

L'expérience du "Gaz de France" en matière de réservoirs souterrains de gaz comprimés

par Ch.-B. Roux

Chef du Département "Réservoirs souterrains"
de la Direction des Etudes et Techniques nouvelles,
Gaz de France, Paris

Le problème du stockage de l'énergie se pose avec de plus en plus d'acuité étant donné le développement de son utilisation qui rend difficile l'adaptation des moyens de production et de transport aux variations aléatoires et brutales de la consommation.

Si le stockage de certains combustibles liquides ou solides est possible chez le consommateur, il n'en est pas de même quand l'énergie se trouve sous forme électrique ou sous forme gazeuse.

Le stockage souterrain apporte une solution intéressante au cas des combustibles gazeux et d'importantes réserves ont été constituées à proximité des centres de consommation. Pour fixer les idées, il est intéressant de rappeler qu'un seul stockage souterrain (comme celui de Saint-Illiers ou de Chemery) est capable d'emmagasiner une quantité d'énergie du même ordre de grandeur que la totalité des réserves énergétiques constituées par les grands barrages hydrauliques de l'Electricité de France.

Des stockages analogues à ceux qu'a réalisés le Gaz de France sont susceptibles d'être utilisés pour constituer des réserves d'air comprimé en vue de l'accumulation d'énergie. Cependant, l'énergie sera, à volume égal, beaucoup plus faible (environ cinquante fois), puisqu'on utilise seulement l'énergie de compression du fluide stocké. Pour assurer des puissances équivalentes, il faudra modifier sensiblement les conditions d'exploitation; c'est ce que nous tenterons d'examiner après avoir décrit brièvement les techniques actuellement mises en œuvre pour le gaz.

Le stockage souterrain du gaz naturel

Au temps des usines à gaz traditionnelles, le gaz était utilisé d'abord pour l'éclairage, puis pour la cuisine; les variations des besoins étaient surtout journalières et les différences d'une saison à l'autre étaient peu marquées et en tout cas très progressives. A cette époque, les usines à gaz avaient un rôle local et les gazomètres classiques, acces-

soires indispensables des usines, suffisaient pour assurer la fonction de stockage.

Aujourd'hui, le gaz naturel s'est substitué au gaz manufacturé, un réseau de transport à grande distance a été mis en place (plus de 16 000 km actuellement) et les usines à gaz sont éteintes; la production est assurée par les grands gisements français et étrangers.

Cette évolution, jointe au développement du chauffage domestique, a rendu nécessaire la création de stockages de modulation saisonnière.

Problème de modulation.

Le Gaz de France doit faire face actuellement à une demande saisonnière puisque, au cours de l'année, plus de 60 % du gaz est émis pendant les cent cinquante jours d'hiver.

Pendant l'année 1970, le rapport de l'émission mensuelle (*) la plus élevée à l'émission mensuelle la plus faible atteignait 4,1; il était seulement de 2,1 en 1960 (fig. 1).

Les variations de température ont une influence — immédiate et difficilement prévisible — très sensible sur la consommation du gaz; elles entraînent des « pointes journalières ». Au cours du même exercice 1970, le rapport de l'émission maximale (*) journalière à l'émission minimale a été égal à 9,2.

Les stockages souterrains, en injection l'été, en soutirage l'hiver (fig. 2), ont été indispensables pour faire face à ces variations d'émission. Ils ont d'ailleurs, dans certains cas, fourni une modulation hebdomadaire comme le montre nettement la figure 3; à la limite, une modulation journalière serait possible.

Différentes techniques de stockages souterrains et conditions d'exploitation.

En France, deux techniques sont utilisées pour constituer les réserves de gaz naturel.

(*) Il s'agit des émissions du Gaz de France. Ce chiffre ne tient pas compte des clients industriels alimentés par la Compagnie Française du Méthane ou par la Société Nationale des Gaz du Sud-Ouest.

Ch.-B. ROUX

LES RÉSERVOIRS EN NAPPE AQUIFÈRE.

On connaît le principe du stockage en nappe aquifère qui consiste à réaliser, en utilisant les pores des roches du sous-sol (sable, grès, calcaire), l'équivalent d'un gisement de gaz naturel.

Il est bien évident qu'un tel stockage ne peut être créé que dans la mesure où les conditions géologiques nécessaires se trouvent réunies, c'est-à-dire qu'il faut à la fois :

- une couche poreuse et perméable susceptible de recevoir le gaz et de permettre les mouvements saisonniers cycliques;
- une couverture imperméable empêchant le gaz de s'évaporer vers les niveaux supérieurs;
- une forme générale des couches en dôme qui oblige le gaz à rester au voisinage des puits d'exploitation.

La figure 4 montre la coupe d'une structure apte au stockage. Lors de la reprise du stock, la hauteur de la zone occupée par le gaz diminue jusqu'au moment où la fourniture du débit souhaité devient impossible, car l'eau envahit la base des puits; la quantité de gaz en place dans le réservoir à cet instant est appelé gaz coussin (V_c). La quantité de gaz que l'on peut injecter, puis récupérer lors des cycles normaux d'exploitation, est appelée gaz utile ou respiration (V_u) du réservoir.

La notion de gaz coussin est très importante car elle intervient considérablement sur l'économie du stockage souterrain. En général, pour un stockage souterrain de gaz naturel, V_c et V_u sont du même ordre de grandeur; le coût du gaz coussin est sensiblement équivalent à celui de la totalité des investissements (puits, compresseurs, déshydratation, etc.) nécessaires à l'équipement du stockage. Nous verrons que pour équiper une structure aquifère pour le stockage de l'air comprimé, il convient d'augmenter considérablement le gaz coussin.

LE STOCKAGE EN CAVITÉS CREUSÉES DANS LE SEL.

Le sel est un matériau dont il existe d'importantes quantités dans le sous-sol. De plus, il est imperméable et on peut y creuser des cavités par dissolution à l'eau douce. L'idée

est donc venue très vite de réaliser des cavités creusées dans le sel en vue du stockage.

Certaines cavités sont utilisées depuis plusieurs années pour le stockage des hydrocarbures liquides, propane et butane notamment, mais pour le gaz naturel, la technique est relativement récente.

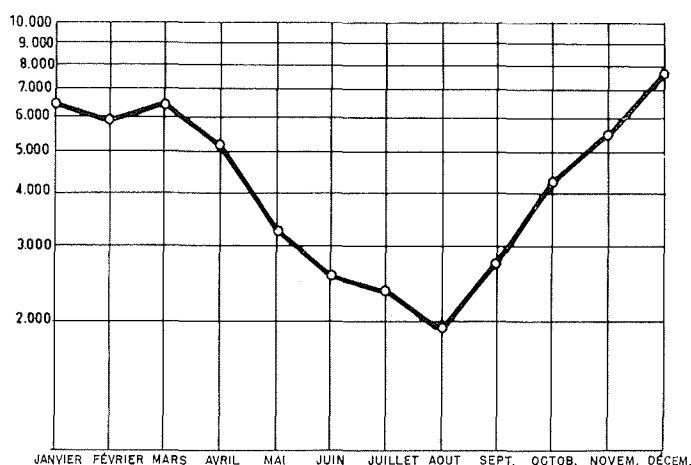
Le principe de création du stockage est simple : dissoudre à l'eau douce le sel et évacuer la saumure en partant d'un seul puits qui servira ensuite pour l'injection et le soutirage du gaz. Pour cette opération, il faut prendre toutes les dispositions afin d'obtenir une cavité dont la forme soit le mieux adapté à la stabilité, ce qui demande une grande maîtrise du lessivage.

L'ordre de grandeur du volume ainsi réalisé est essentiellement fonction de l'épaisseur de la couche de sel qui doit par ailleurs être très homogène pour que toute la hauteur de découvert puisse être lessivée d'une façon régulière. La forme généralement obtenue est comparable à une bouteille ou à une poire. Le rapport entre le diamètre et la hauteur est de l'ordre de 1/3 ou 1/2, c'est-à-dire qu'avec une hauteur de 100 m on peut atteindre des volumes de 100 000 à 200 000 m³ (fig. 5).

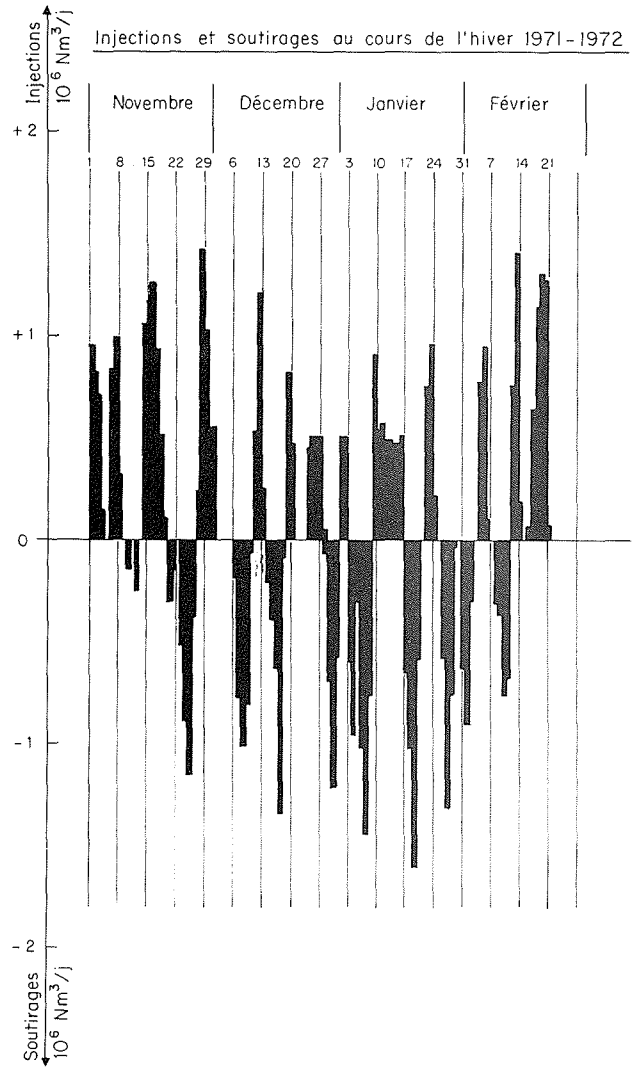
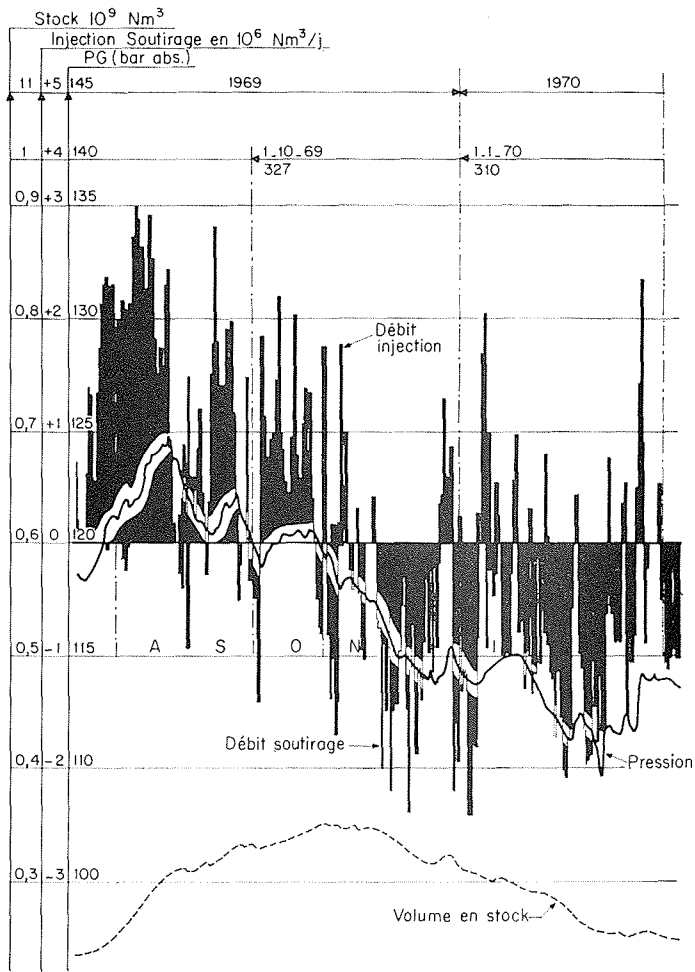
La capacité de stockage est alors, pour un volume de cavité donné, proportionnelle à la pression maximum d'utilisation, c'est-à-dire à la profondeur. Quant au volume utile, il est égal au volume total de gaz emmagasiné si l'on utilise le secours d'un fluide intermédiaire (saumure) pour déplacer le gaz, sinon à la « respiration » déterminée par les pressions extrêmes de fonctionnement; dans ce dernier cas, le volume utile atteint 60 à 70 % du gaz stocké.

La profondeur du sel, son épaisseur (qui conditionne le volume unitaire des cavités), le mode d'exploitation retenu, conduisent à des variations sensibles du coût du mètre cube stocké.

Par rapport aux aquifères, les cavités offrent des possibilités de débit beaucoup plus importantes. Si l'on désigne par Q le débit quotidien de soutirage, le rapport Q/V_u est en général pour un aquifère de l'ordre de 1/50 à 1/40; il atteint des valeurs très supérieures pour une cavité saline, ce qui permet des possibilités plus grandes pour faire face à l'extrême pointe.



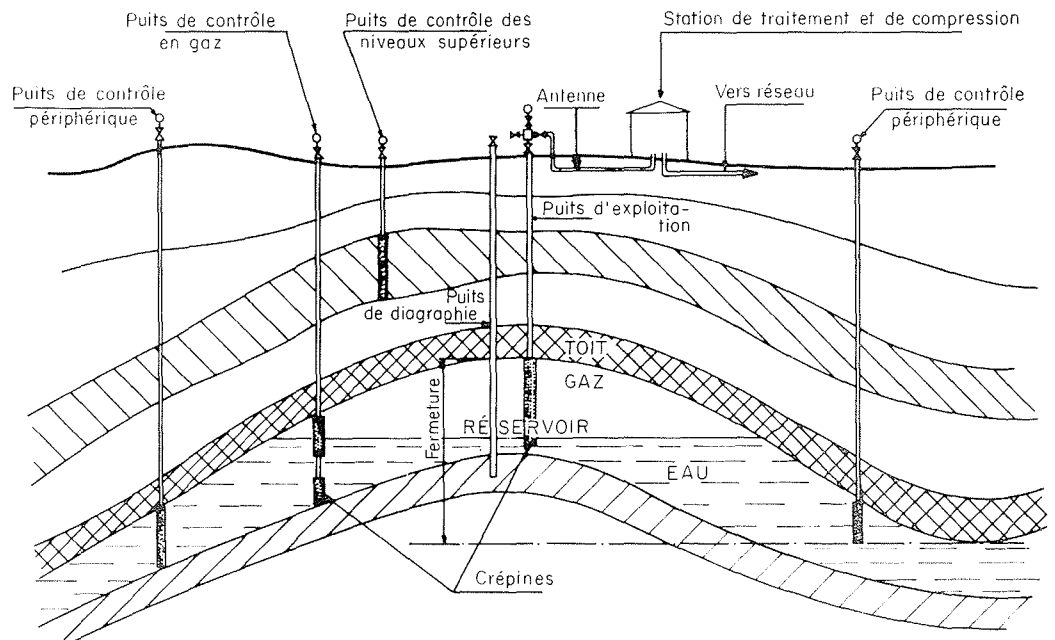
1/ Evolution des émissions du Gaz de France en 1970 (en millions de thermies).



2/

3/

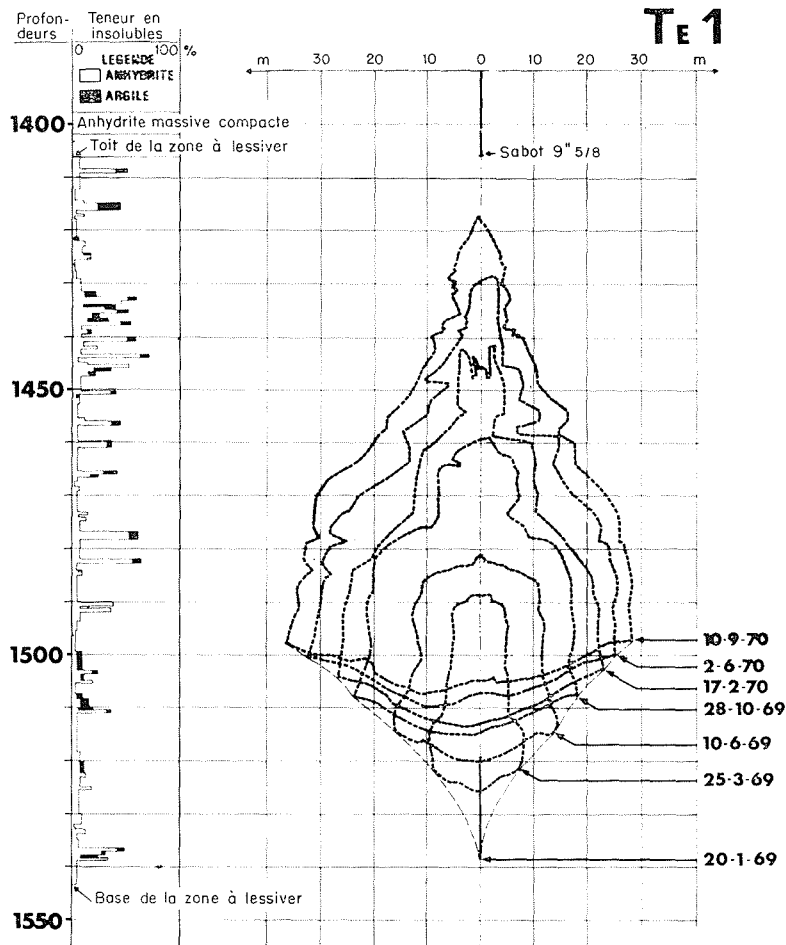
2/ Réservoir souterrain de Chemery.



3/ Réservoir souterrain de Velaine-Cercueil.

4/ Coupe schématique d'un réservoir en aquifère.

4/



5/Coupe schématique d'une cavité de stockage dans le sel.
Evolution de forme pendant le lessivage.

Application des techniques gazières au problème du stockage de l'air comprimé

Conditions d'exploitation.

Pour la fourniture d'une énergie d'extrême pointe, le stockage doit délivrer, pendant quelques heures par jour, un certain débit d'air comprimé, le regarnissage s'effectuant pendant les heures creuses de la nuit. La respiration du stockage porte alors sur 24 h au lieu d'un an pour le gaz naturel.

Or, l'équipement des stockages de gaz est généralement conçu pour que le débit maximum de soutirage journalier soit une fraction ($1/40^e$ à $1/50^e$ pour les aquifères) du volume utile stocké; pour l'air comprimé, ce rapport Q/V_u doit atteindre 3 ou 4 et c'est par un coefficient supérieur à 100 qu'il faut — à volume en stock égal — multiplier la production instantanée quand on passe du stockage de gaz naturel au stockage d'air comprimé. Il convient d'examiner comment les mêmes techniques peuvent être utilisées dans l'un et l'autre cas.

Cas des aquifères.

A première vue, multiplier par un coefficient supérieur à 100 le débit de soutirage, impose d'augmenter dans les

mêmes proportions le nombre de puits, car ceux-ci — seuls accès à la réserve de gaz constituée dans le sous-sol — fixent les performances du stockage.

Pour réduire le nombre de puits à une valeur raisonnable, on peut agir sur deux paramètres :

AUGMENTATION DU VOLUME DE GAZ COUSSIN.

A la première mise en gaz d'un aquifère, on déplace l'eau contenue dans les pores de la roche et, à la fin du remplissage, le gaz est emprisonné entre la couche supérieure imperméable et le plan d'eau qui se crée à la face inférieure du réservoir.

Pendant le soutirage, le plan d'eau remonte légèrement, mais cette remontée n'apparaît qu'après un certain temps car l'eau se déplace relativement lentement dans le milieu poreux. Dans un stockage à respiration journalière, tout se passe comme s'il s'agissait d'un réservoir à volume constant.

Pour l'exploitation du stockage d'air comprimé, il est intéressant d'éviter les variations importantes de pression, ce qui conduit à une augmentation du gaz coussin d'autant plus facile à réaliser que son coût est plus faible.

Un plus grand volume de gaz coussin a d'autres conséquences intéressantes. D'une part, il facilite l'implantation des puits d'exploitation en offrant une surface de bulle plus importante, d'autre part il peut, dans certains cas, autoriser l'exploitation des puits à un débit plus élevé. En effet, la productivité d'un puits d'aquifère est limitée par les risques

de venues d'eau en fin de soutirage (water coning), risques qui sont d'autant plus faibles que la période de soutirage est plus courte et que le volume en stock est plus important.

Dans le cadre de la présente étude, il est difficile d'analyser plus avant l'incidence du volume en stock sur le water coning et de conclure de façon précise sur l'influence du gaz coussin sur la productivité des puits. En effet, chaque aquifère nécessite, à partir de ses caractéristiques propres, une étude spécifique; si l'on veut cependant fixer les idées, on peut admettre que multiplier le rapport V_c/V_u par un coefficient compris entre 10 et 20 permet de doubler, voire de quadrupler le débit nominal des puits.

MODIFICATION DE L'ÉQUIPEMENT DES PUITS.

L'équipement traditionnel des puits des stockages souterrains de gaz est réalisé avec un tube de production situé à l'intérieur du casing et un espace annulaire de contrôle. Ce dispositif, indispensable pour la sécurité, augmente très sensiblement les pertes de charge dans le puits.

Pour l'air comprimé, il n'est pas nécessaire de prendre de telles précautions et l'on peut assurer la production à la fois par le tubing et l'espace annulaire. Cette modification permet (pour des conditions identiques par ailleurs) de multiplier le débit par 4 pour une perte de charge équivalente.

Cas des stockages dans le sel.

La création de cavités dans le sel, en vue d'y emmagasiner du gaz, est d'invention relativement plus récente. Les nombreuses études réalisées par le Gaz de France ont permis d'établir des modèles mathématiques indispensables pour assurer le creusement des cavités dans les meilleures conditions techniques, notamment pour simuler l'avancement de la paroi de sel pendant le lessivage et donner à la cavité la forme souhaitée.

Ce point est fondamental car il assure, dans une couche donnée, le volume maximum compte tenu des impératifs de stabilité.

Bien entendu, toutes ces études sont directement utilisables pour la création des cavités en vue du stockage d'air comprimé.

Il reste à examiner comment les problèmes d'exploitation peuvent être transposés. Pour cela il convient de distinguer deux cas :

EXPLOITATION PAR DÉPLACEMENT A LA SAUMURE.

L'air contenu dans la cavité est déplacé par une injection de saumure. Ce procédé permet de délivrer de l'air à une pression constante en surface, tandis que les conditions thermodynamiques dans la cavité varient peu : la température et la pression y sont sensiblement constantes. Mais, si l'accès à la cavité se fait par un puits unique, l'air transite par l'espace annulaire, la saumure par le tubing central, or les débits demandés ne sont compatibles avec les pertes de charge que dans la mesure où :

- la cavité est d'un faible volume;
- la cavité est peu profonde;
- le diamètre du puits est important.

Enfin, la nécessité de disposer en surface d'une réserve de saumure dont le volume est égal à celui de la cavité alourdit sensiblement le montant des investissements.

EXPLOITATION PAR DÉTENTE.

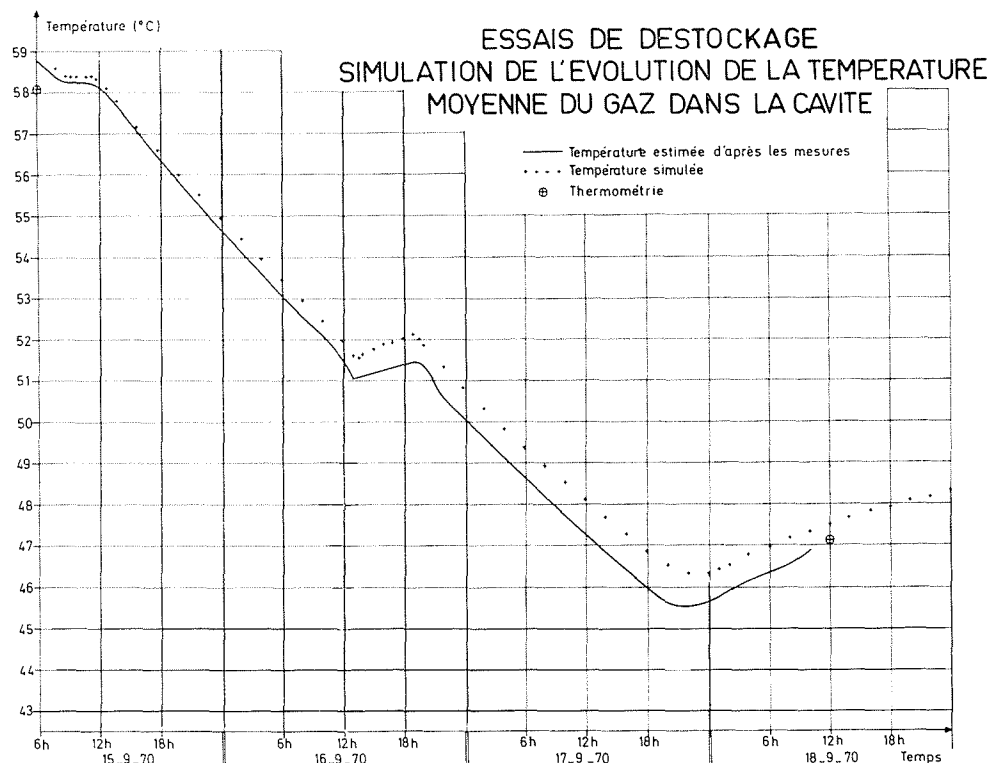
Bien que les relations entre volume utile et volume coussin d'une part, entre débit instantané de soutirage et volume utile d'autre part, ne soient pas les mêmes (cf. tableau), l'exploitation par détente pose des problèmes identiques qu'il s'agisse de gaz naturel ou d'air comprimé; à cet égard, l'expérience acquise par le Gaz de France dans l'exploitation de Tersanne est intéressante.

Parmi les problèmes qui se posent en cours d'exploitation, il en est un, particulièrement difficile à traiter, qui concerne l'évolution de la température de l'air soutiré au cours des cycles rapides d'injection et de soutirage. Il faut s'assurer, en effet, que la détente rapide de l'air n'entraîne pas de variations de température trop élevées au soutirage.

Pour traiter ce problème, le Gaz de France a établi un modèle de comportement thermodynamique du gaz pour rendre compte de l'évolution à masse spécifique variable d'un gaz réel sec échangeant par convection naturelle turbulente de la chaleur avec le massif de sel entourant la cavité soumise à un régime variable de diffusion thermique; une simulation numérique a été effectuée d'après ce modèle pour une période d'exploitation de cinq semaines sur une des cavités de Tersanne. Les résultats concernant la température

Ordre de grandeur des performances attendues d'un stockage équipé pour le gaz naturel ou pour l'air comprimé

	STOCKAGE ÉQUIPÉ POUR LE GAZ NATUREL	STOCKAGE ÉQUIPÉ POUR L'AIR COMPRIMÉ
I. AQUIFÈRE		
Rapport du débit de pointe au volume utile : Q/V_u	1/40 à 1/50	3 à 4
Rapport du volume utile au volume coussin : V_u/V_c	1	1/10 à 1/20
Nombre de puits d'exploitation.....	de l'ordre de 20	40 à 100
II. CAVITÉS DANS LE SEL		
Rapport du débit de pointe au volume utile.....	peut atteindre 1/5	3 à 4
Rapport du volume utile au volume coussin V_u/V_c (exploitation par détente).....	le plus souvent supérieur à 2	1/5 à 1/10



du gaz ont été confirmés à 0,5 °C. La figure 6 montre l'excellente concordance entre les températures de fond estimées par mesures de pression et bilan gaz et les températures calculées.

Depuis cette époque, une approche de l'influence de la vapeur d'eau sur le processus thermodynamique a été effectuée et le modèle peut en tenir compte.

Aperçu économique

Il est impossible de chiffrer les coûts de mise en œuvre des différentes techniques que nous venons de décrire tant que les paramètres physiques qui peuvent intervenir ne sont pas précisés. On peut cependant indiquer des ordres de grandeur à partir de l'expérience acquise.

Pour le stockage du gaz naturel on cherche à déterminer le prix du mètre cube de gaz soutiré d'un réservoir souterrain. Ce prix est obtenu en ajoutant au prix du mètre cube injecté les charges financières d'amortissement du stockage et ses charges d'exploitation (dépenses de main-d'œuvre, d'entretien, d'énergie, etc.). On considère généralement que l'incidence du stockage entraîne une majoration de coût de l'ordre de 2 à 3 CF/m³N pour les aquifères, légèrement supérieure pour les cavités dans le sel.

Ces chiffres n'ont pas grande valeur pour préciser l'intérêt économique des techniques de stockage pour l'air comprimé. Dans ce cas, en effet, le gaz coussin, qui représente près de la moitié du coût d'investissement pour les stockages de gaz, n'a pas la même valeur et, par ailleurs, il est plus intéressant de préciser pour l'air comprimé la charge proportionnelle au débit de soutirage puisqu'en définitive c'est ce débit qui définit la puissance installée.

Les études réalisées par le Gaz de France pour équiper un aquifère ou des cavités salines en vue du stockage d'air comprimé ont permis de préciser le coût d'équipement moyen concernant la partie souterraine de ces ouvrages.

C'est ainsi qu'un aquifère susceptible de délivrer 1 Mm³/h d'air sous 15 bars pendant 5 à 6 h par jour pourrait être équipé pour une dépense de l'ordre de 50 F par m³N/heure. Quant à l'équipement de cavités salines exploitées par détente, assurant les mêmes performances, le coût pourrait être sensiblement moins élevé, de l'ordre de la moitié.

Conclusion

L'accroissement des besoins pour la production d'énergie d'extrême pointe peut être assuré par la mise en œuvre de techniques analogues à celles utilisées par le Gaz de France pour assurer la modulation de ses émissions. Les cavités dans le sel paraissent d'ailleurs les mieux adaptées pour résoudre ce problème.

On risque cependant d'être vite limité dans les puissances mises en œuvre en raison des très gros débits d'air qu'il faut soutirer. A cet égard, l'utilisation des aquifères semble — sauf cas particuliers où l'injection de gaz naturel est impossible pour des raisons techniques ou géographiques (environnement) — plus intéressante avec du gaz naturel. Celui-ci permet, en effet, la mise en œuvre de puissance thermique considérable: puisqu'un seul puits du stockage de Saint-Illiers correspond à une puissance de 450 MW, l'ensemble du stockage pouvant soutirer un débit de gaz correspondant à une puissance thermique de 5 GW

Abstract

"Gaz de France" experience with underground compressed-gas reservoirs

I. UNDERGROUND STORAGE OF NATURAL GAS.

In order to modulate its gas supplies, Gaz de France has had to set aside substantial reserves of gas. With gas-heating on the uptrend, temperature variations give rise to large time-variations in gas supplies (Figure 1).

Figures 2 and 3 show annual and weekly variations in supplies drawn from certain typical reservoirs.

Two techniques are used in France to constitute reserves of natural gas. By making use of porous rocks (sand, sandstone, limestone etc.), *reservoirs in groundwater aquifers* can be set up. These are equivalent to deposits of natural gas (Figure 4). A more recent technique consists in hollowing out *cavities in salt deposits*. Figure 5 shows a cross-section through a salt-deposit storage cavity at Tersanne.

II. APPLICATION OF GAS TECHNIQUES TO COMPRESSED AIR STORAGE.

In order to ensure power supplies during periods of peak demand, compressed air is withdrawn from storage for a few hours per day, the reservoir being topped up again overnight. Reservoir "breathing cycle" thus covers 24 hours instead of a whole year in the case of natural gas.

The performances of compressed-air and natural-gas reservoirs are quite dissimilar. If Q is the outflow in m^3/day at NTP, V_a the volume of air or gas withdrawn during one cycle (reservoir breathing value) and V_c the buffer volume i.e. the volume of air or gas which remains in the reservoir to ensure correct operation, then the time variations of these variables are as shown in the table. The following points are of special interest :

(a) *Aquifers.*

Buffer gas volume is larger by a factor of 10 to 20. This makes operation easier by avoiding water-coning in the wells and by increasing well yields. Setting up wells is also made easier by the relative size of the compressed-air bubble.

Also of interest are the modifications to well equipment which increase potential well yields.

(b) *Salt-cavity reservoirs.*

If operation with gas expansion is used, the buffer volume should be increased to avoid excessive temperature and pressure variations during withdrawal.

III. ECONOMIC ASPECTS.

The investigations carried out by Gaz de France with a view to equipping aquifers or salt cavities for compressed-air storage have led to an estimation of the average cost of the underground portion of the equipment.

To equip an aquifer for the supply of $1 Mm^3/hr$ of 15-atm. compressed air during five or six hours per day would cost approximately 50 F per m^3/hr (NTP). The cost of equipping equivalent-performance salt cavities operating with gas expansion would be about half the above figure.

IV. CONCLUSIONS.

Natural-gas storage techniques are well suited to storing compressed air for peak-hour power supply. Cavities hollowed out in salt deposits would appear to afford the best means of storage.