

Le stockage de chaleur en aquifère profond – Synthèse des facteurs de performance

Bernard Bourbiaux
IFP Energies nouvelles, France

En France, les secteurs résidentiel et tertiaire consomment près de 45 % de l'énergie finale consommée tous secteurs confondus, principalement pour des usages calorifiques. Ces secteurs contribuent pour 22 % aux émissions de CO₂ (source : ADEME, "Chiffres Clés du Bâtiment, édition 2013"). Cette consommation de chaleur est en grande partie saisonnière et souvent déphasée par rapport à des sources de chaleur qui pourraient constituer des alternatives aux énergies fossiles. Le stockage saisonnier de chaleur en aquifère constitue une solution pour effacer ce décalage entre production et consommation.

Il peut être mis en œuvre au moyen de la technique du **doublet réversible** dont le principe est illustré par la **Figure 1** (Ungerer et Le Bel, 2006). Au cours de la saison estivale, la saumure de l'aquifère est soutirée et réchauffée par une source de chaleur via un échangeur, puis réinjectée à une certaine distance du point de soutirage afin de constituer une « bulle chaude ». Au cours de la saison hivernale, le sens de circulation est inversé afin de prélever la saumure chaude stockée et de subvenir aux besoins d'un réseau de chaleur. Une fois refroidie par échange avec le réseau, cette même saumure est réinjectée par le puits de production estival, constituant ainsi une "bulle froide" en cet endroit du réservoir. Ces deux étapes constituent le cycle de base du stockage saisonnier.

Les premiers essais de stockage souterrain de chaleur en aquifère remontent aux années 70-80, à des profondeurs souvent faibles, de l'ordre de la centaine de mètres. Cet article concerne le stockage massif de chaleur à destination de réseaux de chaleur délivrant des puissances de l'ordre de la dizaine de MW correspondant aux besoins calorifiques de plusieurs milliers de foyers. Le stockage est envisagé dans des aquifères salins profonds compte tenu des grands volumes d'eau à stocker et des restrictions relatives à l'exploitation des aquifères d'eau potable. Bien qu'attractif en apparence, ce mode de stockage n'est pas parvenu à percer pour diverses raisons, parmi lesquelles l'échec de certaines opérations pilotes et la compétition des autres sources d'énergie à bas coût durant les années 80-90. L'exploitation saisonnière du stockage augmente également la durée d'amortissement économique, par comparaison aux stockages solaires à cycle journalier par exemple. Le stockage de chaleur et de froid à des fins de chauffage hivernal et de climatisation estivale, expérimenté à ce jour sur des aquifères peu profonds, permettrait cependant d'améliorer le bilan économique.

Malgré ces obstacles, le stockage souterrain de chaleur fait l'objet d'un regain d'intérêt pour

des motifs environnementaux évidents, également en raison d'avancées technologiques concernant la maîtrise des puits notamment.

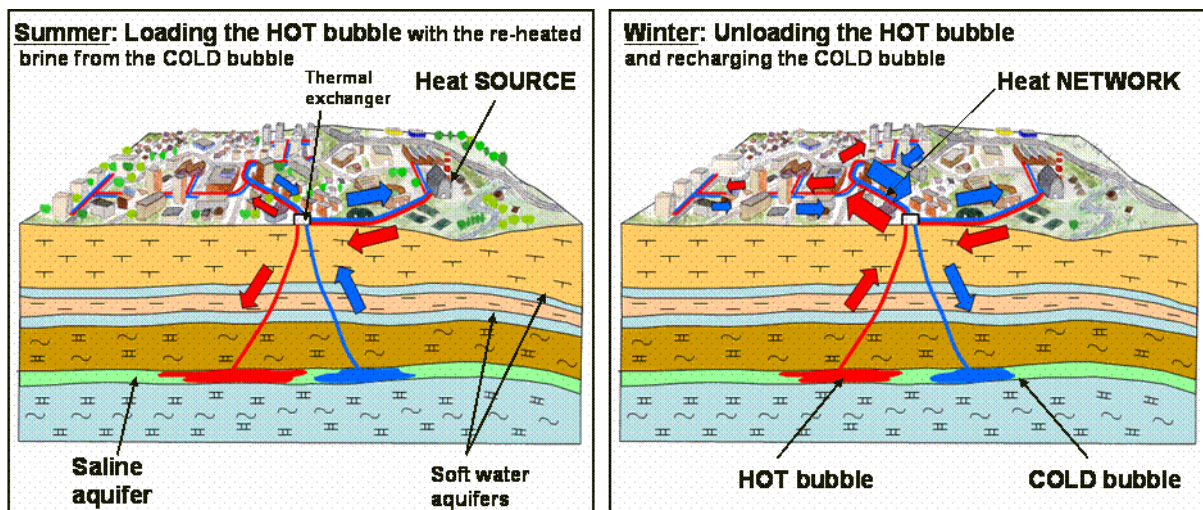


Figure 1 (source : Ungerer et Le Bel, 2006) – Principe du doublet réversible.

Une opération récente réalisée en Allemagne redonne du crédit à ce concept (Kabus *et al.*, 2005). Elle concerne un aquifère situé à une profondeur de 1200-1300 m. La chaleur estivale excédentaire d'une centrale thermique à cogénération est stockée dans un aquifère géothermique à 53-55 °C qui alimente un réseau de chaleur d'une puissance de 12 MW. Les motivations étaient la surproduction estivale de chaleur et la température insuffisante de l'eau géothermique qui nécessitait le recours à des pompes à chaleur. Deux doublets de puits sophistiqués ont été installés, comportant des tubage et cuvelage en fibre de verre pour résister à la corrosion. Le fonctionnement alterné des puits est assuré d'une part par une pompe d'injection dans l'annulaire en surface, d'autre part par une pompe immergée de production par le tubing. Un taux de récupération de la chaleur stockée de l'ordre de 73% est rapporté.

On citera également le projet GEOSTOCAL (GEO-STOCKAGE de ChALEUR) mené de 2007 à 2011 dans le cadre du programme de stockage de l'énergie de l'ANR (poster consultable sur http://www.agence-nationale-recherche.fr/Colloques/NTE2009/pdf/2/STOCKE_3_GEOSTOCAL_poster.pdf) et dont l'objectif était de stocker dans l'aquifère du Dogger la chaleur estivale excédentaire d'usines d'incinération alimentant des réseaux de chaleur d'Ile-de-France, et d'améliorer ainsi le bilan environnemental de ces derniers en limitant le recours à des sources fossiles en période de pointe hivernale. Un tel stockage permet également de valoriser des sites géothermiques peu attractifs ou déjà exploités (Réveillère et al. 2013).

Les questions relatives à l'évaluation des besoins de stockage et aux caractéristiques géologiques d'un aquifère performant en stockage sont passées en revue ci-après.

EVALUATION DES BESOINS DE STOCKAGE SAISONNIER

L'estimation des besoins de stockage passe par la mise en regard des profils de consommation et de production de chaleur sur un cycle annuel. A titre d'exemple, la **Figure 2** superpose les profils de consommation et de production extraits du guide méthodologique de pilotage d'installations solaires de l'INES (Letz, 2004). La production, d'origine solaire, est mise à l'échelle de la consommation moyenne annuelle d'un foyer (100 m², 200 KWh/m²/an en chauffage et eau chaude sanitaire).

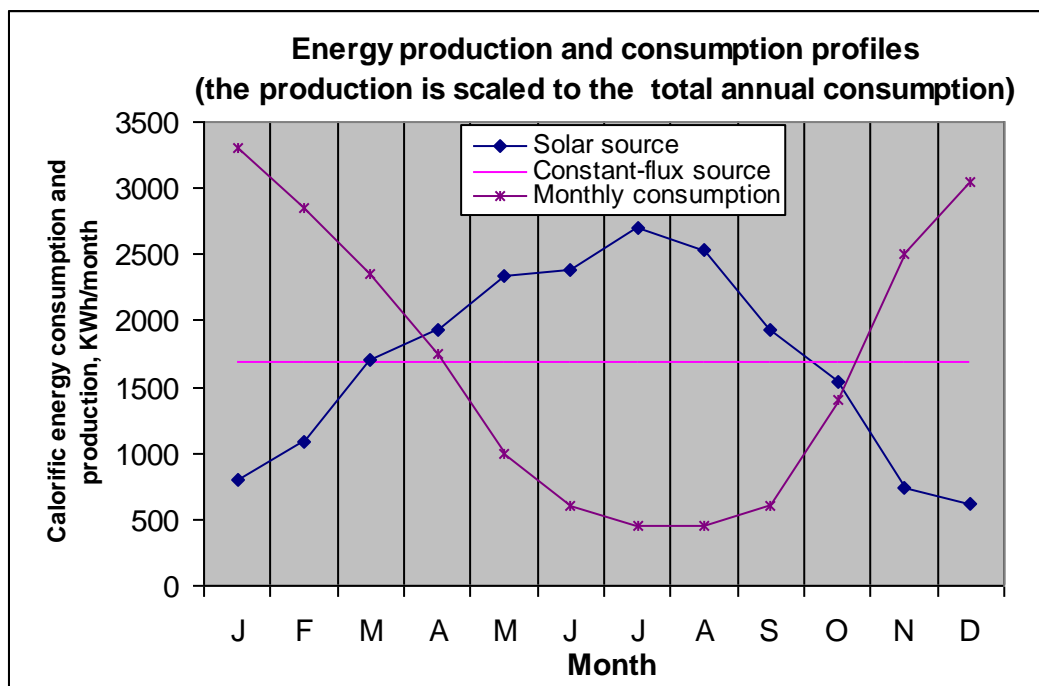


Figure 2 (Bourbiaux, 2011) - Profils de production et de consommation de chaleur. La droite représente la source équivalente à puissance constante.

Le dimensionnement d'un stockage tient compte des pertes de chaleur, au sein de l'aquifère d'une part, au cours des phases de transport surface \leftrightarrow fond d'autre part. Le rendement énergétique du stockage, ou récupération, est défini à l'échelle d'un cycle annuel comme le rapport R entre la chaleur fournie au réseau lors du déstockage et la chaleur prélevée à la source pour être stockée. Compte tenu de ce rendement, la puissance moyenne de la source doit être surdimensionnée d'un facteur α par rapport à la puissance moyenne consommée sur un cycle annuel (calculs développés dans Bourbiaux 2011). L'évolution de α en fonction de R est représentée sur la **Figure 3** pour les profils de consommation et de production à puissance

variable ou constante de la Figure 2, avec des périodes de charge et décharge égales à 6 mois. Pour une récupération de 50 % de la chaleur stockée, la production annuelle d'une source à flux constant doit excéder de près de 20 % la chaleur annuelle finale consommée ($\alpha = 1.2$). Ce surdimensionnement est de 36 % pour une source solaire en raison d'un déphasage maximal par rapport à la consommation.

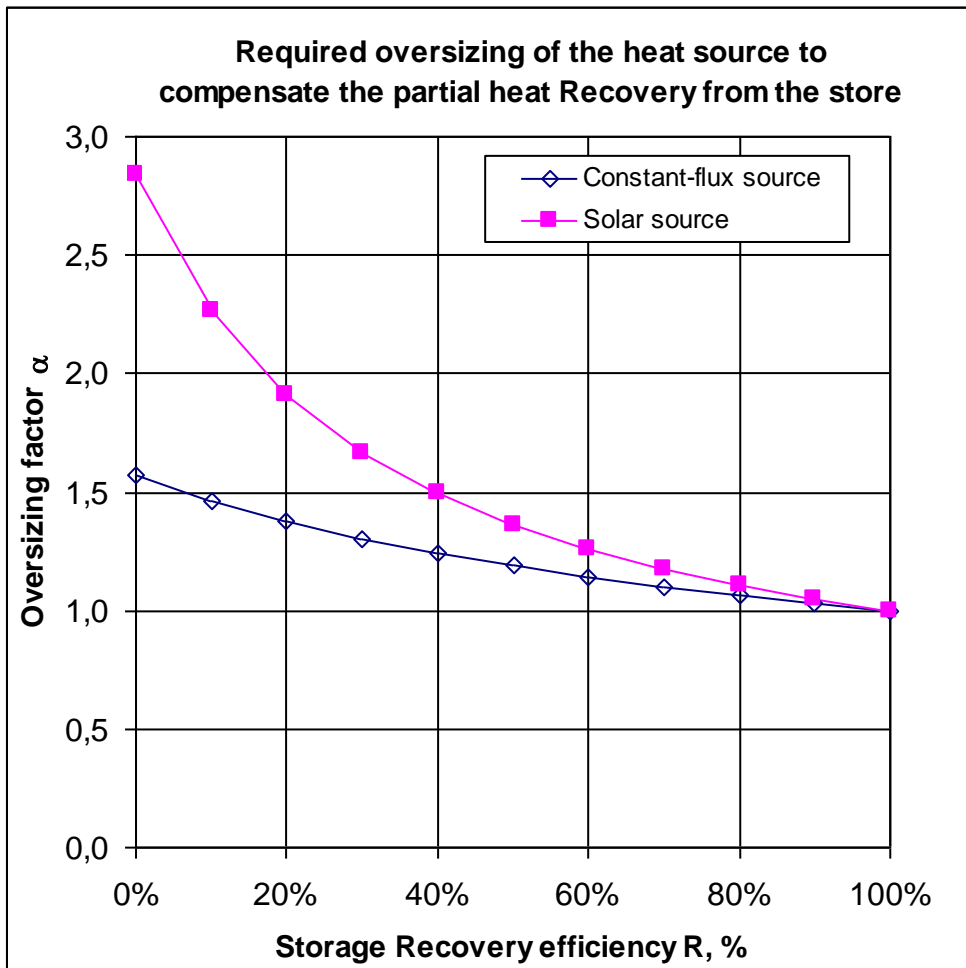


Figure 3 (Bourbiaux, 2011) – Surdimensionnement de la source de chaleur en fonction du rendement thermique du stockage.

Le surdimensionnement de la source croît d'autant plus vite que la récupération est faible. Ce constat nous amène à examiner les facteurs géologiques influençant la performance d'un stockage de chaleur.

FACTEURS IMPACTANT LA PERFORMANCE D'UN STOCKAGE DE CHALEUR EN AQUIFERE

Les principales causes de déperdition de chaleur au cours des cycles de stockage sont passées

en revue.

Pertes de chaleur au sein de l'aquifère

Des mécanismes de dispersion et de conduction sont à l'origine de ces pertes.

La *dispersion de chaleur* résulte :

- de l'hydrodynamisme naturel,
- des différences de masse volumique et de viscosité entre les fluides injecté et en place, qui peuvent induire une ségrégation et/ou des instabilités du front de déplacement,
- et des hétérogénéités du réservoir.

La *conduction* de chaleur intervient à différentes échelles :

- à une échelle locale entre le fluide injecté et la matrice solide de l'aquifère,
- à grande échelle entre le réservoir et ses épontes,
- et à une échelle intermédiaire entre les niveaux perméables du réservoir et les intercalations ou corps imperméables qu'il renferme.

Hydrodynamisme naturel

Ce phénomène entraîne une migration directionnelle de la bulle thermique au cours du temps. Son impact peut être important pour des stockages de chaleur peu profonds et de petite taille. Pour les aquifères profonds concernés par les stockages saisonniers de grands volumes, l'hydrodynamisme est moindre et le déplacement de la bulle rapporté à sa dimension généralement négligeable.

Ségrégation thermique et convection

Ces phénomènes peuvent être sensibles dans des réservoirs homogènes, épais et perméables. Cependant, les aquifères profonds ont souvent subi une diagénèse importante qui tend à accroître les hétérogénéités et les contrastes de perméabilité au sein du réservoir. Ces hétérogénéités réduisent l'épaisseur sur laquelle des transferts convectifs peuvent intervenir. En conséquence, les phénomènes convectifs y sont généralement négligeables.

Conduction thermique à l'échelle locale

Un équilibre thermique s'établit quasi-instantanément entre l'eau chaude injectée et les grains de la roche-réservoir, compte tenu que la conduction s'opère sur une distance infra-millimétrique correspondant à la dimension caractéristique de ces grains. Cet équilibre est peu impacté par la porosité car la capacité calorifique d'une roche saturée varie peu avec sa porosité.

Conduction thermique au travers des épontes.

Une déperdition des calories de l'aquifère réchauffé par l'eau stockée se produit par

conduction aux épontes, au cours de l'injection puis durant l'éventuelle phase de repos avant déstockage. Il en résulte un profil de température en fonction de la distance au puits (Lauwerier, 1955). Les calculs indiquent que les pertes de chaleur stockée croissent de 7.1 % à 57.5 % lorsque l'épaisseur d'aquifère décroît de 100 m à 5 m. Une épaisseur de 10 m apparaît comme le seuil minimal d'épaisseur en-dessous duquel les pertes thermiques aux épontes deviennent rédhibitoires. A l'opposé, les pertes thermiques aux épontes d'aquifères massifs d'une épaisseur de 100 m ou plus sont négligeables en valeur relative.

Les observations précédentes concernent le premier cycle de stockage. Toutefois, la succession des cycles modifie progressivement l'environnement thermique des bulles de stockage, ce qui atténue les échanges aux épontes. Des simulations numériques des cycles de stockage et déstockage sont nécessaires pour quantifier cette évolution de l'environnement thermique et calculer le rendement thermique du stockage en fonction des cycles.

Impact des hétérogénéités internes à l'aquifère

L'équilibre thermique d'une couche imperméable incluse dans l'aquifère de stockage peut être calculé en fonction de l'épaisseur de cette couche comme illustré par la **Figure 4**.

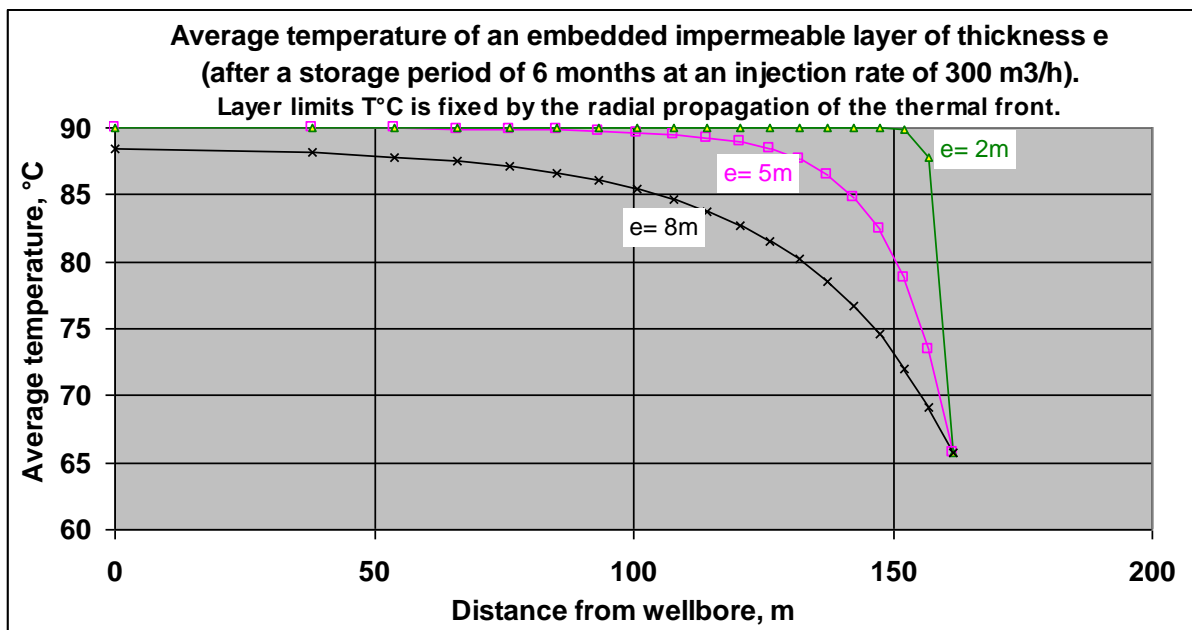


Figure 4 (Bourbiaux, 2011) – Profil de température d'une couche imperméable d'épaisseur e intercalée dans un aquifère épais à la fin d'une période de 6 mois de recharge de l'aquifère par un fluide à 90°C injecté au débit de 300 m³/h.

La présence de couches ou corps imperméables de petite dimension (d'épaisseur métrique ou infra-métrique) en porte pas préjudice au rendement thermique du stockage et la température déstockée, car l'équilibre thermique entre l'aquifère et le fluide stocké s'établit sur des durées

de temps négligeables devant la durée de chargement de l'aquifère. De telles intercalations imperméables, qui peuvent être multiples, jouent le rôle d'accumulateurs de chaleur au sein de l'aquifère et accroissent la compacité de la bulle thermique, ce qui réduit l'impact relatif des pertes thermiques aux épontes. Elles inhibent également les phénomènes de convection thermique. A l'inverse, des niveaux ou corps imperméables épais (décamétriques par exemple) ne parviennent pas à l'équilibre thermique au cours de la phase de stockage, ce qui réduit la qualité (température) du fluide déstocké.

Pertes thermiques lors de la charge et de la décharge de l'aquifère

Les pertes par transport sont minimales pour des aquifères situés au droit des points de production et de consommation. Elles peuvent être réduites par isolation des conduites, au prix d'un investissement supplémentaire. Un débit élevé des puits (plusieurs centaines de m³/h) demeure toutefois la meilleure garantie de maximisation du rendement thermique du stockage. Le produit perméabilité-épaisseur de l'aquifère détermine en premier lieu la productivité ou injectivité des puits du doublet. La géométrie du puits, vertical ou horizontal, influence également son débit potentiel. Une trajectoire de puits inclinée apparaît comme un compromis optimal car elle maximise la probabilité d'interception de nombreux niveaux conducteurs. Dans le cas d'aquifères profonds (> 1 km), les bulles chaude et froide peuvent être exploitées sans interférence entre elles à partir de puits inclinés forés depuis le même point en surface.

Le maintien de la productivité/injectivité des puits sur de nombreux cycles annuels constitue l'un des principaux défis d'un projet de stockage de chaleur en aquifère. Les cycles thermiques peuvent modifier les équilibres géochimiques roche-fluide et induire des phénomènes de dissolution-précipitation aux abords du puits. Les propriétés physico-chimiques du fluide de l'aquifère, en liaison éventuelle avec une activité bactérienne, occasionnent également des phénomènes de corrosion et/ou dépôts préjudiciables à l'état et la performance des puits. Or, une baisse de la productivité/injectivité des puits compromet rapidement la rentabilité d'un stockage en raison de la diminution de son rendement thermique et d'une qualité amoindrie de la chaleur déstockée. En conséquence, comme en géothermie classique mais plus encore ici pour des puits à fonctionnement réversible, les risques d'une baisse de performance des puits doivent être anticipés et minimisés par le choix de matériels adaptés et la mise en place d'un programme de surveillance et d'opérations préventives (injection d'inhibiteurs,... (Bray et al. 1991)).

CONCLUSION

Le recours à une solution de stockage doit être décidé au regard du décalage saisonnier entre production et consommation prévisible sur la durée du projet. Ce décalage détermine la taille du projet en termes de quantité de chaleur à stocker.

Le stockage massif de chaleur sera de préférence envisagé dans des aquifères salins modérément profonds, afin de minimiser le coût des puits et d'éviter les restrictions d'usage d'aquifères potentiellement destinés à la fourniture d'eau potable.

Un aquifère sera candidat possible pour un stockage sur la base d'estimations de sa productivité et de son rendement thermique. Cette évaluation nécessite de collecter et intégrer les données caractérisant la géométrie et les hétérogénéités internes de l'aquifère ainsi que son comportement à l'écoulement. Des simulations numériques des cycles de stockage sont nécessaires pour évaluer l'évolution du rendement thermique au cours des cycles de stockage, ainsi que sa sensibilité aux incertitudes géologiques. Une modélisation double milieu peut s'avérer utile pour appréhender l'impact d'hétérogénéités internes à l'aquifère.

Le maintien de la productivité des puits est également un facteur déterminant de viabilité d'un projet de stockage en aquifère.

Si le stockage de chaleur saisonnier évite le recours hivernal à des énergies d'appoint souvent coûteuses et d'origine non renouvelable, ce bénéfice ne semble cependant pas suffisant à ce jour pour motiver de telles opérations. De multiples raisons peuvent être invoquées, telles que le poids élevé des investissements associés, les risques géologiques et opératoires, la réduction progressive du besoin de stockage grâce à l'isolation des bâtiments, des incitations financières insuffisantes y compris le faible coût des émissions de CO₂.

REFERENCES

Bourbiaux, B. (2011) ATEs Contribution to the Housing Energy Balance: a Simple Assessment Methodology, OGST – Revue IFP Energies nouvelles, Vol. 66, No. 1, pp. 21-36.

Bray, P., Goyenèche, O., Ignatiadis, Y. et Longin, G. (1991) Diagnostic et réhabilitation des forages géothermiques du Bassin de Paris, Hydrogéologie **4**, 321-328.

Kabus, F., Hoffmann, F. and Möllmann, G. (2005) Aquifer Storage of Waste Heat Arising

from a Gas and Steam Cogeneration Plant – Concept and First Operating Experience, *Proceedings World Geothermal Congress 2005*, Antalya, Turkey, 24-29 April.

Lauwerier, H.A. (1955) The Transport of Heat in an Oil Layer Caused by the Injection of Hot Fluid, *Appl. Sci. Res.***5**, 145-150.

Letz T. (2004) Suivi des Systèmes Solaires Combinés: Guide méthodologique (mise à jour 2004), <http://www.ines-solaire.org/fr/suivi-evaluation/systemes-solaires-combines/guide-methodologique/>

Réveillère, A., Hamm, V., Lesueur, H., Cordier, E., Goblet, P. (2013) Geothermal contribution to the energy mix of a heating network when using Aquifer Thermal Energy Storage: Modeling and application to the Paris basin, *Geothermics* **47**, 69-79.

Ungerer, P. et Le Bel, L. (2006) Le stockage de chaleur en aquifère : une nouvelle perspective pour la géothermie, Dossier : Stockage de l'Energie, *Revue des Ingénieurs des Mines* **423**, Nov./Déc. 2006, 35-37.