

Oscillations anharmoniques dans les puits de cavités souterraines

Pierre BÉREST, Jean BERGUES et Benoît BROUARD

LMS, École Polytechnique, 91128 Palaiseau cedex, France.
E-mail : berest@athena.polytechnique.fr

Résumé. On a observé, à la tête d'un puits d'accès à une cavité souterraine, des oscillations fortement anharmoniques de la pression, engendrées par des arrêts d'injection de fluide. Ces oscillations sont dues à la présence d'une petite poche de gaz, piégée dans la tête de puits, qu'elles permettent de détecter.

Mots clés : cavité / oscillation / anharmonique / stockage souterrain / sel

Anharmonic oscillations in underground cavities

Abstract. *Strongly anharmonic pressure oscillations generated by fluid injection stops have been observed at the well head of an underground cavern. They are due to a small gas pocket, trapped in the well head, whose existence was unknown.*

Keywords: *cavern / oscillation / anharmonic / underground storage / salt*

Abridged English Version

The Carresse site, which belongs to the Elf EAEPF company, has been used for 30 years to store liquified propane. Of the site's four caverns, three are filled with propane, and the fourth one, called SPR3, is filled with saturated brine. A 1995 sonar survey, performed shortly before the test described above, proves that this cavern exhibits a non-convex shape (*fig. 1*). According to the survey, the cavern volume is approximately 4 600 m³, with a casing-shoe depth of 692 meters below ground level and a cavern-bottom depth of 711 meters.

A compressibility test performed in this cavern showed that the compressibility ratio observed during the test was $\beta = 11 \times 10^{-4} \text{ MPa}^{-1}$, instead of $\beta = 4 \times 10^{-4} \text{ MPa}^{-1}$, which is generally observed in similar conditions. It soon became clear that this exceptionally high compressibility was caused by gas coming from the salt formation or from the brine injected in the cavern during leaching and trapped in gas pockets under the bell-shaped parts of the cavern, which are clearly visible on the left and top of *figure 1*. The gas pressure at cavern depth is 8.3 MPa, which means that its isothermal compressibility is $1.2 \times 10^{-1} \text{ MPa}^{-1}$: a very small amount of trapped gas, typically 25 m³, produces a drastic drop in cavern stiffness.

The initial objective of the test was to observe oscillations in the opened cavern: after build-up of a small pressure excess in the closed cavern, opening a well head valve triggers long-period oscillations. This phenomenon can be observed on *figure 3*: 300 s after the beginning of the test, venting triggers short-period stationary quarter-waves, followed by a longer period of oscillation. These phenomena have been described previously (Bérest and Habib, 1983).

Note présentée par André ZAOUL.

Much clearer, but totally unexpected oscillations, are triggered in the closed cavern when the injection pump stops, 100 s after the beginning of the test. These oscillations are anharmonic: crests are spiky and troughs are rounded, resulting in uncommon asymmetric pressure-versus-time curves (*fig. 4*); the period clearly varies with the amplitude. During a second series of tests (*fig. 5*), 700 L of brine were injected in the closed cavern in 100-L steps, triggering anharmonic vibrations whose periods are significantly reduced when the well head pressure increases.

Only the existence of a very compressible non-linear elastic body included in the (cavern plus well) system can be responsible for these unexpected features. The gas pocket trapped in the cavern is not a good candidate – its high pressure (8.3 MPa) makes it a relatively stiff body. A better guess is the existence of a small amount of gas (a few liters) trapped at the well head in the annular space. If so, then even small brine displacements can drastically modify the gas volume and generate non-linear pressure build-up.

If P and h are the gas column pressure and height, respectively, equation (1) can describe the adiabatic gas compression. Equation (2) links the cavern brine displacement (due to interface rise) to cavern pressure change (due to cavern compressibility). Equation (3) is the momentum equation for the brine column in the annular space; some straightforward algebra leads to a non-linear differential equation that allows back-calculation of the gas column height that fits the observed data; the period of the movement, as a function of the kinetic energy, is drawn on *figure 7* for different values of the average gas pressure; the agreement with the data shown in *figure 5* is satisfactory. After the test, the annular space was opened to the atmosphere and gas flew out of the well head.

1. Introduction

Les fluides (saumure, pétrole, gaz, eau...) contenus dans un puits pétrolier, ou dans une caverne souterraine de stockage d'hydrocarbures, présentent une certaine compressibilité. Ces ouvrages sont donc le siège de vibrations naturelles dont les périodes, compte tenu de la dimension des ouvrages, sont de l'ordre de la seconde ou de la dizaine de secondes, et donc très facilement mesurables en tête de puits, à la surface du sol. Les mouvements ainsi observés peuvent apporter une information utile sur des caractéristiques de l'ouvrage qu'il serait difficile d'obtenir autrement. Dans une précédente note (Bérest et Habib, 1983), on avait donné l'exemple d'un tel mouvement dans une caverne souterraine reliée à la surface du sol par un puits de petit diamètre : l'ensemble se comportait comme un résonateur de Helmholtz, dont la période était de l'ordre de la minute. Des systèmes de natures proches ont été discutés par Holzhausen et Gooch (1985) ; une revue d'ensemble est donnée dans Bérest *et al.* (1996).

Dans la présente note, on évoque des oscillations naturelles anharmoniques apparues dans une caverne souterraine.

2. Site de Carresse

Le gisement de sel de Carresse (Pyrénées-Atlantiques) est exploité depuis une trentaine d'années par la société Elf Aquitaine Exploration Production France (EAEPF) pour le stockage souterrain de propane liquéfié dans des cavernes créées par lixivation. Une caverne du site, dite SPR3, ne contient que de la saumure saturée. Un relevé échométrique effectué en avril 1995, quelque temps avant les essais décrits dans cette note, est présenté sur la *figure 1* : la profondeur du sabot du cuvelage du puits est $H = 692$ m sous la surface du sol ; le fond de la caverne a pour profondeur 711 m. Le volume de la caverne mesuré pendant le relevé est $V = 4\,600$ m³ environ. On remarque sur la partie gauche

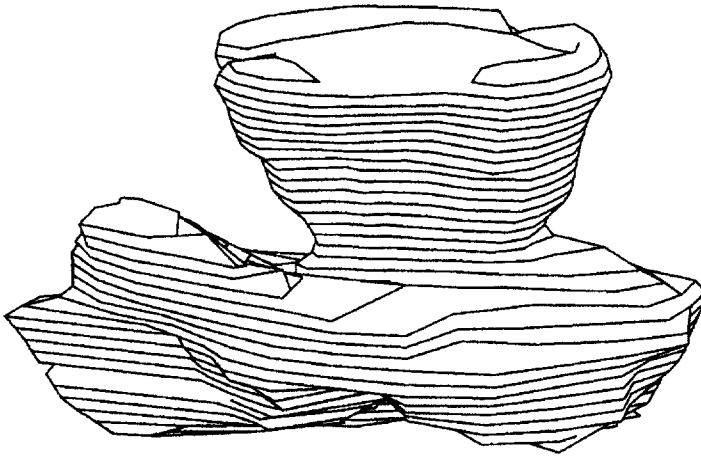


Fig. 1. - Mesure échométrique, cavité SPR3 du site de Carresse.

Fig. 1. - Echo-log survey, SPR3 cavern, Carresse site.

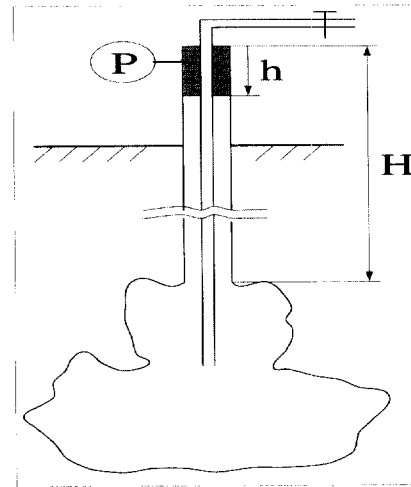


Fig. 2. - Dispositif de l'essai et notations.

Fig. 2. - Test set-up and captions.

de la vue en perspective de la *figure 1* que la cavité présente une excroissance verticale ou « cloche » ; de plus petites cloches sont également apparentes au sommet de la caverne.

3. Anomalie de la compressibilité

On a réalisé un essai de compressibilité au cours duquel on ferme la caverne, puis on relève l'accroissement de pression ΔP provoqué par l'injection d'un volume connu ΔV de saumure. On peut ainsi estimer le coefficient de compressibilité globale β de la caverne, soit $\Delta V = \beta V \Delta P$. Ce coefficient est en général de l'ordre de $\beta = 4.10^{-4} \text{ MPa}^{-1}$ (Boucly, 1980) ; il est la somme du coefficient de compressibilité de la saumure saturée, soit $\beta_s = 2,7.10^{-4} \text{ MPa}^{-1}$, et du coefficient de compressibilité de la caverne elle-même.

Ce fut donc une surprise que d'observer sur cette caverne un coefficient de compressibilité globale de l'ordre de $\beta' = 11.10^{-4} \text{ MPa}^{-1}$ qu'il apparaît raisonnable d'imputer à la présence d'une petite quantité de gaz piégé dans les « cloches ». En effet, soit x la fraction du volume de la caverne occupée par du gaz et p la pression de ce gaz (environ 8,3 MPa, compte tenu de la profondeur de la caverne et de la masse volumique $\rho = 1\,200 \text{ kg m}^{-3}$ de la saumure contenue dans le puits) ; les évolutions du gaz, pendant un essai relativement lent, sont isothermes, de sorte que le coefficient de compressibilité du gaz est $\beta_g = 1/p$ et que le coefficient de compressibilité globale de la caverne est :

$$\beta' = \beta + x(\beta_g - \beta_s)$$

Pour que cette compressibilité atteigne les valeurs observées, il suffit que le gaz occupe une fraction de l'ordre de $x = 0,5 \%$ du volume de la caverne, soit encore une vingtaine de mètres cubes. Ce gaz, qui peut provenir de la formation salifère, ou de la saumure injectée dans la caverne pendant le lessivage, s'est accumulé sous les « cloches » où il est piégé.

4. Résonateur de Helmholtz

Le but initial des essais était de mettre en évidence des oscillations de type « résonateur de Helmholtz », décrites dans Bérest et Habib (1983). A cette fin, l'espace annulaire (*fig. 2*) était équipé d'un capteur de pression, de résolution 250 Pa ; la période d'acquisition était de 0,05 s.

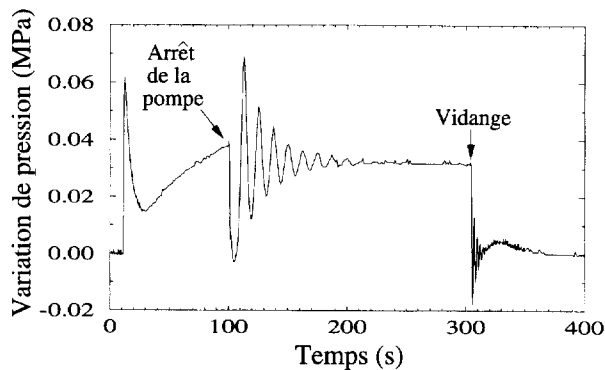


Fig. 3. – Oscillations de la pression, cavité SPR3 du site de Carresse, essai 0.

Fig. 3. – Pressure oscillations, SPR3 cavern, Carresse site, test 0.

Au début de l'essai, qu'on appellera essai 0, on a fermé la caverne, l'origine des pressions mesurées est prise à cet instant ; pour accroître la pression d'une fraction de mégapascal, on a injecté de la saumure ; puis on a ouvert rapidement une vanne pour créer un coup de bélier et déclencher le fonctionnement de la cavité, qui est laissée ouverte à l'atmosphère, en résonateur de Helmholtz. Sur la *figure 3*, ce déclenchement (« vidange ») est effectué à peu près 300 s après le début de l'essai. On observe très nettement des vibrations de courte période (environ 2,5 s), qui sont des quarts d'onde stationnaires dans le puits, engendrés par le coup de bélier initial (Bérest *et al.*, 1996) ; ensuite l'oscillation du résonateur est manifestement amortie rapidement (la période pour un tel mouvement serait, en négligeant l'amortissement, $T = 2\pi\sqrt{\beta V \rho H / \Sigma}$ (Bérest et Habib, 1983) soit, avec $\beta = 11.10^{-4} \text{ MPa}^{-1}$, $V \approx 4\,600 \text{ m}^3$, $H = 692 \text{ m}$, $\rho = 1\,200 \text{ kg m}^{-3}$ et $\Sigma \approx 81 \text{ cm}^2$ (la section du tube central), une période de $T \approx 145 \text{ s}$).

5. Oscillations déclenchées à l'arrêt d'injection

La *figure 3* met en évidence un autre type d'oscillations, beaucoup plus nettes, qui sont déclenchées par l'arrêt de la pompe d'injection de saumure, à peu près 100 s après le début de l'essai 0. Ces oscillations sont nettement anharmoniques, comme le confirment les résultats d'un essai ultérieur d'amplitude plus grande (*fig. 4*) ; l'origine des pressions est la même que sur la *fig. 3*) : dans la moitié supérieure, la courbe est beaucoup plus « pointue » que dans la moitié inférieure ; cet effet devient moins net quand l'amplitude du signal diminue, tandis que dans le même temps la « période » diminue.

Pendant une seconde série d'essais notés de 1 à 7 (*fig. 5*), on a injecté 700 L de saumure par phases de 100 L. Après chaque phase d'injection (qui dure quelques secondes) on laisse la caverne au repos pendant une centaine de secondes. Pendant chacune de ces périodes de repos, on observe de nouveau des vibrations très nettement anharmoniques ; toutefois leur « période », estimée sur les premières oscillations, est considérablement plus courte lors des derniers essais effectués que lors des premiers (on passe typiquement de 15 à 8 s).

6. Modélisation des oscillations anharmoniques

Ces phénomènes ne peuvent être expliqués que par la présence, à l'intérieur du système puits-caverne, d'un corps extrêmement compressible. Le gaz contenu dans les poches de la caverne sous pression relativement forte (8,3 MPa) est trop raide ; il faut donc supposer que le sommet de l'espace annulaire contient un petit volume de gaz, provenant de la caverne, et dont l'origine est sans doute la

Fig. 4. – Oscillations anharmoniques de la pression, essai 5.

Fig. 4. – Anharmonic oscillations of pressure, test 5.

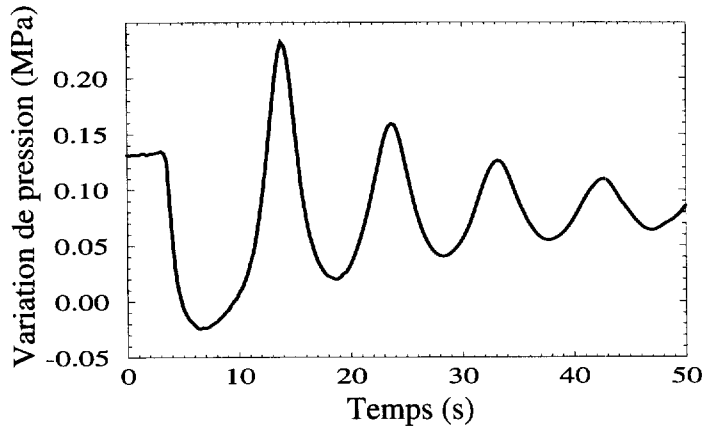
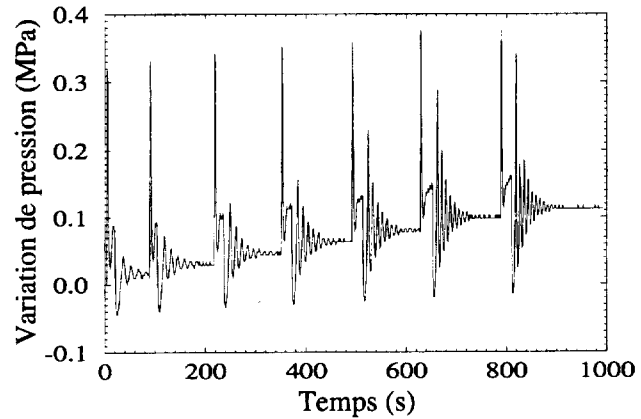


Fig. 5. – Injection de saumure par paliers, cavité SPR3 du site de Carresse.

Fig. 5. – Step-by-step brine injection, SPR3 cavern, Carresse site.



même que celle du gaz piégé dans les poches au fond de la caverne. Lorsque celle-ci est ouverte à l'atmosphère par l'intermédiaire du tube central, la pression de ce gaz est proche de la pression atmosphérique. Les coups de bélier provoqués par un arrêt d'injection, même s'ils ne provoquent que des déplacements de quelques litres de saumure, suffisent à modifier substantiellement le volume du gaz contenu dans la tête de puits, dont le comportement mécanique ne peut plus être décrit par une approximation linéaire.

On note h_1 , la hauteur au repos de la poche de gaz piégée en tête de puits lorsque la cavité est fermée ; de même, P_1 est la pression (absolue) au repos du gaz piégé. On note h et P , les mêmes quantités au cours de l'évolution de l'interface gaz-saumure dans l'espace annulaire. Pour des mouvements dont la période est d'une dizaine de secondes, il est raisonnable de considérer que le comportement du gaz est isentropique :

$$Ph^\gamma = P_1 h_1^\gamma \quad (1)$$

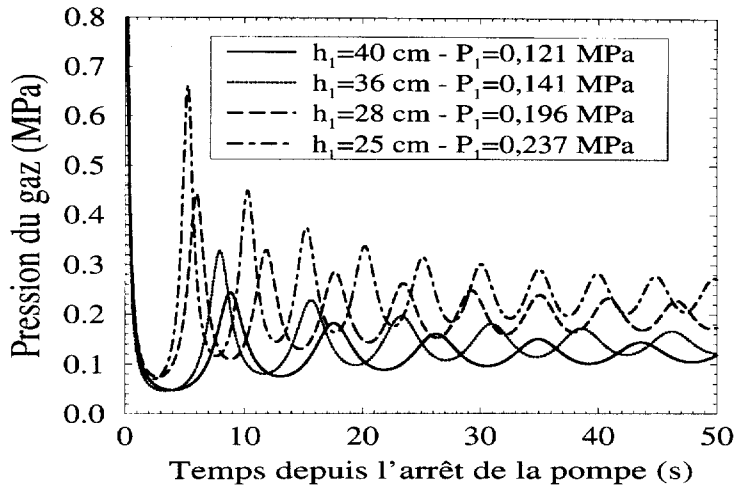


Fig. 6. – Simulation numérique des oscillations anharmoniques.

Fig. 6. – Anharmonic oscillations, numerical simulations.

Par ailleurs, comme on l'a vu, la caverne possède une certaine compressibilité ; le déplacement de l'interface gaz-saumure de la profondeur h_1 à la profondeur h pousse dans la caverne un volume $S(h - h_1)$, où S est la section de l'espace annulaire, et fait passer la pression de la caverne de p_1 à p tel que :

$$\beta V(p - p_1) = S(h - h_1) \quad (2)$$

Enfin (fig. 2), on écrit l'équation de la dynamique pour la colonne de saumure contenue entre l'interface gaz-saumure et le fond du puits à l'entrée dans la caverne :

$$(H - h)(\rho \ddot{h} + \bar{\omega}) = P - P_1 - \rho g(h - h_1) - (p - p_1) \quad (3)$$

où $\bar{\omega}$ désigne les pertes de charge par unité de longueur, typiquement $\bar{\omega} = \alpha \operatorname{sgn}(\dot{h})|\dot{h}|^{1,85}$, avec ici $\alpha = 1,35 \cdot 10^6$ unité SI. Après combinaison de (1) (2) et (3), on obtient une équation différentielle du second ordre pour la hauteur $h = h(t)$ de la poche de gaz. On a ainsi pu estimer la hauteur du gaz piégé (fig. 6) qui permet d'expliquer les résultats expérimentaux ; elle est de $h_1 = 40$ cm environ, ce qui place l'interface gaz-saumure de l'annulaire 170 cm sous l'interface air-saumure du tube central pendant l'essai initial dit 0, de sorte que la pression absolue du gaz était environ $P_1 = 0,121$ MPa pendant cet essai. La figure 7 représente la période du mouvement en fonction de l'énergie cinétique maximale pour la quantité de gaz précédemment déterminée, lorsque la pression du gaz au repos varie comme dans les essais décrits par la figure 5, et que les pertes de charge sont négligées.

Après le test, on a pu vérifier, en ouvrant l'espace annulaire à l'atmosphère, qu'il contenait effectivement une petite quantité de gaz.

7. Conclusion

On a pu mettre en évidence et interpréter des oscillations anharmoniques dans le système constitué par une grande caverne souterraine et le puits qui la relie à la surface du sol. Ces oscillations

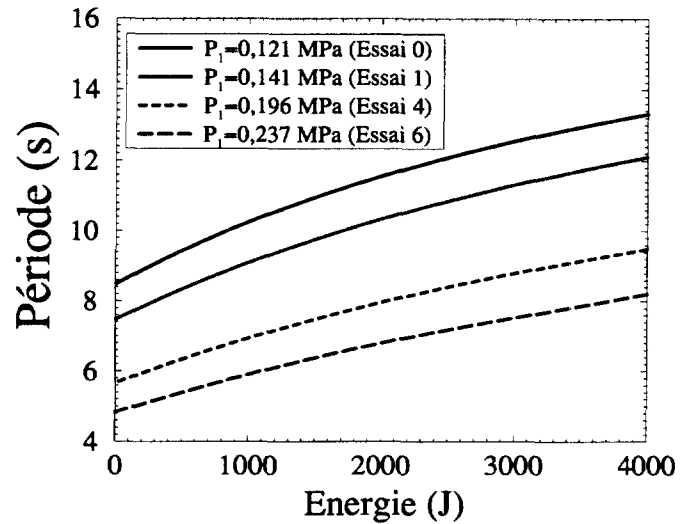


Fig. 7. – Évolution de la période en fonction de l'énergie cinétique maximale.

Fig. 7. – Oscillation period, as a function of the maximal kinetic energy.

s'expliquent par la présence d'une très petite quantité de gaz piégé dans la tête de puits. Elles constituent donc un moyen commode de détecter une telle accumulation de gaz.

Note remise le 27 septembre 1997, acceptée le 14 octobre 1997.

Références bibliographiques

- Bérest P., Habib P., 1983.** Détermination du volume d'une cavité souterraine par mesure d'une période d'oscillation. *C. R. Acad. Sci. Paris*, 296, série II, 301-304.
- Bérest P., Bergues J., Brouard B., 1996.** *Vibrations and Free Oscillations in Salt Caverns*, SMRI Fall Meeting, Cleveland.
- Boucly P., 1980.** Expériences *in situ* et modélisation du comportement des cavités salines utilisées pour le stockage du gaz, *Rev. Fr. Géotech.*, 18, 49-57.
- Holzhausen G.R., Gooch R.P., 1985.** *The effect of hydraulic fracture growth on free oscillations of wellbore pressure*, 26th U.S. Symp. Rock Mech., 621-625.