
Stockage de chaleur en aquifère et flexibilité de la demande électrique : quelles possibilités ?

PAULUS Claire¹, BOLLY Pierre-Yves², HERMANS Thomas³, KOO SEEN LIN Emma⁴, ROBERT Tanguy⁵

¹ Université Catholique de Louvain-la-Neuve (UCL), Ecole polytechnique de Louvain (EPL), 1 Rue Archimède, 1348 Louvain-la-Neuve, Belgique, claire.i.paulus@gmail.com

² Aquale sprl, 22 Rue Montellier, 5380 Noville-les-Bois, Belgique, py.bolly@aquale.com & Université Catholique de Louvain-la-Neuve (UCL), Ecole polytechnique de Louvain (EPL), 1 Rue Archimède, 1348 Louvain-la-Neuve, Belgique, pierre-yves.bolly@uclouvain.be

³ Stanford University, School of earth, energy & environmental sciences, Department of Geological Sciences, 450 Serra Mall, Building 320, Room 118, Stanford, CA 94305-2210, USA, thermans@stanford.edu

⁴ Ecole d'ingénieurs en Environnement, Géoressources et Ingénierie du Développement durable (ENSEGID), 1 Allée Fernand Daguin, 33607 Pessac, France Bordeaux, France, ksl.emma@gmail.com

⁵ Aquale sprl, Rue Montellier 22, 5380 Noville-les-Bois, Belgique, t.robert@aquale.com

RÉSUMÉ. Dans les contextes de la flexibilité de la demande électrique (EDSM) et du stockage de chaleur en aquifère, le dimensionnement et le fonctionnement de systèmes géothermiques ouverts (ATES) sont étroitement liés à la géologie du site, hétérogène et complexe par définition. Afin de pouvoir développer des outils de modélisation prédictive fiable, nous avons développé une méthodologie de collecte de données spatialisées et à haute résolution temporelle de la subsurface combinant de la tomographie de résistivité électrique (ERT) en 4D, des mesures hydrogéologiques et une expérience de stockage de chaleur à court terme dans un aquifère confiné de plaine alluviale. Les résultats démontrent la capacité de l'ERT 4D à délimiter la distribution du panache thermique (volume et estimation des températures) lors des phases d'injection, de stockage et de récupération de la chaleur dans l'aquifère. L'expérience montre que minimum 70% de l'énergie stockée pouvait être récupérée à condition de disposer de stratégies de récupération adéquate, ce qui apparaît intéressant dans le contexte de la flexibilité de la demande électrique.

ABSTRACT. In the context of energy demand side management (EDSM) and heat storage in aquifers, the design and functioning of aquifer thermal energy storage (ATES) systems have strong interconnections with the geology of the site which may be complex and heterogeneous, making predictions difficult. In this context, we developed a subsurface monitoring methodology to better characterize heat transfer in the subsurface with the help of 4D electrical resistivity tomography (ERT), multiple hydrological measurements in wells, and a short-term heat storage experiment conducted for the purpose in a confined alluvial aquifer. Results clearly show the ability of ERT to delimit the thermal plume growth during injection, the diffusion and decrease of temperature during storage, and the decrease in size after heat recovery. Energy balance shows that up to 70% of the energy can be easily recovered with an adapted strategy in the context of DSM. Short-term heat storage in alluvial aquifer is efficient and ERT is a valuable tool to image and estimate the temperature distribution in the subsurface.

MOTS-CLÉS : géothermie, hydrothermie, stockage de chaleur, flexibilité de la demande électrique, suivi temporel, géophysique

KEY WORDS : ERT, ATES, EDSM, monitoring, energy storage, geophysics

1. Introduction

La transition énergétique est en marche et les projets de recherche en énergie se multiplient. Du point de vue des systèmes électriques, l'utilisation croissante d'énergies renouvelables entraîne des déséquilibres fréquents et difficilement prévisibles sur les réseaux. Côté offre, les systèmes électriques doivent absorber une part toujours plus importante d'énergies renouvelables (secteurs photovoltaïque et éolien par ex.) dont la variabilité dans le temps est difficile à prédire. Côté demande, l'utilisation de l'énergie électrique est en croissance dans les pays en transition, notamment à cause de l'utilisation croissante de pompes à chaleur (PAC) et d'équipements de haute technologie. Face à ce constat, la thématique de la flexibilité de la demande électrique (EDSM) occupe une place importante dans les recherches énergétiques actuelles (par ex. via l'utilisation décalée et régulée de PAC) [ALB 2007].

Du côté des PAC, l'emploi du sous-sol comme source froide (géothermie) pour le chauffage et/ou la climatisation du secteur résidentiel (sondes verticales ou BTES) ou des secteurs tertiaire et de logement collectif (systèmes ouverts sur aquifère ou ATEs) explose [AND 1997 ; HAE 2010 ; VAN 2011 ; HAE 2013 ; BAY 2013]. En comparaison avec les pompes à chaleur air-air, l'emploi du sous-sol a l'avantage d'une température relativement constante tout au long de l'année [HAE 2013].

Les systèmes ATEs (*Aquifer Thermal Energy Storage*) fonctionnent en captant directement les calories (ou frigories) de l'eau souterraine via pompage dans un ou plusieurs puits. L'eau ainsi pompée va subir un changement de température induit par les PAC (hausse en cas de climatisation ou baisse en cas de chauffage) puis être réinjectée dans l'aquifère via un ou plusieurs puits d'injection situés à une distance suffisante des puits de pompage pour éviter tout court-circuit thermique. Le système ATEs étant réversible (chauffage en hiver puis climatisation en été), un stockage saisonnier de calories ou de frigories se produit tout en permettant d'augmenter le rendement (SPF) des PAC eau/eau (puisque le ΔT sera réduit entre la source froide et la source chaude) [VAN 2011].

La température stable de l'eau souterraine et la possibilité de stocker de la chaleur dans certains types d'aquifère offrent une perspective de combinaison avec les thématiques de flexibilité de la demande électrique (EDSM). Une possibilité serait par exemple de remplir les creux de consommation en stockant de la chaleur (convertie efficacement à partir de l'énergie électrique) temporairement dans un aquifère puis de l'utiliser de manière décalée pour lisser les pointes de consommation. Le stockage de chaleur ne serait plus seulement saisonnier mais bien horaire, journalier voire hebdomadaire. Toutefois, le sous-sol doit pouvoir être modélisé très finement afin de pouvoir piloter intelligemment et de manière prédictive ce type de systèmes.

Dans cette recherche, nous avons développé une méthodologie de caractérisation dynamique du transfert et du stockage de chaleur en aquifère dans le but d'améliorer significativement les prédictions de modèles numériques. Le but de cette étude est de rendre possible le pilotage intelligent des PAC eau/eau de grandes puissances (notamment, pour des applications EDSM à une échelle horaire, journalière voire hebdomadaire).

La présente communication se focalise sur la présentation de cette méthodologie couplant du monitoring de tomographie de résistivité électrique (ERT), des mesures hydrogéologiques et une expérience de stockage de chaleur durant 3 jours dans un aquifère confiné de plaine alluviale (**Figure 1**).

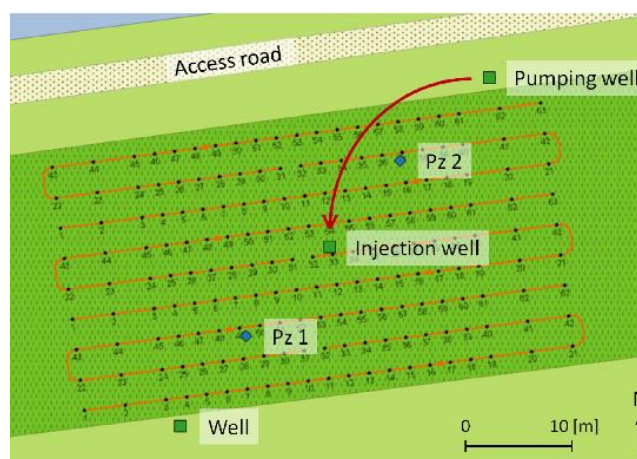


Figure 1. Plan schématique de l'expérience montrant le dispositif d'électrodes centré sur le puits ayant servi à l'injection de chaleur. Outre le dispositif ERT 3D, les ouvrages à proximité ont tous été suivis grâce à des sondes CTD et des mesures manuelles.

2. Contexte

L'expérience s'est déroulée sur un ancien site industriel wallon dans un aquifère de plaine alluviale que la société Aquala (et historiquement Ecofox) a caractérisé depuis plus de deux décennies (i.e., ce site est équipé de multiples puits et piézomètres). Nous y retrouvons des terrains de couverture jusqu'à 2 m de profondeur. Il s'agit principalement de remblais puis d'argiles non saturés qui présentent des résistivités électriques de l'ordre de 10 Ωm . De 2 à 8 m de profondeur, nous retrouvons des sables et graviers saturés qui composent l'aquifère de plaine alluviale investigué lors de cette expérience. D'un point de vue électrique, ces sables et graviers saturés présentent des résistivités de l'ordre de 80 Ωm . Cet aquifère sablo-graveleux repose sur les schistes du Houiller (très peu perméables) dont le toit est situé à 8 m de profondeur (**Figure 2**).

Cet aquifère alluvial est confiné puisque le niveau de la nappe a été mesuré à 1,70 m de profondeur. Il est aussi très perméable. En effet, une campagne de pompage d'essai menée en mars 2015 a permis d'estimer la conductivité hydraulique K à 10^{-3} m/s au droit du puits d'injection utilisé pour cette expérience. Les études historiques sur le site montrent également que le gradient hydraulique est pratiquement nul (i.e., l'écoulement naturel de l'eau souterraine est excessivement lent). D'un point de vue hydrogéologique, ce type d'aquifère, peu profond, très productif et sans écoulement souterrain significatif, offre les meilleures conditions pour des applications de type ATES et stockage de chaleur puisque la chaleur stockée ne se dissipera pas via l'écoulement.

D'un point de vue physico-chimique, l'eau souterraine est contaminée en chlorures et présente des résistivités électriques spécifiques très hétérogènes : entre 2 et 5 Ωm . Les variations de résistivité électrique de l'eau souterraine sont très grandes sur une distance très faible. Ainsi, seule une vingtaine de mètres séparent le puits de pompage et le puits d'injection utilisés pour cette expérience et pourtant, l'eau souterraine y présente des résistivités électriques de respectivement 2 et 2,5 Ωm . La température de l'eau souterraine est de 10°C.

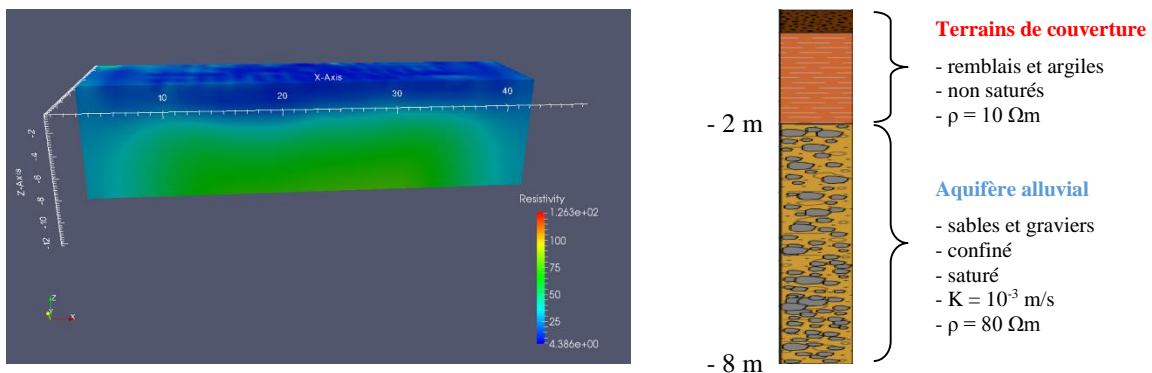


Figure 2. Contexte (hydro)géologique (droite) et modèle inverse 3D de résistivité électrique (gauche). L'aquifère alluvial investigué a sa base à 8 m de profondeur et se pose sur les schistes imperméables du Houiller.

3. Méthodes

Les études hydrogéologiques classiques se basent sur des données très souvent ponctuelles collectées dans des ouvrages souterrains : puits et piézomètres entre autres. Si ces ouvrages sont des fenêtres directes sur le sous-sol, ils sont coûteux, invasifs et ne permettent pas de visualiser les processus dynamiques ayant cours à proximité. D'autre part, en terme de température, l'eau du puits n'est pas toujours en équilibre avec l'aquifère, un mélange et des pertes de chaleur au sein du puits sont possibles, induisant un biais dans les données [HER 2015b]. A l'inverse, les techniques de prospection géophysique (analogues à l'imagerie médicale) permettent d'imager de manière non invasive et peu coûteuses le sous-sol en 2, 3 et 4D, capturant ainsi une partie de l'hétérogénéité du sous-sol à travers l'hétérogénéité des propriétés géophysiques mesurées, mais avec une résolution spatiale plus limitée.

L'imagerie électrique ou tomographie de résistivité électrique (ERT) est une technique géophysique qui consiste à imager la distribution de la résistivité électrique du sous-sol en 2 ou 3D (comme présenté à la **Figure 2**) à partir de mesures en surface [LOK 2013]. La collecte d'une donnée ERT consiste à injecter un courant d'intensité connue dans le sol à l'aide de deux électrodes (dites de courant) et de mesurer la différence de potentiel électrique associée entre deux autres électrodes (dites de potentiel). Cette opération est répétée de multiple fois (typiquement des centaines à milliers de données pour une image) de manière automatique via un protocole d'acquisition prédéfini. Le traitement de ces données permet de calculer la distribution de résistivité du sous-sol.

La tomographie de résistivité électrique a été utilisée à de nombreuses reprises pour aider à caractériser la géologie et l'hydrogéologie de sites. Par exemple Robert et al. [ROB 2011] ont développé une méthodologie permettant de détecter des zones plus fracturées dans le bedrock calcaire autorisant des écoulements préférentiels d'eau souterraine. Hermans et al. [HER 2015a] ont développé une méthodologie de caractérisation d'aquifère de plaine alluviale sur la base d'informations ERT et d'essai de pompage à l'aide de méthodes probabilistes.

L'imagerie électrique fonctionne également en suivi temporel [SIN 2015]. On parle alors de monitoring ERT. Le principe est de répéter dans le temps l'acquisition d'images électriques puis de visualiser les changements de résistivité électrique ($\Delta\rho$) associés au processus physique étudié. Dans la dernière décennie, les expériences relatives au monitoring ERT ont prouvé leur utilité pour caractériser les processus dynamiques ayant cours dans le sous-sol. Robert et al. [ROB 2012] ont par exemple pu suivre un traceur salin à travers un réseau de fractures via monitoring ERT et ainsi, détecter la direction de transport préférentiel de soluté dans un aquifère calcaire fracturé et en estimer la vitesse de transport. Auken et al. [AUK 2014] ont réussi à suivre des variations de résistivité électrique associées à l'injection de CO₂ dans un aquifère danois. Hermans et al. [HER 2012 ; 2015b] ont suivi de manière quantitative l'injection d'eau chaude dans des formations meubles dans le cadre d'expériences de stockage et traçage de chaleur en aquifère.

La résistivité électrique étant fonction de la température, il est possible de relier les variations temporelles de résistivité électrique imagées par ERT aux variations de température dans l'aquifère [HAY 2007 ; HAY 2010 ; HER 2012 ; ROB 2013 ; HER 2014 ; HER 2015b]. En effet, une augmentation d'1°C provoque une diminution de la résistivité électrique de l'eau souterraine d'environ 2% [HER 2014]. Le monitoring ERT requière toutefois une (ou plusieurs) image de background collectée avant toute modification du sous-sol (**Figure 2**). Deux images ont été collectées avant la réalisation de l'injection d'eau chaude. Suivant la méthodologie de Robert et al. [ROB 2012], nous avons pu définir une valeur de coupure sur les variations de résistivité électrique au-delà de laquelle nous pouvons considérer que le changement de résistivité imagé ($\Delta\rho$) est bien associé à la chaleur injectée (ΔT), soit environ 0,5% dans cette expérience.

L'expérience réalisée en mai 2015 est centrée autour du stockage de chaleur à court terme en condition réelle. Le principe était d'injecter de l'eau chaude dans l'aquifère sollicité puis de suivre le panache de chaleur ainsi créé pendant 72 heures via des mesures hydrogéologiques et un suivi ERT 4D. Au terme des 72 heures, nous avons récupéré l'énergie injectée en pompant l'eau souterraine ainsi réchauffée. Un bilan énergétique a ainsi pu être calculé au terme des 72 heures de stockage (cf. **Tableau 1**).

L'injection s'est déroulée comme suit. Nous avons pompé de l'eau de l'aquifère (à 10°C) dans le puits de pompage (**Figure 1**) à un débit d'environ 3 m³/h. Cette eau a d'abord circulé dans une chaudière mobile afin d'être chauffée à 40°C avant d'être injectée dans l'aquifère via le puits d'injection (**Figure 1**). L'injection a duré 5 heures et 20 minutes. Pendant l'injection, nous avons collecté des images électriques à une plus haute résolution temporelle (mais uniquement sur les 3 lignes centrées sur le puits d'injection). Si l'eau injectée était à une température proche de 40°C, la température maximale enregistrée dans la colonne du puits d'injection n'a jamais dépassée 36°C.

La phase de stockage de chaleur a duré 72 heures et nous avons acquis des images électriques complètes à raison de 2 par jour environ. Lors du stockage, un orage a éclaté et des changements de résistivité électrique ont été observés dans les 2 premiers mètres. Ces variations sont liées à un changement de saturation des terrains de couverture à cause des fortes précipitations causées par l'orage. Ces dernières n'étant pas voulues pour l'expérience, nous avons appliqué un filtre sur les 2 premiers mètres imagés par ERT.

A la fin des 72 heures de stockage, nous avons récupéré l'énergie stockée en pompant dans le puits d'injection pendant 4 heures ½ avec un débit supérieur à celui de l'injection. La température de l'eau dans l'aquifère (au droit du puits d'injection) était encore de 21°C après ces 72 heures de stockage (**Figures 4**). Bien que le gradient hydraulique soit quasi nul, des phénomènes de diffusion ont permis au panache de chaleur de s'élargir pendant les 72 heures du stockage. A l'instar de l'injection, nous avons acquis des images électriques avec une résolution temporelle plus élevée lors de la récupération de la chaleur stockée. A la fin du pompage, nous avons encore collecté une image électrique complète avant de démonter le dispositif d'électrodes. Les sondes CTD placées dans chacun des ouvrages ont encore collecté des données pendant plusieurs semaines après la fin de l'expérience. En effet, une partie de la chaleur stockée a été captée par la matrice sédimentaire (les sables et graviers) puis rendue sur une plus longue échelle de temps à l'eau souterraine.

4. Résultats

Le suivi ERT 4D a permis de visualiser les changements de résistivité électrique associés à :

- l'injection d'eau chaude (**Figure 3-A** ; régime transitoire) ;
- le stockage de cette chaleur pendant 72 heures (**Figure 3-B** ; régime permanent) ;
- la récupération de la chaleur stockée (**Figure 3-C** ; régime transitoire).

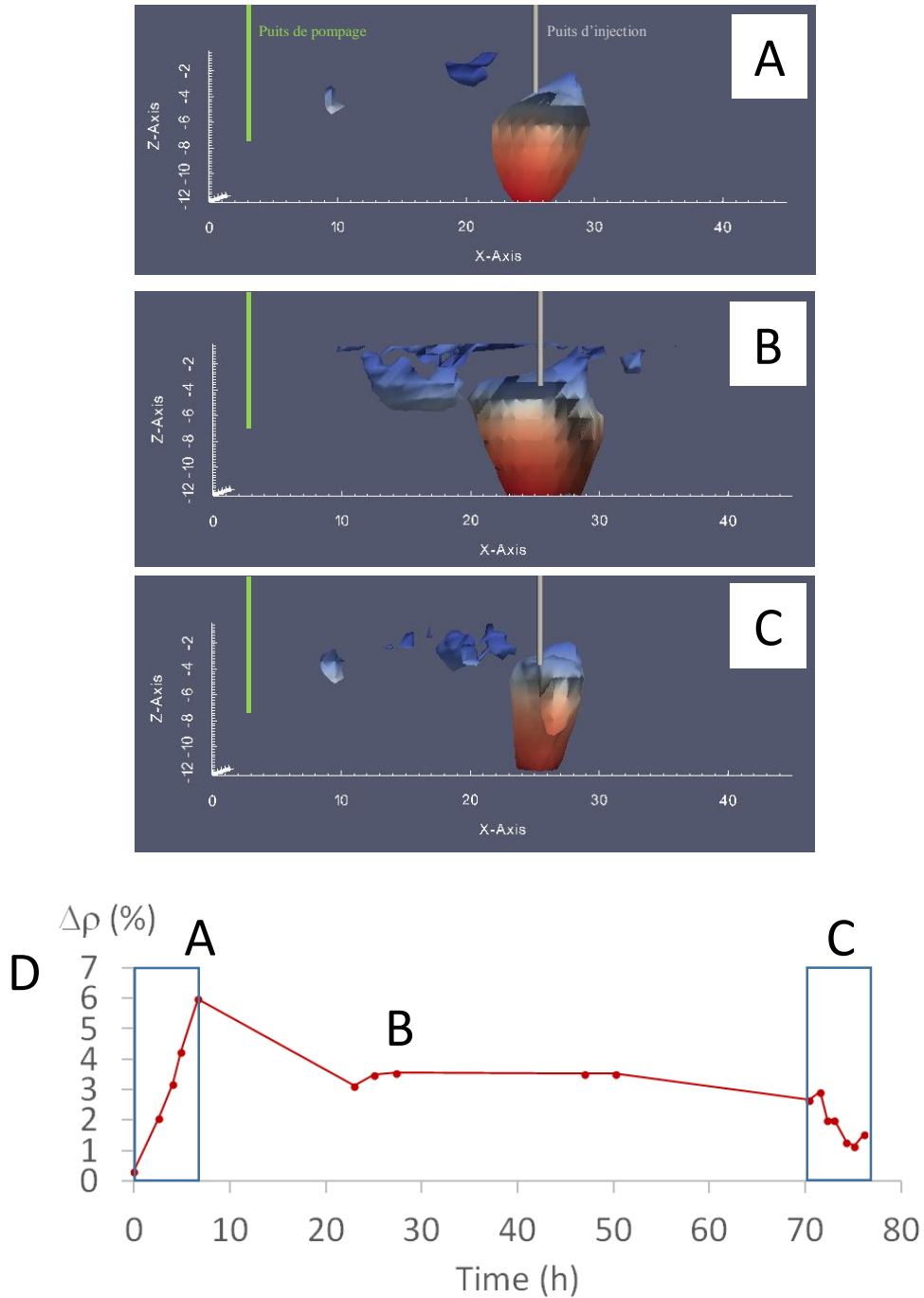


Figure 3. Evolution des variations de résistivité électrique ($\Delta\rho$) pendant l'injection de chaleur (A) ; lors des 72 heures de stockage (B) et lors de la récupération (C). Une courbe de restitution ($\Delta\rho$ vs. temps) au droit du puits d'injection est également présentée en D. Les volumes imagés correspondent à un $\Delta\rho > 2\%$.

La **Figure 3** montre clairement que le suivi ERT est capable de capter l'évolution qualitative des températures dans l'aquifère. Les mesures transitoires pendant la phase d'injection montrent la croissance du panache. Pendant le stockage, le volume affecté par des changements de température s'agrandit alors que l'amplitude du changement diminue, suite aux phénomènes de diffusion. Après pompage, l'ERT montre la chaleur résiduelle présente à proximité du puits.

La comparaison des images ERT avec les mesures hydrogéologiques (**Figure 4**) indique un lien direct entre changement de résistivité ($\Delta\rho$) et changement de température (ΔT). L'essentiel de la diminution de température au niveau du puits a lieu dans les 24 premières heures après injection. Ensuite, la température se stabilise. On observe lors du stockage un écart entre les tendances mesurées dans le puits et par ERT (48 h). Cet écart est probablement lié aux échelles différentes des mesures. La température dans le puits mesurée par sonde CTD est très locale, alors que l'ERT englobe un volume plus important. D'autre part, la mesure dans le puits est biaisée par des pertes de chaleur et une homogénéisation des températures au sein du puits. En effet, on observe qu'à la reprise du pompage, la température dans le puits augmente, indiquant que la sonde CTD sous-estime la température dans l'aquifère même. L'ERT, par contre, n'est pas affectée par cette perturbation locale.

La résistivité électrique de l'eau étant très hétérogène sur le site, il n'est pas possible d'utiliser une relation pétrophysique générale pour estimer quantitativement les températures par ERT [HER 2015b]. En effet, le changement de résistivité de l'eau engendre également un effet sur la mesure ERT. Cependant, la tendance observée (**Figure 4**) peut servir de calibration locale dans l'estimation des températures.

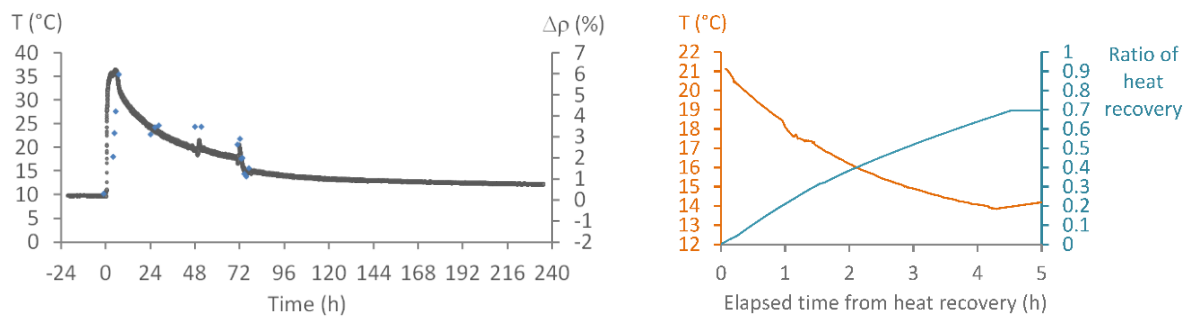


Figure 4. *Gauche :* Evolution de la température mesurée dans le puits d'injection (courbe grise) et des variations de résistivité électrique détectées via le monitoring ERT (points bleus). *Droite :* Evolution de la température mesurée dans le puits d'injection lors de la récupération de la chaleur par pompage et bilan énergétique associé.

Les températures et débits mesurés lors de la phase de pompage permettent de réaliser un bilan énergétique. Pour un volume pompé équivalent au volume injecté, environ 35% de l'énergie est récupérée. Cependant, la température à ce moment est encore plusieurs degrés au-dessus des mesures initiales. Après 4,5 h de pompage, le volume d'eau pompé est 2,5 fois celui injecté et 70% de l'énergie a été récupérée. La température est encore de 14°C, soit une température encore supérieure à la température de départ et permettant une récupération énergétique efficace par PAC. La remontée de température après la fin du pompage indique que la chaleur stockée dans les sédiments est transférée à l'eau. Cela signifie que lors des phases transitoires, il existe un écart de température entre les phases solide et liquide du milieu souterrain qui nécessite des outils de modélisation avancés.

Tableau 1. Evolution des températures et de l'énergie récupérée lors du pompage.

Durée cumulée du pompage (h)	Volume récupéré (%)	Energie récupérée (%)	Température (°C)
0	0	0	21
1,75	100	35	17
4,5	250	70	14

5. Conclusions et perspectives

Nous avons développé une méthodologie de caractérisation dynamique du sous-sol dans le contexte du transfert et stockage de chaleur en aquifère peu profond. Celle-ci se base sur le suivi 4D d'un test de stockage de chaleur à court terme dans un aquifère alluvial, combinant des mesures hydrogéologiques classiques avec un suivi géophysique par tomographie de résistivité et un bilan énergétique.

Les images de résistivité électrique montrent que le suivi ERT 4D peut capturer une information semi-quantitative à quantitative spatialisée et volumique sur le panache de chaleur et son évolution dans le temps. En effet, leur comparaison avec les mesures hydrogéologiques locales indiquent un lien clair avec l'amplitude des changements de températures. Cette comparaison met également en lumière les limitations des mesures locales qui sont biaisées par des mélanges et des pertes de chaleur au niveau du puits, ce dont ne souffre pas l'ERT.

Le bilan énergétique effectué soutient l'hypothèse que le stockage de chaleur de courte durée (horaire, journalier ou hebdomadaire) est une alternative plausible dans le cadre de la gestion de la flexibilité de la demande électrique. En effet, lors de notre essai, plus de 70% de l'énergie injectée a pu être récupérée sous la forme d'eau plus chaude, qui peut être valorisée via un système de pompe à chaleur. La chaleur résiduelle présente en fin d'expérience suggère que l'efficacité pourrait être plus importante en cas d'utilisation régulière du système et d'optimisation des cycles d'injection/stockage/récupération.

L'intégration de ce type de données dans l'élaboration de modèles numériques prédictifs du sous-sol et dans le dimensionnement des systèmes géothermiques en aquifère peu profond sort du sujet de cette communication. Elle constitue néanmoins une perspective d'avancée significative dans le domaine de la modélisation hydrogéologique des systèmes géothermiques.

6. Bibliographie

- [ALB 2007] Albadi, M.H., El-Saadany, E.F., 2007. Demand response in electricity markets: An overview, in: *IEEE Power Engineering Society General Meeting*. pp. 1–5.
- [AND 1997] Andersson, O., 1997. ATEs utilization in Sweden - an overview, in: *Proceedings of MEGASTOCK '97*. Presented at the MEGASTOCK 97, Sapporo, Japan, pp. 25–30.
- [AUK 2014] Auken, E., Doetsch, J., Fiandaca, G., Christiansen, A.V., Gazoty, A., Cahill, A.G., Jakobsen, R., 2014. Imaging subsurface migration of dissolved CO₂ in a shallow aquifer using 3-D time-lapse electrical resistivity tomography. *Journal of Applied Geophysics* 101, 31–41. doi:10.1016/j.jappgeo.2013.11.011
- [BAY 2013] Bayer, P., Rybach, L., Blum, P., Brauchler, R., 2013. Review on life cycle environmental effects of geothermal power generation. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 26, 446–463. doi:10.1016/j.rser.2013.05.039
- [HAE 2010] Hähnlein, S., Bayer, P., Blum, P., 2010. International legal status of the use of shallow geothermal energy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* 14, 2611–2625. doi:10.1016/j.rser.2010.07.069
- [HAE 2013] Hähnlein, S., Bayer, P., Ferguson, G., Blum, P., 2013. Sustainability and policy for the thermal use of shallow geothermal energy. *Energy Policy* 59, 914–925. doi:10.1016/j.enpol.2013.04.040
- [HAY 2007] Hayley, K., Bentley, L.R., Gharibi, M., Nightingale, M., 2007. Low temperature dependence of electrical resistivity: Implications for near surface geophysical monitoring. *Geophysical Research Letters* 34, L18402, doi:10.1029/2007GL031124
- [HAY 2010] Hayley, K., Bentley, L.R., Pidlisecky, A., 2010. Compensating for temperature variations in time-lapse electrical resistivity difference imaging. *Geophysics* 75, WA51.
- [HER 2015a] Hermans, T., Nguyen, F., Caers, J., 2015. Uncertainty in training image-based inversion of hydraulic head data constrained to ERT data: Workflow and case study. *Water Resources Research* 51, 5332–5352, doi:10.1002/2014WR016460
- [HER 2014] Hermans, T., Nguyen, F., Robert, T., Revil, A., 2014. Geophysical Methods for Monitoring Temperature Changes in Shallow Low Enthalpy Geothermal Systems. *Energies* 7, 5083–5118, doi:10.3390/en7085083
- [HER 2012] Hermans, T., Vandenbohede, A., Lebbe, L., Nguyen, F., 2012. A shallow geothermal experiment in a sandy aquifer monitored using electric resistivity tomography. *Geophysics* 77, B11–B21. doi:10.1190/geo2011-0199.1
- [HER 2015b] Hermans, T., Wildemeersch, S., Jamin, P., Orban, P., Brouyère, S., Dassargues, A., Nguyen, F., 2015b. Quantitative temperature monitoring of a heat tracing experiment using cross-borehole ERT. *Geothermics* 53, 14–26, doi:10.1016/j.geothermics.2014.03.013
- [LOK 2013] Loke, M.H., Chambers, J.E., Rucker, D.F., Kuras, O., Wilkinson, P.B., 2013. Recent developments in the direct-current geoelectrical imaging method. *Journal of Applied Geophysics* 95, 135–156, doi:10.1016/j.jappgeo.2013.02.017
- [ROB 2012] Robert, T., Caterina, D., Deceuster, J., Kaufmann, O., Nguyen, F., 2012. A salt tracer test monitored with surface ERT to detect preferential flow and transport paths in fractured/karstified limestones. *Geophysics* 77, B55–B67, doi:10.1190/geo2011-0313.1
- [ROB 2011] Robert, T., Dassargues, A., Brouyère, S., Kaufmann, O., Hallet, V., Nguyen, F., 2011. Assessing the contribution of electrical resistivity tomography (ERT) and self-potential (SP) methods for a water well drilling program in fractured/karstified limestones. *Journal of Applied Geophysics* 75, 42–53. doi:10.1016/j.jappgeo.2011.06.008
- [ROB 2013] Robert, T., Hermans, T., Dumont, G., Nguyen, F., Rwabuhungu, D.E., 2013. Reliability of ERT-derived Temperature-Insights from Laboratory Measurements, in: *Near Surface Geoscience 2013-19th EAGE European Meeting of Environmental and Engineering Geophysics*.
- [SIN 2015] Singha, K., Day-Lewis, F.D., Johnson, T., Slater, L., 2015. Advances in interpretation of subsurface processes with time-lapse electrical imaging. *Hydrological Processes* 29, 1549–1576.
- [VAN 2011] Vanhoudt, D., Desmedt, J., Van Bael, J., Robeyn, N., Hoes, H., 2011. An aquifer thermal storage system in a Belgian hospital: Long-term experimental evaluation of energy and cost savings. *Energy and Buildings*.