Stockage de chaleur intersaisonnier en aquifère à moyenne profondeur

Interseasonal heat storage in an aquifer at medium depth

A. Boisdet

Institut mixte de recherches géothermiques
BRGM, Orléans

Après un bref rappel des principales caractéristiques d'opérations de stockage de chaleur en nappe aquifère réalisées dans un passé récent (Bonneaud, Campuget en France et Mobile aux USA), les projets en cours ou à l'étude sont analysés (ELF-CEA à Plaisir, Université du Minnesota à St-Paul, Institut mixte de recherches géothermiques : IMRG).

Le projet étudié par l'IMRG est un stockage intersaisonnier de chaleur en aquifère à moyenne profondeur. Le point de l'évolution du projet est dressé aussi bien au plan énergétique qu'économique. Ce projet, qui présente une grande synergie avec les opérations de géothermie par doublet, devrait pouvoir rapidement déboucher sur une réalisation en vraie grandeur.

After a brief review of the main characteristics of heat storage operations in an aquifer, conducted in the recent past (Bonneaud, Campuget in France and Mobile in the U.S.A.), the projects being carried out or under study are analyzed (ELF-CEA in Plaisir, University of Minnesota in Saint Paul, Institut Mixte de Recherches Géothermiques : IMRG).

The project in development at the IMRG is interseasonal heat storage in an aquifer at medium depth. The stage of development of the project is described from an energy and an economic standpoint. This project, which exhibits considerable synergy with geothermal operations by doublet, should rapidly lead to a full-size implementation.

Introduction

L'idée du stockage intersaisonnier de chaleur peut naître de l'examen du déphasage entre besoins de chaleur et disponibilité de l'énergie solaire. Le gisement solaire représente en France de 900 à 1800 tep/ha et par an en moyenne. Ceci a conduit de nombreux organismes à rechercher, dans des voies diverses, des solutions.

Le stockage thermique en aquifère en est une, particulièrement intéressante, que la réussite des opérations de géothermie en doublet rend techniquement crédible.

L'IMRG (Institut mixte de recherches géothermiques) conduit à l'heure actuelle un programme de recherche sur

ce thème, dans l'optique de pouvoir dans un délai rapproché, proposer la réalisation d'une opération en vraie grandeur.

Dans un souci évident de simplicité, bien que l'objectif, à terme, soit « héliogéothermique », l'effort porte pour réaliser l'opération sur un producteur important d'effluents thermiques du domaine industriel (usine) ou résidentiel et tertiaire (usine d'incinération d'ordures ménagères).

Réalisations antérieures

Notre propos n'est pas de dresser un catalogue, aussi exhaustif que possible, des réalisations de stockage (on consultera à ce sujet la thèse de M. J.P. SAUTY (1)) mais de situer des ordres de grandeurs en référence à des opérations bien connues : Bonneaud, Campuget et Mobile (université d'Auburn USA).

Bonneaud (Jura) 1976-1977 (Réf. 1 et 2)

Les expériences ont été réalisées dans un aquifère captif entre 3,5 et 7 m de profondeur. La température moyenne de l'eau à l'injection était de 33 °C soit 20 °C de plus que la température d'équilibre du réservoir. La durée moyenne d'un cycle (stockage destockage) avait été fixée à 12 jours. Les quantités injectées allant de 500 à 1 700 m³ avec un débit maximum de 7 m³/h.

En se référant à la température initiale de l'aquifère l'énergie stockée représenterait donc 34 000 th ou 3,4 tep (39,5 Mwh) au maximum.

Campuget (Gard) 1977-1978 (Réf. 3)

Le stockage a été réalisé dans une nappe libre limitée à sa base, à 11 m, par un substratum argileux; sa température moyenne était de 14 °C. En trois mois (du 4 juillet 1977 au 28 septembre) il a été injecté 20 000 m³ d'eau à 33° de moyenne, soit au total 380 000 th, 38 tep (441 Mwh).

Expériences conduites à Mobile par l'Université d'Auburn (Alabama) 1980-1982

Le stockage a été réalisé dans une nappe captive de 21,3 m d'épaisseur dont le toit était à 5,6 m sous le niveau du sol.

L'eau de stockage provient de la nappe phréatique à 20 °C, elle est injectée à environ 80 °C; près de 60 000 m³ ont été stockés soit au total 3 600 000 th, 360 tep (4 186 Mwh).

Opérations de stockage intersaisonnier en cours

Projet de l'Université du Minnesota à St Paul (Début des expériences en décembre 1982, réf. 5)

L'Université de St Paul utilise un doublet de stockage, écartement de 255 m. L'aquifère sollicité, situé à une profondeur de 181 m a une épaisseur de 63 m.

La première expérience réalisée est résumée dans le tableau suivant :

Phases	Injection	Relaxation	Destockage
Durées cumulées	5,2 jours	13 jours	5,2 jours
Débits	66 m ³ /h		66 m ³ /h
Températures	90 °C		60 °C
Volumes pompés	8 300 m ³		8 100 m ³
ΔT de stockage	79 °C		
Énergie stockée	65,6 tep 762,4 Mwh		

Le programme est soutenu par le Département of Energy (DOE) et devrait continuer en s'amplifiant en 1984.

Projet d'ELF — CEA de Plaisir (Réf. 6)

Ce projet de stockage intersaisonnier, conçu selon un principe développé par le CEA, vise à stocker de l'eau à plus de 180 °C dans un aquifère à 500 m de profondeur (nappe du Wealdien). La chaleur stockée proviendra d'une usine d'incinération des ordures ménagères implantée à Thivernal-Grignon.

Le système comporte un puits central (chaud pour le stockage-destockage de l'eau (180-200 °C) et 3 puits périphériques (froids) qui confinent la bulle chaude (température de 70 °C).

A ce jour un forage de reconnaissance a été réalisé pour tester les caractéristiques du réservoir. Il est destiné à devenir l'un des puits froids. Le montage juridique de l'opération est en cours alors que le financement a été demandé.

Les investissements qui restent à réaliser représentent encore près de 30 MF (1983).

L'énergie destockée représentera au maximum 20 000 Mwh soit 1 720 tep environ (figures 1 et 2).

Ainsi que présenté à la figure 5, le projet de stockage intersaisonnier à moyenne profondeur de l'IMRG se situe en position intermédiaire tant au plan des niveaux de température que de celui de l'énergie stockée.

De surcroît au plan des températures il n'y a pas une très grande différence avec les projets de Mobile et St Paul.

Figure 1. — Thiberval-Grignon (d'après un document ELF-CEA).

Figure 2. — Position du projet de l'IRMG parmi les cas cités.

Figure 3. — Système de stockage puits chaud — puits froid.

Projet de l'IRMG de stockage en aquifère à moyenne profondeur

Description générale

Dans le cas du stockage à 90 °C dans un aquifère à 35 °C on peut espérer restituer de 1 000 à 1 500 tep par an en moyenne (débit nominal de 150 m³/h).

Le choix d'une température inférieure ou égale à 90 °C résulte du désir de conserver une parfaite synergie avec les opérations de géothermie les plus classiques : les pompes, les compléments sont les mêmes. Le choix de la profondeur permet d'opérer avec des machines de forage moins lourdes à un coût beaucoup moins important, si on compare à un forage de géothermie ayant la même efficacité énergétique (donc situé à plus de 1 000 m plus profond).

Le schéma proposé à la figure 3 tient compte des matériels actuellement disponibles et il est possible d'y apporter un grand nombre de variantes. En particulier on peut recourir au réseau EDF pour la fourniture électrique; avec des limitations évidentes (rendement global en énergie primaire, inférieur à 30 %, tarif pénalisant en hiver durant la saison de chauffe, etc.), ou bien envisager des pompes immergées réversibles, ce qui permettrait de s'affranchir d'une unité de réinjection coûteuse.

Ce schéma permet d'avoir une première idée des principaux problèmes énergétiques qui se posent pour optimiser le système :

- bilan énergétique des pompes,
- l'hiver, choix entre l'énergie disponible au stockage et en provenance du producteur d'effluents thermiques,
- gestion de l'appoint énergétique indispensable (monotone des puissances appelées).
- pérennité des caractéristiques hydrauliques du réservoir.

Simulation théorique du fonctionnement du système et optimisation

La simulation repose sur une modélisation des besoins grâce à des hypothèses classiques et sur des hypothèses de comportements hydrothermiques des réservoirs.

En ce qui concerne les besoins (B) on peut, très grossièrement, retenir une hypothèse de linéarité par rapport à la température extérieure et le volume à chauffer V : $B = GV\Delta T$ où G est coefficient de proportionnalité fonction des caractéristiques d'isolation des ouvrages, de leur coefficient architectural au regard des conditions microclimatiques dans le cas d'un immeuble isolé G est du type $G = f(I, R, S, m)$ avec I = isolation, R = renouvellement d'air, S = apport thermique gratuit (solaire, etc.), m = paramètre microclimatique tenant compte de l'exposition aux vents dominants par exemple.

ΔT est l'écart de la température extérieure équivalente par rapport à la température intérieure de consigne (19 °C dans les logements, conformément à la réglementation, mais plus élevée dans les hôpitaux...). Une hypothèse du même type sur le fonctionnement des émetteurs de chaleur, compte tenu d'un certain rendement global, permet

Figure 4. — Courbe de retour de chauffage.

Figure 5. — Surface de dépendance des différents paramètres de chauffage.

Figure 6. — Courbe de restitution de chauffage (à débit constant).

Figure 7. — Courbes de températures en restitution de stockage d'après [13].

d'obtenir (sous réserve de la donnée d'une courbe des températures extérieures) une courbe du niveau thermique du retour des installations de chauffage linéaire.

En raison de la modulation température-débit, il n'est toutefois pas immédiat d'en déduire l'évolution de l'énergie restant disponible dans le stockage (figure 4).

La figure 5 donne un aperçu du domaine : puissance appelée température de retour du chauffage, en fonction du temps.

La résolution pratique du problème doit prendre en compte :

- les données climatiques moyennes;
- l'historique (proche et lointain) de la gestion du stockage;
- l'excédent de disponibilité de l'effluent thermique;
- l'appoint éventuellement nécessaire;
- la récupération sur la production électrique le cas échéant;
- la consommation générale d'énergie du système.

Température de restitution du stockage

Dans un premier temps on peut utiliser les abaques suivants pour avoir une idée de la courbe de température à la sortie du stockage. Compte tenu des cas les plus courants les courbes $Pe = 10$ et $\Lambda = 10$ sont les plus pessimistes et les courbes $Pe = 100$ et $\Lambda = 100$ les plus optimistes. La charge et la décharge ont lieu à débit constant pendant la même durée t_i (figures 6 et 7).

- θ_i = température de stockage supposée constante
- θ_0 = température de référence au puits froid
- θ = température au temps t/t_i pendant le destockage
- t_i = période totale de décharge

Rendement énergétique global du stockage

Le calcul théorique du rendement du stockage est particulièrement difficile notamment en raison du fait que, même dans les cas les plus simples (débit constant, température d'entrée dans le stock constante), l'historique des cycles précédent intervient.

Cependant grâce à un certain nombre d'hypothèses simplificatrices on peut arriver à une première approche du rendement énergétique global du stockage :

- pendant la phase de stockage on suppose :
 - le débit constant,
 - les températures constantes à l'exhaure et à la réinjection;
- pendant la phase de déstockage :
 - le débit est constant,
 - la température de déstockage ne dépend que de la température de charge,
 - la température à la sortie de l'échangeur géothermique est une fraction de la température de retour du circuit géothermique;
- on suppose en outre que les caractéristiques thermiques des eaux des circuits géothermique et géothermique sont les mêmes;
- la température au puits froid est proche de celle de l'aquifère.

Les principaux paramètres sont les suivants :

- ρc = capacité calorifique de l'eau du réservoir
 q = débit de pompage
 $T(t)$ = température de déstockage
 $T(0) = T_i$ température de stockage
 T_0 = température au puits froid en phase de stockage
 $t(t)$ = température en sortie de l'échangeur géothermal pendant la phase de déstockage
 α = efficacité de l'échangeur géothermal
 $T_r(t)$ = température de retour du chauffage
 E_i = Énergie totale stockée
 E_0 = Énergie totale déstockée
 r = rendement énergétique du stockage
 Δ_i = durée de stockage
 Δ_0 = durée de déstockage

Nous avons :

$$r = \frac{\int_0^{\Delta_0} (T(t) - \alpha T_r(t)) dt}{(T_i - T_0) \Delta_i} \quad (1)$$

Si on introduit les deux valeurs suivantes :

$$\int_0^{\Delta_0} T(t) dt = \Delta_0 T_m$$

$$\int_0^{\Delta_0} T_r(t) dt = \Delta_0 T_m$$

qui définissent les valeurs moyennes de la température de stockage et de la température de retour de chauffage il vient :

$$r = \frac{\Delta_0 (T_m - T_m)}{\Delta_i (T_i - T_0)} \quad (2)$$

Dans l'hypothèse d'un échangeur parfait $\alpha = 1$ et si de plus les périodes de stockage et de déstockage ont la même durée ($\Delta_0 = \Delta_i$) la formule (2) prend la forme simple suivante :

$$r = \frac{T_m - T_m}{T_i - T_0} \quad (3)$$

On peut calculer T_m grâce à l'utilisation d'abaques généraux (13). Pour ce qui concerne T_m il faut soit l'évaluer de manière théorique à partir de données climatiques et architecturales propres à l'opération : construction d'une année climatique type, évaluation des caractéristiques thermiques moyennes — coefficient de déperdition volumique des locaux à desservir — ; soit disposer pour plusieurs années des courbes de température de retour de chauffage.

Ce calcul simplifié conduit à des rendements énergétiques moyens qui varient entre 45 et 80 %.

Approche économique

Nous allons présenter un bilan économique d'une opération plausible, pour laquelle : l'effluent thermique à stocker est gratuit, un réseau de chaleur à basse température existe.

Les ordres de grandeur (voir 14) correspondent à une opération dans le bassin parisien avec un aquifère situé à une profondeur de 700 m environ.

Investissements en kF

• surface	4 000
• sous-sol	10 500
total	14 500

Énergie économisée

	1 000 tep
	(11 628 Mwh)
ratio	14 500 F/tep

Charges annuelles (électricité, personnel, renouvellement, assurances etc.) — 900 KF

Recettes limites sur la base d'un prix de vente de : 200 F/Mwh

$$0,2 \times 11\,628 = 2\,325,6 \text{ KF}$$

Recettes nettes :

$$2\,325,6 - 900 = 1\,425,6 \text{ KF}$$

Temps de retour brut de l'investissement

$$14\,500 / 1\,425,6 = 10 \text{ ans}$$

Conclusions

La première approche, réalisée par l'IMRG, aussi bien au plan technique qu'économique, montre que le stockage intersaisonnier en aquifère à moyenne profondeur est envisageable dans des conditions satisfaisante.

Il semble donc nécessaire aujourd'hui de procéder au choix d'un site expérimental. Il sera possible, avec les paramètres réels, de procéder à une modélisation thermique fine qui tiendra compte des besoins énergétiques

effectifs en parallèle avec l'étude économique détaillée.

A l'issue de cette phase le montage de l'opération pourra être lancé : constitution du maître d'ouvrage, recherche de financements etc. Pendant un premier temps (trois à quatre ans) la gestion thermique du stock fera l'objet d'un suivi scientifique rigoureux, par la suite, en phase de croisière, les ouvrages seraient placés sous la seule responsabilité du maître d'ouvrage.

Références bibliographiques

- [1] J.P. SAUTY. — *Comportement thermique des réservoirs aquifères exploités pour le stockage d'eau chaude ou la géothermie basse enthalpie*. — Document BRGM.
- [2] J.P. SAUTY, A.C. GRINGARTEN, H. FABRIS, D. THIERRY, A. MENJOZ, P.A. LANDEL. — *Sensible Energy Storage in aquifers Field Experiments and Comparison with Theoretical results*. *Water resources Research*, Vol 18, n° 2, pages 245-252, avril 1982.
- [3] P. IRIS. — *Héliogéothermie à faible profondeur avec pompe à chaleur associée. Expérimentation du stockage de chaleur intersaisonnier en nappe phréatique Compuget (Gard) 1977-1978*. Document Plan construction.
- [4] F.J. MOLTZ. — *Design performance and analysis of an aquifer thermal energy storage experiment using the doublet well configuration*. Pacific Northwest Laboratory Richland, Washington 99352.
- [5] M.C. HOYER, M. WALTON. — *Review of testing at the University of Minnesota aquifer thermal energy storage field test facility*. St Paul, Minnesota.
- [6] J. DESPOIS, F. NOUGAREDE. — *Faisabilité du stockage souterrain de chaleur*. Rapport de synthèse 1971 édité par : DENT — CEN Saclay.
- [7] MC. ADAMS. *Transmission de la chaleur*.
- [8] H. RIETSHEL, W. RAISS. — *Traité de chauffage et de climatisation*.
- [9] AFME. — *Recueil des données sur l'énergie*. (août 1983).
- [10] Annales des Mines. — *Document préparatoire au débat parlementaire sur l'énergie* (janvier-février 1982).
- [11] Techniques et Sciences Municipales. — *3^e inventaire des installations de traitement des ordures ménagères*.
- [12] R. FERRANDES. — 1983-1984 : Des choix décisifs pour l'avenir de la géothermie basse température en France. *Géothermie actualité*, n° Hors série 1983.
- [13] A.C. GRINGARTEN, P.A. LANDEL, A. MENJOZ, J.P. SAUTY. — *Étude des possibilités de stockage d'eau chaude en aquifère profond*. Rapport BRGM 79 SGN 326 GTH.
- [14] A. BOISDET, A. MENJOZ, G. AUBERTIN. — *Stockage intersaisonnier à moyenne température dans les aquifères à moyenne profondeur*. Rapport SGN 126 IRG.

Discussion

Président : M. P. DESSUS

Dans le projet de l'IMRG la température de stockage a été choisie à 80 — 90 °C car les températures inférieures à 100 °C ont l'avantage de correspondre à celles des effluents thermiques industriels qui sont pour la plupart à la pression atmosphérique (question de M. DESSUS — Président). Un calcul très sommaire dans la région Ile de France montre la disponibilité d'environ 660 000 TEP de ce type, ce qui correspond au chauffage annuel de 330 000 logements. Ce calcul purement théorique prend en compte le rendement moyen énergétique de l'industrie dans des établissements où les effluents thermiques sont en quantité suffisante pour justifier l'implantation d'un doublet de forage (500 établissements consommant plus de 12 000 TEP/an). Le chiffre final est obtenu en prenant 10 % de ces établissements et en choisissant un rendement assez pessimiste du stockage.

Dans le cas particulier présenté, il y a deux sources; une chaufferie à fuel lourd et une usine d'incinération d'ordures. En prenant comme prix de vente du MWh une moyenne pondérée entre le prix du fuel lourd, pour 130 MW, et celui de l'usine d'incinération, pour 30 MW, le temps de retour est de l'ordre de 8 ans (question de M. IRIS).

Il y a deux autres marchés dont on ne parle pas, mais qui sont clairement identifiés et qui seraient intéressants : d'une part, la synergie entre stockage à moyenne température et stockage du froid. Il y a des industries qui ont plus besoin de stocker du froid que de stocker du chaud, d'autres qui ont besoin de stocker à la fois du chaud et du froid; il y a des pays qui ont besoin de chauffage l'hiver et de climatisation l'été. Donc, il y a la valorisation purement thermique et la valorisation plus large qui vise

le froid et le stockage combiné froid-chaud (M. BOISDET).

En ce qui concerne les problèmes d'ordre chimique, il est clair que le nœud gordien du stockage intersaisonnier sera le règlement apporté aux problèmes chimiques. Ils sont de deux types : précipitation de la calcite et dissolution de la silice. Dans le premier cas des méthodes et des matériels classiques employés dans l'industrie du chauffage notamment, seront utilisés. Pour la dissolution et la précipitation de la silice le problème est plus délicat car, bien qu'il s'agisse de phénomènes connus, il semblerait que des cinétiques beaucoup plus grandes que ce qui apparaît dans la littérature aient été constatées dans des cas réels aux Etats-Unis à des températures supérieures à 100 °C. Le dimensionnement de l'ouvrage tient compte du débit à traiter et des matières à éliminer, et, en combinant un traitement structural, élimination de la calcite pendant les phases de stockage, et un traitement plus conjoncturel, élimination des colmatages constatés, le problème devrait être résolu à des coûts acceptables (question de M. DESSUS — Président).

Par ailleurs la question se posait de savoir s'il n'était pas moins coûteux d'utiliser la nappe de l'Albien qui est située à 150 m au-dessus du Néocomien (question de M. LEJEUNE).

L'administration chargée de la police du sous-sol ayant des réticences pas forcément très rationnelles quant à l'utilisation de l'Albien, et étant donné que ce type de démonstration à risque nécessite un très large consensus, il a été décidé d'utiliser le Néocomien. Ceci dit, s'il s'avère que les conditions hydrauliques de l'Albien sont bonnes et qu'il y a un intérêt économique certain, une demande d'étude plus complète pourrait être faite à l'administration en vue d'utiliser cet horizon.