/R = 4 100 \text{ K} \quad n = 3, 1$$

Appliqués à une caverne de forme sphérique ouverte en surface et placée dans les conditions de profondeur de Ez53, les paramètres proposés par Pouya donnent une vitesse de convergence de $\dot{V}/V = - 3 \cdot 10^{-4}$ par an (Brouard et Bérest, 1998 et formule (2)) ; à 950 m de profondeur $P_\infty = 20,5$ MPa, et la pression dans la caverne est donnée par le poids de la colonne de saumure saturée contenue dans le puits, ou pression *halmstatique*, soit $P_h = 11,2$ MPa à 950 m de profondeur). Cette vitesse calculée est en bon accord avec les observations relatives au débit naturellement expulsé à la tête de puits par la caverne ouverte, effectuées avant l'essai, en 1994, et décrites par Brouard (1998). Ce débit, que l'on peut attribuer au fluage seul, en raison de la valeur de la pression de pore, voir ci-dessous, était de l'ordre de 7 L par jour, soit un peu plus de $3 \cdot 10^{-4}$ par an.

La perméabilité du sel d'Etrez a été étudiée au laboratoire par Le Guen (1991), qui trouve pour certains échantillons une perméabilité intrinsèque de $K = 10^{-21} m^2$. Dupur (1994) a réalisé un essai d'injection d'un an sur le puits Ez58 du même site, dans les mêmes niveaux stratigraphiques que ceux où a été lessivée la caverne Ez53, en appliquant successivement plusieurs niveaux de pression dans le puits. Il a montré que la loi de Darcy rend assez bien compte des résultats de l'essai, que la pression de pore P_o est voisine de la pression *halmstatique*, $P_o \approx P_h = 11,2$ MPa et que la perméabilité intrinsèque,

lorsqu'on suppose une viscosité dynamique $\mu \approx 1,2 \cdot 10^{-3}$ Pa·s pour la saumure au niveau de la caverne, est de $K \approx 5-6 \cdot 10^{-20}$ m². Conformément aux lois de l'effet d'échelle, on peut attendre une perméabilité encore plus grande dans une cavité de grandes dimensions.

La compressibilité de la caverne, soit $\beta V \approx 3$ m³·MPA⁻¹, a été évaluée par Brouard (1998). Au niveau de précision recherchée, on peut assimiler la caverne Ez53 à une sphère de rayon $a = 12$ m ; alors la relation (4), avec $\dot{P}_i = 0$, permet, en utilisant les valeurs précisées ci-dessus des paramètres, de calculer la pression d'équilibre théorique, soit $P_{eq} \approx 14,35$ MPa, valeur qui s'avèrera un peu surestimée.

3. Principe de l'essai

L'essai consiste à imposer, au début de chaque phase de l'essai, par une injection ou un soutirage de fluide dans la cavité fermée, des pressions successives qui encadrent progressivement la pression d'équilibre recherchée, qui n'est pas exactement connue à l'origine (figure 1). Si la pression imposée au début de la phase tend ultérieurement à croître (respectivement décroître) durablement, on la réajuste après un certain temps, pour essayer une pres-

sion plus élevée (respectivement moins élevée) qui change le sens de l'évolution. Chaque phase doit être assez longue pour que les effets transitoires (fluage transitoire, dissolution complémentaire), liés à la variation initiale de pression au début de la phase aient le temps de se dissiper. Des essais antérieurs (Hugout, 1988) ont montré que ces effets transitoires étaient sensibles pendant une quinzaine de jours ; chaque phase dure donc quelques mois.

Il est essentiel, pendant un tel essai, de pouvoir distinguer la percolation de la saumure à travers les parois de la caverne (qui nous intéresse) des fuites éventuelles de liquide par les parois du puits, ou en tête de puits (qui sont des parasites). On sait, de par l'expérience acquise lors des essais d'étanchéité des stockages d'hydrocarbures, que des fuites dans le puits sont possibles ; les essais, obligatoires dans de nombreux pays, ont donné lieu à une abondante littérature. On a perfectionné un dispositif proposé par Diamond et al. (1993). Le puits est équipé d'un tube central (figure 2) dont la section est $S = 21,1$ L·m⁻¹ ; il délimite, avec le cuvelage métallique cimenté aux terrains, un espace annulaire. Dès le 20 mars 1997, l'espace annulaire est rempli de fioul jusqu'à une profondeur de 864 m, où la section est $\Sigma = 5,7$ L·m⁻¹. On a complété le dispositif en injectant, après le 20 novembre 1997, un peu

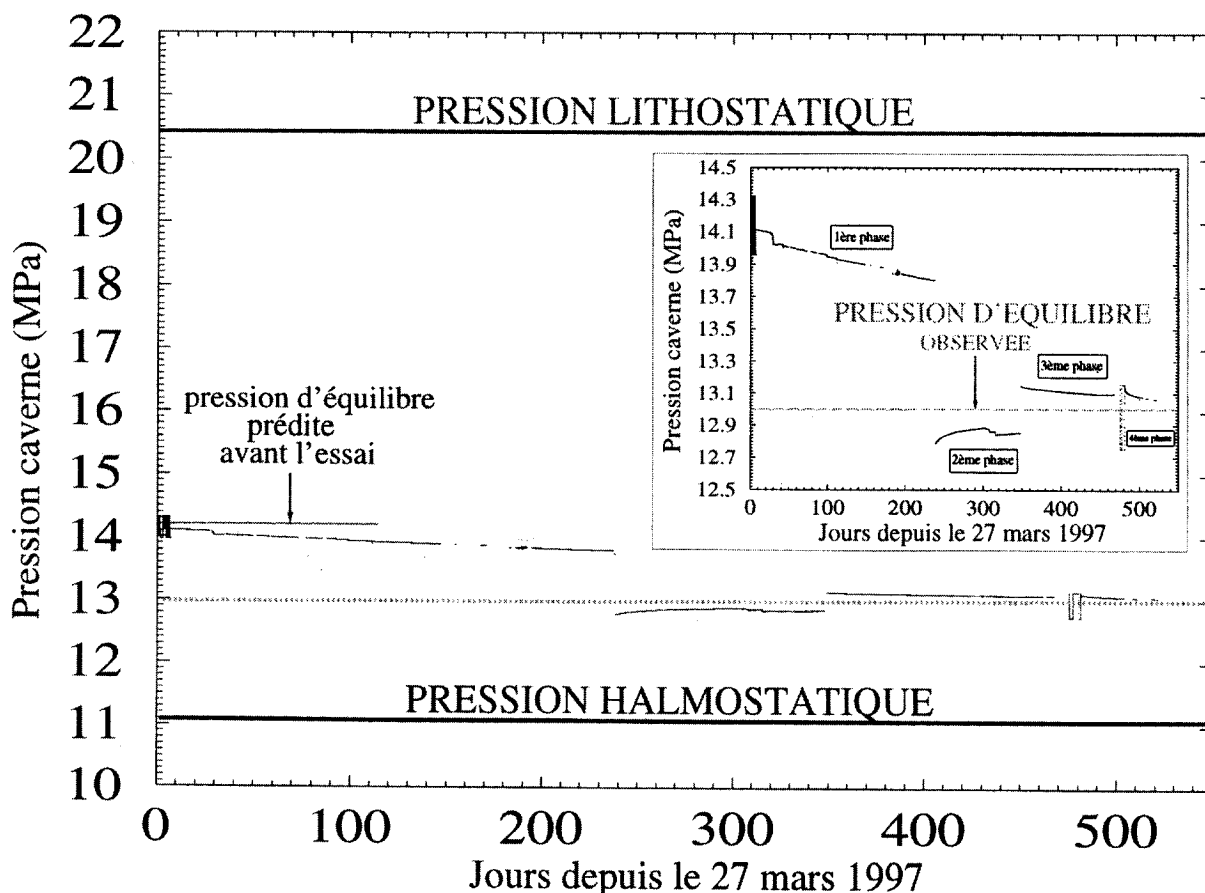


Figure 1. Évolution de la pression moyenne (à 950 m de profondeur) dans la caverne au cours de l'essai.

Evolution of the average cavern pressure (at a 950 m depth) during the test.

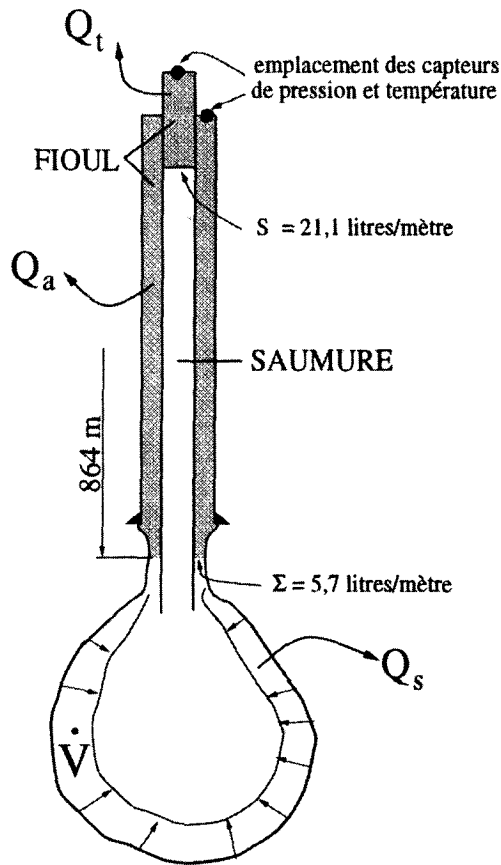


Figure 2. Dispositif expérimental (le puits et la caverne ne sont pas à l'échelle). Trois types de fuites sont possibles. La pression d'équilibre est atteinte, quand le débit de fuite (Q_s) équilibre la vitesse de fluage (\dot{V}).

Experimental system. Three kinds of leaks are to be considered. Equilibrium is reached when brine outflow (Q_s) equals cavern volume loss rate (\dot{V}).

de fioul au sommet du tube central rempli de saumure. Ainsi, compte tenu de l'écart de densité entre la saumure ($\rho_s = 1\,200\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$) et le fioul ($\rho_f = 850\text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$) une fuite de la saumure (Q_s) de la caverne, une fuite du fioul de l'annulaire à travers le cuvelage cimenté (Q_a), et une fuite du fioul du tube central par la tête de puits (Q_t) ont des effets distincts sur l'évolution des deux pressions mesurées en tête de puits, dans l'espace annulaire et dans le tube central respectivement. Si les débits sortants sont positifs ($Q > 0$) et qu'on note $\dot{V} < 0$ la perte de volume de la caverne par fluage [formule (2)], alors :

$$\begin{cases} \dot{P}_a = - (Q_s + Q_a + Q_t + \dot{V}) / (\beta V) - Q_a (\rho_s - \rho_f) g / \Sigma \\ \dot{P}_t = - (Q_s + Q_a + Q_t + \dot{V}) / (\beta V) - Q_t (\rho_s - \rho_f) g / S \end{cases} \quad (5)$$

où P_a et P_t sont les pressions en tête de puits dans l'annulaire et le tube central respectivement. La figure 3 représente, à titre d'exemple, les évolutions de la pression dans l'annulaire (P_a) et le tube central (P_t) mesurées en tête de puits entre les jours 112 et 146 (comptés après le début de

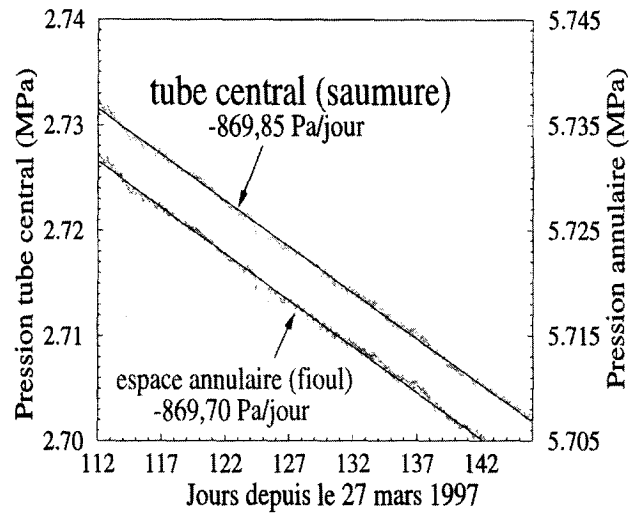


Figure 3. Évolution des pressions en tête pendant la 1^{ère} phase.

Well-head pressures evolution during stage 1.

l'essai). Les pentes moyennes (et les courbes elles-mêmes) sont pratiquement parallèles, soit $\dot{P}_a = \dot{P}_t = -870,7\text{ Pa}\cdot\text{j}^{-1}$, soit une perte apparente de saumure de $Q_s + \dot{V} = -\beta V \dot{P}_a = 2,6\text{ L}\cdot\text{j}^{-1}$ (hormis la fuite qui est compensée par le fluage). L'écart entre les deux pentes est inférieur à $|\dot{P}_a - \dot{P}_t| = 0,2\text{ Pa}\cdot\text{j}^{-1}$, de sorte que la fuite éventuelle de fioul $|Q_a + Q_t|$ est très inférieure au millilitre par jour. Cette méthode de séparation de l'origine des fuites présente une résolution meilleure, de plusieurs ordres de grandeur, que celle pratiquée dans les essais industriels courants d'étanchéité, en raison de trois facteurs : la faible section des tubes au niveau des interfaces ; la durée de l'essai ; la résolution des capteurs de pression (de l'ordre de 0,5 kPa). Les petites fluctuations de la pression autour de la pente moyenne, observables sur la figure 3, peuvent être imputées aux effets des marées terrestres (période : 12 h 25 min, amplitude des déformations : 10^{-8} – 10^{-7}) et aux fluctuations diurnes de la température. Une fuite de fioul est effectivement survenue en tête de puits au jour 293 ; très significativement, elle a été détectée par le suivi quotidien de l'évolution des pressions, avant d'être confirmée par l'observation visuelle de la tête de puits.

Il était nécessaire d'effectuer des mesures redondantes des pressions. Les deux capteurs de tête de puits déjà cités étaient doublés de capteurs plus robustes et moins sensibles ; de plus, la pression était mesurée dans la caverne à une profondeur de 925 m. Les mesures sont cohérentes entre elles et les résultats donnés dans la suite sont relatifs aux capteurs les plus sensibles, placés en tête de puits.

4. Résultats de l'essai

L'essai a comporté 4 phases principales.

– Du jour 1 (27 mars 1997) au jour 238, la pression, initialement égale à 14,12 MPa (à 950 m de profondeur) décroît avec une vitesse sensiblement égale à $-0,9\text{ kPa}\cdot\text{j}^{-1}$,

soit un débit apparent de saumure de $2,7 \text{ L}\cdot\text{j}^{-1}$ (en fait $5,2 \text{ L}\cdot\text{j}^{-1}$ au total, partiellement compensés par $2,5 \text{ L}\cdot\text{j}^{-1}$ de fluage, si on accepte la loi de fluage de Pouya, 1991).

– Au jour 239, on décomprime la caverne de 1 MPa, portant la pression à 12,8 MPa (et on injecte du fioul dans le tube central, comme indiqué plus haut). La vitesse initiale d'accroissement de pression est $+6 \text{ kPa}\cdot\text{j}^{-1}$, puis elle diminue jusqu'à $+0,6 \text{ kPa}\cdot\text{j}^{-1}$. Une fuite, rapidement réparée, survient au jour 293. Ultérieurement, jusqu'au jour 345, la pente est de $+0,32 \text{ kPa}\cdot\text{j}^{-1}$.

– Au jour 349 (10 mars 1998), on accroît la pression dans la caverne de 0,3 MPa, jusqu'à atteindre la valeur de 13,14 MPa. Jusqu'au jour 446, la pression chute de $-0,44 \text{ kPa}$ par jour en moyenne.

– Du jour 446 au jour 550, on a effectué divers mouvements de fluides dans la caverne fermée. Pendant une vingtaine de jours, la pression dans la caverne, inférieure à 12,5 MPa, croît ; puis, pendant une plus longue période, cette pression, supérieure à 13,1 MPa, décroît au cours du temps.

5. Conclusions

L'essai conduit sur la caverne Ez53 montre que la pression dans la caverne se stabilise naturellement à une valeur d'équilibre, à 950 m de profondeur, de $13 \pm 0,1 \text{ MPa}$, supérieure à la pression dans une cavité

ouverte (pression *halmostatique*, ou 11,2 MPa), mais sensiblement inférieure à la pression lithostatique (20,5 MPa). L'équilibre que définit cette pression résulte des actions opposées du fluage du sel (qui réduit lentement le volume de la caverne) et de la perméation de la saumure à travers les parois de la caverne (qui réduit le volume de la saumure contenue dans la caverne). Si on estime que le fluage du sel d'Étrez est bien décrit par la loi proposée par Pouya (1991), qui a été vérifiée in situ au cours d'un essai à caverne ouverte (donc avec une pression de caverne proche de celle qui règne pendant l'essai décrit), il est logique de réviser l'estimation proposée par Durup pour la perméabilité mesurée dans un puits (1994) et de suggérer une valeur de $K = 2 \cdot 10^{-19} \text{ m}^2$ calculée au moyen de la formule (4), avec $\dot{P}_i = 0$. La valeur donnée suppose que le massif, très peu perméable, obéisse à la loi de Darcy. Cette perméabilité, relative à une cavité d'une cinquantaine de mètres de haut, est une moyenne de la perméabilité du sel et des roches peu solubles qu'il contient (5 % à 10 % du volume total), notamment l'anhydrite présente en bancs métriques ou décimétriques. Les variations de volume de la caverne et de son contenu sont alors de l'ordre de $1,4 \text{ L}\cdot\text{j}^{-1}$, soit $0,7 \cdot 10^{-4} \text{ L}\cdot\text{an}^{-1}$, en les rapportant au volume total de la caverne. Le scénario d'évolution à long terme qu'on peut en déduire est une fermeture progressive de la caverne, étalée sur plusieurs milliers d'années, accompagnée d'une diffusion, dans le massif de sel, de la saumure qu'elle contient. Ce scénario rassurant méritera d'être validé par des analyses ultérieures.

Remerciements. Les auteurs remercient les personnels de la station d'Étrez de Gaz de France et du laboratoire de mécanique des solides, qui ont contribué à la réussite de l'essai.

6. Références

- Aubertin M. et Hardy R.H. 1997. In : *Proc. 4th Conf. Mech. Beh. of Salt*, Trans Tech Pub., Clausthal-Zellerfeld, Germany, 658 p.
- Bérest P., Ghoreychi M., Hardy R.H. et Langer M. 1996. In : *Proc. 3rd Conf. Mech. Beh. of Salt*, Trans Tech Pub., Clausthal-Zellerfeld, Germany, 621 p.
- Bérest P., Brouard B., Bergues J., Frelat J. et Durup G. 1997. Salt caverns and the compressibility factor, In : *Proc. SMRI Fall Meeting*, El Paso, 29–48
- Bérest P., Brouard B. et Durup G. 1998. Abandon des cavités salines, *Rev. Fr. Géotech.*, 82, 23–36
- Brouard B. 1998. Sur le comportement des cavités salines. Étude théorique et expérimentation in situ, *Thèse*, École polytechnique, 254 p.
- Brouard B. et Bérest P. 1998. A tentative classification of salts according to their creep properties, in : *Proc. SMRI Spring Meeting*, New Orleans, 18–38
- Charpentier J.-P. 1988. Creep of rock salt at elevated temperature, in : *Proc. 2nd Conf. Mech. Beh. of Salt*, Trans Tech Pub., Clausthal-Zellerfeld, Germany, 131–136
- Diamond H.W., Bertram B.M., French P.S., Petrick G.D., Schumacher M.J. et Smith J.B. 1993. Detecting very small casing leaks using the water-brine interface method, in : *Proc. 7th Symp. on Salt*, Science Publishers B.V., Amsterdam, Vol. I, 363–368
- Durup J.G. 1994. Long term tests for tightness evaluations with brine and gas in salt, in : *Proc. SMRI Fall Meeting*, Hannover
- Hardy R.H. et Langer M. 1984. In : *Proc. 1st Conf. Mech. Beh. of Salt*, Trans Tech Pub., Clausthal-Zellerfeld, Germany, 901 p.
- Hardy R.H. et Langer M. 1988. In : *Proc. 2nd Conf. Mech. Beh. of Salt*, Trans Tech Pub., Clausthal-Zellerfeld, Germany, 781 p.
- Hugout B. 1988. Mechanical behavior of salt cavities – in situ tests – model for calculating the cavity volume evolution, in : *Proc. 2nd Conf. Mech. Beh. of Salt*, Trans Tech Pub., Clausthal-Zellerfeld, Germany, 291–310
- Le Guen C. 1991. Mesure de la perméabilité de roches très peu perméables et étude de son évolution sous sollicitations thermomécaniques, *Thèse*, École nationale des ponts-et-chaussées
- Pouya A. 1991. Correlation between mechanical behaviour and petrological properties of rock salt, in : Roegiers J.C. (ed.), *Proc. 32nd US Symp. Rock Mech.*, 385–392