

PHÉNOMÈNES OSCILLATOIRES DANS LES CAVITÉS SALINES

P. BÉREST, J. BERGUES, B. 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.

I. INTRODUCTION

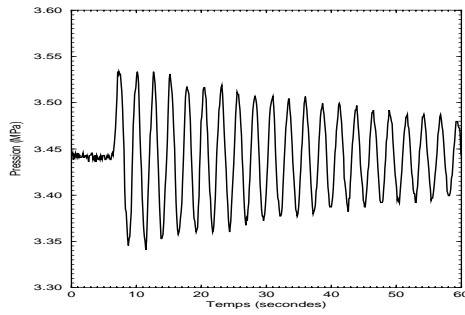
Les cavernes souterraines de stockage de fluides dans le sel sont schématiquement constituées d'un puits vertical de petit diamètre, de longueur kilométrique, débouchant dans une caverne de quelques dizaines à centaines de mètres cubes. Ces cavernes sont le siège de phénomènes oscillatoires très variés. Des ondes stationnaires aux marées terrestres, 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 produit ; l'existence de poches de gaz peut être également mise en évidence par ce biais.

II. ONDES STATIONNAIRES

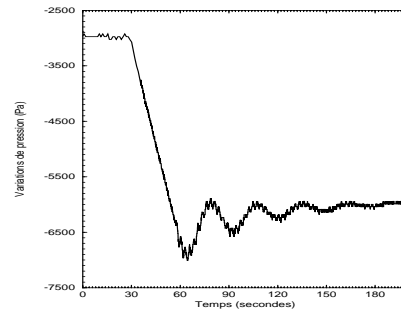
Les puits des stockages souterrains sont le siège de la propagation d'ondes. Ces ondes sont engendrées le plus souvent par l'ouverture ou la fermeture rapide d'une vanne en tête de puits, la mise en route ou l'arrêt d'une pompe, qui provoquent ce qu'on appelle dans le langage courant *coup de bélier* (voir exemple Figure 1). L'onde qui se forme ainsi en surface se propage dans le puits, à chaque changement de milieu (changement de section, de fluide ...), il y a formation d'une onde transmise et d'une onde réfléchi. L'onde atteint la cavité où généralement elle est pratiquement entièrement réfléchi (vers la tête de puits) en raison du contraste important de section à cet endroit. 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.

III. OSCILLATEURS MÉCANIQUES

On considère maintenant de plus le cas de mouvements de fluide de grande amplitude et de grande période, rendus possibles si le puits est ouvert à l'atmosphère, ou contient du gaz piégé. Les deux phénomènes ayant des période très différentes, ils ne s'influencent pas l'un l'autre. Au cours de ces oscillations le liquide contenu dans le puits se déplace



(1)

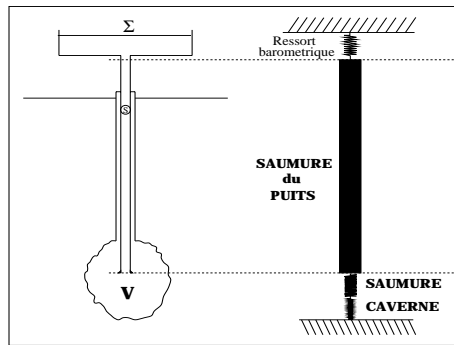


(2)

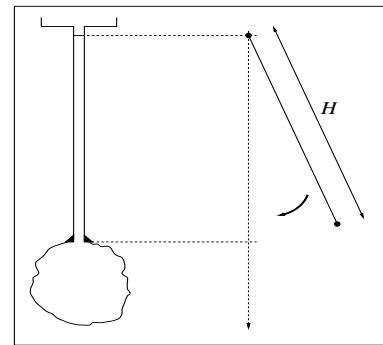
Figure 1: Coups de bélier - Caverne EZ53 (Gaz de France)

Figure 2: Oscillations combinées sur EZ53

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 dans le puits. 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.



(3)



(4)

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

Figure 4: Système oscillant analogue à un pendule

1. 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 . La masse en mouvement ($M = \rho SH$) est celle du fluide de masse volumique ρ contenu dans le puits. Si Q est le débit sortant de la cavité et βV la compressibilité de celle-ci, 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 $T = 2\pi\sqrt{1 - \lambda^2/\omega_o}$. Il y a deux cas extrêmes :

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

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 [voir 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 :

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

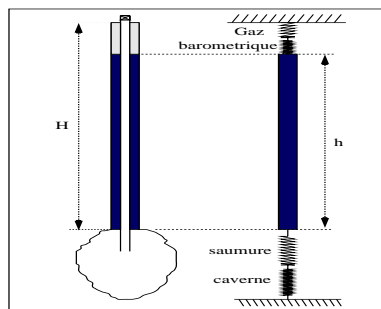
où β_m , β_f et β_s sont respectivement les facteurs de compressibilité du massif, du fluide stocké et de la saumure. On peut donc, quand $\Sigma \gg S$, déterminer le rapport x à partir de la seule mesure de la période T des oscillations propres.

2. Oscillations anharmoniques

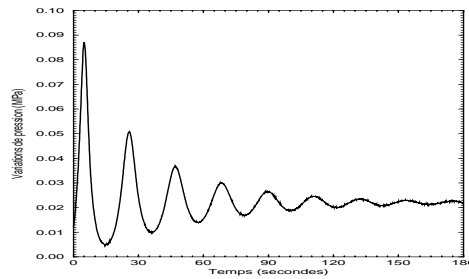
Pour le stockage d'hydrocarbures liquides, on utilise des puits comportant un ou deux espaces annulaires ; le tube central contient de la saumure et le premier annulaire contient, en exploitation, le produit stocké. Un deuxième espace annulaire peut exister, il contient souvent du fioul utilisé au moment du lessivage de la cavité. Il arrive qu'un peu de gaz provenant du massif entourant la cavité remonte vers la surface et soit piégé en tête. La couche de gaz ainsi créée ajoute un ressort supplémentaire au système mécanique [voir Figure (5)]. Quand le système est excité, les détentes/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 :

$$\rho h \ddot{h} + \left[\left(\frac{H - h_o}{H - h} \right)^\gamma - 1 \right] P_g^o + \left[\rho g + \frac{\Sigma}{\beta V} \right] (h - h_o) = 0 \quad (3)$$

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 (6) obtenu lors d'un essai dans une caverne de stockage de GPL (propane liquide).



(5)



(6)

Figure 5: Présence de gaz piégé en tête de puits

Figure 6: Exemple d'oscillations anharmoniques - Caverne SPR1 (Elf)

3. Marées Terrestres - Vibrations propres de la terre

On a observé le débit naturellement expulsé par une petite caverne souterraine du site d'Étrez (GdF) une dizaine d'années après sa création. A cette date, l'équilibre thermique est pratiquement atteint ; on observe une expulsion de saumure à la vitesse de $\dot{V}/V = 2,5 \cdot 10^{-4}$ par an environ, qui est associée au fluage du sel et à la fermeture (très lente) de la caverne. On a mis au point avec l'I.P.G. de Paris (P.A.Blum, P. Bérest) un dispositif qui maintient constante la pression s'exerçant en tête de puits ; on observe alors des fluctuations de période 12h25 minutes, correspondant à des variations relatives de volume de $10^{-8}/10^{-7}$, qui sont dues aux effets sur le massif de sel des marées terrestres (Figure 7).

Ces variations sont elles-mêmes modulées (Figure 8) par des variations périodiques d'amplitude de déformation 10^{-9} et dont la période est de l'ordre d'une quinzaine de minutes, que l'on peut rapprocher d'une période d'oscillations propres de la Terre.

(7)

(6)

Figure 7: Observation des marées terrestre - Caverne EZ53 (GdF)

Figure 8: Observation des vibrations propres de la Terre (?)

IV. CONCLUSIONS

On peut tirer, aisément, certaines informations intéressantes pour les exploitants de la mesure des phénomènes oscillatoires de courtes périodes. Les cavités salines permettent également de mettre en évidence de manière originale des phénomènes physiques de longues périodes et de très faibles amplitudes.

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.

REFERENCES

1. BEREST P. ; “*Phénomènes vibratoires dans les colonnes pétrolières. Application au calcul du volume des cavités souterraines*”, Revue française de géotechnique, n° 32, pp. 5-17, (3^{ème} trimestre 1995).
2. BEREST P., BERGUES J., BROUARD B. ; “*Vibrations and free oscillations in salt caverns*”, Cleveland S.M.R.I. Meeting, (octobre 1996).