

RÉSUMÉ : Les grandes cavernes souterraines reliées à la surface du sol par un puits (stockage d'hydrocarbures etc...) sont le siège de vibrations faciles à enregistrer à la surface du sol. On examine le cas du puits fermé, du puits ouvert, et les phénomènes engendrés par la présence de plusieurs fluides distincts (saumure, gaz, hydrocarbures). Plusieurs essais sont discutés ; on montre qu'on peut tirer des inférences utiles des phénomènes observés.

1 INTRODUCTION

Le ou les fluides contenus dans une cavité souterraine et dans le puits d'accès à celle-ci sont des corps élastiques. Cela signifie que lorsque le ou les fluides, la cavité ou le puits, sont soumis à de petites variations de pression ou de forme, ces corps vibrent en fonction de leurs propriétés mécaniques, de leurs tailles et formes, et en fonction de leurs interactions mécaniques. Ces vibrations constituent une source de renseignements rarement utilisée. Pourtant le coût de cette information est faible ; il suffit en effet d'enregistrer les évolutions des pressions des fluides en tête de puits.

Holzhausen et Gooch [1], par exemple, ont analysé les effets de la progression d'une fracture hydraulique sur la période des oscillations propres dans le puits fermé ; une méthode très semblable a été appliquée au même problème par Bérest [2]. Hsu [3] a déterminé une relation théorique entre la période des oscillations et le rayon d'une fracture de type "penny-shaped".

Dans le cas de puits cimentés débouchant dans une cavité saline, Bérest et Habib [4] ont montré que, quand le puits est ouvert à l'atmosphère, une vibra-

tion de longue période prend naissance en réponse à une petite variation de pression dans la cavité, et qu'elle peut être facilement mesurée, ceci permettant d'estimer le volume de la cavité par un calcul simple.

Nous allons considérer plusieurs types de vibrations qui peuvent être facilement mesurées et nous discuterons leurs relations avec les propriétés des cavités salines ; des enregistrements caractéristiques seront présentés.

2 ONDES STATIONNAIRES

Le premier type d'onde que l'on observe dans les cavités salines est une vibration de la colonne de fluide contenue dans le puits, dont la période est de l'ordre de une à quelques secondes. Quand il se produit un changement rapide de pression, et/ou de débit, dans un tube rempli de fluide (par exemple quand une vanne est ouverte ou fermée brutalement), ce changement engendre une onde acoustique qui se propage dans la colonne de fluide.

Si le tube était infiniment rigide, la célérité de l'onde

serait donnée par la formule simple :

$$\beta_f^{ad} \rho_f c_f^2 = 1$$

ou c_f est la célérité de l'onde, β_f^{ad} est le coefficient de compressibilité adiabatique du fluide et ρ_f sa masse volumique. Dans les conditions normales de température et de pression, des valeurs typiques de la célérité sont: $c_e = 1400$ m/s dans l'eau, $c_a = 340$ m/s dans l'air, $c_s = 1800$ m/s dans la saumure saturée.

En réalité le tube en acier est également un corps compressible. Son coefficient de compressibilité β_t peut être calculé de façon théorique si les caractéristiques du tube et de son environnement (ciment, roches) sont parfaitement connues, ce qui est difficilement possible. Ce dont nous pouvons être sûr, c'est que le coefficient global de compressibilité, $\beta = \beta_t + \beta_f^{ad}$, est plus grand que β_f^{ad} , ce qui implique que la vitesse du son dans le tube est plus petite que la célérité des ondes dans le fluide

$$\frac{1}{c^2} = \frac{1}{c_f^2} + \rho_s \beta_t$$

Une valeur typique pour l'eau ou la saumure dans un tube est $c = 1000$ m/s, ce qui signifie que si, par exemple, on interrompt une injection de saumure dans un puits en fermant rapidement une vanne en surface, l'onde engendrée en tête de puits atteindra un point situé 1 km sous la surface du sol en une seconde environ.

Dans ce premier exemple, si la section du tube central est $S = 250$ cm² (7" de diamètre) et si le débit de saumure était de $Q = 90$ m³/h avant la fermeture de la vanne, la vitesse de la saumure qui était de $v = Q/S = 1$ m/s s'annule brusquement après la fermeture. L'augmentation de pression résultant de cette fermeture soudaine serait $\Delta P = \rho_s c v$, c'est-à-dire dans notre cas, $\Delta P = 1,2$ MPa. Le saut de pression est appelé "un coup de bélier", il peut dans certains cas provoquer des vibrations violentes des installations.

Le tube central débouche dans une cavité tellement grande, en comparaison du faible volume de saumure

déplacé par l'onde elle-même, que, lorsque l'onde atteint l'extrémité du tube, elle n'est pas capable de modifier sensiblement la pression dans la cavité. Alors une deuxième onde est engendrée ; celle-ci se propage vers le haut en "transportant" une dépression, $-\Delta P = -\rho_s c v$, qui a pour effet d'annuler la variation de pression créée par la première onde. Cette deuxième onde atteint la surface et à son tour engendre une onde descendante. Après un temps très court, ces ondes se combinent de manière à former une simple onde stationnaire : sur toute la longueur du tube les variations de pression, ou les vitesses du fluide, possèdent la même phase. Ces ondes stationnaires sont amorties, les composantes de plus hautes fréquences disparaissent, il ne subsiste rapidement qu'une onde sinusoïdale dont la période est fixée par les conditions aux limites, c'est-à-dire les conditions en surface et au sabot du tube. La pression est constante au sabot comme on l'a indiqué auparavant. La vitesse est nulle en surface si la tête de puits est fermée, ce qui détermine une vibration en "quart d'onde" dont la période est $T = 4H/c$, H étant la longueur du tube. Si le puits est ouvert à la pression atmosphérique, on obtient théoriquement une "demi-onde", $T = 2H/c$, mais en raison de l'existence de nombreux coudes et réductions de section en surface, on observe le plus souvent un quart d'onde, même dans le cas d'un puits ouvert.

On peut très facilement observer de telles ondes stationnaires dans des cavités de stockage dans le sel, à condition de disposer du matériel de mesure de pression et d'acquisition approprié. On donne ci-après deux exemples de mesures. De telles ondes seront également observées plus tard quand nous analyserons des ondes de plus longues périodes et d'une autre nature.

- Le premier essai (Figure 1) a été réalisé en juillet 1995 sur la caverne SPR3 du site de Carresse appartenant à Elf Aquitaine (Carresse est situé à une quinzaine de kilomètres à l'ouest de Salies-de-Béarn). La cavité est remplie de saumure ; son volume estimé par mesure échométrique (sonar) est de 4600 m³, et le tube central a une longueur de $H = 692$ mètres

et une section $S = 81 \text{ cm}^2$. Les vibrations observées ont été obtenues à la suite d'une purge de saumure au cours de laquelle la pression en tête de puits a soudainement chuté de $0,032 \text{ MPa}$ à zéro. La période des oscillations est $T = 2,5$ secondes, ce qui signifie que $c = 4H/T = 4 * 692/2,5 \approx 1100 \text{ m/s}$.

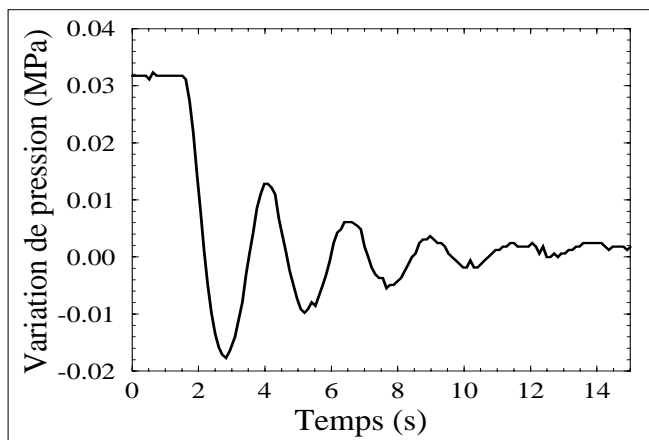


Figure 1: L'essai de juillet 1995 à Carresse.

- Le second essai (Figure 2) a été réalisé en février 1995 sur la cavité Ez53 du site d'Etretz appartenant à Gaz de France ; il fait partie d'une série d'essais décrits dans Bérest *et al.* [5]. Le volume de la cavité est de l'ordre de $V \approx 7500 \text{ m}^3$, la longueur du tube central, rempli de saumure, est $H = 930$ mètres ; sa section est $S = 211 \text{ cm}^2$. L'espace annulaire était rempli d'azote jusqu'à une profondeur de $h_i = 140 \text{ m}$. On observe clairement dans le tube annulaire (Figure 2), à la fin d'une phase de purge des oscillations de longue période (20 s), celles-ci seront discutées plus loin. On observe aussi des demi-ondes dans la colonne d'azote ($c \approx 345 \text{ m/s}$) entre les instants $t = 57 \text{ s}$ et $t = 70 \text{ s}$ qui sont amorties ultérieurement, leur période est $T = 2h_i/c \approx 0,81 \text{ s}$. Des quart d'ondes sont également clairement identifiable, entre les instants $t = 90 \text{ s}$ et $t = 150 \text{ s}$ par exemple ; leur période est approximativement de $T = 2,57 \text{ s}$, ce qui signifie que la célérité des ondes est de $c = 4H/T \approx 1450 \text{ m/s}$. La saumure contenue dans le tube central est vraisemblablement couplée mécaniquement par l'intermédiaire de ce tube avec la saumure contenue dans l'espace annulaire, et la période du quart d'onde est légèrement modifiée par ce couplage.

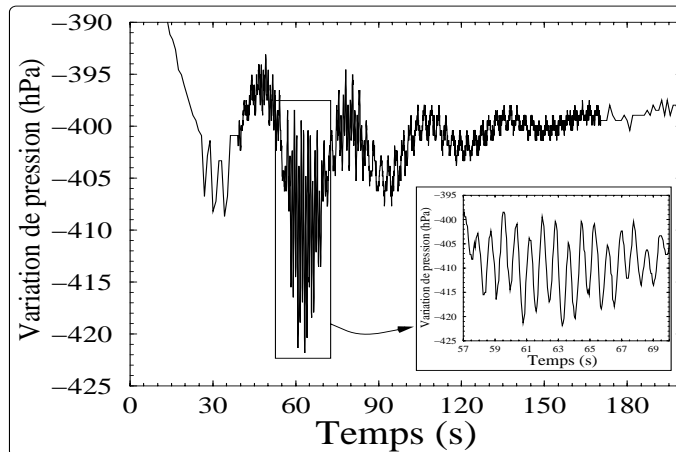


Figure 2: L'essai de février 1995 à Etretz.

3 LE RÉSONATEUR DE HELMOLTZ

3.1 Introduction

Dans la première partie nous avons considéré des ondes engendrées par de petits déplacements du fluide contenu dans le puits, se propageant dans le tube. Un phénomène oscillatoire d'une autre nature apparaît quand la tête de puits n'est pas fermée ; dans ce cas de grands volumes de fluide peuvent être échangés entre le puits et la cavité, dont la pression ne peut plus être considérée comme constante. L'interface entre le liquide et l'air, qui est située soit dans la tête de puits, soit dans un grand récipient au-dessus de la tête de puits (Figure 3), aura un mouvement oscillatoire de longue période (de une à plusieurs minutes).

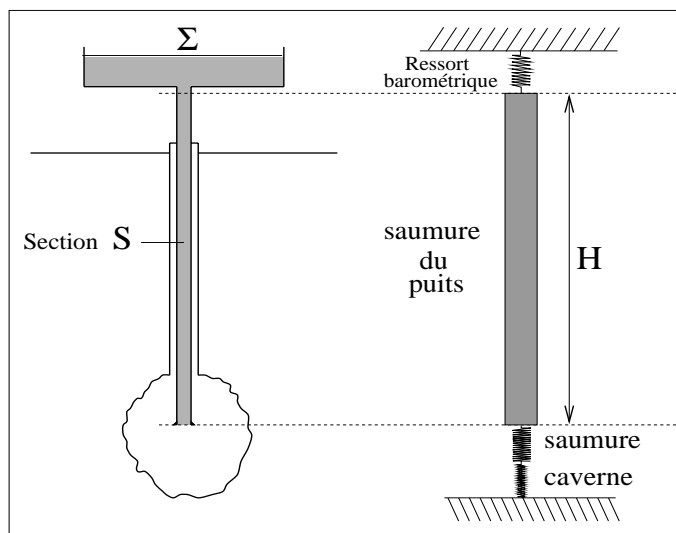


Figure 3: Une cavité saline considérée comme un système masse-ressorts.

dans un grand récipient

Considérons dans un premier temps le cas simple d'une caverne et d'un puits remplis de saumure débouchant à l'atmosphère dans une récipient dont la section horizontale (Σ) peut être beaucoup plus grande que la section du tube (S) (voir Figure 3). Il faut noter que le puits est long et mince en comparaison de la caverne, dont le volume est plus grand que celui du puits de plusieurs ordres de grandeur (par exemple, le volume du puits est de 25 litres/mètre fois 1000 mètres = 25 m³, et le volume de la caverne est de quelques dizaines de milliers de m³).

3.3 La compressibilité de la caverne

A la fois la saumure dans la caverne et la caverne elle-même se comportent comme des ressorts, c'est-à-dire qu'ils sont compressibles : une vitesse de variation de pression \dot{P}_1 dans la caverne conduit à un débit de sortie de saumure au toit de la cavité Q tel que :

$$(\beta_m + \beta_s^{ad})V\dot{P}_1 + Q = 0$$

où V est le volume de la caverne, β_m et β_s^{ad} sont respectivement les coefficients de compressibilité de la caverne dans le massif et de la saumure (adiabatique). Le coefficient de compressibilité "dynamique" $\beta = \beta_m + \beta_s^{ad}$ est légèrement plus petit que son homologue "statique" (voir Bérest *et al.* [6]), mais une valeur de $\beta = 4 \cdot 10^{-4}/\text{MPa}$ semble raisonnable.

La raideur de la caverne remplie de saumure (c'est-à-dire le rapport entre le débit de saumure et la vitesse d'augmentation de pression) est l'inverse de la compressibilité globale de la caverne, ou :

$$\Delta P / \Delta V = 1 / [(\beta_m + \beta_s^{ad})V]$$

Pour une caverne de 100.000 m³ de volume, ce rapport est de l'ordre de $2,5 \cdot 10^{-2} \text{ MPa/m}^3$; en d'autres termes, il faut injecter 40 m³ de saumure dans la caverne pour augmenter sa pression de 1 MPa.

ou "la masse"

En comparaison le volume de saumure contenu dans le tube central apparait extrêmement raide. Certes, le coefficient de compressibilité de l'ensemble (saumure+tube) peut être assez peu différent du coefficient de compressibilité de l'ensemble (saumure+massif), mais le volume du tube est plus petit que celui de la caverne de 3 à 4 ordres de grandeur, et donc aussi sa compressibilité globale. On peut considérer que la saumure contenue dans le tube est ici un corps rigide (en réalité des ondes stationnaires existent dans le tube, en raison de la compressibilité de la saumure, mais celles-ci n'interfèrent pas du fait de leur beaucoup plus courte période), dont la masse est $M = \rho_s S H$, où ρ_s est la masse volumique de la saumure ($\rho_s \approx 1200 \text{ kg/m}^3$). Avec $H = 1000 \text{ m}$ et $S = 250 \text{ cm}^2$, le volume du tube est de 25 m³, et il contient une masse $M = 30$ tonnes de saumure.

3.5 L'interface air/saumure, le "ressort barométrique"

La saumure contenue dans le récipient à la surface du sol se comporte également comme un ressort ; en effet, si un débit de saumure Q (en m³ par seconde) est expulsé de la caverne, il en résultera une montée Q/Σ de l'interface air/saumure en tête de puits, et cette montée provoquera en retour une augmentation de pression dans la caverne :

$$\dot{P}_2 = \rho_s g Q / \Sigma$$

La raideur barométrique due aux forces de gravité, ou le rapport entre le débit de saumure expulsée et l'augmentation de pression dans la caverne, dans le cas où le récipient a une section $\Sigma = 1 \text{ m}^2$, est :

$$\rho_s g / \Sigma = 10^{-2} \text{ MPa/m}^3$$

La raideur est plus grande quand la section Σ est plus petite. Par exemple, s'il n'y a pas de récipient, et si l'interface air/saumure est située dans le tube lui-même, la raideur barométrique due aux forces de gravité sera $\rho_s g / S = 40 \cdot 10^{-2} \text{ MPa/m}^3$. Dans ce cas,

le ressort “du haut” serait plus rapide que le ressort “du bas” constitué par la caverne.

Un très grand oscillateur harmonique

L'équation différentielle satisfaite par le débit Q est obtenue simplement en considérant que la saumure dans le tube central, dont l'accélération est $a = \dot{Q}/S$, est poussée vers le haut par l'excès de pression P_1 dans la caverne (excès par rapport à la distribution statique de pression), et poussée vers le bas par l'excès de pression P_2 au fond du récipient en surface ; ces deux pressions agissant à travers la section S du tube central :

$$(\rho_s S H)(\ddot{Q}/S) = S(\dot{P}_1 - \dot{P}_2)$$

En éliminant \dot{P}_1 et \dot{P}_2 on montre que :

$$\ddot{Q} + \left\{ \frac{S}{\rho_s H(\beta_m + \beta_s^{ad})V} + \frac{gS}{\Sigma H} \right\} Q = 0$$

La solution d'une telle équation différentielle est une fonction sinusoïdale dont la période est :

$$T = \frac{2\pi}{\omega_o} \quad , \quad \omega_o^2 = \frac{S}{\rho_s H(\beta_m + \beta_s^{ad})V} + \frac{gS}{\Sigma H}$$

On peut examiner les deux cas extrêmes suivants :

1. Le volume de la caverne est très important et il n'y a pas de récipient (l'interface air/saumure est située dans le puits). Alors $S = \Sigma$ et les oscillations sont pratiquement déterminées par le ressort “du haut” :

$$T = 2\pi \sqrt{H/g}$$

En d'autres termes, le système se comporte comme un pendule simple dont la longueur est celle de la colonne de saumure. Une période typique, pour $H = 1000$ mètres, $g = 10$ m/s², est $T \approx 63$ secondes.

2. Le volume de la caverne, V , est petit (10.000 m³ par exemple), et la section du récipient, Σ , est très grande (plusieurs m²) ; alors le rapport $(gS)/(\Sigma H)$ est négligeable par rapport

au premier terme $S/(\rho_s H \beta V)$. En premier dit, la caverne constitue un ressort beaucoup plus raide que l'interface air/saumure. Dans ce cas, la période des oscillations est de l'ordre de une à deux minutes (voir exemple ci-dessous) :

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{\rho_s H(\beta_m + \beta_s^{ad})V}{S}}$$

- Un essai a été réalisé en juillet 1982 sur la cavité Ez53 d'Etrez décrite précédemment, la section du tube central était de $S = 250$ cm² (voir Figure 4). Au début de l'essai, la vanne maîtresse était fermée et on a injecté de la saumure dans la caverne à l'aide d'une pompe manuelle pour augmenter la pression. On a ensuite ouvert la vanne maîtresse et une oscillation de la pression de longue période ($T \approx 74$ s) est apparue dans l'espace annulaire rempli de fioul. Cette période mesurée était en bon accord avec la valeur calculée (Figure 4).

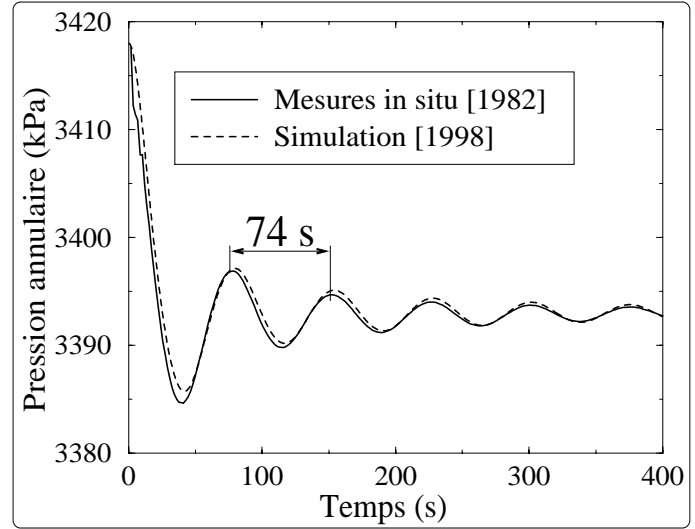


Figure 4: L'essai de juillet 1982 à Etrez.

3.6 Caverne contenant deux fluides différents

Dans le cas d'une caverne contenant de la saumure et un hydrocarbure stocké, le coefficient de compressibilité globale adiabatique de la caverne est :

$$\beta = \beta_m + (1 - x)\beta_s^{ad} + x\beta_h^{ad}$$

où x est le rapport entre le volume de produit stocké et le volume de la caverne, et β_h^{ad} est le coefficient de

compressibilité adiabatique de ce produit. Appliquée au cas des oscillations décrites précédemment, cette formule montre que la période des oscillations dépend du taux de remplissage x . Soit T_{min} la période des oscillations dans le cas où il n'y a que de la saumure dans la caverne ($x = 0$), alors la période est donnée par :

$$T = T_{min} \sqrt{\frac{\beta}{\beta_m + \beta_s^{ad}}} = T_{min} \sqrt{1 + \frac{\beta_h^{ad} - \beta_s^{ad}}{\beta_m + \beta_s^{ad}} x}$$

Ce qui signifie par exemple que la période est multipliée par 3 quand la caverne contient 80% de propane liquéfié (GPL) dont le coefficient de compressibilité est de l'ordre de $\beta_h^{ad} = 45.10^{-4}/\text{MPa}$. Différentes tentatives ont été effectuées pour mettre en application cette méthode de détermination du volume exact stocké, ce volume étant souvent mal connu après un grand nombre d'injections et de soutirages. Une méthode de détermination du stock à partir de la simple mesure de la période des oscillations propres du système pourrait s'avérer très utile, mais malheureusement les essais réalisés jusqu'à maintenant n'ont pas été très satisfaisants en raison de l'existence de pertes de charge importantes dans le système.

3.7 Pertes de charge

Les pertes de charge sont dues à la viscosité de la saumure circulant dans le tube central ainsi qu'aux coudes et réductions de section dans les tubes en surface. Il en résulte un amortissement plus ou moins important des oscillations (Figure 4) qui deviennent alors parfois très difficiles à mesurer.

Nous supposons tout d'abord que la vitesse de la saumure est suffisamment faible pour que le débit puisse être considéré comme laminaire ; on peut dans ce cas appliquer la formule classique de Poiseuille (c'est-à-dire qu'on suppose que les pertes de charge sont linéairement proportionnelles au débit) :

$$\ddot{Q} + 2\lambda\dot{Q} + \omega_o^2 Q = 0 \quad , \quad \lambda = (4\nu_s \pi)/S$$

où ν_s est la viscosité cinématique de la saumure ($\nu_s = 2.10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ à 20°C). Pour éviter un trop fort

amortissement, il faut que λ soit plus petit que ω_o , c'est-à-dire $S^3/(\beta V H) \geq 0,375 \text{ m}^2/\text{MPa}$, ce qui est assez facile à satisfaire pour une petite caverne remplie de saumure et un tube assez large, comme dans l'essai d'Étrez décrit précédemment, où $\beta V \approx 3 \text{ m}^3/\text{MPa}$ et $S = 250 \text{ cm}^2$, mais difficile dans une grande caverne contenant des produits plus compressibles. Cette approximation est valable en régime laminaire, c'est-à-dire pour un nombre de Reynolds suffisamment petit, typiquement :

$$\mathcal{R} = 2Q/(\nu_s \sqrt{\pi S}) < 2000$$

Le débit maximal étant $Q_{max} = \beta V \omega_o \Delta P_{max}$, les variations de pression et donc le saut initial de pression doivent être suffisamment petits (plus petits que 0,1 MPa, comme ordre de grandeur). Il faut noter également que la formule de Poiseuille est valable pour un tube lisse, ce qui n'est certainement pas le cas dans les puits profonds en raison en particulier de la corrosion de l'acier par la saumure.

Une loi empirique plus réaliste permet de mieux prendre en compte les pertes de charge (c'est cette loi qui a été utilisée dans la simulation de la figure 4) :

$$\ddot{Q} + \alpha \text{sgn}(\dot{Q})|\dot{Q}|^{1,8} + \omega_o^2 Q = 0$$

Avec $\alpha = 0,9.10^{-6} H \rho_s^{1,046} \nu_s^{0,196} S^{-2,3}$.

4 Effet d'une colonne de gaz dans le puits

L'étanchéité est une préoccupation essentielle pour le stockage souterrain des hydrocarbures. Le sel présente une perméabilité intrinsèque extrêmement faible (de l'ordre de 10^{-22} à 10^{-19} m²) ; mais le cuvelage en acier qui est cimenté aux terrains peut devenir fuyard, en particulier dans les vieux puits. Il est donc nécessaire de vérifier périodiquement l'étanchéité des cuvelages. Une méthode classique est l'essai dit "M.I.T." (Mechanical Integrity Test) consistant à injecter une colonne d'azote dans l'espace annulaire rempli de saumure de manière à placer l'interface azote/saumure sous le sabot du cuvelage (Figure 5). La position de l'interface est déterminée à l'aide d'une diagraphie ; son évolution est suivie pendant quelques jours. Une montée trop importante de l'interface est censée être le signe d'une fuite de gaz (voir Bérest *et al.* [5] et Bérest *et al.* [7]).

Un tel système, c'est-à-dire une caverne pleine de saumure reliée à un espace annulaire rempli de gaz et fermé en tête, est le siège d'oscillations de l'interface gaz/saumure qui ne sont pas très différentes de celles décrites dans le paragraphe précédent. L'étude de ces oscillations est utile pour vérifier la position de l'interface ; inversement elles peuvent rendre difficile la détermination de la position exacte de l'interface par un outil de diagraphie.

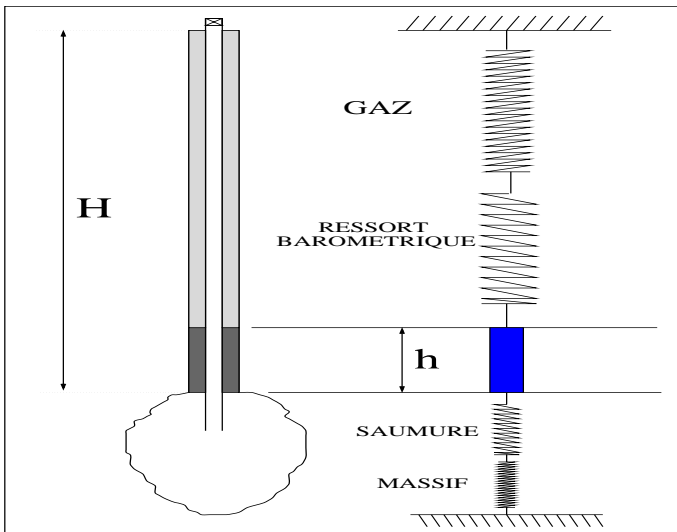


Figure 5: Essai d'étanchéité M.I.T.

Soit $(H - h)$ la profondeur de l'interface à l'équilibre,

h est la hauteur de la colonne de gaz dans l'espace annulaire. Les oscillations étant assez rapides, on peut considérer que les compressions/décompressions du gaz sont adiabatiques, c'est-à-dire que la pression absolue moyenne dans le gaz, P_g , et la hauteur de la colonne de gaz, $(H - h)$, sont liées par la relation $P_g(H - h)^\gamma = \text{constante}$, où γ est la constante de l'adiabatique. En d'autres termes :

$$\dot{P}_g = \gamma P_g \dot{h} / (H - h) = \gamma P_g Q / [\sigma(H - h)]$$

où σ est la section de l'espace annulaire. La raideur de la colonne de gaz peut être estimée comme suit : si on a $\sigma = 1,4 \cdot 10^{-2}$ m², $(H - h) = 500$ m, $\gamma = 1,4$, et $P_g = 8$ MPa, alors la raideur associée est $\dot{P}_g/Q = 1,6$ MPa/m³. La saumure contenue dans l'espace annulaire est donc maintenant poussée vers le bas par un double ressort, d'une part le ressort barométrique déjà défini, d'autre part un nouveau ressort associé à la compressibilité du gaz (Figure 5).

$$\dot{P}_2 = \rho_s g Q / \sigma + \gamma P_g Q / [\sigma(H - h)]$$

Ces deux ressorts sont généralement plus raides que le ressort "du bas" constitué par la caverne. L'équation différentielle satisfaite par le débit de saumure est alors :

$$(\rho_s \sigma h)(\ddot{Q}/\sigma) + \left[\rho_s g + \frac{\sigma}{\beta V} + \frac{\gamma P_g}{H - h} \right] Q = 0$$

soit

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

On voit que la période dépend de la hauteur de la colonne de gaz et s'annule d'une part quand la colonne est très longue, et d'autre part quand elle est très courte (voir toutefois le paragraphe suivant). Les variations de la pression du gaz, mesurées dans l'espace annulaire, et les variations de la pression de la saumure, mesurées dans le tube central, sont respectivement :

$$\dot{P}_{ann} = \frac{\gamma P_g}{\sigma(H - h)} Q \quad \text{et} \quad \dot{P}_{tub} = -\frac{1}{\beta V} Q$$

Leurs amplitudes peuvent dans certains cas être notablement différentes et leurs signes sont opposés.

• On observe sur la figure 6 les oscillations obtenues à la suite d’une purge de saumure au cours d’un essai M.I.T. réalisé sur la cavité Ez53 d’Etrez (Gaz de France) (voir Bérest *et al.* [7]). La colonne de gaz de 200 mètres de haut était à une pression moyenne de l’ordre de $P_g = 7$ MPa. Dans le cas de l’azote, $\gamma = 1,4$; de plus ici $\sigma = 14,7$ litres/mètre, d’où $T \approx 20$ secondes. Cette oscillation n’est pas clairement visible sur le tube central, ceci peut être dû au faible rapport $\dot{P}_{tub}/\dot{P}_{ann} \approx -0,05$; en revanche une vibration de plus courte période (2,6 s) peut être observée.

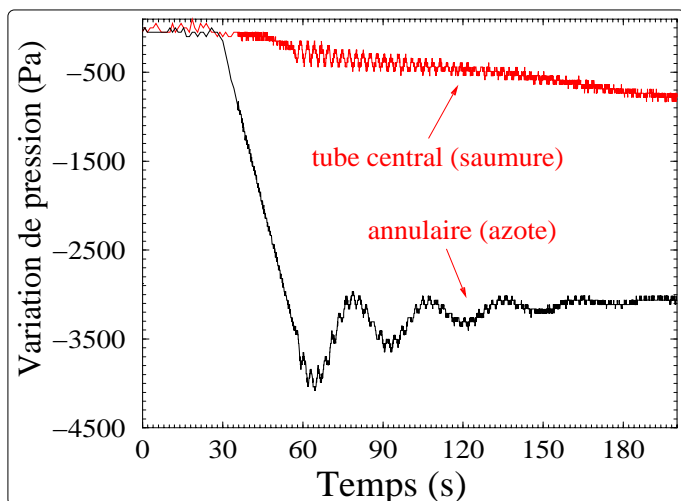


Figure 6: Essai M.I.T., oscillations après un soutirage de saumure.

5 Gaz piégé en tête de puits

On a réalisé en juillet 1995 un ensemble de mesures sur la cavité SPR3 du site de Carresse, décrite précédemment. Une mesure de sa compressibilité globale a mis tout d’abord en évidence un coefficient de compressibilité anormalement élevé, de l’ordre de $11.10^{-4}/\text{MPa}$ alors qu’on s’attendait à une valeur de l’ordre de $4.10^{-4}/\text{MPa}$ pour une cavité pleine de saumure. On a attribué ce phénomène à l’existence de poches de gaz piégé dans la cavité, dans des “oreilles” visibles sur les coupes relevées par sonar.

On a ensuite réalisé des essais d’oscillations ; la tête de puits était équipée de capteurs de pression dont la résolution est de 250 Pa ; le pas d’acquisition des mesures était de 0,05 secondes. L’objectif initial du

premier essai, dit “essai 0”, était d’observer les oscillations de type résonateur de Helmholtz comme celles obtenues sur la cavité Ez53 d’Etrez en 1982. En injectant à l’aide d’une pompe une centaine de litres de saumure dans le tube central fermé, on a fait monter légèrement la pression en tête de puits. En ouvrant une vanne en tête 300 secondes après le début de l’essai (Figure 7) on relie alors le tube central à une cuve de 1 m^2 environ de section horizontale. La section du tube central étant de $S \approx 81 \text{ cm}^2$, on aurait dû observer une oscillation de période proche de 145 secondes (voir formules précédentes). En fait on a d’abord observé des oscillations de courte période correspondant à un quart d’onde dans le tube central, suivies de l’oscillation de longue période que l’on recherchait qui est malheureusement très amortie et disparaît rapidement (Figure 7, le rapport $S^3/(\beta V H)$ est au moins dix fois plus grand que pour la cavité Ez53).

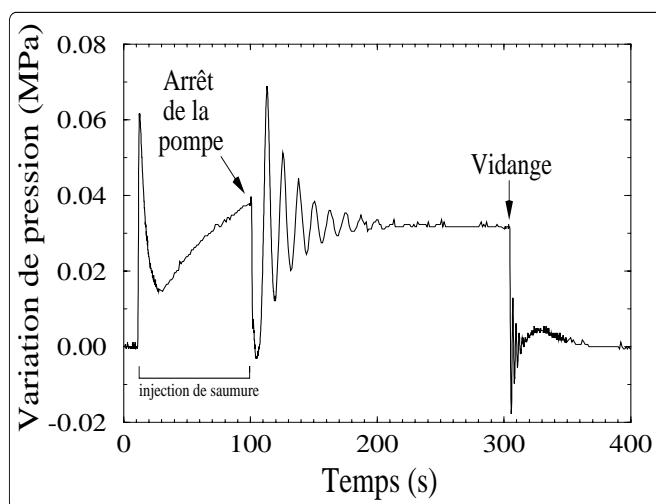


Figure 7: Essai d’oscillation sur SPR3.

De plus, quand la pompe d’injection s’arrête, 100 secondes après le début de l’essai, on peut très clairement observer des oscillations tout à fait inattendues. Ces oscillations sont *anharmoniques*, la courbe est beaucoup plus “pointue” dans la moitié supérieure que dans la moitié inférieure. Quand le signal s’amortit ce phénomène disparaît et la période devient plus petite. Ces effets sont plus nets au cours d’un essai ultérieur dans lequel l’amplitude initiale était plus importante (Figure 8) ; l’origine des pressions est la même que pour la figure 7.

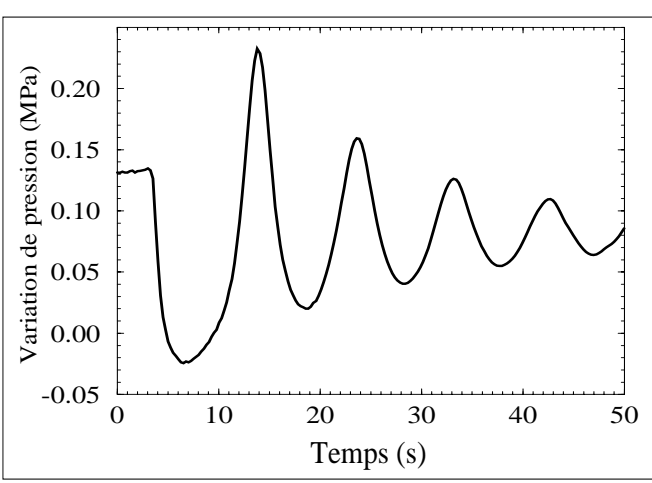


Figure 8: Oscillations anharmoniques.

Au cours d'une seconde série d'essais (Figure 9), numérotés de 1 à 7, on a injecté 700 litres de saumure à raison de 100 litres par essai ; on a obtenu à chaque fois des oscillations anharmoniques dont la période a diminué (de 15 secondes à 8 secondes, pour la période mesurée juste après chaque arrêt de la pompe consécutif à une période d'injection), alors que la pression stabilisée devenait plus importante à chaque étape. Ces phénomènes ne peuvent être expliqués que par la présence, à l'intérieur du système puits-cavité, d'un corps extrêmement compressible qui réagit non-linéairement même pour de faibles variations de pression, de l'ordre de 0,1 MPa. Le gaz contenu dans les poches de la cavité sous pression relativement forte (8,3 MPa) est trop raide pour jouer ce rôle ; il a fallu supposer que le sommet de l'espace annulaire contenait un petit volume de gaz piégé. Ce gaz provient sans doute de la cavité et est vraisemblablement le même que celui piégé au fond.

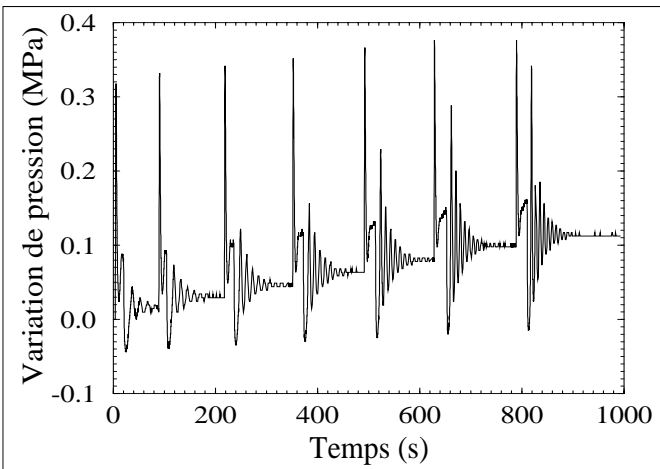


Figure 9: Oscillations anharmoniques au cours d'injections de saumure.

Lorsque la cavité 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 n'engendrent 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 :

$$Ph^\gamma = P_1h_1^\gamma$$

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

$$\beta V(p - p_1) = \sigma(h - h_1)$$

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 cavité :

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

où $\bar{\omega}$ désigne les pertes de charge par unité de longueur. Après combinaison de ces équations 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 (voir Figure 10) 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 11

représente la période de 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 9, 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.

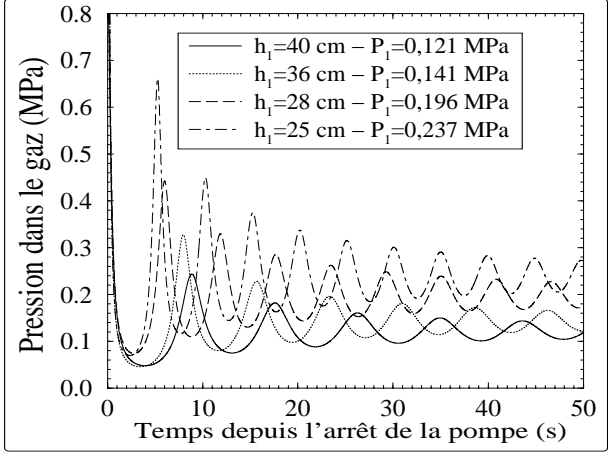


Figure 10: Simulation numérique des oscillations anharmoniques.

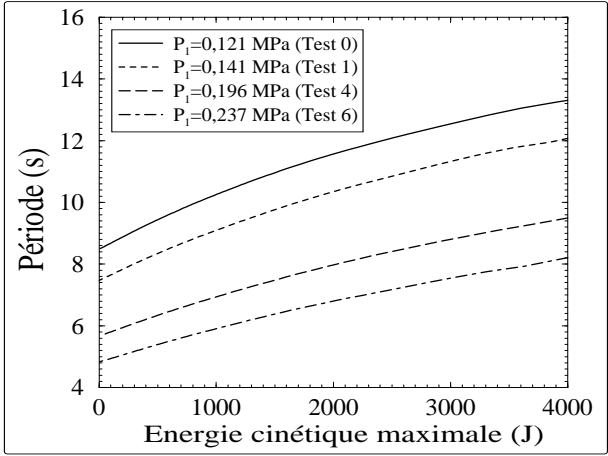


Figure 11: Evolution de la période avec l'énergie cinétique maximale.

0 Caverne fermée, tube central et annulaire remplis de gaz

Dans ce cas, à la fois l'espace annulaire (section σ) et le tube central (section S) contiennent du gaz (voir Figure 12).

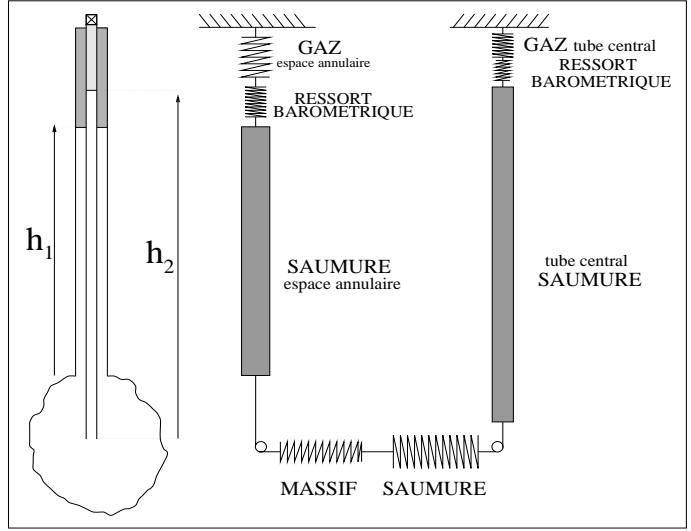


Figure 12: Gaz dans l'annulaire et le tube central.

Le système est constitué de deux masses (la saumure contenue dans l'espace annulaire, $m_1 = \rho_s \sigma h_1$, et celle contenue dans le tube central, $m_2 = \rho_s S h_2$), dont les oscillations sont couplées par un ensemble de ressorts :

$$\begin{cases} \frac{\rho_s \sigma h_1}{\sigma} \ddot{Q}_1 = \sigma \left[\dot{p} - \frac{\gamma P_g^1 Q_1}{\sigma (H - h_1)} + \frac{\rho_s g Q_1}{\sigma} \right] \\ \frac{\rho_s S h_2}{S} \ddot{Q}_2 = S \left[\dot{p} - \frac{\gamma P_g^2 Q_2}{S (H - h_2)} + \frac{\rho_s g Q_2}{S} \right] \\ \beta V \dot{p} + (Q_1 + Q_2) = 0 \end{cases}$$

Les pressions initiales (ou statiques), P_g^1 et P_g^2 , sont liées par

$$P_g^2 + \rho_s g h_2 = P_g^1 + \rho_s g h_1$$

Le système est caractérisé par deux périodes propres distinctes ; les variations réelles des pressions sont des combinaisons particulières des deux modes propres :

$$\begin{bmatrix} \frac{m_1}{\sigma} & 0 \\ 0 & \frac{m_2}{S} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{Q}_1 \\ \ddot{Q}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{m_1 \omega_1^2}{\sigma} & \frac{1}{\beta V} \\ \frac{1}{\beta V} & \frac{m_2 \omega_2^2}{S} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} Q_1 \\ Q_2 \end{bmatrix} = [0]$$

où ω_1 et ω_2 sont les pulsations quand il n'y a pas de liaison entre le tube central et l'espace annulaire (c.à.d. $1/(\beta V) = 0$).

• Un essai (Figure 13) a été réalisé sur la caverne EZ53 d'Etrez. La colonne d'azote avait été descendue à une profondeur d'environ 400 mètres dans l'espace annulaire. De façon inattendue le tube central est devenu fuyard et un peu de gaz est entré dans l'espace central. On a enregistré les variations des pressions en tête de puits au cours d'une purge de l'azote piégé dans le tube central. L'interface gaz/saumure est moins profonde dans le tube central et sa période d'oscillation alors plus courte.

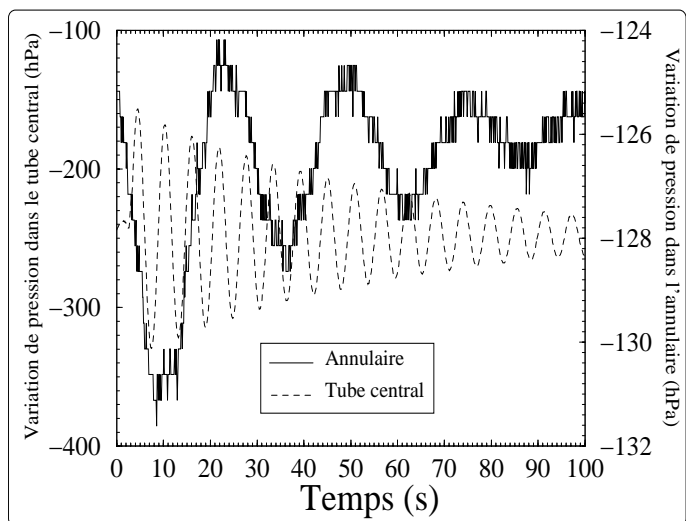


Figure 13: Oscillations dans le tube central et l'espace annulaire.

Conclusions

On peut tirer de nombreuses informations intéressantes de la simple mesure des oscillations de pression en tête de puits, qui sont facilement déclenchées par une injection ou un soutirage de fluide. On peut ainsi, par exemple, déterminer le rapport entre le volume de propane stocké et le volume de la caverne dans le cas d'un stockage de GPL ; on peut également mettre en évidence l'existence de gaz piégé en tête de puits. En outre l'avantage de cette source d'information est que celle ci peut être obtenue à moindre frais.

Remerciements: Les auteurs ont bénéficié des commentaires de Gérard Durup de Gaz de France, ils sont

reconnaissons aux équipes des sites de Etrez (GdF), Carresse (ELF), et Manosque (GEOSTOCK) qui ont permis la réalisation de nombreux essais, et à Yves Le Bras du LMS qui a apporté un concours précieux à la conduite des essais.

REFERENCES

1. Holzhausen G.R. et Gooch R.P. (1985), "The effect of hydraulic-fracture growth on free oscillations of wellbore pressure". *26th U.S. Symp. Rock Mech.*, Rapid City, pp. 621-625.
2. Bérest P. (1985), "Phénomènes vibratoires dans les colonnes pétrolières. Application au calcul du volume des cavités souterraines", *Rev. Fr. Géotechnique* **32**, pp. 5-17.
3. Hsu Y.C. (1975), "Forced oscillations of the Los Alamos Scientific Laboratory's Dry Hot Rock Geothermal Reservoir". *Report LA-6170-MS, Los Alamos Scientific Laboratories.*
4. Bérest P. et Habib P. (1983), "Détermination du volume d'une cavité souterraine par mesure d'une période d'oscillation", *Compte Rendu à l'Académie des Sciences*, t-296, Série II, pp. 301-304.
5. Bérest P., Bergues J., Brouard B., Durup J.G. et Guerber B. (1996), "A tentative evaluation of the M.I.T.", S.M.R.I. Spring Meeting, Houston.
6. Bérest P., Bergues J., Brouard B., Frelat J. et Durup J.G. (1997), "Salt caverns and the compressibility factor", S.M.R.I. Fall Meeting, El Paso.
7. Bérest P., Brouard B., Durup J.G. (1995), "Some comments on the M.I.T. test", S.M.R.I. Fall Meeting, San Antonio.