

VIBRATIONS ET OSCILLATIONS DES FLUIDES DANS LES CAVERNES DE STOCKAGE D'HYDROCARBURES

Pierre Bérest, Jean Bergues, Benoît Brouard

Laboratoire de Mécanique des Solides
(Centre commun X-Mines-Ponts, U.R.A 317 du C.N.R.S)
Ecole Polytechnique, 91128 Palaiseau Cedex.

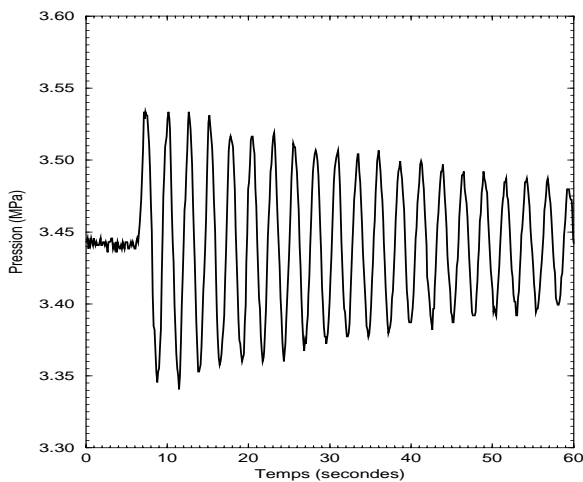
Resumé : Les fluides contenus dans une caverne sont le siège de vibrations qui peuvent être assez facilement mesurées. Leur période peut renseigner sur les dimensions de la caverne, les rapports entre les volumes des différents fluides présents dans la caverne, la présence de gaz piégé. A titre d'exemple, on met en évidence les ondes stationnaires dans le puits ; les oscillations d'une interface gaz-liquide dans une caverne ouverte ou fermée ; en donnant des exemples de mesures effectuées dans des cavités réelles.

1. INTRODUCTION

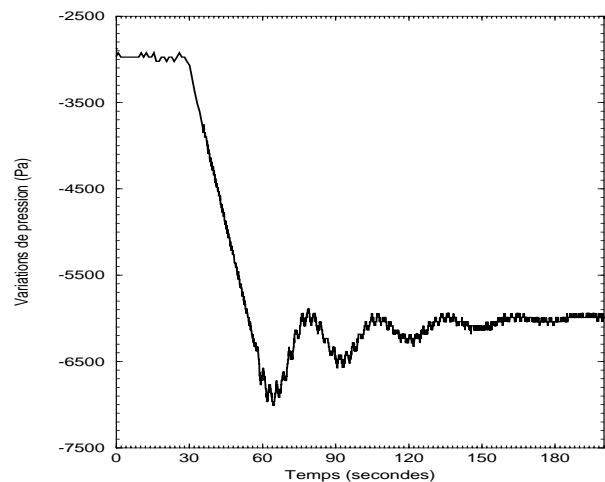
Les cavernes souterraines de stockage de fluides dans le sel sont schématiquement constituées d'un puits vertical de petit diamètre, de longueur kilométrique, débouchant dans une caverne de quelques milliers à quelques centaines de milliers de mètres cubes. Ces cavernes sont le siège de phénomènes oscillatoires variés. En effet les fluides (saumure, pétrole, gaz ...) contenus dans la caverne et le puits, comme les tubes métalliques contenus dans le puits et le massif rocheux, sont des corps élastiques susceptibles de vibrer avec des périodes qui dépendent de leurs dimensions géométriques et de leurs caractéristiques mécaniques. Holzhausen et Gooch [1] ont ainsi analysé les effets de la croissance d'une fracture hydraulique ; une méthode analogue avait été développée par Bérest [2]. Dans le cas d'une caverne ouverte à l'atmosphère, Bérest et Habib [3] ont montré que l'interface avec l'air atmosphérique est affectée de mouvements périodiques qui dépendent du volume de la caverne. Les périodes de ces phénomènes, qui vont de quelques dixièmes de seconde à quelques heures, peuvent être facilement mesurées. Dans certains cas, ces périodes renseignent sur des caractéristiques mal connues du stockage comme son volume ou le taux de remplissage en hydrocarbures ; l'existence de poches de gaz peut être également mise en évidence par ce biais.

2. ONDES STATIONNAIRES

Les puits des stockages souterrains sont le siège de la propagation d'ondes. Ces ondes sont engendrées le plus souvent par l'ouverture ou la fermeture rapide d'une vanne en tête de puits, la mise en route ou l'arrêt d'une pompe, qui provoquent ce qu'on appelle dans le langage courant un *coup de bélier*. L'onde qui se forme ainsi en surface se propage dans le puits, avec une célérité inférieure à la célérité du son dans le fluide indéfini, en raison de la raideur transversale du tube, comme on le démontre en acoustique [4] ; quand l'onde atteint une discontinuité géométrique ou mécanique (changement de section, de nature de fluide ...), il y a formation d'une onde transmise et d'une onde réfléchi. L'onde atteint enfin le sommet de la cavité où généralement elle est pratiquement entièrement réfléchi vers la tête de puits sous la forme d'une onde qui annule la surpression transmise par l'onde incidente, en raison du contraste important de sections à l'entrée dans la caverne, dont le volume est très grand. A l'arrivée en tête de puits de cette onde, une réflexion a de nouveau lieu ; la nouvelle onde descendante annule la vitesse transmise par l'onde incidente (si le puits est fermé, ou si le circuit du fluide dans la tête de puits est complexe) ou annule la surpression transmise par l'onde incidente (si le puits débouche directement à l'atmosphère). Les ondes se superposent en tout point du système, les harmoniques de grandes fréquences étant rapidement amorties, et il se forme une onde stationnaire, caractérisée par une phase uniforme dans l'espace et une période égale à celle du mode fondamental : $T = 2H/c$ si le puits est ouvert à l'atmosphère en surface (demi-onde) et $T = 4H/c$ s'il est fermé (quart d'onde), c étant la célérité des ondes et H la hauteur du puits (voir Figure 1).



(1)



(2)

Figure 1: Coups de bélier - Caverne Ez53 (Gaz de France)

Figure 2: Oscillations combinées sur Ez53

3. OSCILLATEURS MÉCANIQUES

3.1. Introduction

On considère maintenant le cas de mouvements de fluide de grande amplitude et de grande période affectant une interface entre deux fluides placés dans le puits. De tels mouvements sont par exemple possibles si le puits est ouvert à l'atmosphère, ou contient du gaz piégé. La pression dans la cavité ne peut plus être considérée comme constante. Au cours de ces oscillations le liquide contenu dans le puits se déplace à une vitesse très inférieure à celle du son de telle sorte qu'on peut considérer qu'il a un mouvement périodique de corps rigide ; ces oscillations sont donc bien distinctes des vibrations du fluide dans le puits décrites précédemment. Les deux types d'oscillation se superposent généralement, comme on peut le voir par exemple sur la Figure 2 obtenue au cours d'un essai d'étanchéité réalisé sur la caverne Ez53 d'Étrez.

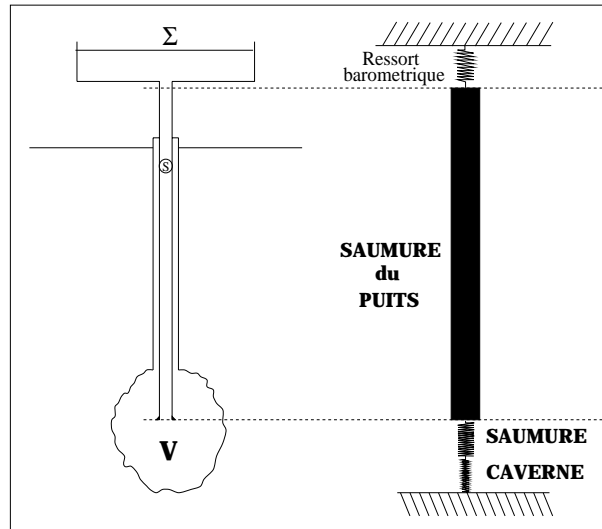


Figure 3: Cavité profonde décomposée en un système masse-ressorts

3.2. Résonateur de Helmholtz

Le système le plus simple où l'on observe des oscillations de longue période est celui du **résonateur de Helmholtz** ; le puits de section S et de longueur H débouche d'un côté dans la cavité de volume V et de l'autre à l'atmosphère dans un récipient de section horizontale Σ (Figure 3). La masse en mouvement ($M = \rho SH$) est celle du fluide de masse volumique ρ contenu dans le puits. On note Q son débit de sorte que son accélération est \dot{Q}/S . Le fluide est poussé vers le haut par l'excès de pression P_1 dans la caverne, $Q + \beta V \dot{P}_1 = 0$, si β est le coefficient de compressibilité de la caverne, somme de la compressibilité du massif et de la saumure, $\beta = \beta_m + \beta_s$; et poussé vers le bas par l'effet barométrique dans le récipient de surface, qui modifie la pression P_2 en tête de puits selon $\dot{P}_2 = \rho g Q / \Sigma$. Si on tient compte de pertes de charge dans le puits, l'équation différentielle du mouvement s'écrit :

$$\ddot{Q} + 2\lambda \dot{Q} + \omega_o^2 Q = 0 \quad \text{avec} \quad \omega_o^2 = \frac{S}{\rho H \beta V} + \frac{S g}{\Sigma H} \quad (1)$$

Avec pour les oscillations de faibles amplitudes (écoulement laminaire) $\lambda = 4\nu\pi/S$ où ν est la viscosité cinématique de la saumure. La solution est une fonction sinusoïdale amortie de pseudo-période $T = 2\pi\sqrt{1 - \lambda^2}/\omega_o$. Si on néglige l'amortissement ($\lambda = 0$), il y a deux cas extrêmes :

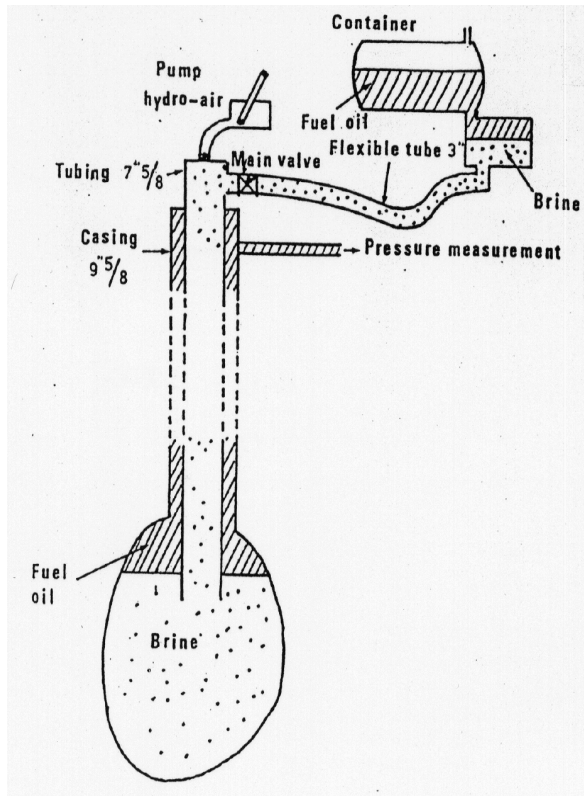
$$T = 2\pi\sqrt{\frac{\rho H \beta V}{S}} \quad \text{si } \Sigma \gg S \quad \text{et} \quad T = 2\pi\sqrt{\frac{H}{g}} \quad \text{si } \Sigma = S \text{ et } V \text{ grand}$$

Dans le premier cas on a une période, de quelques minutes typiquement, qui dépend du volume V de la caverne. Dans le deuxième cas, la période est égale à celle d'un pendule de longueur égale à celle du puits. La Figure 5 représente les résultats d'un essai conduit dans la configuration du premier cas ; le schéma de principe de l'essai est donné Figure 4.

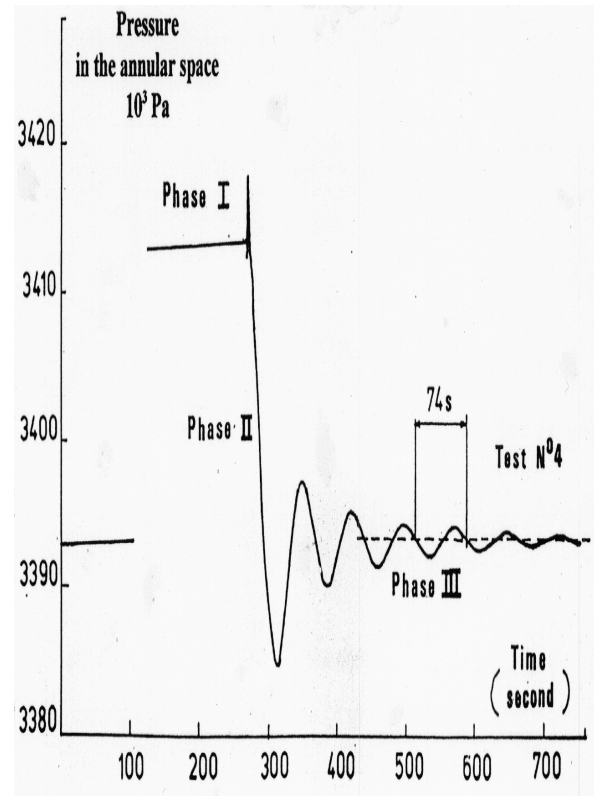
Quand une cavité saline est en exploitation, elle contient généralement de la saumure et un fluide stocké, qui ont des compressibilités différentes. Si l'on note x le rapport entre le volume de fluide stocké et le volume de la caverne, le facteur de compressibilité globale de la caverne s'exprime par :

$$\beta = \beta_m + x\beta_f + (1 - x)\beta_s \quad (2)$$

où β_m , β_f et β_s sont respectivement les facteurs de compressibilité du massif, du fluide stocké et de la saumure. On peut donc, quand $\Sigma \gg S$, déterminer le rapport x à partir de la seule mesure de la période T des oscillations propres.



(4)



(5)

Figure 4: Schéma de principe de l'essai
Figure 5: Oscillations de pression observées

The test was performed in July 1982 on the Ez53 cavern operated by Gaz de France. Cavern volume was $V \approx 7500 \text{ m}^3$, tubing length was $H = 930 \text{ m}$, and the tubing cross-section S was 250 cm^2 . At the beginning of the test the main valve was closed and brine was forced into the cavern through the hydro-air pump to increase the cavern pressure. Then the main valve was opened (end of Phase I) and a long period oscillation ($T = 74 \text{ s}$) took place. Measuring the pressure variations through the fuel-filled annular space was an easy process.

L'essai a été réalisé en juillet 1982 sur la caverne Ez53 exploitée par Gaz de France. Le volume de la caverne était $V = 7500 \text{ m}^3$; la longueur du tube, H , était de 930 mètres, et la section de ce tube était 250 cm^2 . Au début de l'essai la vanne principale (main valve) est fermée et de la saumure est injectée dans la caverne au moyen d'une petite pompe à main afin d'accroître la pression. Puis la vanne principale est ouverte (fin de la phase I) et des oscillations de longue période ($T = 74 \text{ s}$) sont observées.

3.3. Puits contenant du gaz

Une situation assez analogue à la précédente se présente lorsque le puits est fermé mais contient du gaz sur une certaine hauteur. Tel est le cas par exemple au cours de l'essai d'étanchéité à l'azote : on injecte en général dans l'annulaire extérieur une couche de gaz et on descend progressivement l'interface gaz-saumure, en vue de détecter des fuites éventuelles. Ce système se distingue du précédent par le fait que l'interface est toujours placée dans l'annulaire et que le gaz présente une certaine élasticité. Si P_g est la pression du gaz, γ l'indice de l'adiabatique du gaz, $(H - h)$ la hauteur de la colonne de gaz et σ la section de l'annulaire (Figure 6) on aura :

$$\omega_o^2 = \frac{g}{h} + \frac{\sigma}{\beta V g h} + \frac{\gamma P_g}{\rho h (H - h)} \quad (3)$$

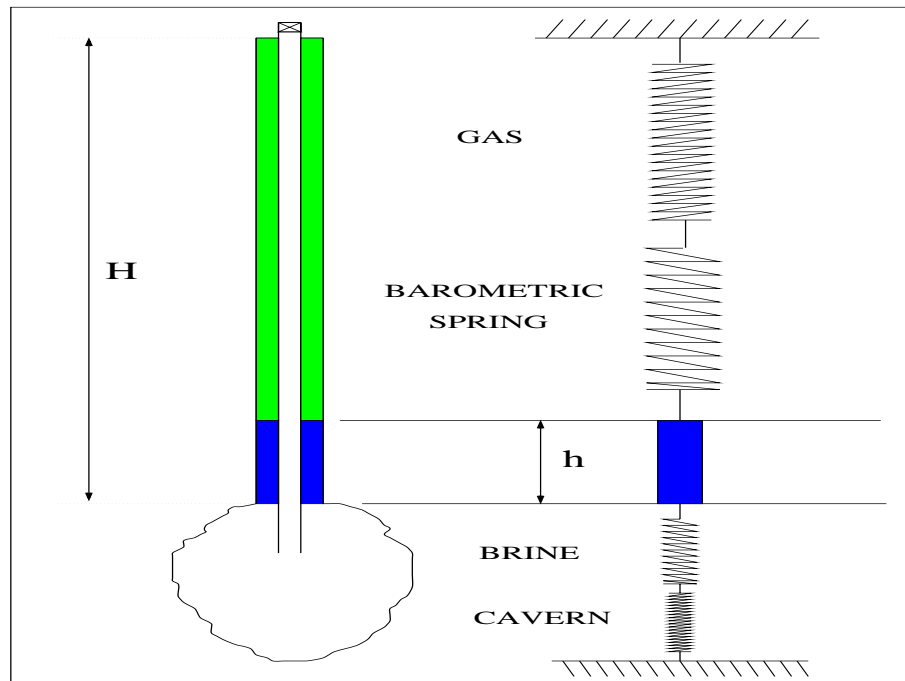


Figure 6: Schéma de principe de l'essai d'étanchéité à l'azote

La Figure 7 montre une essai typique sur une caverne, avec superposition d'ondes stationnaires de courte période dans le gaz et dans la saumure. Au début de cet essai effectué sur la caverne Ez53, on a soutiré 1,3 m³ de saumure par le tube central, en faisant ainsi chuter la pression de 4,7 MPa à 4,43 MPa dans l'espace annulaire rempli d'azote sur une partie de sa hauteur. Trois périodes distinctes peuvent être observées : l'une est inférieure à une seconde (demi-onde dans la colonne de gaz) l'autre est de 2,5 secondes environ (quart-d'onde dans la colonne de saumure de l'espace annulaire) et la dernière, de 30 secondes environ, est associée aux mouvements de l'interface gaz-saumure.

At the beginning of this phase of the test performed on the Ez53 cavern, 1.3 m³ of brine was withdrawn from the central tube, resulting in a pressure drop from 4.7 MPa to 4.43 MPa in the annular space wich was filled partly with nitrogen (the tube lengh is 930 meters). Three different oscillation periods can be observed on the (gas pressure-versus-time) curve:

1. a short period (smaller than one second) that is associated to half-waves in the gas column ;

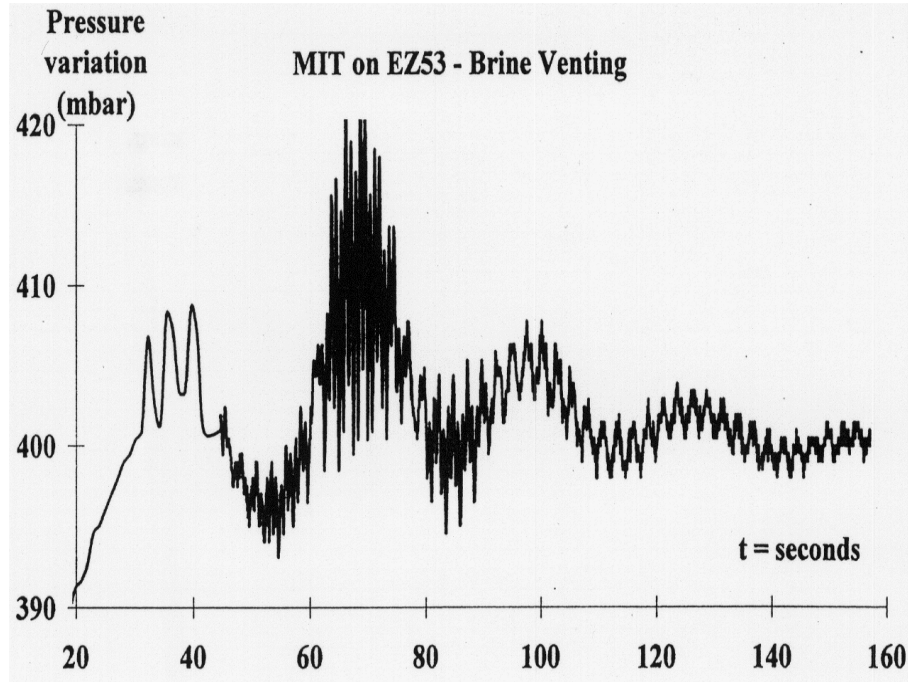


Figure 7: Essai d'étanchéité à Etrez (Gaz de France)

2. an approximately 2.5 seconds period, probably associated with quarter-waves in the annular-space brine column, and
3. a 30-second period that is associated to the gas-brine interface movements.

3.4. Oscillations anharmoniques

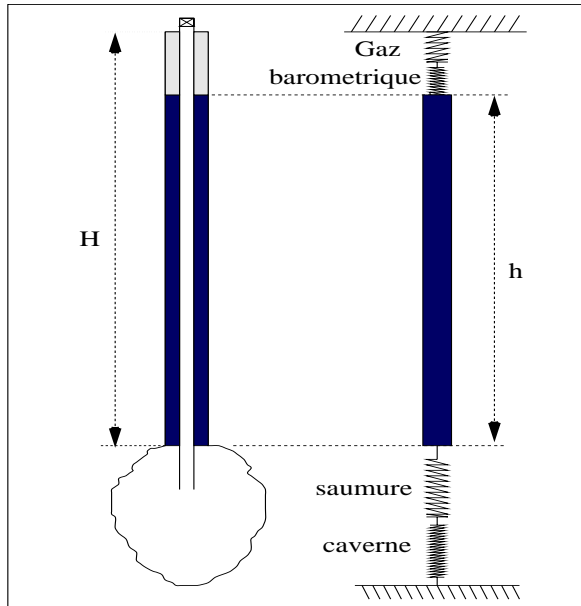
Lorsque la hauteur de gaz contenue dans le puits devient très petite, le phénomène présente des caractéristiques nouvelles [voir Figure (8)]. En effet même des mouvements faibles de l'interface suffisent à changer substantiellement la pression du gaz. Quand le système est excité, les détente/compressions de la couche de gaz sont adiabatiques (coefficient γ) si les oscillations sont suffisamment rapides. On montre alors que la hauteur h satisfait à l'équation différentielle *non-linéaire* suivante :

$$\rho h \ddot{h} + \left[\left(\frac{H - h_o}{H - h} \right)^\gamma - 1 \right] P_g^o + \left[\rho g + \frac{\Sigma}{\beta V} \right] (h - h_o) = 0 \quad (4)$$

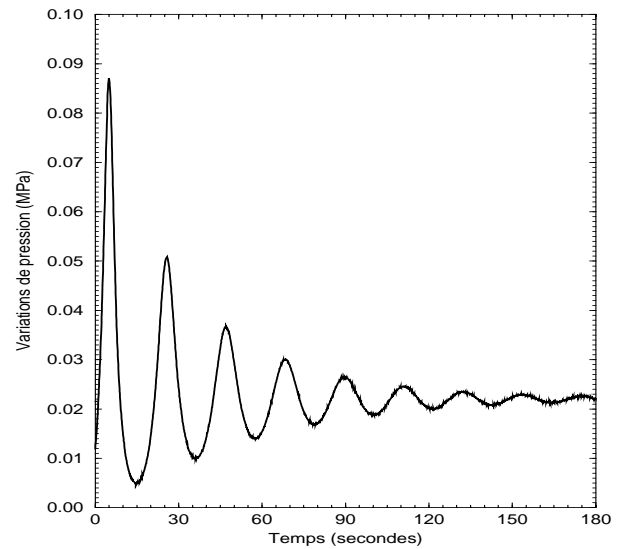
où P_g^o et h_o sont respectivement la pression du gaz et la hauteur de saumure à l'équilibre statique. Un exemple est donné sur la Figure 9 obtenue lors d'un essai dans une caverne de stockage de GPL (propane liquide). Le caractère non linéaire se manifeste par une dissymétrie forte des premières oscillations et une dépendance de la période avec l'amplitude.

L'apparition de ce type de phénomène permet de détecter l'existence d'une poche de gaz piégée en tête de puits.

Remerciements : Nous tenons à remercier Gaz de France et Elf Aquitaine qui ont permis la réalisation de nombreux essais et autorisé la publication des résultats.



(8)



(9)

Figure 8: Présence de gaz piégé en tête de puits

Figure 9: Exemple d'oscillations anharmoniques - Caverne SPR1 (Elf)

REFERENCES

1. G.R. Holzhausen, R.P. Gooch, *The effect of hydraulic fracture growth on free oscillations of wellbore pressure*, 26th U.S. Symp. Rock Mech., pp. 621-625 (1985)
2. P. Bérest, *Phénomènes vibratoires dans les colonnes pétrolières. Application au calcul du volume des cavités souterraines*, Revue française de géotechnique, n° 32, pp. 5-17 (1985).
3. P. Bérest, P. Habib, *Détermination du volume d'une cavité souterraine par mesure d'une période d'oscillation*, C.R. Acad. Sc. Paris, Tome 296, Série II, pp. 301-304 (1983).
4. J. Lighthill, *Waves in fluids*, Cambridge University Press (1959).