

EFFETS MÉCANIQUES D'UNE DÉTENTE DANS UNE CAVERNE DE STOCKAGE DE GAZ

MECHANICAL EFFECTS OF A DEPRESSURIZATION IN A GAS STORAGE CAVERN

Hippolyte DJIZANNE¹, Pierre BÉREST¹, Benoît BROUARD²

1 LMS Ecole Polytechnique ParisTech, Paris, France

2 Brouard Consulting, Paris, France.

RÉSUMÉ — Les modes récents d'exploitation des cavités de stockage impliquent des détentes rapides accompagnées d'un refroidissement significatif du gaz. On discute l'évolution de la température et les contraintes qu'elle induit à la paroi des cavernes. Celles-ci sont souvent des tractions, mais les fractures qui se forment ne tendent pas à former facilement des écailles susceptibles de se détacher de la paroi.

ABSTRACT — Storage of natural gas in salt caverns was developed mainly for seasonal storage. The needs of energy traders are changing toward faster depressurization. Temperature and stresses changes generated by gas cooling are discussed. Tensile stresses often are created at cavern wall and fracturing develops. However, as fractures are perpendicular to the cavern wall, spalls are not prone to break off from the cavern wall.

1. Introduction

Il existe dans le monde quelques milliers de cavités de stockage de gaz naturel dans le sel, dont une petite centaine en France. Dans le passé, lorsque le gaz était soutiré dans la caverne, les vitesses de diminution de la pression étaient relativement lentes (inférieures à 1 MPa par jour), de sorte que le refroidissement lié à la détente était limité. Du fait de la dérégulation du marché du gaz naturel, certains stockages sont maintenant exploités de manière plus agressive et on envisage aujourd'hui des vitesses bien plus rapides, avec un déstockage complet de la caverne en une dizaine de jours.

Dans cet article, il est montré qu'on peut calculer précisément les variations de températures consécutives à une détente. Le refroidissement du gaz peut engendrer à la paroi des cavernes des contraintes de traction dont on propose une estimation analytique. Ces contraintes peuvent entraîner l'ouverture des fractures. Toutefois, les blocs délimités par les fractures restent liés au massif, et, au contraire du cas d'un échauffement du gaz, un écaillage généralisé est peu probable.

2. Retour d'expérience

Une exploitation raisonnée des cavités salines vise plusieurs objectifs : éviter une vitesse trop rapide de fermeture des cavernes par fluage du sel ; éviter des

affaissements de surface trop importants ; éviter les chutes de blocs du toit ou des parois ; éviter la dégradation de l'étanchéité du puits. On dispose d'un large retour d'expérience relatif à des cas de fermeture rapide et/ou d'écaillage. Aucun n'est à proprement parler catastrophique ; ils concernent le plus souvent des cavernes profondes (jusqu'à 2000 m) dans lesquelles la pression du gaz à stock bas était réduite.

Un exemple caractéristique est fourni par une des cavités du stockage de Markham au Texas (Cole, 2002). Ces cavités étaient cyclées en pression de 8 à 10 fois par an (un mode d'exploitation que l'on peut considérer comme « agressif ») avec des vitesses de soutirage 3 à 4 fois plus rapides que les vitesses d'injection. La cavité #5 avait été mise en gaz en 2005. Sa profondeur initiale était comprise entre 1075 m et 1771 m. En 2002, une mesure du niveau de la saumure résiduelle laissée au fond montrait qu'il était monté de 128 m. Le volume utile de la caverne avait diminué de 5%, mais un volume équivalent était tombé au fond sous forme d'écaillés de sel détachées des parois (Figure 1).



Figure 1. Profils verticaux superposés de la caverne #5 de Markham mesurés en mai 1995 et janvier 2002. Noter la montée du fond et les ruptures en paroi.

3. Thermodynamique des cavernes

Dans la suite on se préoccupe principalement des effets thermiques et mécaniques d'une détente rapide consécutive à un soutirage important de gaz

3.1. Pression et température

Dans une cavité au repos, la pression est pratiquement uniforme car la masse volumique du gaz est faible (de 50 à 200 kg/m³). Dans une formation salifère, compte tenu de la conductivité thermique élevée du sel, $K_R = 5$ à 6 W/m/°C, le gradient géothermique est de l'ordre de $G = 1,5$ à 1,8 °C/100 m. La température est donc plus élevée au fond qu'au sommet de la cavité, et on peut attendre un brassage convectif du fluide contenu dans la cavité. L'apparition de la convection nécessite toutefois que le gradient de température soit supérieur à un seuil appelé gradient adiabatique (G_{ad}) (Landau et Lifchitz, 1971). Dans le cas d'un gaz, $G_{ad} = g / C^P$ où $g = 10$ m/s² est l'accélération de la pesanteur, et C^P est la chaleur spécifique massique à pression constante, $C^P = 2345$ J/kg/°C et $G_{ad} = 0,4$ °C/100 m pour le gaz naturel et, pour l'air, $C^P = 1000$ J/kg/°C et $G_{ad} = 1$ °C/100 : on a $G > G_{ad}$ et l'apparition de la convection naturelle est certaine dans une cavité laissée longtemps au repos. Diverses circonstances peuvent toutefois inhiber la convection : injection de gaz chaud au sommet de la cavité, soutirage rapide suivi d'un refroidissement d'ensemble, présence de saumure résiduelle froide au fond de la cavité.

L'analyse dimensionnelle suggère que la convection est gouvernée par les nombres de Prandtl ($Pr = \nu/k$, ν : viscosité cinématique, k : diffusivité thermique du gaz) et de Grashof ($Gr = gaa^4/\nu^2$ où a est la dimension caractéristique de la cavité). Comme a est en général très grand (plusieurs dizaines de mètres) le nombre de Grashof est aussi très grand et, dès lors que la convection peut apparaître, elle est en général très efficace. Par la suite on suppose donc qu'on peut parler de la température (absolue) et de la pression (absolue) du fluide dans la cavité.

3.2. Equation de l'énergie

La première loi de la thermodynamique indique que la variation d'énergie interne du gaz est égale à la puissance des efforts intérieurs plus l'apport de chaleur extérieur auquel il faut ajouter, dans le cas d'une injection, l'apport d'enthalpie massique du gaz injecté. L'expression de cette loi se simplifie grandement si l'on suppose que les variations relatives de volume de la cavité sont négligeables (elles sont de l'ordre de $(\Delta V / V) / \Delta P \approx 1,5 \cdot 10^{-4} / \text{MPa}$) et que le gaz est parfait, $P = \rho r T$:

$$mC^V \dot{T} - \dot{m}rT = \int_{\partial\Omega} K_R \frac{\partial T_R}{\partial n} da + \langle \dot{m} \rangle C^P (T^{inj} - T) \quad (1)$$

Où m est la masse du gaz, C^V sa chaleur spécifique massique à volume constant, T_R la température dans le massif, $\langle \dot{m} \rangle = 0$ est la partie positive de \dot{m} . Le flux de chaleur provenant du massif qui apparaît au second membre peut être exprimé par une convolution ; par exemple, dans le cas d'une cavité parfaitement sphérique de rayon a , on a dans le cas d'un soutirage ($\langle \dot{m} \rangle = 0$) :

$$mC^V \dot{T} - \dot{m}rT = 4\pi a K_R \int_0^t \dot{T}(\tau) (1 + \sqrt{t_c / (t - \tau)}) d\tau \quad (2)$$

dont la solution peut être calculée numériquement ; $K_R = 100$ m²/an est la diffusivité thermique du sel. Sur la Figure 2 on a montré un calcul effectué par les auteurs pour

le cas d'un historique de soutirage un peu complexe proposé par Crossley (1996). L'accord avec les mesures est très bon, pour les évolutions de pression et de température calculés, mais pour obtenir ce résultat il faut ajuster le rapport surface/volume car la forme de la cavité est loin d'être sphérique.

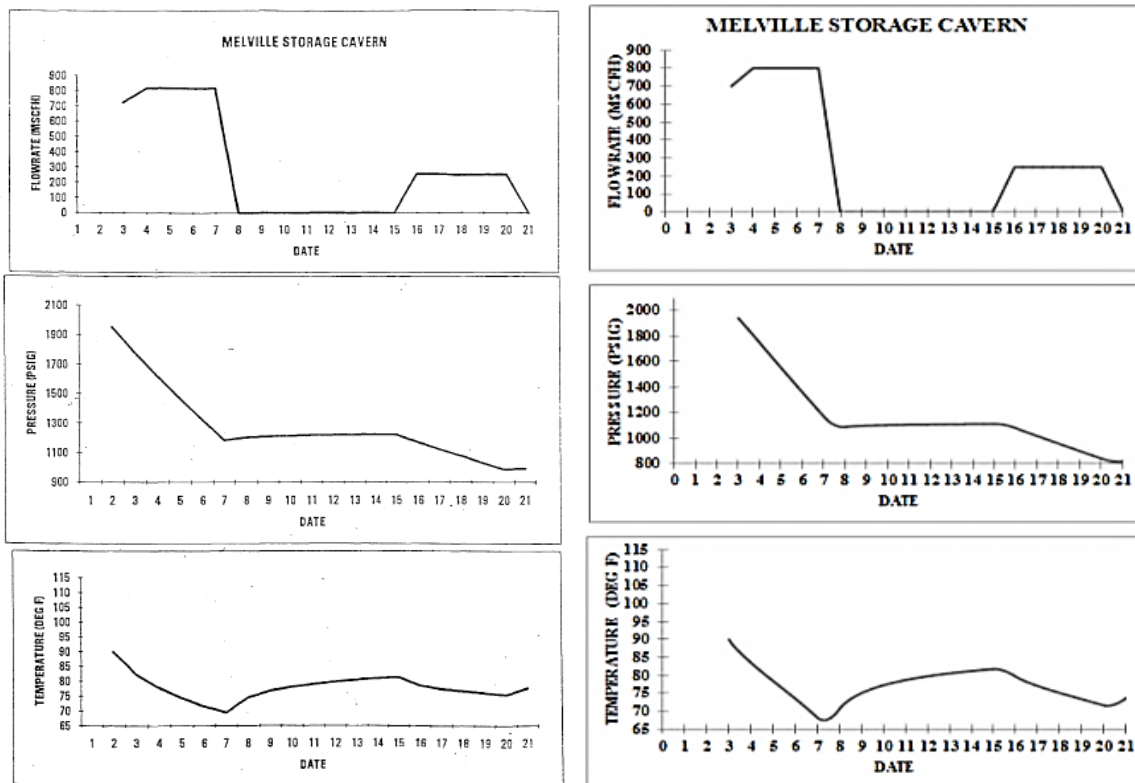


Figure 2. Caverne de Melville (évolutions mesurée – à gauche – et calculée par les auteurs – à droite) : débit soutiré, évolution de la pression et de la température de fond (Crossley, 1996).

4. Contraintes thermo-élastiques

4.1. Ordre de grandeur des contraintes thermo-élastiques

On peut calculer l'évolution de la température dans la totalité du massif en prenant l'équation (2) comme condition à la limite pour le problème de la conduction de la chaleur dans le massif. De façon générale la pénétration de la perturbation thermique dans le massif est lente, puisqu'elle est de l'ordre de $d = (k_R t)^{1/2}$ où t est la durée d'application d'un écart de température à la paroi, soit $d = 2,5$ m après $t = 1$ mois. Le refroidissement du massif engendre des contraintes thermiques. Si ΔT est l'écart de température (par rapport à la température naturelle du massif) appliqué à la paroi, l'ordre de grandeur des contraintes tangentielles qui apparaissent à la paroi est $\sigma_t = -E\alpha_R\Delta T/(1-\nu)$ où $E = 18000$ MPa est le module élastique de la roche, $\alpha_R = 4.10^{-5}/^{\circ}C$ son coefficient de dilatation thermique et $\nu = 0,25$ son coefficient de Poisson. Dans le cas d'un refroidissement ($\Delta T < 0$) la contrainte tangentielle est une traction et vaut $\sigma/\Delta T = 1$ MPa/ $^{\circ}C$. C'est une valeur très élevée

car la résistance à la traction du sel n'est typiquement que de 1 à 2 MPa. L'apparition de fractures est probable. On peut l'expliquer comme suit : une mince tranche de sel à la paroi de la caverne est considérablement refroidie, ce qui doit conduire à sa contraction. Il n'y a guère d'obstacle à cette contraction dans la direction normale à la paroi. En revanche, dans les directions tangentiels, cette contraction n'est pas compatible avec l'absence de contraction de la couche sous-jacente de sel qui, pour sa part, n'est pas ou n'est que peu refroidie. L'incompatibilité des déformations engendre des contraintes si grandes qu'elles conduisent à l'ouverture de fractures.

4.2. Echauffement d'un ouvrage souterrain

Il est intéressant de comparer de ce point de vue les cas d'un échauffement et d'un refroidissement. Dans le cas d'un réchauffement ($\Delta T > 0$) on a à la paroi deux contraintes tangentiels de compression élevées et une contrainte normale faible (il est entendu qu'on ne prend pas en compte à ce stade d'éventuelles contraintes préexistantes, seules les contraintes d'origine thermique sont discutées). On est dans le cas de l'*extension* et on peut attendre la formation de (multiples) écailles aplaties, dont la largeur est plusieurs fois plus grande que l'épaisseur, celle-ci étant donnée par la profondeur de la zone dans laquelle la température a augmenté substantiellement et a engendré des contraintes élevées de compression. Après chute des écailles, et dégagement d'une nouvelle surface froide, le processus peut se poursuivre par échauffement de la surface dégagée.

Lee et al., (1982), décrivent le cas d'une galerie souterraine horizontale à North Bay, Ontario, Canada, creusée dans le granite à 150 m de profondeur. Des gaz brûlés d'une centrale thermique souterraine circulaient dans la galerie ; leur température était de 315°C. Après plusieurs mois, la section de la galerie avait augmenté de 100% en raison d'un écaillage intense du toit et des parements "The fracture surfaces appeared to ignore the structure in the rock and to be determined mainly by the pattern of the thermal stress", Lee et al. (1982). On fit circuler les gaz chauds dans un rameau d'essai (0,76 m sur 0,76 m pour une longueur de 3 m). L'écaillage commença pour une température de paroi de 61 °C seulement. Après 8,5 heures de circulation le rameau d'essai avait l'aspect de la Figure 3.



Figure 3. Galerie d'essai à North Bay, Ontario, Canada (Lee et al., 1982).

4.3. Refroidissement d'un ouvrage souterrain

Le refroidissement au contraire engendre des fractures perpendiculaires à la direction de la plus grande traction, donc aussi perpendiculaires à la paroi. La profondeur des fractures est grossièrement égale à la profondeur de la zone dans laquelle la plus grande contrainte est une traction. Il existe une relation entre la profondeur de la fracture et la distance entre deux fractures consécutives. Au début du processus, la température est modifiée sur une épaisseur encore faible et un grand nombre de petites fractures apparaissent dans la zone en traction. Quand la zone froide pénètre plus profondément dans le massif, seul un nombre réduit de fractures continuent à progresser. La Figure 4 illustre un essai effectué par (Dreyer, 1977) dans une petite cavité (2 mètres de haut, 1 mètre de diamètre) créée par dissolution à partir du mur d'une galerie à 600 mètres de profondeur dans une mine de sel. La cavité fut remplie d'azote liquide à une température de -196°C . Les contraintes de traction engendrées étaient considérables, et des fractures ont été créées. À la fin du processus il ne restait que quatre fractures perpendiculaires. Cet exemple est quelque peu extrême car le refroidissement imposé est très grand.

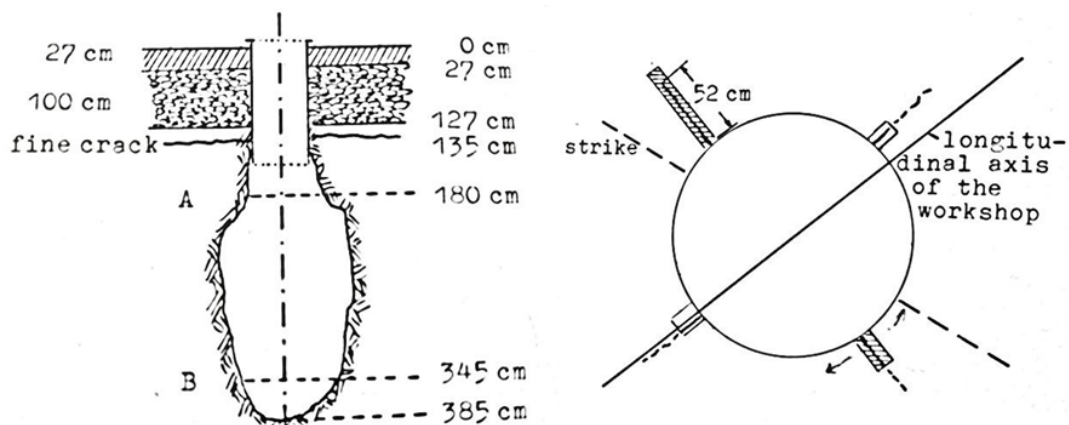


Figure 4. Fractures observées à la fin d'un essai de refroidissement dans une petite cavité créée par dissolution depuis le mur d'une galerie de mine (Dreyer, 1977).

Au contraire du cas du réchauffement, il est difficile que se forment des écailles susceptibles de se détacher des parois. Quand les fractures s'approfondissent, leur nombre diminue, les plaques dont elles déterminent le contour sont donc plus larges et restent solidaires du massif par l'intermédiaire d'une large surface intacte parallèle à la paroi. On peut donc anticiper que les ruptures en traction n'affecteront que des zones particulières déjà enclines à tomber, tels que des hors-profilés (Pellizzaro et al., 2011).

4.4. Evaluation des contraintes globales

L'analyse mécanique doit aussi prendre en compte les contraintes pré-existantes et les contraintes purement mécaniques engendrées par la détente. Les lois de comportement des matériaux étant en général assez complexes, comme d'ailleurs la

forme de la cavité, il faut recourir à des calculs numériques. Toutefois on peut évaluer des ordres de grandeur en considérant le cas d'une cavité cylindrique idéale de rayon a . Supposons que la pression géostatique soit P_∞ et que la cavité ait été très longtemps laissée à la pression P_0 de sorte que la distribution initiale de contraintes soit celle associée au régime stationnaire pour une loi viscoplastique de Norton-Hoff ($\dot{\varepsilon} = A\sigma^n$), $n = 3$ à 6 qui rend bien compte du comportement du sel :

$$\begin{cases} \sigma_{rr}(t = \infty) = -P_\infty + (P_\infty - P_0)(a/r)^{2/n} \\ \sigma_{\theta\theta}(t = \infty) = -P_\infty + (1 - 2/n)(P_\infty - P_0)(a/r)^{2/n} \\ \sigma_{zz}(t = \infty) = -P_\infty + (1 - 1/n)(P_\infty - P_0)(a/r)^{2/n} \end{cases} \quad (3)$$

Le refroidissement du massif à partir de la paroi de la cavité est décrit par la distribution de température $T - T_0 = \theta(r, t) < 0$. Ce refroidissement a été obtenu par une détente du gaz, c'est-à-dire un passage de la pression du gaz de P_0 à $P = P_0 - \Delta P$, $\Delta P > 0$. Le refroidissement et la détente engendrent des contraintes mécaniques additionnelles :

$$\begin{cases} \Delta\sigma_{rr}(r, t) = -(a/r)^2 E\alpha \int_a^r u\theta(u, t)/(1 - \nu) du + \Delta P (a/r)^2 \\ \Delta\sigma_{\theta\theta}(r, t) = +(a/r)^2 E\alpha \int_a^r u\theta(u, t)/(1 - \nu) du - E\alpha\theta(r, t)/(1 - \nu) - \Delta P (a/r)^2 \\ \Delta\sigma_{zz}(r, t) = -E\alpha\theta(r, t)/(1 - \nu) \end{cases} \quad (4)$$

On a évidemment supposé que la détente était extrêmement rapide, de sorte que les contraintes additionnelles (d'origine thermique ou purement mécanique) n'ont pas eu le temps d'engendrer de nouvelles déformations viscoplastiques. À la paroi de la cavité ($r = a$), en sommant (3) et (4), les contraintes prennent la forme :

$$\begin{cases} \sigma_{rr}(t = \infty) = -P_0 + \Delta P \\ \sigma_{\theta\theta}(t = \infty) = -P_\infty + (1 - 2/n)(P_\infty - P_0) - \Delta P - E\alpha\theta(a, t)/(1 - \nu) \\ \sigma_{zz}(t = \infty) = -P_\infty + (1 - 1/n)(P_\infty - P_0) - E\alpha\theta(a, t)/(1 - \nu) \end{cases} \quad (5)$$

Le refroidissement le plus intense est obtenu dans l'hypothèse adiabatique, soit $\Delta P^{ad}/P_0 = [(T_0 + \theta(a, t))/T_0]^{1-1/\gamma}$. On vérifie que les contraintes additionnelles (4) sont positives pour toutes les valeurs vraisemblables des paramètres : l'effet global de la détente est donc bien d'ajouter des contraintes de traction à la paroi. Mais en raison des contraintes initiales (3) la contrainte totale (5) à la paroi n'est pas nécessairement une traction, notamment dans une caverne très profonde pour laquelle la pression géostatique P_∞ peut être particulièrement grande.

On a supposé jusqu'ici que des fractures apparaissent lorsqu'une contrainte tangentielle de traction apparaît à la paroi. On se place ainsi du côté de la sécurité, puisque le sel présente une certaine résistance à la traction (de l'ordre de 1 à 2 MPa). Toutefois, d'un autre point de vue, ce critère peut être trop optimiste. Si l'on

réalise un essai de fracturation hydraulique (ou pneumatique), une fracture apparaît lorsque la contrainte effective à la paroi, c'est-à-dire la somme de la plus grande contrainte compressive (en général négative) plus la pression du fluide, est une traction (CFMR, 2000). Il faut alors ajouter aux contraintes des formules (5) la pression $P_0 - \Delta P$ et l'apparition de la fracturation est bien plus probable.

5. Conclusion

L'exploitation « agressive » des cavernes de stockage de gaz implique des chutes de pression rapides accompagnées d'un refroidissement et de contraintes tangentielles de traction qui peuvent engendrer des fractures. Celles-ci ne sont toutefois pas favorables au développement d'un écaillage généralisé des parois. Des vérifications expérimentales sont en cours.

Remerciements

Ce travail se place dans le double cadre d'une étude effectuée avec Storengy sur le stockage de gaz naturel et de l'action coopérative SACRE financée par l'ANR et consacrée au stockage adiabatique d'air comprimé en cavité saline qui regroupe le LMS, EDF, Geostock et les laboratoires PROMES (Perpignan) et L2EP (Lille).

Références bibliographiques

- CFMR (2000) – Manuel de Mécanique des Roches, coordonné par F. HOMAND et P. DUFFAUT, Tome 1, Presses de l'Ecole des Mines de Paris
- COLE R. (2002). The long Term Effects of High Pressure Natural Gas Storage on Salt Caverns. SMRI Spring Meeting, Banff, Canada, 75-97.
- CROSSLEY N.G (1996). Salt cavern Integrity Evaluation Using Downhole Probes. A Transgas Perspective. SMRI Fall Meeting, Cleveland, Ohio, 21-54.
- DREYER W.E. (1977). Cold and cryogenic storage of petroleum products. Preprints Rock Store 77 conference, 237-249.
- LANDAU L., LIFCHITZ E. (1971). Mécanique des Fluides, Editions MIR, Moscou
- LEE C.F., TSUI K.K, TSAI A. (1982). Thermomechanical response of a disposal vault in a high horizontal stress field. Proc. IRSM Symposium, Aachen, W.Witke ed., Balkema, 961-969.
- PELLIZZARO C., BERGERET G., LEADBETTER A., CHARNAVEL Y. (2011). Thermomechanical behavior of Stublach Gas Storage Caverns. SMRI Fall Meeting, York, UK, 161-178.