

Le stockage souterrain du gaz aux U.S.A. et ses possibilités d'application en Europe

Dr.-Ing. H. JUST, Essen (*)

Traduit de « Das Gas- und Wasserfach », n° 1, 1953, par INICHAR.

La possibilité d'emmagasinage des différentes formes d'énergie.

Quand on compare le gaz et l'électricité, on souligne généralement comme avantage propre au gaz, son aptitude à être emmagasiné. Cette thèse ne peut être contredite car le gaz possède poids et volume qui manquent à l'électricité et qui constituent les conditions fondamentales de l'aptitude au stockage. Cependant, le gaz est très défavorisé en tant que matière à emmagasiner, l'énergie qu'il contient par unité de volume étant extraordinairement faible. Par exemple, un litre de gaz de cokerie à la pression atmosphérique contient 4 kcal, tandis qu'un litre d'huile de chauffage en contient 9 000, soit une quantité d'énergie deux mille fois plus forte. Ajoutons, comme circonstance aggravante, que le gaz, en raison de sa volatilité, ne peut être emmagasiné que dans des espaces fermés de tous les côtés. C'est pourquoi, dans le passé, on a uniquement compensé les pointes journalières et hebdomadaires par des réservoirs artificiels coûteux pour lesquels un volume d'emmagasinage d'environ 70 % du débit journalier moyen était considéré comme suffisant.

Aussi longtemps que l'on n'eut pas à résoudre le problème des pointes d'hiver, il fut possible par ces moyens d'exploiter les installations de production de gaz à pleine capacité. Pendant ce temps, faute de possibilité de stockage, l'électricité devait s'adapter aux besoins instantanés en tenant en réserve des moyens de production prêts à intervenir, ce qui conduisait, en comparaison avec le gaz, à une utilisation moindre de la capacité totale de production installée.

Les possibilités de stockage n'ont pu suivre le rythme d'accroissement de l'emploi du gaz dans la République fédérale, conséquence de la mise en œuvre de réseaux de transport à distance du gaz de cokerie. Il s'ensuit que, pour une consommation qui atteignait 10 milliards de m³ en 1951, on ne

dispose que de 6 millions de m³ de réservoir, ce qui, à pleine utilisation, correspond à 5 h de consommation moyenne. Dans une certaine mesure, la capacité des conduites à distance s'ajoute à celle des réservoirs; mais l'ensemble ne suffit même pas à assurer dans la mesure désirable, en ce qui concerne les variations journalières et hebdomadaires, l'emmagasinage du gaz aux moments de faibles charges et la restitution aux moments de fortes charges.

Il est donc nécessaire de prévoir une compensation supplémentaire qui consiste dans une production annexe au moyen d'installation de réserves élastiques — gazogènes ou générateurs de gaz à l'eau — en cas de manque de gaz. Dans le cas de pléthore, le gaz excédentaire est employé à la production de vapeur, chose d'ailleurs indésirable en soi. Il serait toutefois impossible par ces moyens de résoudre économiquement le problème de la pointe d'hiver que provoquerait le chauffage domestique au gaz pratiqué sur une grande échelle.

Tandis que, en Allemagne et autres pays d'Europe où les conditions sont similaires, l'industrie du gaz ne dispose que d'une réserve emmagasinée correspondant à quelques heures de consommation, il existe en général, pour les formes d'énergie concentrée liquide que sont l'essence et le mazout, une possibilité d'emmagasinage pouvant couvrir les besoins de plusieurs mois.

L'industrie électrique ne pouvant stocker des kWh a fait de gros investissements pour réaliser, par le truchement de l'énergie hydraulique, au moins une possibilité indirecte de stockage. La centrale de barrage avec apport naturel d'eau ne peut être considérée comme réalisant le stockage du courant. Il s'agit en fait d'une centrale de pointe qui s'alimente artificiellement en énergie hydraulique fournie par la nature, tout comme une centrale thermique s'alimente en charbon, en vue d'une transformation à sens unique en courant électrique au moment des besoins les plus forts, c'est-à-dire en hiver, tout comme pour le gaz. Toutefois, les centrales de barrage donnent aujourd'hui à l'industrie électrique, dans maints

(*) Rapport présenté à la Conférence annuelle de la « Deutsche Gesellschaft für Mineralölwissenschaft und Kohlechemie », le 2 octobre 1952, à Goslar.

pays, une souplesse qui manque actuellement à l'industrie du gaz. La Suisse vient en tête des pays européens en ce qui concerne le développement de l'énergie hydraulique. Elle peut emmagasiner dans ses barrages, pour ses 4,7 millions d'habitants, une quantité d'eau correspondant à une provision d'hiver de 1,3 milliard de kWh (1), ce qui équivaut à 330 millions de m³ de gaz de cokerie pour le chauffage domestique. Par contre, l'installation réversible de pompe d'accumulation représente un véritable stockage de courant. Elle transforme en eau sous pression le courant en excès produit dans les centrales thermiques, pour la convertir en retour en énergie électrique aux moments de pénurie de courant. L'installation de pompage peut donc être comparée effectivement à un réservoir de gaz, encore que la double transformation ne se fasse qu'avec un rendement maximum de 65 % (1).

fage en saison froide, on a comparé les volumes des différentes formes d'énergie nécessaires pour couvrir les besoins d'hiver d'une maison d'habitation pour une famille. Dans ce but, on a supposé une quantité de chaleur utile de 10 millions de kcal. Compte tenu des rendements d'utilisation, les différents volumes sont les suivants : 1,3 m³ pour le mazout, 3 000 m³ pour le gaz de cokerie à pression ordinaire, 51 000 m³ pour l'eau avec 100 m de chute. On voit clairement dans le tableau 1 que l'approvisionnement en combustible liquide et solide ne pose pas de problème, tandis que l'approvisionnement en gaz à basse pression exige un volume correspondant à environ dix fois celui de la maison à chauffer, évalué à 300 m³.

Il serait encore moins indiqué de munir cette habitation d'un réservoir pouvant contenir 51 000 m³ d'eau et placé sur un support de 100 m de hauteur (fig. 2). Malgré cela, l'industrie élec-

Tableau 1. — Volume de stockage nécessaire des différentes formes d'énergie correspondant au chauffage d'une maison d'habitation pour une famille.

Mazout (P.C. = 9 000 kcal/kg) 1,0 t = 1 m ³	9 000 000	85	1,3
Gaz liquéfié (P.C. = 11 900 kcal/kg) 0,53 t = 1 m ³	6 300 000	85	1,9
Houille (P.C. = 7 000 kcal/kg) 0,8 t = 1 m ³	5 600 000	70	2,5
Gaz de cokerie (P.C. = 4 000 kcal/Nm ³) :			
40 atm	160 000	85	74
1 atm	4 000	85	2 950
Eau avec 100 m de chute	234	84	51 000

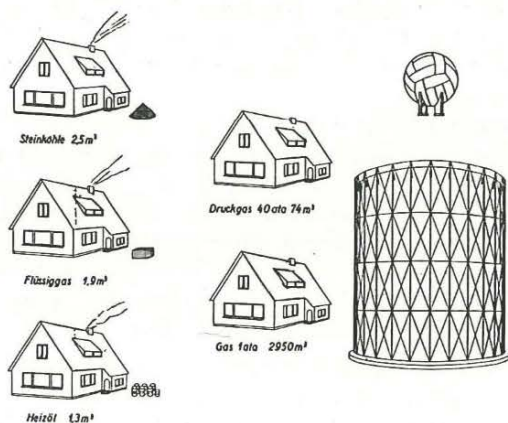


Fig. 1. — Représentation du volume de stockage des différentes formes d'énergie correspondant au chauffage d'une maison d'habitation pour une famille

La comparaison des volumes de stockage des différentes formes d'énergie pour un chauffage déterminé montre à l'évidence que l'eau sous pression occupe la dernière place, bien en dessous du gaz déjà considéré comme une forme d'énergie défavorisée à cet égard (tableau 1). Comme le problème de la pointe d'énergie en hiver est surtout en connexion avec le problème du chauf-

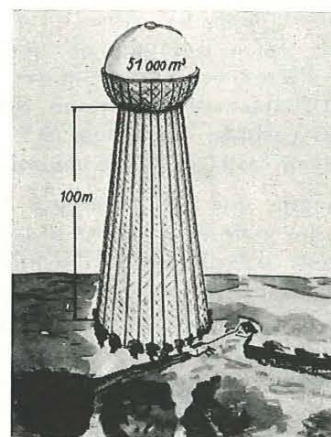


Fig. 2. — Volume d'eau accumulée nécessaire pour le chauffage électrique d'une maison d'habitation pour une famille (10 millions de kcal).

trique a appliqué le principe des pompes d'accumulation là où les conditions topographiques étaient favorables et sans porter atteinte au site (fig. 3). Ces pompes d'accumulation servent en tout cas uniquement à la compensation journalière ou hebdomadaire. Elles ne pourraient jamais assurer les besoins d'hiver d'une population aussi

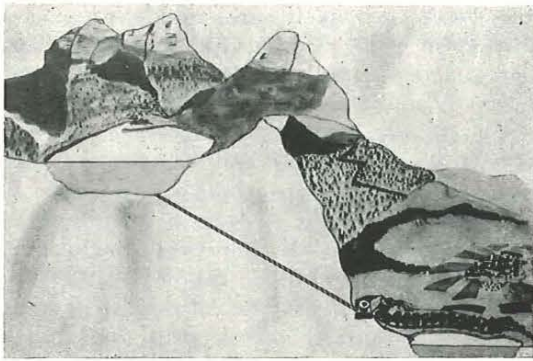


Fig. 5. — Schéma de l'emmagasinage d'eau pour la production d'électricité.

dense qu'en Allemagne, les formidables quantités d'eau requises ne pouvant être stockées en aucun cas. A titre de comparaison, on peut signaler l'installation de pompage de la RWE, à Herdecke, servant à la compensation journalière. Le volume d'eau en stockage s'élève à 1,5 million de m³, avec une hauteur de chute de 166 m, et correspond à 490 000 kWh. Au point de vue énergie, cela équivaut seulement à 125 000 m³ de gaz de cokerie.

La pratique du stockage souterrain.

D'après les possibilités existantes de stockage, il ne semble pas jusqu'à présent en Europe que l'on puisse réaliser à grande échelle le chauffage domestique d'hiver en passant du combustible solide au gaz ou à l'électricité. Le problème des fortes pointes d'hiver ne paraît soluble dans une

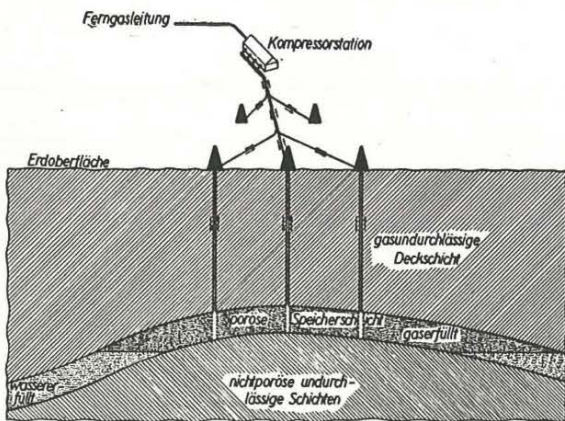


Fig. 4. — Schéma du stockage souterrain du gaz.

- Ferngasleitung : Conduite de transport à distance.
- Erdoberfläche : Surface du sol.
- Gasunterdurchlässige Deckschicht : Couverture imperméable au gaz.
- Porose Speicherschicht : Formation poreuse d'emmagasinage.
- Wassererfüllt : rempli d'eau.

certaine mesure par le truchement des usines ou des centrales de pointe que dans les pays favorisés en énergie hydraulique et en lacs d'accumulation et dont la population est relativement faible comme la Suisse. Il serait économiquement insoluble ailleurs.

Il a été proposé de couvrir les besoins de pointe par la gazéification de l'huile ou la construction d'usines chimiques utilisant normalement le gaz comme matière première et qui livreraient au réseau durant les mois de pointe, en arrêtant la fabrication. Ces propositions et d'autres analogues pourraient amener une solution partielle; mais l'unique possibilité de remédier à la pointe d'hiver croissante en raison du chauffage domestique résiderait dans le stockage souterrain, inconnu jusqu'ici en Europe.

Par ce vocable, on ne doit pas entendre le stockage souterrain du gaz en conduite ou en réservoir, mais exclusivement le stockage sous terre dans des couches de roches naturellement poreuses ou dans des sables. La figure 4 montre schématiquement l'installation d'un stockage souterrain qui constitue aujourd'hui un auxiliaire indispensable de l'industrie du gaz aux U.S.A. et qui a permis de résoudre en grand le problème des pointes d'hiver les plus fortes.

Sous une couverture étanche gît une couche de roche magasin généralement constituée de grès ou calcaire ayant une porosité de 20 à 35 %. Dans cette couche, dont les pores sont le plus souvent remplis d'eau avant d'être utilisés pour le stockage, le gaz est introduit par trous de sonde et compresseurs refoulant l'eau des pores. L'eau forme alors la fermeture d'un côté et maintient le gaz à la pression hydrostatique qui correspond suivant la règle à la profondeur de stockage. Si le gaz se trouve à 200 m de profondeur, la pression est de 20 atm. A la reprise du gaz, l'eau remonte plus ou moins vite dans la couche suivant la poussée de telle façon que la pression se maintient et qu'en général le gaz peut être livré dans la conduite collectrice à la pression désirable, sans compression ultérieure.

La figure 5 montre le rôle du stockage et la liaison de la charge de base et de la pointe d'hiver. Un stockage souterrain suffisant donnerait aux cokeries la possibilité de maintenir en exploitation continue, et indépendamment des fluctuations saisonnières, les générateurs à gaz pauvres em-

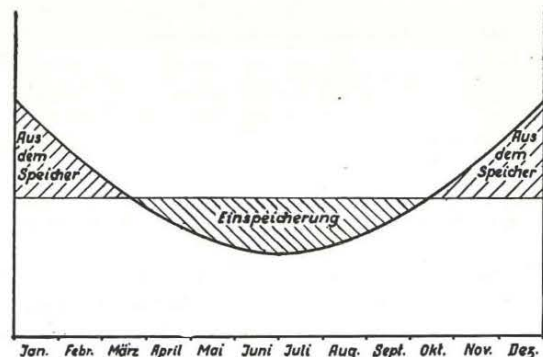


Fig. 5. — Couverture des besoins de pointe de gaz pour le chauffage d'hiver au moyen du stockage souterrain.

- En ordonnée : consommation de gaz.
- Aus dem Speicher : fourniture par le stockage.
- Einspeicherung : gaz stocké.

ployés uniquement jusqu'ici pour remédier à la pointe d'hiver par la chauffe des fours à coke, ce qui libère une quantité correspondante de gaz riche. Le réservoir souterrain est en même temps le plus apte à absorber les pointes journalières et hebdomadaires. L'excédent du dimanche notamment peut être stocké.

Le stockage souterrain en outre ne change rien au paysage, pas plus que l'emmagasinage de l'eau utilisant le relief naturel du sol. Il n'occupe que la surface nécessitée par la station de compression et ne soustrait donc rien à l'agriculture ni à la

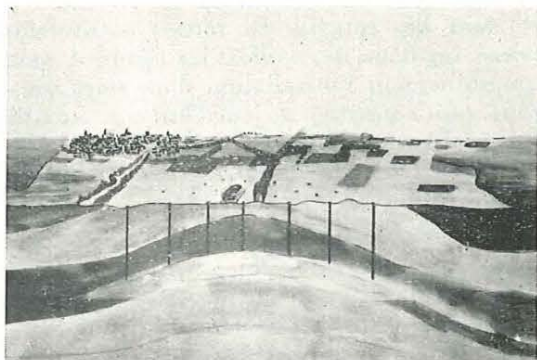


Fig. 6. — Coupe en long par un réservoir souterrain de gaz

ylviculture (fig. 6). La vie continue sans remous au-dessus d'un réservoir souterrain dont la couche utile s'étend, en ce qui concerne un des plus grands projets américains connus, sur une superficie de 60 km². Aucun Américain ne considère que la vie dans les fermes et les villages est rendue

les gisements de gaz naturel épuisés dont l'étanchéité était déjà établie. Le premier stockage souterrain dans un grès dont les pores étaient remplis d'eau et qui n'avait jamais auparavant contenu de gaz, fut entrepris en 1948 par la Société « Louisville Gas and Electric ». Il s'agit du champ de stockage Muldraugh (2). Pour autant que l'on sache, ce travail de pionnier est dû principalement à M. Yunker, attaché à cette Société, dont l'exemple a inspiré le gigantesque projet de stockage exécuté dans une formation gréseuse en forme de dôme, près du village de Herscher à 80 km au sud-ouest de Chicago, aux fins d'alimenter en gaz cette dernière ville (3) (4). La formation géologique servant au stockage se trouve à 500 m de profondeur et n'a jamais contenu de gaz. Elle est remplie d'eau salée. On estime que, pour une capacité totale de 5 milliards de m³, environ 2,5 milliards de m³ de gaz naturel pourraient être utilement stockés et que le prélèvement maximum d'un jour de pointe pourrait être de 42 millions de m³. Pour caractériser l'ampleur inouïe du projet, on peut signaler que 2,5 milliards de m³ de gaz naturel correspondent en pouvoir calorifique à 5 milliards de m³ de gaz de cokerie, soit la moitié du gaz fourni en 1951 par l'ensemble des distributions publiques dans la République fédérale. On espère remplir ce réservoir en quatre ou cinq années.

Alors que le premier essai entrepris déjà en 1919, par la « Central Kentucky Natural Gas Co », n'avait éveillé aucune attention dans le public, le développement du stockage souterrain aux U.S.A. a pris, spécialement dans les dernières années, un essor étonnant (tableau 2) (2) (5).

Tableau 2. — Développement du stockage souterrain aux U.S.A.

Année	Nombre de réservoirs	Capacité totale millions de m ³	Capacité utile millions de m ³	Quantité utilement accumulée millions de m ³	Quantité de gaz comprimé millions de m ³	Prélèvement pendant la pointe d'hiver millions de m ³
1919	1	140	aucune donnée	aucune donnée	aucune donnée	aucune donnée
1930	3	166	»	»	»	»
1935	7	334	»	»	»	»
1940	31	5 700	»	»	»	»
1945	58	10 300	»	»	»	»
1950	125	21 700	11 650	9 600	6 700	4 100
1951	142	25 900	15 450	13 450	9 560	5 700
Accroissement 1950-51	17	4 200	3 800	3 850	2 860	1 600

plus dangereuse au-dessus d'un réservoir souterrain. Chose peut-être plus probante encore, le célèbre Fort Knox qui contient la réserve d'or des U.S.A., se trouve au-dessus d'un réservoir souterrain de gaz. Le réservoir souterrain n'est d'ailleurs rien d'autre qu'un champ artificiel de gaz naturel, au-dessus duquel la vie se déroule normalement.

Jusqu'en ces derniers temps, on employait uniquement aux U.S.A. comme réservoir souterrain

Le premier essai de compression de gaz dans un gisement de gaz naturel épuisé fut entrepris avec quelque appréhension. Le Vice-Président de la « Central Kentucky Natural Gas Co », dans un rapport à ce sujet, disait : « Les représentants autorisés de notre Société étaient très sceptiques quant aux possibilités de réalisation du projet. On faisait remarquer qu'il s'agissait d'une affaire sans précédent et que la preuve manquait que le gaz ainsi emmagasiné pourrait être récupéré (2). »

Pendant dix ans, cette Société resta la seule à stocker souterrainement le gaz. Mais en 1951, l'industrie du gaz américaine disposait de 142 réservoirs souterrains avec une capacité totale de 26 milliards, une capacité utile de 15,5 milliards et une contenance utile, en 1951, de 13,5 milliards de m³. Durant l'hiver 1951-1952, 6 milliards de m³ furent prélevés (5), étant entendu qu'il s'agit de gaz naturel avec un pouvoir calorifique environ double de celui du gaz de houille en Europe. Ces chiffres ne comprennent pas encore le projet de Chicago avec ses milliards de m³ et d'autres projets grandioses connus. Le stockage souterrain est donc encore en développement continu.

Influence de la capacité de stockage sur le marché du gaz.

Une comparaison entre les quantités de gaz vendues et la capacité de stockage aux U.S.A. (6) (7) et dans la République fédérale montre les énormes possibilités que constituent les réservoirs souterrains pour l'industrie gazière américaine, particulièrement en ce qui concerne la distribution du gaz domestique (tableau 3). Comme la consommation industrielle de gaz est peu influencée par les saisons, on peut utiliser la capacité des réservoirs souterrains essentiellement pour les usages domestiques. La capacité utile de stockage

constitue alors 29 % de la quantité de gaz fournis pour les besoins domestiques. En d'autres termes, il existe pour ces besoins une réserve couvrant 2 560 heures de consommation moyenne d'hiver. Les données correspondantes pour l'Allemagne, même si l'on considère que le volume actuel de stockage ne servirait qu'aux besoins domestiques, sont de 0,37 % ou 33 heures; chiffres extrêmement bas. La comparaison ne tient pas encore compte du fait que l'industrie du gaz aux U.S.A. n'est pas comme en Europe basée sur le charbon, mais pour la plus grande partie sur le gaz naturel (7) (tableau 4).

La production à partir des champs de gaz naturels offre naturellement une élasticité dans le débit beaucoup plus grande qu'à partir des usines à gaz, telles les cokeries; on peut se demander alors pourquoi les U.S.A., où le gaz naturel représente 93 % de la production, utilisent le stockage souterrain, c'est-à-dire pratiquement la mise en œuvre de champs artificiels de gaz naturels. La raison en est que les gisements de gaz naturels sont le plus souvent très éloignés des centres de consommation. Par conséquent, de longues canalisations et des stations de compression sont indispensables. Par exemple, la région de Chicago reçoit son gaz du Texas par deux conduites de 1 300 km de longueur et l'on a calculé que six

Tableau 3. — Vente de gaz en 1951 par les distributions publiques et capacité de stockage aux Etats-Unis et dans la République fédérale.

Pays	Vente de gaz 1951		Capacité de stockage 1951		
	Usage	Millions de m ³	Millions de m ³	de la vente de gaz en %	Capacité de stockage en heures
U.S.A.	Total	161 000	15 500	9,6	840
	Domestique	53 000		29,2	2 560
République fédérale	Total	10 000	6	0,06	5
	Domestique	1 600		0,37	33

Tableau 4. — Fourniture du gaz en 1951 par les distributions publiques, réparties en espèces de gaz, aux U.S.A. et dans la République fédérale.

Nature du gaz	U.S.A.			République fédérale	
	Volumes Réels milliards de m ³	Converti en gaz de P.C. : 4.000kcal/m ³ milliards de m ³	Proportion en % de chaleur	Milliards de m ³	Proportion en % de chaleur
Gaz naturel P.C. \approx 8 000 kcal/m ³	140	279	93	—	—
Gaz de cokerie + gaz à l'eau P.C. \approx 4 000 kcal/m ³	21	21	7	10	100
Total	161	300	100	10	100

Tableau 5. — Fournitures du gaz par les distributions publiques, réparties par groupes de consommateurs aux U.S.A. et dans la République fédérale, exprimées en gaz à 4 000 kcal/m³.

Utilisateurs	U.S.A.		République fédérale	
	Vente de gaz milliards de m ³	Consommation par habitant en m ³	Vente de gaz milliards de m ³	Consommation par habitant en m ³
Domestique	100 (33 %)	665	1,6 (16 %)	35
Industriels	200 (67 %)	1 335	8,0 (80 %)	174
Divers	—	—	0,4 (4 %)	9
Total	300 (100 %)	2 000	10 (100 %)	218

nouvelles conduites et des compresseurs correspondants devraient être établis pour couvrir les besoins de chauffage de pointes d'hiver, avec une dépense de 1 milliard de dollars. Le même objectif serait atteint, au moyen du stockage souterrain en question de Herscher, avec une dépense de 25 à 35 millions de dollars (3) et une notable économie d'acier. En outre, les expériences ont montré que le débit d'un gisement de gaz naturel doit être aussi régulier que possible, sinon une partie du gaz existant se perd par suite de l'invasion prématurée de l'eau. Enfin, il ne faut pas perdre de vue que, pour les gaz naturels ayant une forte teneur en hydrocarbures de rang élevé, des installations de récupération de gazoline sont nécessaires. Leur construction serait antiéconomique parce que, pour maintes sociétés, les besoins journaliers d'hiver représentent huit à neuf fois ceux d'été.

A l'aide du stockage souterrain, le chauffage domestique au gaz a pris aux U.S.A. un essor énorme. Le chauffage au mazout qui s'était d'abord introduit a été dépassé et en grande partie supplanté. La part du gaz américain fournie au secteur domestique s'élève à 33 % du débit total, soit une proportion double de celle de l'Allemagne. La consommation par habitant, exprimée en m³ de gaz à 4 000 kcal, est de 665 m³ aux U.S.A. et 35 m³ en Allemagne seulement. Dans les réservoirs souterrains des U.S.A., il y avait en 1951 600 m³ de gaz naturel pour chacune des 23 millions de familles alimentées.

L'utilisation complète des réservoirs existants et l'exécution des nouveaux projets porteront dans quelques années le nombre à 1 200 m³, correspondant à 2 400 m³ de gaz de cokerie. Il n'y aura plus alors aux U.S.A. de problème de pointe d'hiver pour l'industrie du gaz. Malgré l'importance du capital à investir pour le stockage souterrain, qui à la fin de 1951 était évalué à 170 millions de dollars aux U.S.A. (5), cette forme d'emmagasinage s'avère comme de loin la plus économique. Partant à nouveau de ces données que les besoins en chauffage d'une maison de 300 m³ d'espace bâti abritant une famille sont de 3 000 m³ de gaz, les ordres de grandeur sont donnés au tableau 6.

Tableau 6. — Comparaison entre les frais de construction d'une habitation et les frais de stockage d'une quantité de gaz correspondant à ses besoins en gaz pour le chauffage d'hiver.

Maison de 300 m ³ d'espace bâti pour une famille	25 000 DM
Réservoir de gaz à basse pression.	
Coût 5 millions DM pour 300 000 m ³ . Coût pour 3 000 m ³	50 000 DM
Réservoir souterrain.	
Coût évalué à 10 millions de DM pour 100 millions de m ³ . Coût pour 3 000 m ³	300 DM

Avec le stockage à basse pression, on arrive au double du coût de la bâtisse, tandis qu'avec le stockage souterrain, l'évaluation est de 300 DM. Le capital nécessité par le stockage souterrain se répartit en trois groupes : 1) Les recherches géologiques et les forages; 2) La station de compression et éventuellement les canalisations d'amenée et de raccordement du gaz; 3) Le « coussin de gaz » (8). Ceci est une notion introduite par les Américains. Il représente une quantité de gaz qui doit rester emmagasinée jusqu'à la fin du prélèvement d'hiver pour pouvoir répondre jusqu'au dernier jour au besoin de pointe le plus élevé. Le rôle du coussin de gaz est d'empêcher que la pression ne tombe sous une certaine valeur variable suivant les conditions locales et de prévenir tout dommage au réservoir par irruption d'eau. La proportion du coussin de gaz au volume total du stockage au début du prélèvement est variable et doit, en dernière analyse, être donnée par la pratique. L'importance du champ de stockage doit être appropriée à la quantité à emmagasiner et, de cette façon, le coussin de gaz est réduit au minimum. Quoi qu'il en soit, le coussin de gaz ne peut être inférieur au tiers ou à la moitié de la quantité globale à prélever en hiver.

Comparaison

entre le stockage du courant et du gaz

Dans ses grandes lignes, le chauffage des locaux pose d'abord un problème de pointe insoluble du

seul côté production. Pour permettre le chauffage en grand des locaux, au moyen du gaz ou de l'électricité, l'économie européenne doit tout d'abord résoudre le problème du stockage. L'industrie européenne du gaz, basée aujourd'hui presque exclusivement sur le charbon, a besoin du stockage souterrain plus encore que celle des U.S.A., laquelle est plus élastique parce que basée sur le gaz naturel. Une comparaison entre le stockage de l'énergie sous ses formes d'eau accumulée par pompage et de gaz stocké souterrainement montre la supériorité de cette dernière forme (tableau 7). Si l'on emmagasine par pompage dans un réservoir 100 millions de m³ d'eau à une hauteur utile de 200 m, on peut en retirer 45 millions de kWh; cela correspond, si l'on employait du courant pour le chauffage, à 38,4 milliards de kcal, pour un degré d'utilisation du charbon de 18 % correspondant au rendement d'une centrale moderne. Si l'on emmagasine par contre dans un réservoir souterrain 100 millions de m³ de gaz à 4 000 kcal par m³, 322 milliards de kcal peuvent être utilisés pour le chauffage des locaux. Cela correspond à un degré d'utilisation du charbon de 44 %, en admettant pour la production et la compression du gaz un rendement normal.

Pour livrer cette même quantité de chaleur correspondant à 100 millions de m³ de gaz au moyen d'eau accumulée par pompe à une hauteur de 200 m, la station de pompage devrait refouler 840 millions de m³ d'eau, soit 8,4 fois plus. Ce ne serait réalisable que dans des cas exceptionnels, des raisons topographiques s'y opposant de prime abord. Si, d'autre part, les 100 millions de m³ de gaz étaient transformés en courant électrique par turbines à gaz, on pourrait produire 155 millions de kWh correspondant à 133 milliards de kcal, soit 3,5 fois plus que 100 millions de m³ d'eau accumulée avec 200 m de hauteur de chute. Le degré d'utilisation du charbon, dans le cas de production du courant de pointe par le truchement du stockage souterrain de gaz, serait de 18 % environ comme dans le cas de la station de refoulement par pompage. Il n'est pas possible d'évoquer ici la rentabilité de cette forme de stockage de courant, bien qu'un tel stockage offre un certain intérêt s'il est réalisé en liaison avec un système de dégazage; celui-ci paraît être devenu techniquement réalisable suivant les procédés étudiés par Stief (9) (10) et autres chercheurs. L'usage de réservoirs de gaz permettrait l'alimentation en énergie thermique, plus économique par l'électricité que par le gaz transporté à

Tableau 7. — Réservoir d'énergie à l'échelle de l'année.
Stations de pompage et stockage souterrain de gaz.

Genre de stockage	A		B	
	Pompes de refoulement pour le stockage du courant produit à partir du charbon		Stockage souterrain pour le gaz produit à partir du charbon	
Capacité	100 millions de m ³ d'eau avec 200 m de hauteur de chute (à peu près l'usine de Walchensee)		100 millions de m ³ de gaz à 4.000 kcal (petit réservoir américain)	
Charbon nécessaire (P.C. = 7 000 Kcal)	t	30 000	104 000	
	millions kcal	210 000	728 000	
Rendement de l'utilisation du charbon jusqu'au stockage	%	22	55	
Capacité utile du réservoir	millions kcal	46 800	400 000	
	millions kWh	55		
Energie soutirée au réservoir	millions kcal	38 400	380 000 (10 fois)	
	millions kWh	45	445	
Rendement du déstockage	%	82	95	
Chauffage des locaux				
η courant = 100 % (A)				
η Gaz = 85 % (B)				
utilisable	millions kcal	38 400	322 000 (8,4 fois)	
η total	%	18,3	44,4	
Chauffage des locaux				
η courant = 100 % (A)				
η gaz transformé en courant par turbine à gaz = 35 % (B)				
utilisable	millions kWh	45	155 (3,5 fois)	
utilisable	millions kcal	38 400	133 000	
η global	%	18,3	18,3	

grande distance. D'autres liaisons entre la centrale électrique et le stockage souterrain du gaz seraient possibles. On pourrait, par exemple, stocker de l'hydrogène et de l'oxygène obtenus par électrolyse au moyen du courant excédentaire produit momentanément à bas prix; une liaison économique avec l'industrie chimique pourrait s'ensuivre.

Possibilités d'application et perspectives d'avenir en Europe.

Vu le problème de la pointe d'hiver, la Ruhrgas A.G. a entrepris par ses propres moyens l'étude du stockage souterrain peu après la guerre. Elle ignorait les réalisations américaines, l'Allemagne ne recevant plus de littérature de l'étranger depuis de longues années.

On ne disposait pas en Allemagne de gisements de gaz naturel épuisés. On pensa tout d'abord à un champ pétrolifère épuisé ou à exploiter un champ pétrolifère non rentable. On apprit par la suite que cette idée avait été réalisée avec succès dans un cas aux U.S.A. Comme on n'avait trouvé aucun champ pétrolifère approprié, les premiers essais furent réalisés par compression d'air dans une couche presque horizontale de sable tertiaire aquifère, dans la région de Hahnenborn près de Celle. Ces essais effectués, avec l'appui et les conseils en matière géologique de la Erdöl A.G., donnèrent lieu à des résultats précieux. On s'efforça alors d'utiliser une formation en dôme pour arriver à une solution définitive. Les Professeurs Seitz et Wager, du Service des Etudes du Sol à Hanovre, préconisèrent des essais dans la selle d'Engelbosteler, bien connue par les sondages antérieurs de la « Deutsche Vacuum Oel A.G. » et par les travaux de Forche (11). Différentes couches de calcaire et de grès du Wealdien étaient à considérer; elles sont connues comme étant en partie faiblement pétrolifères. Dans ce territoire, et avec les conseils en matière géologique de la Deutsche Vacuum Oel A.G., on effectua des sondages, les uns avec un objectif d'observation et d'investigation, les autres pour des essais de compression d'une faible quantité d'air. On établit une conduite de raccordement et des essais de compression à assez grande échelle devaient avoir lieu au début de l'année suivante au moyen de gaz de cokerie. Dans les deux cas, l'Administration des Mines de Celle et de Hanovre a été d'un grand secours. Les offices compétents de Basse-Saxe ont également et constamment soutenu l'entreprise avec beaucoup de compréhension.

A la lumière des résultats obtenus jusqu'à présent, la Ruhrgas A.G., d'accord avec les conseillers géologiques de la Deutsche Vacuum Oel A.G. et avec M. Junker, expert américain attaché à la Louisville Gas and Electric, a l'espoir de créer dans la région de la selle d'Engelbosteler, un réservoir souterrain utilisable. Les conditions favorables à un stockage souterrain efficient, exposées dans une publication à propos du Herscher-Dome par M. Burlingame (4), Vice-Président de la

Natural Gas Storage Co of Illinois, paraissent être remplies dans le cas présent :

1. Il faut disposer d'un domaine géologique fermé, suffisamment vaste pour contenir la quantité de gaz voulue et qui ne laisse pas échapper le gaz latéralement.
2. Les couches du réservoir doivent présenter la porosité et la perméabilité voulues pour que le gaz puisse être aisément emmagasiné et repris.
3. Les couches poreuses doivent être recouvertes de couches imperméables pour que le gaz ne puisse s'échapper vers le haut.

Les essais futurs doivent être effectués, comme il a été dit ci-dessus, avec du gaz de cokerie provenant d'une conduite de transport située à quelques km au maximum. Le gaz de cokerie a une composition autre que le gaz naturel, sa teneur en hydrogène est par exemple élevée. En raison de l'existence d'oxyde d'azote, on peut craindre, par suite de sa réaction avec les oléfines existantes, la formation de gomme susceptible d'obturer les pores.

A notre étonnement, nous avons constaté que le stockage souterrain de gaz de cokerie a demandé aux Etats-Unis également de longues années d'essai. En 1947, Bircher a fait un rapport à ce sujet (12). Par après les cokeries Clairton de Pittsburgh stockèrent du gaz sous pression dans le champ de gaz naturel épuisé de Mc Keesport. On a développé un procédé permettant d'épurer le gaz en oxyde d'azote à un point tel que toute formation nuisible de produits gommeux est évitée.

Le même rapport signale que la porosité subsiste pendant de nombreuses années, que le gaz comprimé peut être complètement récupéré et qu'il n'y a pas de perte de gaz.

On peut en déduire qu'il n'existe pas de difficulté fondamentale à réaliser le stockage souterrain du gaz de cokerie ou d'autres gaz de composition analogue obtenus par distillation ou gazéification du charbon pour autant qu'une bonne épuration soit faite au préalable.

Le problème capital est de trouver des champs d'emmagasinage favorables et au plus près des centres de consommation. On pensera tout d'abord à utiliser les champs épuisés de gaz naturel. Des possibilités dans ce sens pourraient se présenter, sinon immédiatement du moins dans un certain avenir, dans les régions productrices de gaz naturel en Autriche et en Italie. En Allemagne, n'existe actuellement que le champ de Bentheim. D'autres pourraient être découverts, comme d'ailleurs en France et en Hollande.

Le projet récemment discuté d'amener le gaz naturel d'Irak à Vienne et Paris par la Turquie et les Balkans gagnerait en sécurité et en économie si le stockage souterrain était réalisé.

En finale de ces considérations, on trouve la notion du réseau gazier européen.

En résumé on peut admettre que le stockage souterrain est la meilleure et peut-être la seule solution du problème de la pointe d'hiver de l'in-

dustrie gazière européenne et que celle-ci, si elle peut résoudre ce problème, se trouve au seuil d'une nouvelle ascension.

BIBLIOGRAPHIE

- (1) H. Vogt : *Wasserkräfte in der Verbundwirtschaft*, Verlag von M. Riederer, München 1952.
 - (2) Max W. Ball : *Gas Age*, v. 23-6-1949.
 - (3) Med Serif : *Gas Age*, v. 29-3-1951.
 - (4) M.V. Burlingame : *Gas Age*, v. 22-5-1952.
 - (5) D.H. Stormont : *Oil and Gas Journal*, Vol. 51, N° 2 v. 19-5-1952.
 - (6) George F. Mitchell : *American Gas Association Monthly*, Jan. 1952.
 - (7) George F. Mitchell : *Gas Age*, v. 5-1-1952.
 - (8) Frank A. Boyd : *Gas Age*, v. 30-3-1950.
 - (9) F. Stief : *GWF*, 90 (1949), H. 16, S. 403/10.
 - (10) K. Traenckner : *GWF*, 93 (1952), H. 19, S. 537/47.
 - (11) F. Forche : *Erdöl und Tektonik* 1949.
 - (12) J. Russel Bircher : *Chemical Engineering Progress*, Sept. 1947.
-