Stockage de chaleur en nappe de surface Les pilotes de Montreuil et de Lyon-Gerland

Heat Storage in Surface Water The Pilot Plants of Montreuil and Lyon Gerland

J.M. Lejeune

BRGM

Département Géothermie et Hydroénergie

Deux types principaux de stockage ont été étudiés par le B.R.G.M. en fonction de l'existence ou non d'une circulation de la nappe concernée au droit du site.

A Montreuil, un doublet captant l'aquifère yprésien fonctionne selon le système dit « Puits chaud — Puits froid » et permet le chauffage et la climatisation de 53 000 m² de bureaux. Après 2 ans de fonctionnement, des bilans thermiques très satisfaisants peuvent être établis.

A Lyon Gerland, un stockage intersaisonnier des calories d'été du chauffage urbain est envisagé dans la nappe alluviale. Son originalité réside dans la confection d'une paroi moulée circulaire rendue nécessaire par la vitesse de circulation importante de cet aquifère.

Two main types of storage were analyzed by the B.R.G.M. depending on whether or not circulation of the groundwater concerned existed in the location of the site.

In Montreuil, a doublet collecting the Ypres aquifer operates according to the "hot well — cold well" system and allows heating and cooling of 53,000 m² of office space. After two years of operation, very satisfactory thermal records can be drawn up.

At Lyon Gerland, interseasonal storage of summer calories for urban heating in the alluvial groundwater is considered. The originality of this storage resides in construction of a circular molded wall made necessary by the high flow rate of this aquifer.

1. Vers une valorisation énergétique optimale des nappes superficielles

Le chauffage de locaux par extraction des calories des eaux souterraines à l'aide de pompes à chaleur connaît un développement important. Le procédé le plus simple qui consiste à puiser l'eau par un forage puis à l'évacuer en surface après extraction de chaleur, représente le plus souvent une mauvaise gestion de la ressource.

La réinjection, après refroidissement, de ces eaux dans leur aquifère d'origine (dispositif du doublet) conserve quantitativement la ressource; cependant une zone froide se développe progressivement autour du puits d'injection et cette perturbation thermique est partiellement attirée vers le puits d'exhaure ou entraînée par l'écoulement régional, pénalisant à terme soit l'installation considérée, soit d'autres existantes ou potentielles en aval.

L'alternance de prélèvements en hiver puis d'injection en été de calories dans la nappe peut permettre de

conserver le bilan énergétique. Les deux flux réalisés en quantités égales permettent alors une régénération du potentiel; l'expérience d'Aulnay sous Bois, présentée par ailleurs, relève de cette approche.

Un degré supplémentaire a été réalisé dans l'opération de Montreuil que nous allons décrire plus loin; en effet, les besoins pour la climatisation de frigories d'été en quantité équivalente aux calories nécessaires pour le chauffage d'hiver, ont conduit à rechercher une exploitation réalisant simultanément et en permanence un stockage de calories (ou frigories) et une exploitation de frigories (ou calories). Deux stocks, l'un de calories, l'autre de frigories sont générés puis gérés de façon optimale en fonction des besoins de chauffage et de climatisation des locaux. Cependant, par rapport à la température naturelle de la nappe, un écart relativement faible (± 10 à 12 °C maxi) est permis pour chacun des deux stocks. Par ailleurs, ce dispositif ne convient pas lorsque l'écoulement naturel de la nappe est rapide, ce qui est assez fréquent dans les aquifères à faible profondeur.

Figure 1. — L'exploitation énergétique des nappes superficielles (vers une valorisation optimale de la ressource).

Pour mémoire, on peut citer le stockage en puits unique et le doublet à balayage, mais ces techniques paraissent peu susceptibles de développement.

Dans le cas précis d'un écoulement régional important (vitesses de Darcy de l'ordre de plusieurs dizaines de mètres par an), il convient soit d'isoler le volume concerné par le stockage au moyen d'une étanchéification périphérique, soit d'annuler l'effet d'écoulement par un dispositif de pompes compensateurs. Pour l'étanchéification, selon la profondeur concernée, différentes techniques sont possibles; à Lyon, pour le projet de l'Ecole Normale Supérieure, une paroi moulée est réalisable compte tenu de la faible profondeur de la nappe. Au-delà de 20 à 25 m, cette technique devrait être remplacée par celle d'un voile d'injection ou un autre procédé visant au même effet de création d'une barrière pérenne de transmissivité. L'isolation du stock ainsi réalisée permet une stratification verticale des niveaux de température qui peuvent être élevés dans ce type de projet (85/90 °C prévus à Lyon).

La figure 1 reprend ces différentes conceptions de la valorisation énergétique des nappes superficielles. Indépendamment de leurs contraintes respectives, on voit que l'évolution vise à une gestion optimale de la ressource en réduisant à chaque stade le rapport Volume d'aquifère concerné/Energie prélevée. Une gestion rationnelle des ressources en eau souterraine se révèle indispensable dès lors qu'une généralisation de son exploitation à des fins de consommation et/ou énergétiques est recherchée dans les grandes agglomérations; c'est pourquoi les techniques les plus lourdes, mais aussi les plus « économes » pour la ressource, méritent une attention particulière.

Figure 2. — Plan de situation du complexe intersyndical de Montreuil (échelle : 1/12 500).

2. Chauffage et climatisation du complexe immobilier intersyndical CGT à Montreuil (93)

Ce complexe de Montreuil présente, tant au point de vue architectural qu'au plan du génie climatique un caractère réellement novateur. Le souci des économies d'énergie a conduit le maître d'ouvrage, la Société Civile d'Etudes et de Recherches (SCER), en liaison avec EDF, à rechercher le mode de fonctionnement le plus efficace d'un système de chauffage et climatisation basé sur l'exploitation d'un doublet géothermique en nappe superficielle alimentant des pompes à chaleur. Les études hydrogéologiques puis les travaux de forage conduits par le Service Géologique Régional du B.R.G.M. ont abouti à retenir finalement le système dit « à puits chaud et puits froid », le mode d'exploitation de surface permettant un équilibre des volumes et des quantités d'énergie tant en été qu'en hiver.

Les travaux de forage ont eu lieu en 1979/1980. La nappe captée est celle des sables de l'Yprésien, entre 45 et 65 mètres de profondeur à une température naturelle de 13,8 °C. La nature détritique du réservoir a nécessité la mise en place d'une complémentation par crépines et massif de gravier. Les essais de pompage ont permis de préciser les débits d'exploitation envisageables (120 m³/h en pointe); un système de régulation, mis en place début 1983, permet de moduler le pompage d'exhaure en fonction des besoins; la réinjection est gravitaire.

La figure 2 indique la localisation du projet et des ouvrages réalisés.

On trouvera sur la figure 3 le principe général de fonctionnement de la boucle de chauffage et de climatisation; nous ne détaillerons pas ici l'ensemble assez complexe des régulations gérées de façon centralisée par ordinateur, qui assurent les échanges internes à chaque

bâtiment puis les échanges entre bâtiments et, enfin le recours au doublet et aux PAC. Décrivons succinctement le fonctionnement de la boucle géothermale tel qu'il a été étudié pour la phase d'exploitation définitive :

— en hiver, l'eau est prélevée du puits chaud à une température initiale de 19/20 °C et elle alimente les évaporateurs des PAC; très progressivement sa température diminue; en fin de saison de chauffe on aura prélevé de l'ordre de 210 000 m³ à une température moyenne supérieure à 17/18 °C; l'eau refroidie entre 5 et 10 °C est injectée dans le puits froid;

— en été, l'eau est prélevée du puits froid à une température de l'ordre de 8 à 11 °C; elle refroidit des batteries placées sur l'air extrait, en particulier d'un vaste hall vitré faisant, de ce fait, office de captage solaire et est injectée au puits chaud à une température de 20/22 °C; le débit total exploité aura été en fin de saison de l'ordre de 210 000 m³ d'eau.

L'énergie stockée (calories ou frigories) est récupérée à 70 % et ainsi près de 2 000 MWh (et autant de frigories) sont prélevées chaque année.

L'exploitation a débuté au cours de l'été 82, où 70 000 m³ d'eau chaude ont pu être stockés puis exploités l'hiver suivant. Au printemps 83, une intervention a été réalisée sur le puits froid dont le massif de gravier avait subi une destabilisation durant l'été 82. De nouvelles conditions d'exploitation, en particulier la modulation des débits, ont alors été définies.

Durant l'été 83, l'ensemble du dispositif a fonctionné normalement; le stockage d'eau chaude, ainsi constitué, atteignait à l'automne 120 000 m³. Le déstockage a débuté en novembre 83; la réinjection a cependant dû être arrêtée en décembre du fait d'un ensablement du puits froid. Des mesures conservatoires ont été alors adoptées afin de poursuivre l'exploitation jusqu'au printemps 84 par rejet des eaux refroidies à l'égout puis durant l'été 84 par des prélèvements à débit limité sur ce puits froid. Des solutions définitives de remise en état du système par la réalisation d'un nouveau forage sont envisagées pour l'automne 84.

Quel bilan peut-on, au stade actuel, tirer de l'opération de Montreuil ?

Malgré les difficultés qui ont pu être rencontrées depuis la mise en service des installations, un premier bilan technique peut en être tiré qui conforte les hypothèses initiales :

— le volume d'eau transité de 120 000 m³ durant l'été 83 puis l'hiver 83/84 concernait un potentiel de besoins raccordés de 35 000 m² de superficie alors que l'ensemble est passé à 42 000 m² mi 84 et est prévu à 53 000 m² à terme; dans cette configuration, les 210 000 m³ d'eau à transiter en phase finale devraient être atteints, compte tenu des améliorations encore attendues grâce à la Gestion technique centralisée (GTC) par ordinateur;

— les températures du stockage chaud sont actuellement supérieures (~ 22 °C) aux prévisions (~ 22 °C); en ce qui concerne le stockage froid, une amélioration est attendue visant à baisser le niveau moyen de température des 9 °C actuels environ vers les 6/7 °C prévus; globalement l'écart et donc le bilan énergétique pourraient être supérieurs aux prévisions sous réserve du respect des équilibres en volume et en quantité d'énergie des deux stocks;

— la décroissance de température à la sortie du stock chaud s'est avérée au cours de l'hiver 83/84 très progressive (de 26 à 20 °C entre novembre et avril) et a confirmé les hypothèses thermiques.

Les calculs initiaux qui prévoyaient une économie en énergie primaire due au système de 546 TEP/an en phase finale, se trouvent donc largement confirmés ainsi que l'intérêt économique du projet.

Quelle généralisation pour le procédé ?

Ce mode de stockage permet de maintenir les potentiels hydraulique et thermique de la nappe : les perturbations en pression et température restent localisées au voisinage immédiat du doublet. L'inversion périodique des débits a une action décolmatante. Les zones chaude et froide sont

Figure 3. — Complexe CGT : Principe de la boucle de chauffage/climatisation.
a) Installation thermique de surface. b) Principe de la boucle interbâtiments.

Les intervenants dans le projet de Montreuil (CGT)

Maître d'ouvrage (par délégation de la CGT)
Société civile d'études et de recherches (SCER)

Maître d'œuvre sous-sol

Bureau de recherches géologiques et minières (B.R.G.M.-Service géologique régional Ile de France et département Eau)

Maître d'œuvre surface (thermique)

Bureau d'Études et de réalisations pour l'industrie moderne (BERIM)

Avec la participation de EDF, Agence pour les économies d'énergie, A.F.M.E....

Quelques références :

- BERIM « Le complexe intersyndical CGT de Montreuil » BERIM informations n° 1, 1981
- Coll. SCER-BERIM « De la protection acoustique aux économies d'énergie » — Cahiers techniques du bâtiment n° 36, mai 1981
- J.Y. AUSSEUR, J. CAMPINCHI, J.P. SAUTY « Pompes à chaleur sur nappe et stockage en aquifères » — Annales des Mines mai-juin 1983.

disjointes si bien que le milieu géologique autour de chaque puits s'échauffe progressivement et les pertes thermiques diminuent au fur et à mesure que se déroulent les cycles.

En contrepartie, l'exploitation doit respecter (au moins en moyenne sur plusieurs cycles) :

- l'équilibre des volumes chaud et froid pour éviter un envahissement progressif du réservoir par le stock excédentaire en volume;
- l'équilibre des quantités d'énergie, sous peine de voir les température des stocks dériver dans le sens de l'excédent thermique.

Des caractéristiques énoncées ci-dessus on peut déduire les principaux domaines d'intérêt concernés par ce type de réalisation : les zones fortement urbanisées et/ou les aquifères fortement sollicités (emprises hydraulique et thermique limitées par l'exploitation en doublet) et les utilisations présentant des besoins comparables de chaud et de froid ce qui se trouve dans le secteur tertiaire et l'industrie.

On trouvera ci-dessus l'indication des principaux intervenants dans ce projet de Montreuil ainsi que quelques références bibliographiques.

3. Projet de stockage confiné pour l'ENS Lyon

L'École normale supérieure de Saint Cloud doit prochainement être décentralisée à Lyon où elle s'installera sur le site de Gerland, à partir de la rentrée 1987. Plusieurs variantes ont été étudiées pour le chauffage et la climatisation des locaux; parmi celles-ci une solution envisage le recours à un stockage intersaisonnier de chaleur.

En effet, le site sera raccordé à un réseau de chaleur dont les calories d'été sont produites à partir d'une usine d'incinération des ordures ménagères de façon excédentaire par rapport aux besoins appelés à cette période. Compte tenu des caractéristiques souhaitées pour le stockage (température et quantités assez élevées) d'une part, et de celles des ressources aquifères (circulation de nappe importante), d'autre part, les solutions « classi-

ques » ne se révélaient pas envisageables et une étude a été réalisée prévoyant un confinement du stock par le biais d'une paroi moulée.

Principe du procédé

La figure 4 représente les schémas de principe des deux phases de charge et de soutirage du stock. On a vu en 1 ci-dessus les avantages de cette solution qui permet l'élimination de la majeure partie des pertes par advection et autorise le stockage à température élevée (70 à 90 °C) dans des nappes à écoulement rapide. L'eau chaude évolue en circuit fermé entre le stock et un échangeur sur la boucle de distribution de surface. Les pertes thermiques sont réduites à celles résultant de la conduction, horizontalement à travers les parois et verticalement vers les couches sus et sous-jacentes. Le dispositif à puits et drains multiples a pour effet de maintenir l'horizontalité de l'interface entre les portions chaude (en haut) et froide (en bas).

Le prototype ENS Lyon Gerland

La nappe considérée est celle des alluvions du Rhône, constituée de sables et graviers située entre 5 et 20 mètres de profondeur environ. L'isolation concerne la totalité de la hauteur de réservoir et trouve son assise sur la molasse imperméable. Au sommet du stock (— 4 m), une isolation thermique et hydraulique est réalisée pour éviter notamment les infiltrations d'eau de pluie.

Figure 4. — ENS Lyon Gerland.
Schémas de principe du stockage de chaleur en paroi moulée.

En été, l'eau prélevée à la base du stock par une batterie de puits verticaux est réintroduite au sommet par un réseau de drains rayonnants horizontaux après élévation de sa température aux environs de 90 °C. En hiver, le schéma hydraulique est inversé avec prélèvement de l'eau chaude au sommet et retour d'eau refroidie à 25-30 °C à la base. L'eau du stock s'écoule donc en circuit fermé.

Les dimensions prévisionnelles du stock sont un cylindre de 15 m de haut et de 75 m de diamètre, soit un volume de 66 000 m³ de réservoir.

Les phases de l'étude réalisée en 1983-1984

— Une étude hydrogéologique du site a permis, sur la base de trois sondages réalisés fin 83, début 84, de préciser les conditions d'écoulement dans la nappe et ses caractéristiques hydrogéologiques (perméabilités horizontale et verticale, température, niveau statique...); les caractéristiques chimiques du fluide nécessiteront une approche détaillée des conditions d'exploitation par une simulation de l'évolution des équilibres lors des variations importantes de température escomptées.

— Les bilans thermiques de l'installation de surface ont permis d'établir les lois de variation des besoins appelés en fonction des données climatiques et des modes d'occupation des locaux; la puissance maximale appelée par — 10 °C sera de l'ordre de 2 000 kW et les besoins annuels voisins de 2 300 MWh.

— Sur la base des données acquises par les deux phases d'étude ci-dessus, une modélisation thermique globale a été mise au point prenant en compte toute la complexité du système tant au niveau du stock souterrain qu'au niveau des régulations de surface; plusieurs variantes ont pu être simulées selon les systèmes complémentaires adoptés (appoint chauffage urbain, pompe à chaleur, hydroaccumulation); le stock est susceptible de couvrir 70 à 80 % des besoins annuels avec un taux de restitution de l'ordre de 65 %.

— Une étude technique, comportant des essais en laboratoire, a permis de choisir le type de paroi à mettre en œuvre en l'occurrence un coulis simple, et l'isolation superficielle, à savoir du polystyrène entre deux couches de polyanne pour étanchéifier; le couplage du stock aux différents réseaux ainsi que les différents équipements de pompage ont également été définis.

— L'analyse économique du projet a repris le chiffrage prévisionnel des coûts d'investissement et des coûts d'exploitation; sur la base des différentes hypothèses tarifaires, une évaluation de la rentabilité du projet a pu être faite; en terme de délai de retour brut, une valeur de l'ordre de 15 ans est attendue.

— Les conclusions de l'étude explicitent certaines causes liées soit au site, soit à la taille limitée des besoins qui viennent réduire l'intérêt économique du projet; cependant le site paraît bien adapté à la réalisation d'un pilote et devrait permettre les extrapolations à d'autres projets potentiels.

Quelles perspectives pour ce type de projet ?

Lorsqu'on envisage le stockage dans des nappes superficielles, on est très fréquemment confronté au problème de l'écoulement régional. La technique envisagée à Lyon permet de s'affranchir de cette difficulté mais est

Les intervenants dans l'étude de faisabilité du projet stockage de l'ENS Lyon Gerland

Conducteur de l'étude

Bureau de recherches géologiques et minières (Départements Eau et géothermie, Service géologique régional Rhône Alpes)

Associé à

Solexpert International (Soletanche) Cabinet Morvan (Bureau d'études thermiques)

Avec la collaboration de l'A.F.M.E. et du Rectorat de l'Académie de Lyon.

cependant limitée à des profondeurs accessibles (20 à 25 mètres) pour la réalisation de la paroi; au-delà, d'autres techniques telle que celle du voile étanche seraient à mettre en œuvre. Les atouts résident dans les températures de stockage admissibles et l'emprise relative très limitée sur la nappe.

Les conditions pour un développement de cette solution portent notamment sur la pérennité de l'ensemble des constituants du système et en particulier les isolations périphérique et superficielle; quant à l'intérêt économique, il sera trouvé dès lors que les projets atteindront une dimension suffisante que l'on peut estimer, à l'heure actuelle, à environ le double du projet de Lyon (stock de diamètre > 100 m, plus de 500 TEP/an stockées) ou que des conditions favorables de l'infrastructure limiteront les investissements (utilisation partielle des fondations d'un bâtiment, par exemple).

4. Conclusion

Avec la réalisation de Montreuil et le projet de l'ENS Lyon Gerland, on dispose de deux techniques de valorisation énergétique des nappes superficielles par stockage de calories (et/ou de frigories) assez contrastées quant aux niveaux de température visés et aux profondeurs admissibles; elles ont cependant en commun la nécessité d'un aquifère d'épaisseur assez importante et présentant une bonne homogénéité.

A partir de ces deux conceptions de base pour lesquelles des modèles hydrodynamiques et thermiques ont pu être élaborés, différentes variantes peuvent être étudiées au cas par cas en fonction des caractéristiques de la ressource aquifère, d'une part, et de la nature des besoins de surface, d'autre part.

Discussion

Président : M. B. DESSUS

La capacité calorifique de l'eau étant supérieure à celle du sol saturé en eau, il paraît logique de comparer la méthode de stockage présentée à un stockage en piscine (M. DESSUS — Président).

Répondant à une question de M. GRJEBINE, M. SAUTY indique que le stockage en piscine excavée implique un génie civil beaucoup plus coûteux car il faut excaver, faire une paroi armée (par exemple attachée à la formation par des forages — technique du « mur berlinois »), et prévoir un terrassement en sous-sol (le poids est supérieur à celui du sol) alors que la « solution proposée est une paroi circulaire en béton plastique étanche qui n'aura pas à supporter d'effort de poussée (terre et hydrostatique) donc très bon marché » (M. COUDERC).

Le béton utilisé est un mélange spécial (dont très peu de polystyrène) qui a des propriétés isolantes un peu supérieures au béton classique.

Indépendamment des raisons économiques (moindre coût du génie civil) qui conduisent à préférer le stockage d'eau chaude dans un aquifère naturel isolé par des parois étanches, plutôt que dans une « piscine » excavée, la présence du milieu poreux bloque les courants de convection naturelle; cela évite une homogénéisation des températures entre eaux chaudes stockées et eaux froides en retour.

Dans l'hypothèse de deux excavations, piscine chaude et piscine froide (proposition de M. DESSUS — Président), on peut

remarquer que le coût de génie civil serait pratiquement doublé (M. SAUTY).

De manière générale, pour obtenir un rendement correct du stockage il y a deux voies : soit sophistication des installations en améliorant l'isolation thermique, l'étanchéité, la gestion du stock de chaleur etc., soit jouer sur la géométrie et les facteurs d'échelles afin de diminuer les pertes tout en conservant un système simple à l'exploitation.

La première voie peut entraîner un manque de fiabilité dans l'exploitation du stock qui devient techniquement trop complexe. La deuxième voie peut conduire à une plus grande difficulté à trouver un site naturel exploitable, donc à diminuer le potentiel de développement ou à augmenter les coûts d'installation. (M. FAVROD).

Nous comptons faire une étude complète de l'ensemble de ce qui a pu être présenté dans ce domaine, de façon à montrer qu'il y a différents types de stockages, qui répondent à des niveaux de besoins différents, à des contraintes de types différents, à des ressources différentes. Nous souhaitons arriver, après quelques réalisations pilotes dont celle de Lyon et celle de Montreuil, à une sorte de typologie permettant rapidement, pour un rejet thermique, de savoir quelle est la solution de stockage la plus adaptée, quel est le meilleur créneau pour chaque stockage, y compris, éventuellement les problèmes d'exploitation (M. LEJEUNE).