

Essai d'abandon d'une caverne dans le sel

An abandonment test on a solution-mined cavern
Ein Feldversuch zum Endverschluss einer soltechnisch hergestellten Kaverne

P.BEREST, J.BERGUES, B.BROUARD, Laboratoire de Mécanique des Solides, Ecole Polytechnique, France
J.G.DURUP & B.GUERBER, Gaz de France, La Plaine Saint Denis, France

RÉSUMÉ: On a réalisé un essai in situ pour chercher la valeur d'équilibre à laquelle se stabilise la pression de la saumure contenue dans une cavité souterraine fermée. L'équilibre résulte de l'action du fluage du massif de sel et de la perméation de la saumure. Sa valeur est sensiblement inférieure à la pression lithostatique, ce qui exclut un risque de fracturation naturelle.

ABSTRACT: A test has been performed on a deep brine-filled cavern, whose objective was to measure the equilibrium pressure reached when the cavern is closed. Such an equilibrium is reached when salt mass creep, which leads to cavern shrinkage, balances the permeation of brine through the cavern wall. This pressure is significantly smaller than the lithostatic pressure at cavern depth, alleviating any natural fracturation risk.

ZUSAMMENFASSUNG: Es wurde ein Feldversuch an einer tiefliegenden solegefüllten Kaverne durchgeführt mit der Zielsetzung, den Gleichgewichtsdruck nach dem Verschießen der Kaverne zu messen. Ein solches Gleichgewicht wird erreicht, wenn das Kriechen des Steinsalzgebirges, das zu einer Volumenverringeringung der Kaverne führt, dem Infiltrationsvolumen von Sole durch die Kavernenwand entspricht. Der sich einstellend Druck ist erheblich geringer als der lithostatische Druck an die Kavernentiefe, würde die Gefahr des Aufreißen des Gebirges vermindern.

EXTENDED SUMMARY

When a brine-filled salt cavern is sealed and abandoned, its pressure builds up due to two main phenomena (Bérest *et al.* 1979):

- (i) thermal expansion of the brine; and
- (ii) cavern creep.

The former is by far the predominant phenomenon during a period of several years or dozens of years (depending on the cavern size). When thermal expansion can be disregarded, cavern creep leads to cavern shrinkage, at which point pressure builds up and, in turn, slows the cavern convergence rate, which becomes very small when brine pressure is close to lithostatic pressure (Wallner & Paar 1997).

With the possible exception of very deep caverns, the balance between cavern pressure and lithostatic pressure will only be achieved after several centuries. Due to the density difference between brine and rock salt, only an average balance can be achieved: in a high cavern, brine pressure will exceed lithostatic pressure by a significant amount at the cavern top (Wallner 1988). Fears have been expressed that this excess will lead to rock fracturing and/or a severe increase of rock permeability — in either case, leading to a large amount of brine seepage.

Theoretical considerations prove that this situation can be alleviated, provided that the salt exhibits (even very small) some permeability to brine.

In order to determine the effect of salt permeability on cavern pressure build-up, Gaz de France and Ecole Polytechnique, supported by the Solution Mining Research Institute (SMRI), have performed an in-situ test. The Ez53 cavern of the Etrez site in France was selected for this test. In Spring 1982, the relatively small cavern (7500 m³) was leached out in a bedded salt formation at an average depth of 950 meters. In 1996 a temperature measurement showed that thermal equilibrium had been reached (see Figure 1)

in this cavern, whose mechanical and hydrological properties were determined in several previous in-situ tests.

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 to be determined in situ by a step-by-step approach. First (see Figure 5), cavern pressure was submitted to a pressure slightly lower than the predicted equilibrium value (14.2 MPa), resulting in a slow pressure decrease from March 27, 1997 (day 1) to November 20, 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 November 20, 1997 (day 238) to March 10, 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 March 10, 1998 (day 348) to June 16, 1998 (day 446).

From June 16, 1998 (day 446) to September 18, 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 smaller than 12.5 MPa (days 446 to 468) pressure change rate is positive; when cavern pressure is larger than 13.1 MPa (days 481 to 540), pressure change rate is negative.

To correctly interpret these results, 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. Accurate measurements of the differential pressure evolution (between the annular and tubing pressures at the well head, see Figure 3) then allowed determination of fuel-oil/brine interface movement. Any brine leak from the cavern leads to a parallel evolution of these two pressures; any fuel-oil leak from the well leads to a differential evolution of the two pressures. This system has proven to be extremely

effective. For instance between days 112 to 146 the two (pressure versus time) curves are almost perfectly parallel (Fig. 4), which proves that no or extremely small leaks from the well exist during this period.

Test results prove that, for the Ez53 cavern, cavern creep and brine seepage balance when the cavern pressure is $13 \text{ MPa} \pm 0.1 \text{ MPa}$, a figure far below the lithostatic pressure of 20.5 MPa (Fig. 5). The estimated yearly brine seepage is 1.4 m^3 , or 0.02% of the cavern volume, and the average cavern permeability is $K = 2.10^{-19} \text{ m}^2$.

This conclusion is a significant breakthrough in understanding the long-term behavior of sealed caverns: due to brine percolation through cavern walls, pressure in an abandoned salt cavern does not reach lithostatic pressure.

1 PRESENTATION

L'article concerne l'abandon des cavernes profondes (300 m - 2500 m) réalisées par dissolution dans des massifs de sel. Il existe dans le monde plusieurs milliers de cavernes de ce type, utilisées pour la production de saumure ou le stockage des hydrocarbures. La plupart seront abandonnées après avoir été remplies de saumure ; dans certains contextes hydrogéologiques, cette dernière est un polluant potentiel. De plus on a envisagé d'utiliser ces cavernes pour enfouir des eaux tritiées (Bérest *et al.* 1997) ou, à bien plus large échelle, certains résidus de l'exploitation pétrolière, notamment au Texas (Tomasko *et al.* 1997). Le Solution Mining Research Institute, qui rassemble les exploitants de telles cavernes, a placé le problème de leur abandon au centre de son programme de recherche.

La discussion doit tenir compte des spécificités de chaque site, mais il est possible de poser une problématique générale (Bérest *et al.* 1998). La pression du fluide contenu dans une caverne fermée augmente au cours du temps. Dans les premières années qui suivent la fermeture, le réchauffement de la saumure et l'expansion qui l'accompagne sont la cause majeure de l'accroissement de pression ; ce phénomène a été souvent observé (Bérest *et al.* 1979; You *et al.* 1994) et il peut être facilement modélisé (Ehgartner & Linn 1994, Bérest *et al.* 1996a). Ses effets peuvent conduire à une fracturation du massif ; mais ils décroissent au cours du temps quand on se rapproche de l'équilibre thermique. On peut les éviter par différents procédés, dont le plus simple est d'attendre que l'équilibre thermique soit atteint avant de fermer la caverne, ce qui peut être assez long. En revanche les effets du fluage de la cavité sont durables et ne peuvent être évités ; avec une vitesse lentement décroissante, la pression moyenne du fluide tend vers la valeur moyenne de la pression lithostatique au niveau de la caverne. Wallner & Paar (1997) ont montré que ce phénomène pouvait être étalé sur plusieurs siècles ; Wallner (1988) avait noté que, si la caverne est assez haute, il ne peut exister d'équilibre mécanique statique ultime, en raison de l'écart de densité entre le sel et la saumure qui sont deux fluides. L'ouverture d'une fracture au toit de la cavité est alors possible ; elle peut conduire à la pollution des aquifères sus-jacents. Ce scénario a été réactualisé par les résultats de Peach (1991) et de Fokker & Kenter (1993) qui ont montré, au laboratoire, que la perméabilité du sel augmentait de plusieurs ordres de grandeur quand il est au contact de fluides dont la pression est proche de la contrainte moyenne à laquelle le sel est soumis.

Bérest *et al.* (1998) ont proposé une idée plus simple : quoique très petite, la perméabilité naturelle du sel intact suffit à empêcher la pression de la saumure dans la caverne d'atteindre la pression lithostatique. De ce fait, la fracturation est évitée et remplacée par une diffusion progressive de la saumure dans le massif de sel. Le présent article est consacré à un essai visant à vérifier cette idée.

2 OBJECTIFS DE L'ESSAI

La conduite d'un tel essai exige qu'on dispose d'une cavité ayant atteint l'équilibre thermique ; la plupart des essais à cavité fermée (ou des essais de mesure du débit expulsé par une caverne ouverte) décrits dans la littérature sont

largement influencés par le rééquilibrage thermique et donc inexploitable du point de vue d'une analyse fine du fluage. Compte tenu de l'expression du temps caractéristique de la conduction thermique autour d'une cavité dans le sel

$$t_c \text{ (ans)} = V^{2/3} \text{ (m}^3\text{)} / (4k) = V^{2/3} \text{ (m}^3\text{)} / 400$$

où V est le volume de la caverne (en m^3), $k = 100 \text{ m}^2/\text{an}$ la diffusivité thermique du sel gemme, il faut disposer d'une caverne petite et/ou lessivée depuis longtemps. La caverne Ez53 du site d'Étrez, lessivée au printemps 1982 (quinze ans avant l'essai effectué), d'un volume de l'ordre de 7500 m^3 et d'une profondeur de 930 mètres environ, correspondait à cette description (pour cette caverne, $t_c \approx 1 \text{ an}$). Son histoire thermique dans l'année qui a suivi le lessivage est bien connue (Hugout 1988) ; un profil de température avait été relevé en février 1996 (Fig. 1) ; il établit que le réchauffement est achevé. Dès lors le comportement de la caverne fermée est régi par le fluage et la percolation de la saumure.

Le fluage du sel suit des lois complexes, qu'on approche souvent par une loi dite de Norton-Hoff dont l'expression uniaxiale est :

$$\dot{\epsilon} = A \exp(-Q/\mathcal{R}T) \sigma^n$$

Le sel de la couche supérieure d'Étrez dans laquelle a été réalisée la cavité a été étudié au laboratoire par Charpentier (1984) et par Pouya (1991). Ce dernier propose les valeurs suivantes des constantes du modèle :

$$A = 0,64 \text{ MPa}^{-n} \text{ an}^{-1} \quad Q/\mathcal{R} = 4100 \text{ K} \quad n = 3,1$$

On ne peut attendre de telles estimations un pouvoir prédictif qui soit meilleur que l'ordre de grandeur ; néanmoins, appliqués à une caverne sphérique placée dans les conditions d'Ez53, les paramètres proposés par Pouya donnent (Brouard & Bérest 1998) une vitesse de convergence de 3.10^{-4} par an, en très bon accord avec les observations du débit expulsé à la tête de puits par la caverne ouverte, effectuées avant l'essai et décrites dans Brouard (1998).

La perméabilité du sel du site d'Étrez a été étudiée au laboratoire par Le Guen (1991) qui trouve pour certains échantillons une perméabilité intrinsèque $K \approx 10^{-21} \text{ m}^2$. Durup (1994) a réalisé un essai d'injection sur le puits Ez58 du site et a mis en évidence une perméabilité moyenne de $K \approx 6.10^{-20} \text{ m}^2$. Conformément aux lois d'effet d'échelle, on peut attendre une perméabilité encore plus grande dans une cavité de grande dimension.

On peut chercher la pression théorique pour laquelle la convergence de fluage stationnaire équilibre exactement le débit filtrant dans le massif du fait de la perméabilité du sel. En supposant que la cavité présente une forme proche de celle d'une sphère de rayon a ; on rend égaux la convergence de la caverne calculée en régime stationnaire et le débit de saumure à travers la paroi en régime permanent, dans l'hypothèse de l'écoulement de Darcy

$$\begin{aligned} Q &= V \dot{\epsilon} = 4\pi a^2 \frac{K}{\mu} \frac{P - P_o}{a} \\ &= \left(\frac{4\pi a^3}{3} \right) \frac{3}{2} \left[\frac{3}{2n} (P_\infty - P) \right]^n A \exp \left(\frac{-Q}{\mathcal{R}T} \right) \end{aligned} \quad (1)$$

où K , A , Q/\mathcal{R} , n ont les valeurs citées plus haut proposées par Durup (1994) et Pouya (1991) ; μ est la viscosité dynamique de la saumure ($\mu = 1,2.10^{-3} \text{ Pa.s}$), a est le rayon équivalent de la cavité ($a=12 \text{ m}$), P_o est la pression de pore naturelle qui est égale, selon les essais de Durup (1994) à la pression *halmostatique*, ou pression obtenue quand le puits est rempli de saumure saturée (dans notre cas $P_o \approx 11,2 \text{ MPa}$ à 950 mètres), P_∞ est la pression lithostatique (soit $P_\infty \approx 20,5 \text{ MPa}$ à 950 mètres) et $\dot{\epsilon}$ désigne la vitesse de convergence par fluage de la caverne. La pression d'équilibre recherchée est P ; le calcul montre qu'elle est de l'ordre de $14,2 \text{ MPa}$ à 950 mètres, au milieu de la cavité ; on verra que cette valeur prédite s'est avérée un peu surestimée.

La formule théorique (1) montre que la pression d'équilibre P est très proche de la pression de pore P_o quand la dimension de la cavité est petite, et s'approche de la pression lithostatique P_∞ dans le cas d'une très grande cavité. Toutefois (sauf bien entendu si la perméabilité est très petite, disons $K < 10^{-21} \text{ m}^2$ pour fixer les idées) la pression d'équilibre P reste sensiblement inférieure à la pression lithostatique dans tous les cas d'application réalistes. On a illustré sur la figure 2 le cas d'une cavité sphérique de rayon $a=12$ mètres à 950 mètres de profondeur ; ce cas est très proche de celui de la cavité Ez53. Pour un cavité de rayon différent b , le même abaque peut être utilisé en considérant une perméabilité fictive $K' = K a^2/b^2$. Ainsi pour une cavité de 500.000 m^3 ($b = 40$ mètres) on peut trouver la pression d'équilibre en divisant la perméabilité réelle par 16: la pression d'équilibre sera sensiblement plus élevée dans une grande cavité que dans une petite.

Le résultat est d'une très grande importance pratique puisqu'il signifie que le risque de fracturation naturelle de la cavité ne doit plus être pris en compte : on lui substitue une diffusion sans doute beaucoup plus répartie dans l'espace de la saumure expulsée de la cavité à vitesse très lente.

3 PRINCIPE DE L'ESSAI

La stratégie de l'essai consiste à "essayer" successivement des pressions dans la cavité, en encadrant progressivement la pression d'équilibre, qui n'est pas exactement connue à l'origine. Si la pression imposée au début d'une phase de l'essai tend à croître (respectivement à décroître) durablement, on la réajuste après un certain temps pour essayer une pression plus élevée (respectivement moins élevée). Chaque phase doit être suffisamment longue pour que les effets transitoires (fluage transitoire, dissolution complémentaire) liés à la variation de pression au début de la phase aient le temps de s'effacer. Des essais antérieurs (Hugout 1988) ont montré que ces effets étaient très sensibles pendant une quinzaine de jours ; on a donc effectué des phases de plusieurs mois.

Un problème essentiel dans ce type d'essai est de pouvoir distinguer la percolation de la saumure à travers les parois de la cavité (qu'on veut observer) et les fuites éventuelles de liquide dans le puits ou en tête de puits (qui sont des parasites). De ce point de vue, on a pu profiter de l'expérience acquise dans la conduite d'essais d'étanchéité des cuvelages de puits, qui sont obligatoires dans beaucoup de pays (Crotogino 1994, Bérest *et al.* 1996b) pour les stockages d'hydrocarbures. On a perfectionné le dispositif proposé par Diamond *et al.* (1993) : le puits est équipé d'un tube central (Fig. 3 ; βV est la compressibilité de la cavité et $\dot{\epsilon}$ sa vitesse de déformation) ; depuis le 20 mars 1997, l'espace annulaire a été rempli de fioul jusqu'à une profondeur de 864 m, où l'aire de la section est de l'ordre de 5,7 litres par mètre ; on a complété ce dispositif le 10 mars 1998 en plaçant aussi (sur une hauteur plus petite) du fioul dans le tube central, dont la section est de l'ordre de 21,1 litres par mètre. Compte tenu de l'écart de densité entre la saumure et le fioul, une fuite de fioul (au contraire d'une percolation de saumure qui ne modifie pas cet écart) engendre une variation de l'écart des pressions mesurées en tête de puits respectivement dans l'annulaire (P_a) et dans le tube central (P_t). La figure 4 illustre cette idée : on a représenté les évolutions des deux côtés de la tête de puits, entre les jours 112 et 146 : la chute moyenne de pression est de 870 Pascals par jour, soit, si la compressibilité de la cavité est $\beta V = 3 \text{ m}^3/\text{MPa}$ (Brouard 1998), une perte apparente de saumure de 2,6 litres par jour (en fait il s'agit de la différence entre la perte vraie de saumure et la réduction de volume de la cavité par fluage). L'écart des deux pentes est inférieur à $\Delta \dot{P} = 0,2 \text{ Pa}$ par jour, de sorte que dans un annulaire de $\Sigma = 5,7$ litres par mètre, le débit maximal de fuite de fioul est $Q_a = \Sigma \Delta \dot{P} / (\rho_s - \rho_f) g \approx 0,3 \text{ ml/jour}$. Ce système de contrôle de l'absence de fuite est donc d'une très grande résolution. Les fluctuations observables sur les

deux courbes sont imputables aux variations journalières de température et aux effets des marées terrestres.

Il était nécessaire d'assurer des mesures redondantes de la pression : un capteur de pression de fond était disposé dans la cavité (à -925 mètres) et quatre capteurs de pression (deux du côté de l'annulaire, deux du côté du tube central) en tête de puits. Les deux capteurs de résolution 10 hPa (utilisés pour la figure 4) se sont révélés les plus utiles.

L'essai a comporté quatre phases (voir Fig. 5) :

- du jour 1 (27 mars 1997) au jour 238 (19 novembre 1997) la pression chute avec une vitesse moyenne sensiblement constante de -0,9 kPa par jour, soit une fuite apparente de 2,7 litres par jour, la pression en tête dans le tube central en saumure étant initialement de 2,92 MPa (14,13 MPa dans la cavité à 950 m de profondeur). Dans cette phase, la percolation l'emporte sur le fluage, qui doit être de 2,5 litres par jour environ, si on retient l'exposant $n = 3,1$ proposé par Pouya (1991) pour la loi de fluage, et les valeurs du fluage observées quand la cavité était ouverte (Brouard 1998).
- au jour 239 on décomprime la cavité de 1 MPa et on injecte un peu de fioul dans le tube central pour compléter le système de détection de fuite. Dans la période qui va jusqu'au jour 250 l'accroissement moyen de pression est de +6,1 kPa par jour puis la vitesse diminue régulièrement, elle est de +0,6 kPa par jour en moyenne entre les jours 275 et 290, le fluage l'emporte sur la percolation. Il s'est alors produit une fuite de fioul en tête de puits, vers le 25 janvier 1998, qui a d'abord été détectée par la lecture des courbes de pression, puis observée sur le site et réparée. Entre les jours 320 et 345 l'accroissement moyen de pression est de 0,32 kPa par jour.
- au jour 349 on injecte un peu de fioul dans le tube central pour augmenter la pression dans la cavité de 0,3 MPa. Jusqu'au jour 446 la pression moyenne chute de -0,44 kPa par jour en moyenne.
- du jour 446 au jour 540, on a effectué divers mouvements de fluide. Pendant une vingtaine de jours la pression dans la cavité, inférieure à 12,5 MPa, croît ; puis pendant une plus longue période la pression dans la cavité, supérieure à 13,1 MPa, décroît au cours du temps.

4 CONCLUSIONS

L'essai conduit sur la cavité Ez53 (essai "à cavité fermée" ou "shut-in pressure test") montre que la pression dans la cavité se stabilise naturellement à une valeur de $13 \text{ MPa} \pm 0,1 \text{ MPa}$ à 950 mètres de profondeur, soit sensiblement moins que la pression lithostatique à la profondeur de la cavité qui est 20,5 MPa à 950 mètres. L'équilibre que définit cette pression résulte des actions opposées du fluage du sel, qui réduit le volume de la cavité, et de la percolation de la saumure dans le massif, qui réduit le volume de fluide dans la cavité. On peut estimer que l'intensité du fluage est bien estimée en extrapolant la loi proposée par Pouya (1991) qui a été vérifiée in situ pour une pression interne à peine plus basse. Il est alors logique de conclure que la perméabilité intrinsèque globale de la cavité est sensiblement plus grande que celle estimée dans le même site sur un puits (Durup 1994) et qu'elle est de l'ordre de $K = 2.10^{-19} \text{ m}^2$: les variations de volume de la cavité et de son contenu sont alors de l'ordre de $1,4 \text{ m}^3$ par an, soit environ 2.10^{-4} par an en rapportant au volume total de la cavité. Une erreur significative d'interprétation (fuite du fioul contenu dans le puits) peut être écartée en raison du dispositif utilisé. L'essai sur cette cavité confirme la nécessité de prendre en compte la perméabilité du sel dans l'analyse de l'abandon des cavernes.

Remerciements

Cet essai a été financé par le Solution Mining Research Institute (S.M.R.I.). Les auteurs remercient le personnel de la station d'Étrez du Gaz de France et Yves Le Bras, Vincent De Greef, de l'École Polytechnique.

REFERENCES

- Bérest P., Ledoux E., Legait B. & de Marsily G. 1979. Effets thermiques dans les cavités en couches salifères, Proc. 4ème Congrès S.I.M.R., Montreux, Vol. 1, 31-35.
- Bérest P., Brouard B. & Durup J.G. 1996a. Behavior of sealed solution-mined caverns, Proc. 4th Conf. Mech. Beh. of Salt, Trans Tech Pub., 511-524.
- Bérest P., Bergues J., Brouard B., Durup J.G. & Guerber B. 1996b. A tentative evaluation of the M.I.T., S.M.R.I. Spring Meeting, Houston, USA.
- Bérest P., Brouard B., Beugin F. & Goldberg J. 1997. Storage of tritiated waters in salt caverns, Proc. S.M.R.I. Fall Meeting, 49-63, El Paso, USA.
- Bérest P., Brouard B. & Durup J.G. 1998. Abandon des cavités salines, Rev. Fr. Géotech., n°82, 23-36.
- Brouard B. & Bérest P. 1998. A tentative classification of salts according to their creep properties, Proc. S.M.R.I. Spring Meeting, 18-21, New Orleans.
- Brouard B. 1998. Sur le comportement des cavités salines, Etude théorique et expérimentation in situ, Thèse de l'École Polytechnique, France.
- Charpentier J.P. 1988. Creep of rock salt at elevated temperature, Proc. 2nd Conf. Mech. Beh. of Salt, Trans Tech Pub., 131-136.
- Crotogino F.R. 1994. External well mechanical integrity testing / performance, data evaluation and assesment, Report for the Solution Mining Research Institute.
- Diamond H.W., Bertram B.M., French P.S., Petrick G.D., Schumacher M.J. & Smith J.B. 1993. Detecting very small casing

- leaks using the water-brine interface method, Proc. 7th Symp. on Salt, Vol. I, 363-368, Science Publishers B.V., Amsterdam.
- Durup J.G. 1994. Long term tests for tightness evaluations with brine and gas in salt, Proc. S.M.R.I. Fall Meeting, Hannover.
- Ehgartner B.L. & Linn J.K. 1994. Mechanical behavior of sealed SPR caverns, Proc. S.M.R.I. Fall Meeting, Houston.
- Fokker P.A. & Kenter C.J. 1993. The effect of fluid pressures on the mechanical stability of (rock) salt, Proc. 7th. Symp. on Salt, Vol. 1, 75-82, Elsevier Science, Amsterdam.
- Hugout B. 1988. Mechanical behavior of salt cavities -in situ tests- model for calculating the cavity volume evolution, Proc. 2nd Conf. Mech. Beh. of Salt, Trans Tech Pub., 291-310.
- Hunsche U. 1991. Volume change and energy dissipation in rock salt during triaxial failure test, Proc. Mech. Creep Brittle Materials 2, Leicester, Ed. Cocks and Ponter, Elsevier, 172-182.
- Le Guen C. 1991. Mesure de la perméabilité de roches très peu perméables et étude de son évolution sous sollicitations thermomécaniques, Thèse de l'École des Ponts et Chaussées, France.
- Peach C.J. 1991. Influence of deformation on the fluid transport properties of salt rocks, PhD Thesis, University of Utrecht, Netherlands.
- Pouya A. 1991. Correlation between mechanical behaviour and petrological properties of rock salt, Proc. 32th US Symp. Rock Mech., J.C Roegiers ed., 385-392.
- Tomasko D., Elcock D., Veil J. & Caudle D. 1997. Risk analyses for disposing of nonhazardous oil field wastes in salt caverns, Argonne National Laboratory, U.S. Department of Energy, Contract W-31-109-ENG-38.
- Wallner M. 1988. Frac-pressure risk for cavities in rock salt, Proc. 2nd Conf. Mech. Beh. of Salt, Hardy and Langer ed., Trans Tech Pub., 645-658.
- Wallner M. & Paar W.A. 1997. Risk of progressive pressure build up in a sealed cavity, Proc. S.M.R.I. Fall Meeting, 177-188, El Paso.
- You T., Maisons C. & Valette M. 1994. Experimental procedure for the closure of the brine production caverns on the "saline de Vauvert" site, Proc. S.M.R.I. Fall Meeting, Hannover.

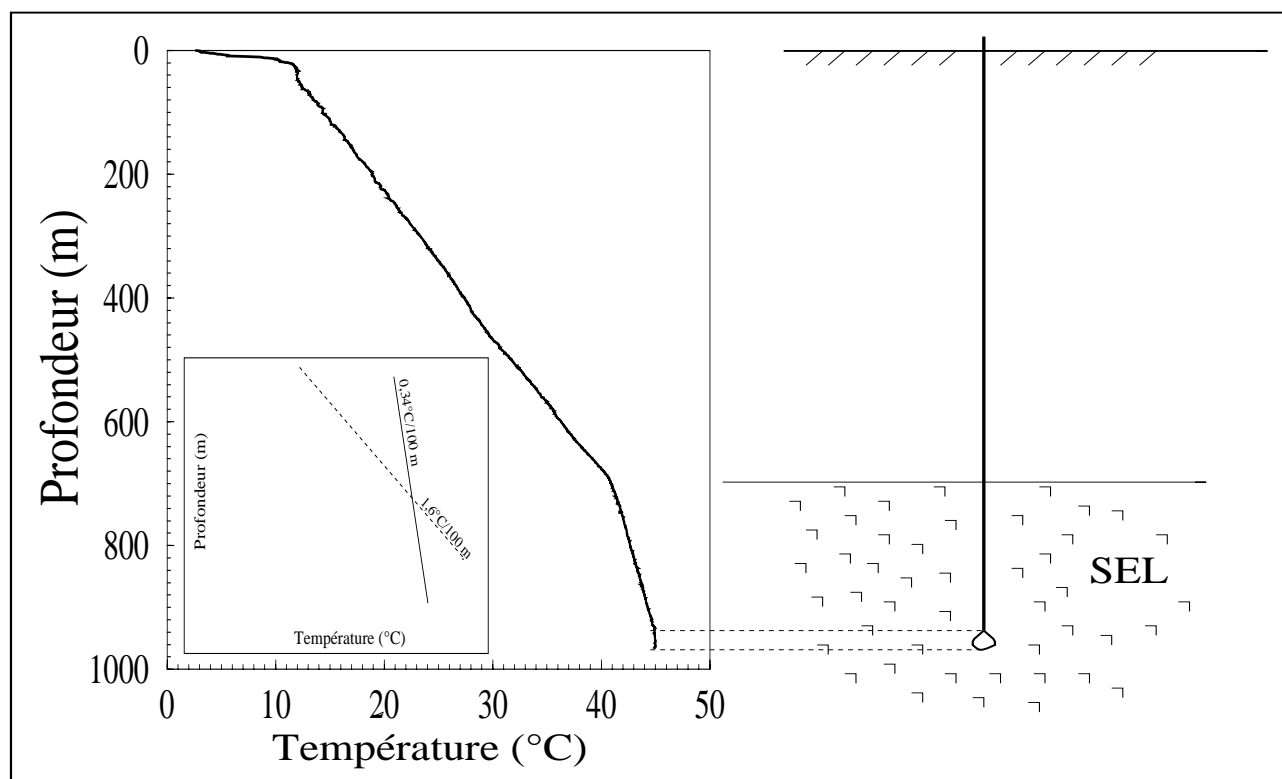


Figure 1: Profil de température mesuré dans le puits et la cavité Ez53 le 22 février 1996.

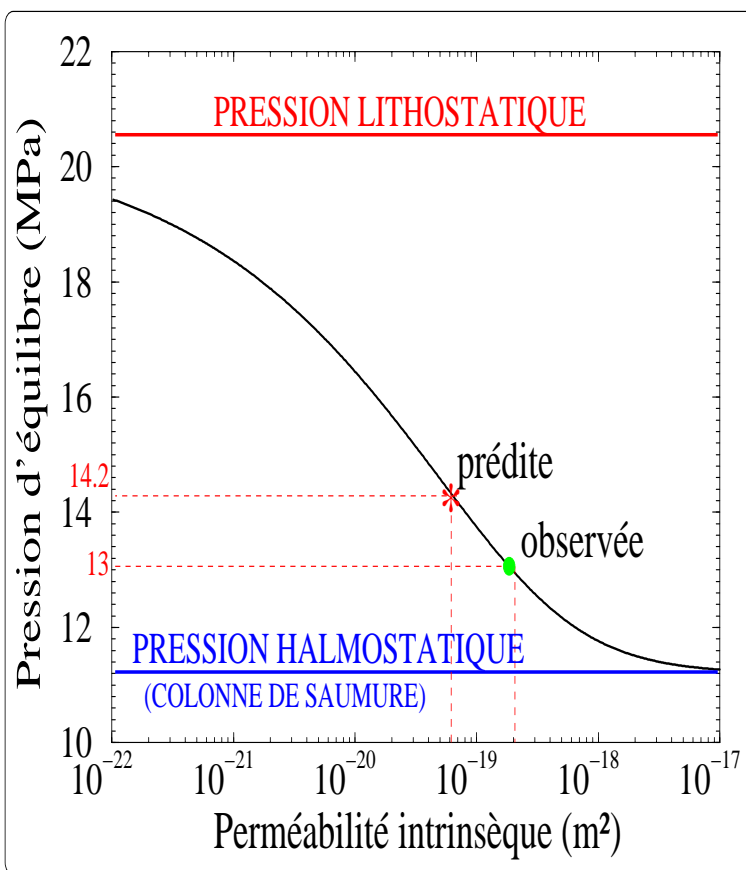


Figure 2: Pressions d'équilibre théorique et observée.

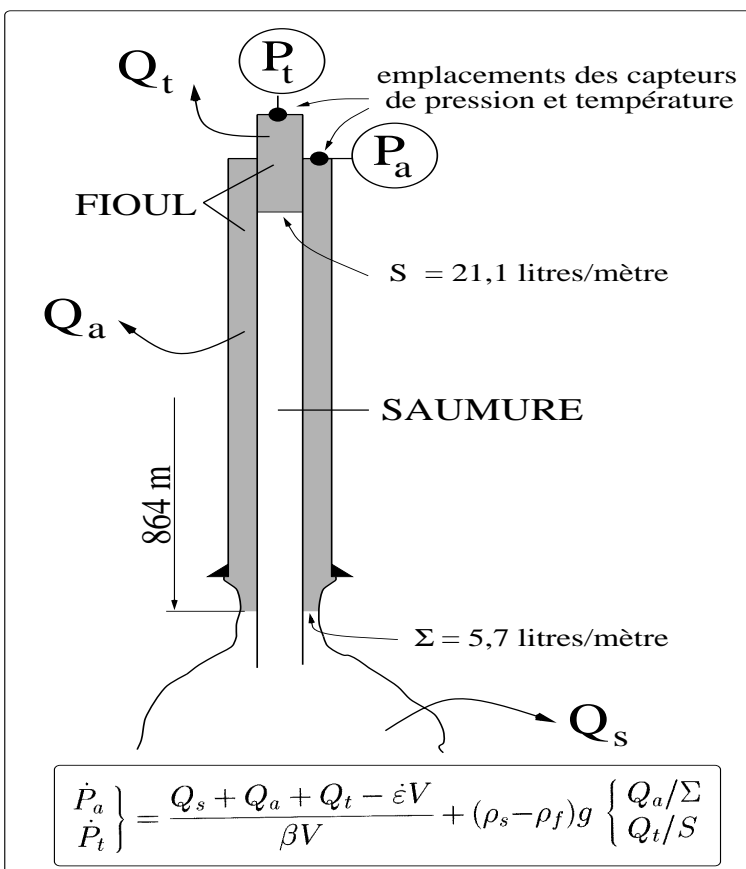


Figure 3: Dispositif de l'essai.

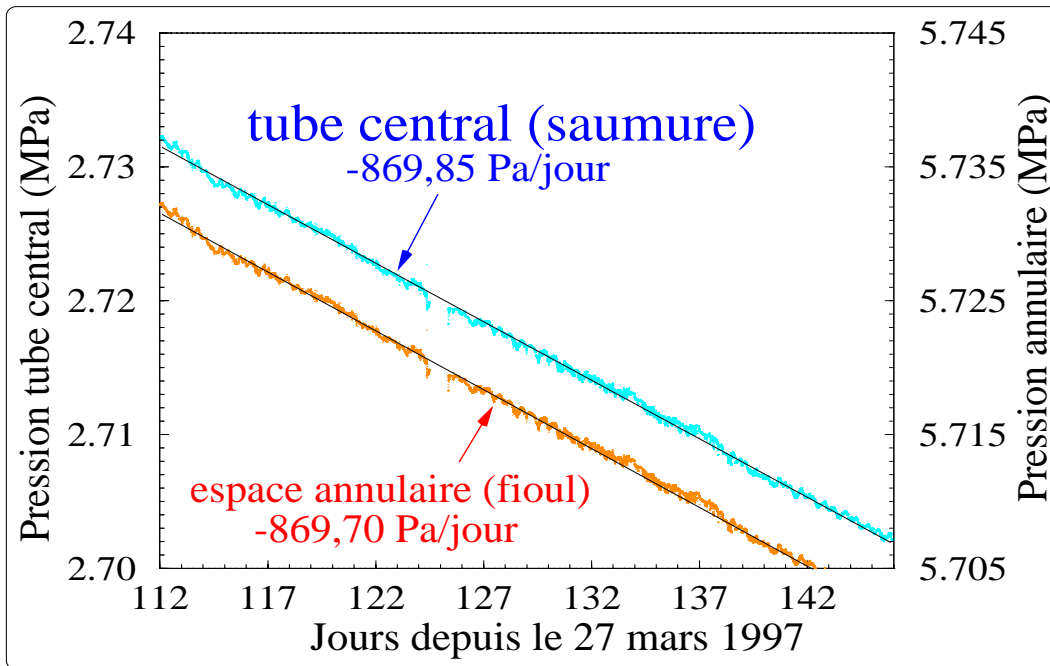


Figure 4: Evolution des pressions en tête de puits pendant la première phase de l'essai.

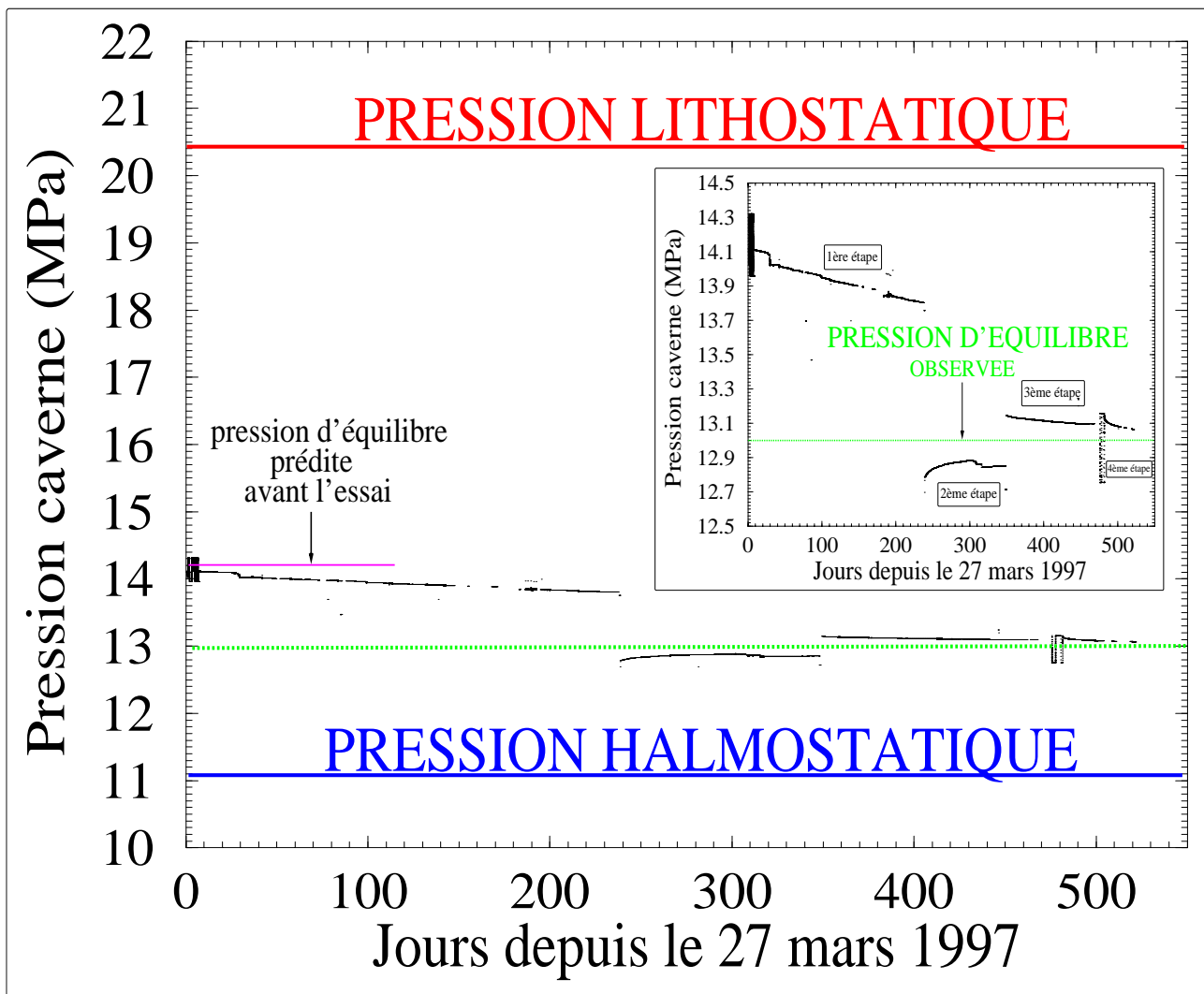


Figure 5: Evolution de la pression dans la cavenerie (à 950 m de profondeur) pendant l'essai.