

**PRINCIPE DU STOCKAGE DE GAZ**

**EN**

**CAVITES CREUSEES DANS LE SEL**

Exposé préparé pour  
L'ECOLE D'ETE SUR L'ENERGIE (2001)  
Université de Caen

par

J. Gérard DURUP  
Président du Solution Mining Research Institute (CA, U.S.A.)  
Ingénieur - Expert à Gaz de France

17 août 2001

## **RESUME**

Dans le principe, l'exploitation d'une cavité de stockage est analogue à celle d'une bouteille de gaz comprimé. Un tel réservoir possède des dimensions remarquables, le volume étant de plusieurs milliers de mètres cube, la hauteur de quelques centaines de mètres et le diamètre de l'ordre de cent mètres. Sa résistance mécanique à la pression du gaz est assurée par la « précontrainte » correspondant au poids des terrains.

Le sel gemme (le halite) est la roche de prédilection pour le creusement de tels ouvrages en raison de ses caractéristiques d'étanchéité excellentes, de sa solubilité dans l'eau qui permet le creusement par dissolution (technique beaucoup plus facile et moins onéreuse que le creusement minier traditionnel), et de sa bonne résistance mécanique à la rupture.

Il est exacte que le stockage du gaz naturel se fait préférentiellement dans les espaces naturels des milieux poreux et perméables des gisements d'hydrocarbures déplétés ou de nappes aquifères. Mais le stockage en cavités creusées dans le sel présente l'avantage de performances en débit d'émission inégalables en regard des quantités de gaz immobilisées.

Dans certains pays d'Europe du Nord sa part est prépondérante. C'est le cas de l'Allemagne où les formations salifères sont abondantes et très bien situées près de la Mer du Nord et de ses importants gisements de gaz. En France il existe trois sites de stockage de gaz naturel en cavités salines, avec environ 40 cavités au total.

Ce cours présente de façon succincte et sans rentrer dans les détails les éléments essentiels de la technique : caractéristiques du sel et géologie, géotechnique, puits, creusement par dissolution, mise en gaz et exploitation.... Une courte bibliographie est proposée à ceux qui souhaite approfondir leurs connaissances dans cette technique particulière.

# TABLE DES MATIERES

<b>1. LE HALITE ET LES FORMATIONS SALIFERES.....</b>	<b>4</b>
1.1. Généralités géologiques .....	4
1.2. Caractéristiques spécifiques pour le stockage.....	4
<b>2. LE CREUSEMENT DES CAVITES .....</b>	<b>5</b>
2.1. Le forage et les essais d'étanchéité .....	5
2.2. La dissolution .....	5
<b>3. MISE EN GAZ ET EXPLOITATION DU STOCKAGE.....</b>	<b>6</b>
3.1. La complétion .....	6
3.2. La première mise en gaz.....	7
3.3. Principes d'exploitation.....	7
<b>4. PERFORMANCES DES CAVITES .....</b>	<b>8</b>
4.1. Equation d'état du gaz .....	8
4.2. Thermodynamique de l'exploitation par compression/détente.....	9
4.3. Stock de gaz en cavité (S) .....	9
4.4. Débit d'émission (Q) .....	10
4.5. Grandeurs principales de la performance : P, S et Q .....	12
<b>5. STABILITE ET DIMENSIONNEMENT DES CAVITES .....</b>	<b>12</b>
5.1. Rupture de l'équilibre naturel.....	12
5.2. La loi rhéologique du sel .....	13
5.3. Les études de stabilité.....	13
<b>6. ETAPES ET COUT DE LA REALISATION D'UN STOCKAGE DE GAZ DANS LE SEL.....</b>	<b>14</b>
6.1. Equipements généraux pour le lessivage .....	14
6.2. Démarches administratives.....	14
6.3. Dépenses spécifiques au creusement d'une cavité .....	15
6.4. Dépenses d'équipement gaz .....	15
6.5. Indicateur économique d'investissement.....	15
<b>7. BREF HISTORIQUE ET PLACE DU STOCKAGE DE GAZ NATUREL EN CAVITES CREUSEES DANS LE SEL .....</b>	<b>16</b>

# 1. LE HALITE ET LES FORMATIONS SALIFERES

Ce chapitre expose les principales caractéristiques des formations salifères permettant d'y réaliser des cavités de stockage.

## 1.1. Généralités géologiques

Le halite ou *sel gemme* ou « roche sel » (anglais : rocksalt, allemand : Steinsalz) est un minéral. Dans le sous-sol, il peut à l'état pur former une roche sédimentaire constituée uniquement de cristaux de chlorure de sodium (NaCl). Il a été formé par l'évaporation de l'eau de mer dans certaines conditions à différents âges géologiques, au Primaire pour les plus anciens, au Trias dans le Secondaire il y a 200 millions d'années, ou au Tertiaire voici 30 millions d'années.

Ce sel appartient à la famille *évaporites* qui comprend d'autres roches sels généralement abondantes et présentes dans presque tous les bassins sédimentaires du monde. Ce sont le halite, l'anhydrite (CaSO<sub>4</sub>), et le gypse (CaSO<sub>4</sub>.2H<sub>2</sub>O). D'autres, sylvine (KCl), polyhalite et carnallite (sels de magnésium et de potassium) etc., beaucoup moins répandues, sont présentes en bancs au sein de formations salifères constituées principalement de sel gemme et d'anhydrite.

Les formations salifères se présentent en *couches* plus ou moins épaisses pouvant atteindre ou dépasser le millier de mètres et en *dômes* d'extension verticale souvent très importante (quelques milliers de mètres).

## 1.2. Caractéristiques spécifiques pour le stockage

Les cavités de stockage sont, en général, creusées dans le halite en raison de :

1. Son abondance en épaisseur suffisante (quelques centaines de mètres) pour y creuser des cavités de grandes dimensions.
2. Sa bonne solubilité dans l'eau ; cette propriété est mise à profit pour le creusement des cavités par dissolution à l'eau, technique plus facile à mettre en œuvre, nécessitant beaucoup moins de main d'œuvre et d'équipements lourds, et par là même, nettement moins onéreuse que les techniques de creusement minier.
3. Sa porosité très petite (de l'ordre du %) et fermée (il ne s'agit pas de pores mais de lacunes entre cristaux) et sa perméabilité très faible (inférieure à  $10^{-17}$  m<sup>2</sup>, soit  $10^{-2}$  milliDarcy) lorsqu'il est confiné (sous étreinte isotrope correspondant à la pression géostatique due au poids de terrains sus-jacents, soit environ 0,023 MPa par mètre de profondeur). Ces deux propriétés (petite porosité et faible perméabilité), et les phénomènes capillaires qui leur sont liés garantissent l'étanchéité des cavités de stockage de fluides non mouillants tels que le gaz et les hydrocarbures.
4. Sa bonne tenue mécanique, résistance à la compression en particulier. Néanmoins, les cavités se referment par écoulement du sel (ou *fluage*) et ce, d'autant plus vite qu'elles

sont profondes (plus de 1000 mètres). Toutes choses égales par ailleurs, la vitesse de fluage du sel gemme varie dans un facteur de 1 à 20 selon la cristallisation du sel et selon sa teneur en impuretés (argiles, anhydrite, calcite, ...). Ces dernières sont souvent appelées « insolubles » car elles sont très peu ou pas solubles dans l'eau. Les autres sels solubles, de potassium ou de magnésium, fluent en général beaucoup plus que le sel gemme, et il est donc déconseillé d'y creuser des cavités de stockage.

## 2. LE CREUSEMENT DES CAVITES

### 2.1. Le forage et les essais d'étanchéité

Les cavités réalisées dans le seul but d'extraire le sel par dissolution comportent en général deux (doublet) ou plusieurs puits hydrauliquement reliés au niveau de la couche de sel (par fracturation initiale ou par un tronçon de forage horizontal). En revanche, celles réalisées dans l'optique de stocker des hydrocarbures sont le plus souvent *monopuits*. Il est exacte qu'aux U.S.A., quelques cavités de stockage d'hydrocarbures liquides ou de gaz de pétrole liquéfié sont exploitées par plusieurs puits. Nous ne traiterons ici que du cas des cavités de stockage creusées puis exploitées par un puits.

Le forage du puits est réalisé selon la technique pétrolière. Le dernier cuvelage cimenté est de diamètre standard (13 3/8" ou 9 5/8 " ; 1"=2,54cm). A partir de sa base (ou « sabot »), située en général dans la formation salifère, est foré un trou de diamètre standard (12 1/4" ou 8 1/2") laissé en *découvert*. C'est à partir de ce trou de 100 à parfois 500 mètres de hauteur que la cavité sera développée.

L'ensemble cuvelage-découvert est, en général, l'objet d'essais d'étanchéité. Ceux-ci permettent à l'industriel de vérifier que cet ensemble dispose effectivement des qualités étanches requises avant même qu'il s'engage dans le processus de dissolution, qui, en général est longue (plusieurs années) et coûteuses (plusieurs dizaines de MF). En fait, leur objectif principal est d'obtenir une première estimation de la pression maximale de service du futur stockage.

### 2.2. La dissolution

Le creusement par dissolution, appelé parfois « lessivage », peut alors commencer. De l'eau est injectée par un tube central dont la base est située vers le fond du découvert (*lessivage direct*), soit par l'espace annulaire (*lessivage inverse*). Forcée de circuler de bas en haut (lessivage direct) ou vice-versa (lessivage inverse), le long du découvert, l'eau « lèche » la paroi du trou et se charge en sel pour devenir de la saumure. La saumure est produite soit par l'annulaire (lessivage direct), soit par le tube central (lessivage inverse). De diamètre décimétrique à l'origine, le découvert s'élargit petit à petit au fur et à mesure que le sel est extrait sous forme de saumure. De trou de forage, il devient cavité.

Afin d'éviter une dissolution anarchique du sel vers le haut, un *fluide physico-chimiquement inerte* vis-à-vis du sel et plus léger que la saumure (par exemple du pétrole brut, du fioul ou GPL, ou du gaz) est injectée dans l'espace annulaire compris entre le

cuvelage de production et la colonne externe. Le développement du « toit » de la cavité dépend étroitement de la façon dont on fait évoluer la profondeur de l'interface entre ce fluide et la saumure.

La géométrie de la cavité creusée dépend des positions des points d'injection d'eau et d'extraction de la saumure. Par ailleurs, les insolubles présents dans la masse offerte à la dissolution se dépose au fond de la cavité. C'est pourquoi les **profondeurs des bases des tubes** d'injection d'eau et de soutirage de saumure sont réajustées, en général diminuées, par des opérations appelées « changement de passe ».

La saumure produite a une teneur en sel dissous de 250 à 310 kg/m<sup>3</sup>. Le creusement d'un mètre cube de cavité, soit environ 2200 kg/m<sup>3</sup> de sel, s'accompagne d'une production de saumure de l'ordre de 8 m<sup>3</sup> et nécessite à peu près la même quantité d'eau. Ainsi la création d'une cavité de 300 000 m<sup>3</sup> nécessite 2 400 000 m<sup>3</sup> d'eau et s'accompagne de la production de 660 000 tonnes de sel sous forme de saumure (2 400 000 m<sup>3</sup>).

La durée du lessivage d'une cavité est sensiblement proportionnelle à son volume final et inversement proportionnelle au débit d'injection d'eau. Il faut compter entre 6 et 18 mois par centaines de milliers de mètres cubes creusée. L'eau douce est pompée dans une rivière ou un lac ou encore une nappe aquifère souterraine. La saumure est transportée par canalisation (*saumoduc*) vers une industrie utilisatrice (chimie du chlore et du sodium) ou vers un point de rejet (émissaire en mer en général).

Les installations de lessivage comportent essentiellement :

- a) Une série de **pompes pour l'injection d'eau**. La pression de refoulement doit être suffisamment élevée pour vaincre la différence de densité entre l'eau et la saumure dans le puits, et les pertes de charge dans le puits et les collectes d'acheminement de l'eau de la station au puits et de retour de la saumure.
- b) Une série de **pompes pour l'expédition de la saumure** de la station vers l'exutoire de saumure (industrie ou point de rejet).
- c) Des **réservoirs** ou bassins d'eau et de saumure servant de tampon.

### 3. MISE EN GAZ ET EXPLOITATION DU STOCKAGE

#### 3.1. La complétion

Le creusement par dissolution terminé, le puits est équipé ou « complété » pour la mise en gaz ou premier remplissage. L'équipement correspondant ou « complétion » comporte pour l'essentiel :

1. Une **colonne de production** doublant le cuvelage de production cimenté. A titre d'exemple, cette colonne peut avoir un diamètre 10 ¾'' s'il s'agit d'un cuvelage 13 3/8'' ou elle peut avoir un diamètre de 7'' s'il s'agit d'un cuvelage 9 5/8''. L'espace annulaire compris entre la colonne et le cuvelage est rempli d'un liquide de complétion (eau ou

saumure avec inhibiteurs de corrosion). Cette disposition, usuelle pour tout puits en exploitation de gaz naturel, a l'avantage, en isolant le cuvelage cimenté de l'effluent (gaz), de le mettre à l'abri de l'érosion et des variations de pression qui pourraient être dommageables pour la cimentation. Mais surtout, elle constitue une double enceinte de confinement pour une meilleure sécurité, car tout défaut, même minime, d'étanchéité peut être mis en évidence et contrôlé (apparition de gaz en tête de l'annulaire).

2. Une **colonne centrale**, de diamètre nominal usuel 5'', par laquelle la saumure sera évacuée de la cavité pendant la mise en gaz. Sa base doit être située le plus près possible du fond de la cavité.
3. Une **tête de puits de production**.
4. Le cas échéant, selon l'opérateur et la réglementation locale, des **vannes de sécurité** situées à quelques dizaines de mètres de profondeur afin de prévenir une éruption en cas d'endommagement sérieux de la tête de puits.

La complétion et la cavité sont parfois l'objet d'essais d'étanchéité en liquide avant le début de la mise en gaz. L'étanchéité de la complétion au gaz est vérifiée au tout début du premier remplissage.

### **3.2. La première mise en gaz**

La mise en gaz s'effectue par injection de gaz par l'espace annulaire entre la colonne de production et la colonne centrale par laquelle la saumure est extraite. La pression du gaz injecté doit vaincre la charge hydrostatique correspondant à la hauteur de saumure dans la colonne centrale (12 MPa pour une cavité à 1000 mètres de profondeur), ainsi que les pertes de charge en circulation dans le puits et dans les lignes de surface.

Pratiquement saturée en sel dans les conditions de fond, la saumure a tendance à cristalliser dans la colonne centrale et dans la ligne de surface qui l'achemine à la station en raison de sa pression et de sa température. Afin d'y remédier, la colonne centrale est lavée périodiquement par injection d'eau et la saumure est diluée en continue à sa sortie de puits.

Le premier remplissage de gaz avec évacuation de saumure se termine lorsque la profondeur de l'interface gaz-saumure atteint celle de la base de la colonne centrale. Le gaz passe alors dans la colonne centrale (on parle de « dégardage ») et y remplace la saumure ce qui se traduit par une augmentation rapide de la pression en tête. Une vanne de sécurité placée immédiatement en aval de la tête de puits se ferme alors afin de protéger les circuits de saumure.

### **3.3. Principes d'exploitation**

Deux principes d'exploitation sont envisageables :

- A. Le premier, consiste à compenser, comme en premier remplissage, toute quantité de gaz injectée ou soutirée par l'annulaire par une quantité équivalente en volume de saumure soutirée ou injectée par la colonne centrale. Cette méthode par compensation ou **balancement de saumure** est employée pour l'exploitation des fluides peu compressibles (hydrocarbures liquides et gaz de pétrole liquéfié). Bien que tout à fait envisageable pour le gaz, elle n'est pas pratiquée dans les faits en raison d'inconvénients majeurs tels que (1) la nécessité de disposer d'une réserve de saumure pratiquement saturée de volume égal à celui des cavités, (2) problèmes de corrosion et de cristallisation inhérents à la saumure, (3) débits d'injection de saumure requis très importants pour un soutirage rapide du gaz. Et ce, malgré deux sérieux avantages : (a) la possibilité de récupérer la quasi totalité du gaz donc pas de gaz irrécupérable ou « gaz coussin », et (b) le maintien d'une valeur élevée de la pression en cavité ce qui est favorable à la stabilité.
- B. Le second est basé sur la compressibilité élevée du gaz naturel et la cavité est exploitée par **compression-détente**, à l'instar d'une bouteille de gaz comprimé. Ce type d'exploitation, systématiquement adopté pour le gaz naturel, permet de s'affranchir de tout maniement de saumure et par là même de tout lien avec l'industrie du sel dès que le premier remplissage avec évacuation de saumure est achevé. Il permet également d'utiliser la place occupée par la colonne centrale d'évacuation de saumure pour la production du gaz d'où des pertes de charge moindres autorisant des débits très importants.

Le premier remplissage avec évacuation de saumure terminé, la colonne centrale désormais inutile est le plus souvent extraite sous pression (opération de « snubbing »). Une vanne de sécurité est alors ancrée par travail au câble (wire-line) dans un siège incorporé à cet effet dans la colonne de production à quelques dizaines de mètres de profondeur. Le puits est alors dans sa configuration d'exploitation.

La mise en conformité précédente correspond au cas intermédiaire où la législation impose une vanne de sécurité enterrée en exploitation, sans en imposer pendant le premier remplissage. Cette disposition devrait très probablement se généraliser.

## 4. PERFORMANCES DES CAVITES

### 4.1. Equation d'état du gaz

Appliquée à la masse de gaz dans la cavité, l'équation d'état s'écrit :

$$(1) \quad P.V = m.r.Z.T$$

Avec :

- P, T = pression et température moyennes du gaz en cavité
- V = volume de la cavité (volume en gaz)
- Z = facteur de compressibilité du gaz en fonction de P, de T et de la composition du gaz
- m = Masse de gaz contenu dans la cavité
- r = R/M



$$\begin{aligned} R &= 8,315 \text{ J.mol}^{-1}.\text{K}^{-1} \\ M &= \text{Masse molaire du gaz (kg.mol}^{-1}) \end{aligned}$$

Par la définition même du stock de gaz exprimé dans les *conditions normales* de pression et de température, l'équation d'état peut s'écrire :

$$(2) \quad P_0.S = m.r.Z_0.T_0$$

Avec :

$$\begin{aligned} P_0, T_0 &= \text{pression et température de référence, c'est-à-dire dans les conditions normales : } P_0=1,013 \text{ bar et } T_0=273,15 \text{ K (0°C)} \\ Z_0 &= \text{facteur de compressibilité du gaz dans les conditions normales (égal à 1 à quelques pour mille)} \\ S &= \text{Stock de gaz ou volume occupé par la masse (m) de gaz dans les conditions normales} \end{aligned}$$

En éliminant (m, r) entre (1) et (2), on obtient :

$$(3) \quad P.V=S.(P_0/T_0).Z.T$$

## 4.2. Thermodynamique de l'exploitation par compression/détente

L'exploitation d'une cavité est identique sur le principe à celle d'une bouteille de gaz comprimé.

La pression et la température moyenne du gaz en cavité augmente pendant le stockage et diminue pendant le déstockage. Leur évolution dépend d'un processus thermodynamique intermédiaire entre l'*adiabatique* (sans échange de chaleur avec l'extérieur) *et l'isotherme* (avec échange de chaleur avec l'extérieur) en raison des échanges thermiques entre le gaz et le massif de sel. De ce fait leur évaluation, assez complexe, nécessite un modèle prenant en compte :

- les équations de la *thermodynamique du gaz* dans la cavité et dans le puits (essentiellement adiabatique),
- la *conduction de la chaleur* dans l'environnement solide de la cavité (essentiellement isotherme).

S'agissant d'un processus à mémoire, la détermination de la pression et de la température moyennes du gaz en cavité à un instant donné nécessite la simulation de toute l'histoire thermique de la cavité depuis le début de son creusement.

## 4.3. Stock de gaz en cavité (S)

Pour des raisons d'étanchéité, on définit une pression maximale de service (PMS) et pour des raisons de stabilité une pression minimale de service (PmS). Ces deux pressions sont en règle générale définies à la profondeur du sabot (base) du cuvelage de production.

Les températures correspondantes dépendent de l'histoire thermique de la cavité (cf. # 4.2). On définit néanmoins un stock maximal (SM) et un stock minimal (Sm) théoriques, calculés par l'application de l'équation d'état du gaz, en fixant arbitrairement (guidé par l'expérience) :

- une température à la PMS (en général de l'ordre de la température géothermique à la profondeur moyenne de la cavité),
- une température à la PmS de l'ordre de 20 à 30 °C inférieure à la température géothermique.

Par souci de simplification, on admettra dans la suite que le gaz est parfait et que la température (T) est constante et égale à  $T_0/P_0=273,15/1,013$ . L'équation d'état (3 de #4.1) se simplifie :

$$(4) \quad \mathbf{P.V=S}$$

Il est important de retenir que cette approximation entraîne une erreur relative de moins de 15% sur l'inconnue déterminée.

Stock maximal	: SM= PMS.V
Stock minimal	: Sm=Pms.V
Stock utile	: Su=SM-Sm=(PMS-PmS).V

A titre d'exemple pour fixer les ordres de grandeur :

Cavité	: Volume V=300 000 m <sup>3</sup> à 1500 mètres de profondeur PMS=230 bar ; PmS=80 bar
Stock maximal	: SM=PMS.V=230.300 000=69 106 m <sup>3</sup> (n)
Stock minimal	: Sm=Pms.V=80.300 000=24 10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> (n)
Stock utile	: Su=SM-Sm=(PMS-PmS).V=45 10 <sup>6</sup> m <sup>3</sup> (n)

#### 4.4. Débit d'émission (Q)

Le principal intérêt des stockages en cavités salines est de permettre une émission de gaz sur le réseau à un débit très élevé pour un stock immobilisé assez réduit.

En soutirage, le gaz émis gagne le réseau de transport à partir de la cavité, par un puits d'exploitation, une antenne de raccordement à la station centrale et différents équipements de surface : filtre, unité de déshydratation, rampe de comptage, de réchauffement et de détente (vanne de laminage,...).

En débit stabilisé, les relations de pertes de charge dans le puits et dans les équipements de surface étant :

Puits	:	$P_t^2 = aP^2 - bQ^2$
Surface	:	$P_t^2 = P_r^2 + cQ^2$

le débit d'émission est donné par la relation :

$$(5) \quad Q = [(aP^2 - P_r^2) / (b + c)]^{0,5}$$

avec :

P : la pression « de fond » en cavité qui débite Q

P<sub>t</sub> : la pression stabilisée en tête de puits, en cours de débit

P<sub>r</sub> : la pression au point d'injection sur le réseau (ou à l'aspiration des compresseurs si nécessaires au soutirage)

a : le poids de la colonne de gaz dans le puits

$$a = \exp\left[-0,0684 \frac{d.H}{Z.T}\right]$$

avec :

- d = densité du gaz par rapport à l'air
- H(m) = profondeur du sabot du cuvelage de production
- Z = valeur moyenne du facteur de compressibilité du gaz dans le puits
- T(K) = valeur moyenne de la température du gaz dans le puits

b : le coefficient de pertes de charge dans le puits.

c : le coefficient de pertes de charge dans les installations de surface. On admet en première approximation que les pertes de charges sont quadratiques dans l'ensemble des installations de surface.

Les coefficients b et c sont inversement proportionnels à la puissance cinq des diamètres des conduites contenant la veine fluide.

La pression statique en tête de puits (P<sub>ts</sub>) correspondant au débit nul est reliée à la pression de fond par l'intermédiaire de la relation :

$$(6) \quad P_{ts} = a^{0,5} \cdot P$$

Le débit Q est déterminé par l'ouverture de la vanne de laminage. Le coefficient « c » varie d'une valeur minimale correspondant à l'ouverture maximale, à une valeur infinie correspondant à sa fermeture complète. Dans le cas où la compression au soutirage est nécessaire, Q est déterminé par la valeur de la pression à l'aspiration des compresseurs.

Les valeurs de « b » et « c » sont déterminés de la façon suivante :

b : au repos, on mesure la pression statique en tête (P<sub>ts</sub>). Ensuite, en soutirage, on mesure P<sub>t</sub> et Q. On en déduit :  $b = (P_{ts}^2 - P_t^2) / Q^2$ . L'application de cette relation n'est valable que pour une pression de fond constante entre les instants où P<sub>ts</sub> et P<sub>t</sub> sont relevés ; il convient donc de limiter au maximum le déstockage entre les mesures de P<sub>ts</sub> et P<sub>t</sub>.

c : en débit, on mesure P<sub>t</sub>, et P<sub>r</sub> et Q. On en déduit :  $c = (P_t^2 - P_r^2) / Q^2$ .

## 4.5. Grandeurs principales de la performance : P, S et Q

L'ensemble des performances des cavités correspondant à trois grandeurs (P, S et Q), peut être déterminé par les trois équations suivantes :

(a) l'équation d'état  $P.V = S$

(b) l'équation de pertes de charge  $Q = [(aP^2 - P_r^2) / (b + c)]^{0,5}$

(c) l'équation stock/débit  $Q = dS / dt$

Dans cet ensemble, le volume de la cavité (V) est calculé par un modèle de géotechnique et la pression au point d'injection sur le réseau ( $P_r$ ) est une donnée liée aux impératifs du grand transport de gaz. Le débit de soutirage (Q) peut être limité par :

- la vitesse maximale de gaz qui doit rester très largement subsonique pour éviter des nuisances sonores,
- la capacité des unités de traitement et en particulier des unités de déshydratation. En effet, le séchage du gaz est nécessaire, le gaz se chargeant en vapeur d'eau au cours de son séjour dans la cavité. Sa teneur est de 200 à 500 mg/m<sup>3</sup>(n) contre 50 mg/m<sup>3</sup> (n) maximum requis pour le transport du gaz.

## 5. STABILITE ET DIMENSIONNEMENT DES CAVITES

### 5.1. Rupture de l'équilibre naturel

Au-delà de quelques centaines de mètres de profondeur, l'état naturel des contraintes dans un massif de sel est, en général, sensiblement hydrostatique (les contraintes horizontales et verticales sont égales). Il correspond au poids des terrains. Leur densité étant de l'ordre de 2,3, la pression ou contrainte géostatique (vierge ou terrastatique) s'accroît d'environ 0,023 MPa par mètre de profondeur. A 1 000 m de profondeur, elle vaut donc environ 23 MPa (230 bar).

La réalisation d'une cavité rompt l'équilibre naturel des terrains. Il s'ensuit une instabilité mécanique dont les manifestations peuvent se traduire par une diminution de volume de la cavité par fluage ou écoulement du sel, et corrélativement par la subsidence des terrains jusqu'en surface.

En l'absence de respect des règles de l'art (dimensionnement et exploitation), des ruptures localisées voire générales apparaissent possibles. Mais il convient de noter que le sel est un matériau susceptible de tolérer de grandes déformations sans se rompre (on parle de « fluage » du sel). De fait, aucune rupture n'a été enregistrée sur le millier de cavités de stockage, dont plus d'une centaine de gaz naturel, exploitées de part le monde, depuis plus de trente ans pour les plus anciennes.

## 5.2. La loi rhéologique du sel

Les études de géotechnique pour le dimensionnement des cavités de stockage (géométrie et espacement des cavité, choix de la pression minimale de service) nécessitent des modèles mathématiques, codes aux éléments finis en général, qui intègrent les équations de base de la mécanique des milieux continus. Ces équations relient les contraintes et déformations sur un domaine modélisant le massif de sel. Parmi elles, est la loi de comportement (ou loi rhéologique) du matériau ; son écriture dépend de la nature du matériau (le verre n'a pas le même comportement que l'acier) et les valeurs des paramètres de la nuance du matériau (cristallisation, impuretés,...).

Le sel a un comportement pratiquement viscoplastique. Son domaine d'élasticité est très réduit : il est l'objet de déformations permanentes dès qu'il est soumis à des contraintes non isotropes, si faibles soient elles (plus exactement, c'est le déviateur qui compte). En fait, les déformations élastiques sont négligeables devant les déformations viscoplastiques.

La loi de comportement viscoplastique du sel est très non linéaire en ce sens que la vitesse de déformation est proportionnelle à une puissance élevée (de l'ordre de sept) des contraintes non isotropes (plus exactement de la racine carré du second invariant du déviateur des contraintes). Sa connaissance assez récente (1980), résulte des études et de l'interprétation de très nombreux essais sur des échantillons ou éprouvettes taillées dans les carottes de sel prélevées lors des forages des puits. Ces études ont été entreprises par divers centres de mécanique des roches pour répondre à la demande des compagnies de stockage.

Les valeurs des paramètres de la loi de comportement varient considérablement selon l'origine du sel (taille et orientation des cristaux, teneur en insolubles). Elles dépendent aussi de la température. Aussi est-il nécessaire, au stade de l'évaluation d'un site en vue d'y creuser des cavités de stockage, d'une part de prélever un certain nombre de carottes pendant le forage du puits de reconnaissance, et d'autre part d'enregistrer une diagraphie de température le long du puits plusieurs mois après le forage, pour que le profil réalisé soit proche de l'équilibre géothermique ou « vierge » de la formation

Les essais de laboratoire sont réalisés sur des éprouvettes taillées dans les carottes et maintenues à la température géothermique régnant à la profondeur moyenne où on projette de réaliser la cavité. L'interprétation de tels essais permet de déterminer les valeurs représentatives des paramètres de la loi de comportement du sel dans les conditions de contraintes et de température en place.

## 5.3. Les études de stabilité

Une première étape des études de stabilité est généralement réalisée à l'aide d'une **solution analytique** obtenue par intégration de la loi de comportement viscoplastique (les déformations élastiques étant négligées) en assimilant la cavité à une sphère isolée en milieu homogène et isotrope d'extension infinie. On évalue ainsi l'ordre de grandeur de l'évolution de la convergence (ou diminution de volume) d'une cavité projetée soumise au scénario d'exploitation envisagé.

Si la convergence apparaîtrait raisonnable (par exemple inférieure à 2% par an), la deuxième étape des études de stabilité est entreprise. Elle consiste cette fois à utiliser un **modèle maillé** pour optimiser, en terme de stabilité, les choix de :

- la pression minimale de service,
- la géométrie d'une cavité,
- l'espacement minimal des cavités,
- la zone sur laquelle seront développées les cavités lorsque l'épaisseur de sel est importante.

Les simulations sont cette fois effectuées en tenant compte des différentes formations environnantes et en approchant au plus près la réalité quant à la géométrie des cavités. L'attention se porte non seulement sur la convergence (l'espacement et la géométrie en étant des facteurs importants) mais encore et surtout sur les risques de rupture.

A cet égard, bien qu'aucune unanimité des rhéologues n'existe sur ce point, il semble qu'il ne peut pas y avoir de rupture du sel si en tout point les contraintes principales restent inférieures à une valeur de l'ordre de + 2,5 MPa (résistance à la traction). Notons que les contraintes de traction sont positives et celles de compression sont négatives (dans un liquide au repos, les trois contraintes principales sont égales, au signe près, à la pression).

## **6. ETAPES ET COUT DE LA REALISATION D'UN STOCKAGE DE GAZ DANS LE SEL**

Les éléments relatifs à l'exploration sont très variables selon la zone. Si la structure géologique est en forme de dôme ou s'il s'agit d'une couche épaisse étendue, un seul puits d'exploration peut suffire. Moyennant un dimensionnement adéquat, ce puits peut par la suite être utilisé pour le développement d'une cavité.

### **6.1. Equipements généraux pour le lessivage**

Avant le début de creusement de la première cavité, il faut réaliser les équipements suivants :

- Une conduite (saumoduc) pour transporter la saumure du site au point de livraison.
- Une station centrale de lessivage (aqueduc ou puits d'eau, pomperie d'eau et saumure, réservoirs tampon).

Ces équipements, devant de quelques années la mise en service de la première cavité, ont un poids important dans le coût du stockage.

### **6.2. Démarches administratives**

Sur le plan administratif, il faut obtenir :

- Un permis minier d'exploitation de mine de sel.
- Une autorisation de stockage.

### 6.3. Dépenses spécifiques au creusement d'une cavité

Le creusement de chaque cavité nécessite les investissements **fixes** suivants :

- Une plate forme pour le puits ainsi que son accès.
- Une plate forme pour le puits ainsi que son accès.
- Les canalisations eau et saumure reliant la station centrale au puits.
- L'équipement sur plate forme relatif au contrôle du développement du toit.
- L'équipement sur plate forme relatif à l'essai d'étanchéité.

A ces frais fixes s'ajoutent des investissements sensiblement **proportionnels** au volume creusé :

- L'énergie de pompage (électricité en général).
- Manœuvres des tubes de lessivage.
- Des mesures de forme de la cavité.
- Les dépenses de personnel et d'entretien relatives au creusement sont comptabilisées en équipement pour un stockage et en fonctionnement pour une exploitation minière.

### 6.4. Dépenses d'équipement gaz

L'équipement gaz comprend une station centrale regroupant :

- La compression.
- Le traitement du gaz (filtrage, séchage).
- Le traitement du gaz (filtrage, séchage).

Par ailleurs il faut compter :

- Les collectes reliant les têtes de puits à la station centrale.
- Les complétions gaz de puits.
- Le stock minimal ou gaz coussin proportionnel au volume des cavités.

### 6.5. Indicateur économique d'investissement

L'indicateur économique d'investissement de stockage est le **prix du mètre cube normal utile disponible crée actualisé**. Il est égal au rapport de la somme des dépenses d'investissements actualisées, à celle des incréments de stock utile créés actualisés.

Pour un site donné, ce prix est d'autant plus faible que le nombre de cavités et le volume de chaque cavité sont importants, et que les cavités sont réalisées rapidement.

## **7. BREF HISTORIQUE ET PLACE DU STOCKAGE DE GAZ NATUREL EN CAVITES CREUSEES DANS LE SEL**

La technique du stockage de gaz naturel en cavités dans le sel est assez récente, les premières réalisations datant du début de la décennie 1960-1970 (Michigan/USA et Saskatchewan/Canada). Aujourd'hui on compte plus d'une centaine de cavités de stockage de gaz naturel réparties sur environ 25 sites dans le monde.

Le nombre cavités par site est généralement plus faible (1 à 4) dans les pays où les compagnies exploitantes sont nombreuses (USA, Allemagne) que dans ceux où l'exploitation est régie par le monopole d'une ou deux compagnies.

Pour des raisons technico-économiques et grâce à une meilleure connaissance du comportement mécanique du sel, le volume creusé par cavité en moyenne est passé de 100 000 m<sup>3</sup> environ dans la décennie 1960/1970 à environ 400 000 m<sup>3</sup> dans la décennie 1990/2000.

En 1990, le premier stockage en cavités par sa capacité était celui de NUTTERMOOR (Allemagne) avec un stock total de 700 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup> (n) en 12 cavités. A la même année, il était suivi par celui d'ETREZ (France) avec un stock total de 600 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup> (n) également en 12 cavités. De très importants projets existent avec notamment le développement du stockage de EPE (Allemagne) dont la capacité doit être portée à 1 800 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup> (n) répartie cavités en 25 cavités, et la poursuite du développement d'ETREZ qui verra sa capacité dépasser les 1 000 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup> (n) avec plus de 20 cavités dans les toutes prochaines années. Les capacités des sites de cavités sont en générale notablement inférieures à celles des stockages en milieux poreux (nappes aquifères, gisements déplétés) qui dépassent souvent les 10<sup>9</sup> m<sup>3</sup> (n) de stock total.

En revanche, les performances en débit d'émission des stockages en cavités très importantes en font des ouvrages bien adaptés à la couverture des besoins d'extrême pointe. En fait, un petit stockage de 3 ou 4 cavités (stock total d'environ seulement 300 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup> (n)) peut émettre sur le réseau de transport un débit de plus de 10 10<sup>6</sup> m<sup>3</sup> (n) /jour. Ce rythme est équivalent voire supérieur à celui des stockages en milieux poreux de capacités 5 à 6 fois supérieures.

En conséquence, l'idéal est de pouvoir disposer de stockages en milieux poreux pour les capacités et de stockages dans le sel pour les performances de pointe. Dans la pratique, ce sont les possibilités géologiques qui font la décision. Par exemple, dans le Bassin de Paris où il existe des structures anticlinales contenant des nappes aquifères de bonnes caractéristiques et où les couches de sel (à l'Est de la zone) sont rares, peu épaisses et chargées en insolubles, les stockages sont réalisés en aquifères. Au contraire, en Allemagne du Nord où les dômes de sel sont étendus et nombreux, les stockages sont creusés dans le sel.

## **BIBLIOGRAPHIE**



HUGOUT, B. – « *Comportement thermodynamique du gaz dans les cavités de stockage et dans les puits de production* », 99<sup>ème</sup> Congrès de l'Association Technique de l'Industrie du Gaz en France, Paris, Septembre 1982.

FAUVEAU, M., LE BITOUX P., - « *Progrès récents de la connaissance du comportement mécanique des cavités salines,* » Revue de l'Institut Français du Pétrole, Vol. 42, N°4, Juillet-Août 1987.

DURAND ,C., DURUP, G., CHAUDAN, E., - « *Les vingt années d'expérience de Gaz de France dans le creusement de cavités dans le sel pour le stockage de gaz naturel* », 105<sup>ème</sup> Congrès de l'Association Technique de l'Industrie du Gaz en France, Paris, Septembre 1988.

BEREST, P., - « *Problèmes de mécanique associés au stockage souterrain* », Thèse de doctorat de l'Ecole Nationale Supérieure des Mines de Paris, Février 1989.

BERGUES J., DURUP G., VOUILLE G. & YOU T. - « *Etude de la Stabilité des Cavités Lésivées dans le Sel. Proposition d'un Critère de Dimensionnement* », Comptes-Rendus du Congrès de la Société Internationale de Mécanique des Roches (ISRM), Lisbon (Portugal), 1993.

DURUP G. & XU J., - « *Comparative Study of Certain Constitutive Laws used to Describe the Rheological Deformation of Salts* », Proc. of the Third Conference on the Mechanical Behaviour of Salt, Palaiseau (France), 1993.

DURUP G., NGUYEN MINH D. & BRAHAM S. – « *Surface Subsidence Over Deep Solution-mined Storage Cavern Field* », Proc. of the Third International Conference on Case Histories in Geotechnical Engineering, St. Louis (Missouri, USA), 1993.

ALLA N., BEREST P., DURUP G. & BLUM P.A., - « *Essais Mécaniques en Place dans les Cavernes Remplies de Saumure* », 4<sup>ème</sup> Colloque Franco-polonais de Géotechnique, Nancy (France), 1993.

DURUP G., TIJANI S.M. & VOUILLE G. - « *The Consideration of the Leaching Phase in the Study of the Evolution of Gas Storage Caverns in Rock Salt* », Paper of the Fall Meeting of the Solution Mining Research Institute (SMRI), Hannover (Germany), 1994.

DURUP G. & DESGREE P., - « *Comportement du Sel In-situ Sous des Pressions Très Elevées* », Proc. du International Gas Research Conference, Cannes (France), 1995.

DURUP G., NGUYEN MINH D. & QUINTANILHA DE MENEZES E., - « *Subsidence Analyses over Leached Salt Gas Storage Cavern* », IAMAC 97 9th Intern. Conference of the International Association for Computer Methods and Advanced Geomechanics, Wuchan (Chine), November 1997.