

Colloque
"Gestion des eaux souterraines"
Bordeaux - 2023

Article étendu

Titre
<i>Impact des îlots de chaleur se développant dans le sous-sol des agglomérations sur la performance des systèmes géothermiques ATEs (Aquifer Thermal Energy Storage) peu profonds</i>
Nom des auteurs
<i>GODINAUD, Jérémy ⁽¹⁾</i> <i>LARROQUE, François¹</i> <i>DUPUY, Alain⁽¹⁾</i>
Affiliation
<i>(1) ENSEGID</i>

Le Stockage d'Énergie Thermique en Aquifère (ATES) est un système géothermique en boucle ouverte composé d'un minimum de deux forages réversibles (permettant de pomper et d'injecter de l'eau). Ce type de système permet de stocker de manière saisonnière de l'eau chaude ou froide dans un aquifère et de restituer l'énergie thermique contenue dans l'eau à un bâtiment lorsqu'un besoin de chauffage ou de rafraîchissement apparaît (Figure 1). Les calories ou frigories de l'eau pompée dans les forages sont récupérées par le bâtiment à l'aide d'un échangeur de chaleur.

Une pompe à chaleur est utilisée pour amener l'eau à une température adéquate pour le chauffage du bâtiment ($\approx 45^{\circ}\text{C}$). Les besoins en rafraîchissement peuvent être directement satisfaits par la simple circulation de l'eau froide dans le bâtiment grâce à la technique du *géocooling*. Si les besoins de rafraîchissement sont conséquents, le fonctionnement réversible de la pompe à chaleur peut être utilisé pour combler la demande thermique.

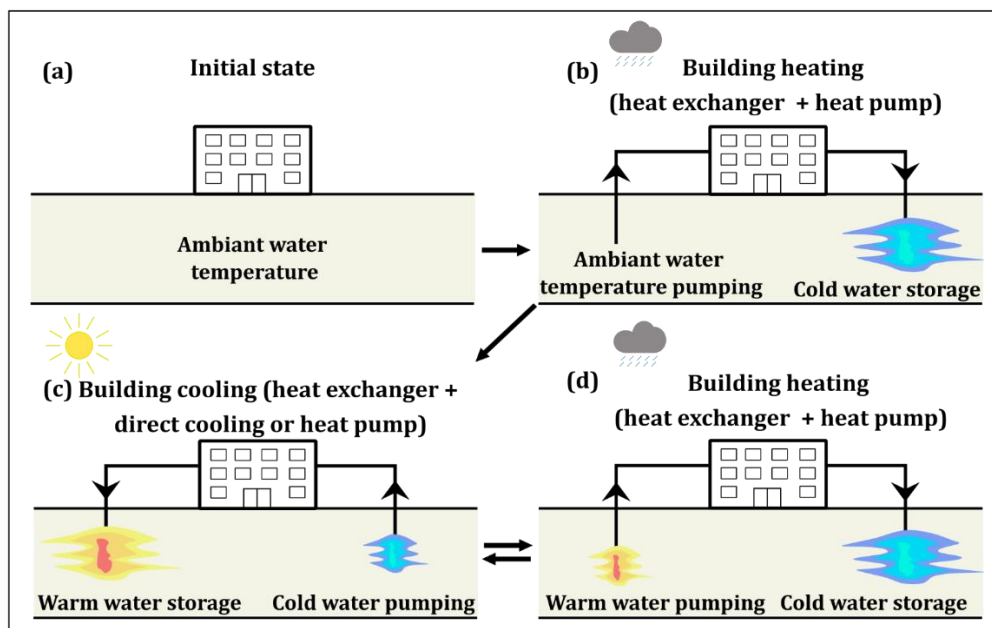


Figure 1 : Principe de fonctionnement d'un système ATES

Par rapport à des systèmes énergétiques dits conventionnels (chauffage gaz et climatisation classique), l'ATES permet d'atteindre des réductions d'émissions de GES comprises entre 40 et 70 %^{1,2}. Le fonctionnement de ce système est fortement dépendant des conditions hydrogéologiques et thermiques du sous-sol².

Dans les agglomérations, l'artificialisation des sols entraînée par la construction de routes, parkings ou bâtiments engendre des surplus de transferts thermiques venant de la surface et allant vers le sous-sol^{3,4}. Ce phénomène est amplifié par le réchauffement climatique. Il se traduit par le développement d'îlots de chaleur souterrains. Ces îlots peuvent avoir un impact sur la distribution de la température jusqu'à une centaine de mètres de profondeur. Ainsi, les températures mesurées dans le sous-sol des agglomérations peuvent être jusqu'à 6°C supérieures aux températures observées aux mêmes profondeurs dans les zones plus rurales⁵. Ces deux phénomènes de surface génèrent une distribution thermique atypique dans le sous-sol des aires urbaines qui se traduit par des profils de températures en forme de « C » (Figure 2)

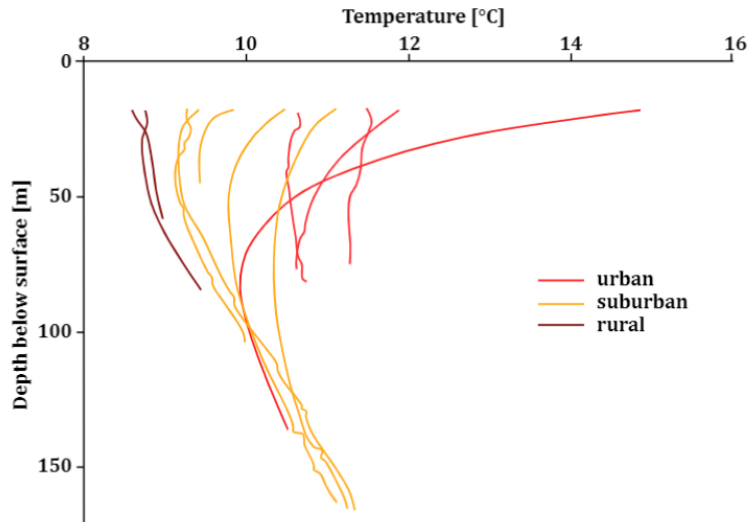


Figure 2 : Profils de température relevés dans des forages de la ville de Berlin (adaptée de Blum et al,2021)

Ces formes atypiques ont été observées sur le site de l'ENSEGID (Ecole Nationale Supérieure en Environnement Géoressources et Ingénierie du développement Durable) située sur le campus universitaire de Bordeaux. L'établissement s'est doté en 2022 d'un système ATES captant la nappe calcaire de l'Oligocène entre 35 et 65 m de profondeur (Figure 3a).

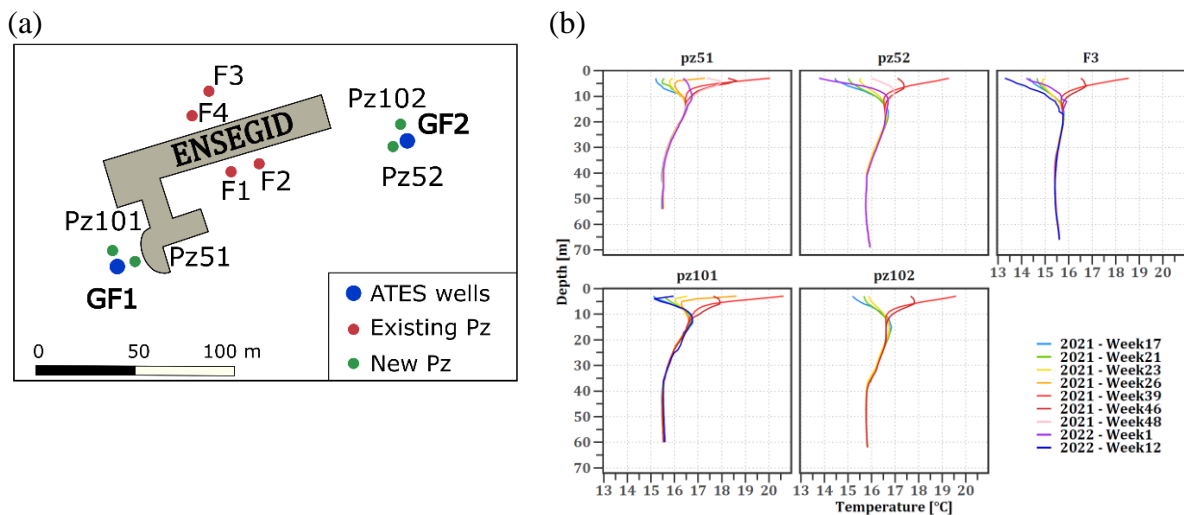


Figure 3 : Présentation du site de l'ENSEGID : (a) implantation du dispositif ATES de l'ENSEGID et (b) distribution de la température dans les forages du site avant la mise en marche du système

Dans les 15-20 premiers mètres du sous-sol (Figure 3b), la distribution de la température est régie par les fluctuations saisonnières de températures atmosphériques ⁶. En dessous de cette profondeur, les profils de températures présentent une forme atypique avec une décroissance de la température jusqu'à 40-45 m de profondeur. La température se stabilise ensuite jusqu'à 60 m de profondeur et commence à augmenter en dessous de cette profondeur. Ce type de distribution traduit l'influence des conditions de surfaces (réchauffement climatique + artificialisation de la surface sol) dans la dynamique thermique du sous-sol.

Afin d'estimer l'influence des phénomènes de surface sur le site de l'ENSEGID, une formulation analytique ^{3,7} est utilisée pour restituer les profils de température mesurés dans les ouvrages. Cette formulation permet de prendre en compte l'influence de l'anthropisation progressive de la surface autour du site (Figure 4a) et la tendance climatique à Bordeaux mesurée depuis le début du XX^{ième} siècle (Figure 4b).

Les résultats obtenus (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**Figure 4c) reproduisent bien les profils de température mesurés dans les différents forages du site. Cela met en évidence l'influence du climat passé à Bordeaux et de l'artificialisation des sols qui s'opère depuis le développement du campus universitaire dans les années 1960 sur la distribution de la température dans le sous-sol de l'ENSEGID.

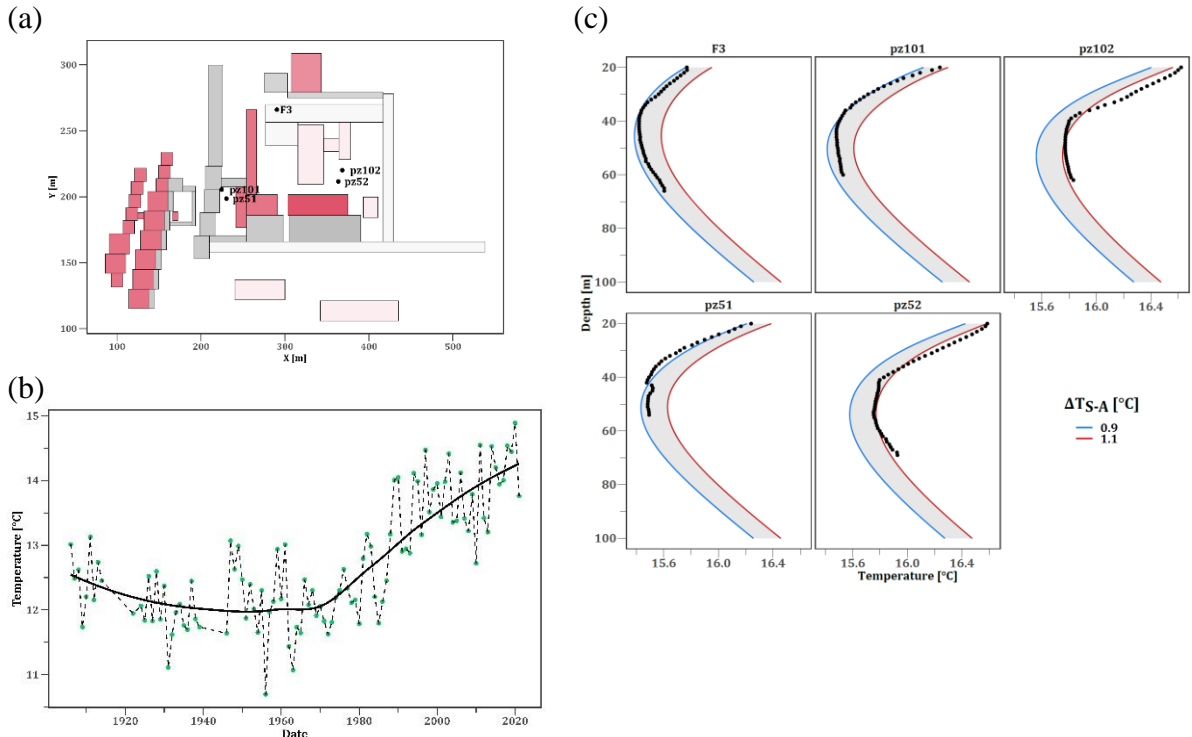


Figure 4 : (a) Configuration du site en surface utilisée dans la formulation analytique. Les nuances rouges représentent les bâtiments et les grises les routes et parkings. Plus la couleur est foncée plus la construction de la structure est récente, (b) moyenne annuelle des températures relevées à la station météo de Bordeaux Mérignac (point verts) et courbe de tendance associée (ligne noire) et (c) distribution de la température obtenue par l'utilisation de la formule analytique (lignes) et distribution mesurée sur chaque forage (points).

L'influence de ces deux phénomènes sur la dynamique thermique d'un sous-sol exploité par un système ATES peu profond n'a été que très peu étudiée. La formulation analytique n'étant pas adaptée au fonctionnement réversible et transitoire de l'ATES, un modèle numérique synthétique 3D est mis au point pour mieux comprendre les implications de ces phénomènes sur la dynamique thermique long terme d'un sous-sol exploité par un ATES. Ce modèle numérique se base sur un site théorique et vise à être appliqué ultérieurement à la configuration de l'ENSEGID.

Afin d'estimer l'influence du réchauffement climatique et de l'artificialisation des sols, deux scénarios distincts sont étudiés :

Scénario 1	Scénario 2
<ul style="list-style-type: none"> - Pas d'anthropisation en surface - Les températures atmosphériques suivent la tendance observée à Bordeaux depuis le début du XX^{ème} siècle et se stabilise à partir de 2022 (courbe noire Figure 5b). La demande thermique du bâtiment est stable 	<ul style="list-style-type: none"> - Anthropisation en surface (Figure 5a) - Les températures atmosphériques suivent la tendance observée à Bordeaux depuis le début du XX^{ème} siècle et après 2022 elles suivent le scénario climatique RCP 8.5 (courbe verte Figure 5b) établi par le GIEC appliqué à la Nouvelle Aquitaine⁸. La demande en rafraîchissement du bâtiment augmente au cours du temps alors que celle en chauffage diminue

Le modèle est lancé de 1906 à 2080, les opérations sur l'ATES débutent en 2022 pour subvenir aux besoins thermiques du bâtiment B5.

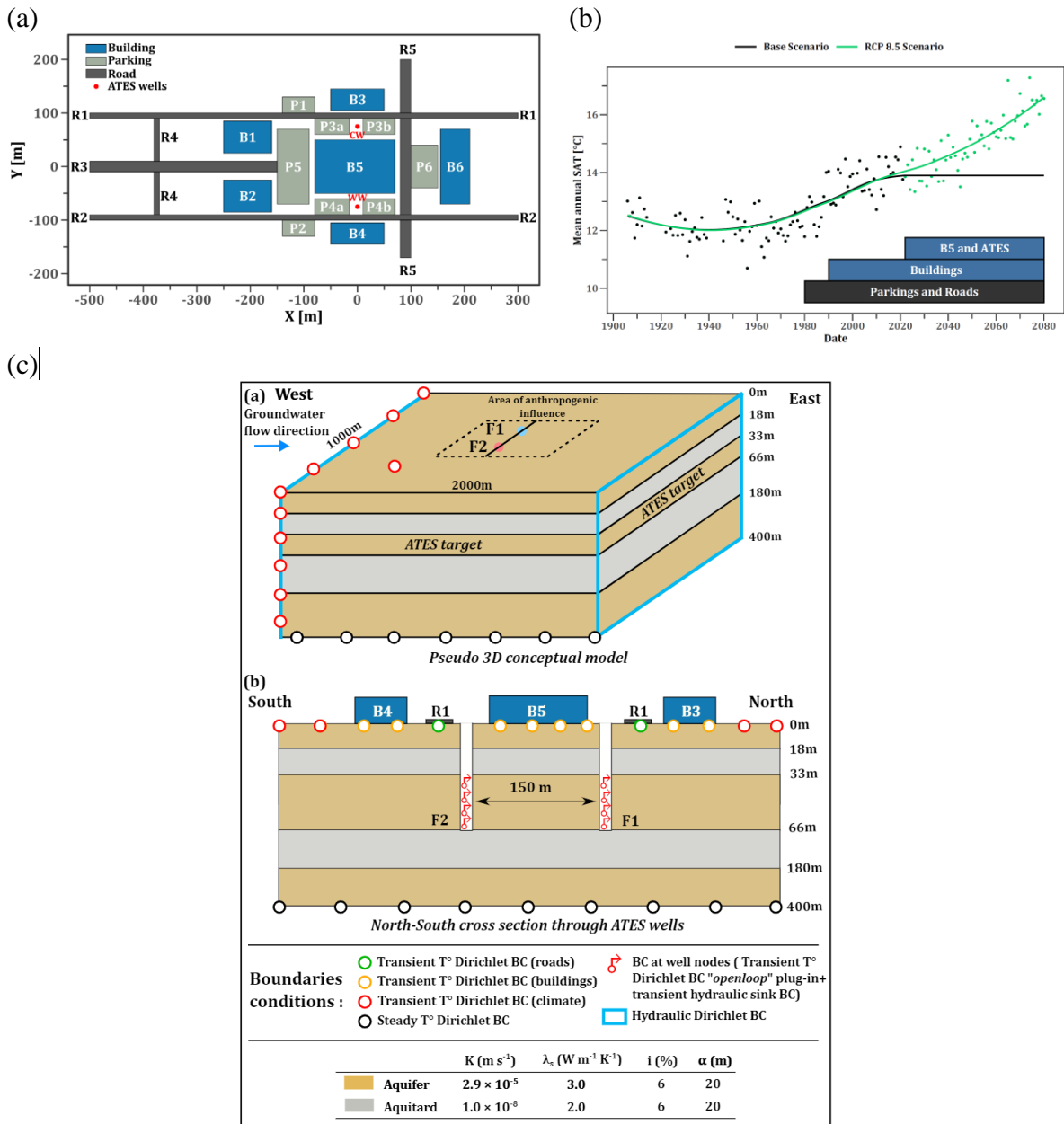


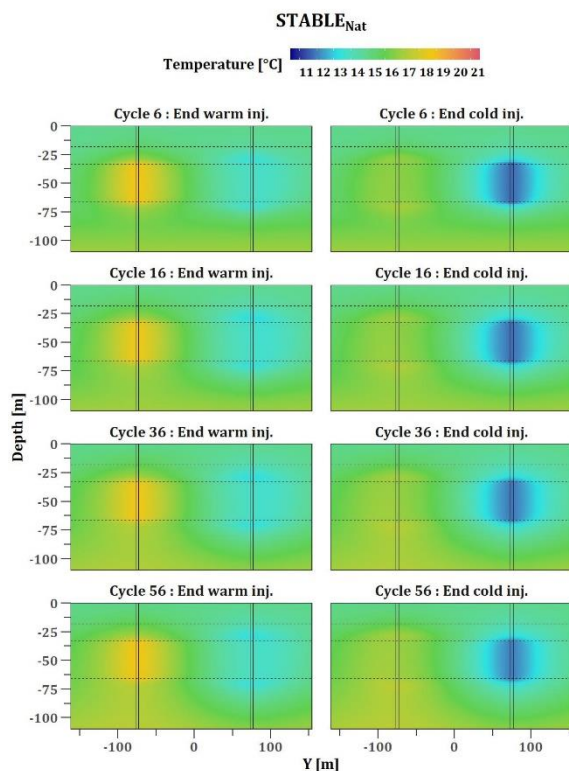
Figure 5 : Modèle conceptuel retenu pour modéliser le fonctionnement de l'ATES : (a) disposition des routes et bâtiments en surface dans le scénario 2, (b) température atmosphériques utilisés (courbe noire scénario 1 et courbe verte scénario 2) et (c) géométrie du modèle avec propriétés et conditions limites implémentées

Les résultats montrent que dans le scénario 1 la dynamique thermique du sous-sol est équilibrée sur le long terme (Figure 6a). L'extension thermique des bulles chaudes et froides dans l'aquifère sont stables et équivalentes dans le temps. A la fin d'une période de pompage, les réserves stockées ne sont jamais épuisées.

En revanche, dans le scénario 2, un net déséquilibre apparaît à partir du 15^{ème} cycle de fonctionnement (Figure 6b). L'extension de la bulle froide diminue de plus en plus et a contrario, l'extension de la bulle chaude ne cesse de croître. La bulle chaude est à la fois favorisée par les apports thermiques de surface (artificialisation et réchauffement climatique) mais aussi par la diminution de la demande en chauffage du bâtiment au cours du temps. En revanche, ces facteurs pénalisent la pérennité de la bulle froide, rendant le stockage d'eau froide quasi impossible sur le long terme. En mode production de froid, le système ATES fonctionne alors comme un doublet géothermique classique, et ne tire plus de bénéfices énergétiques et

environnementaux liés au stockage de froid.

(a)



(b)

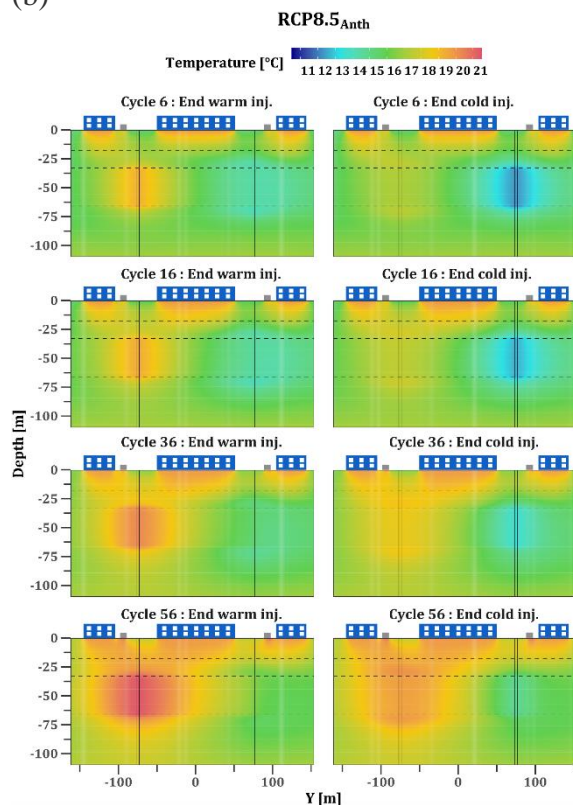


Figure 6 : Coupes transversales montrant la distribution des températures dans le sous-sol à différentes dates après le lancement de l'ATES pour (a) le scénario 1 et (b) le scénario 2

En conclusion cette approche permet de montrer l'importance de considérer les transferts thermiques venant de l'artificialisation de la surface et du changement climatique pour modéliser la dynamique thermique long terme d'un sous-sol soumis à l'exploitation d'un système ATES.

Bibliographie

1. Stemmler, R. *et al.* Environmental impacts of aquifer thermal energy storage (ATES). *Renewable and Sustainable Energy Reviews* **151**, 111560 (2021).
2. Fleuchaus, P., Schüppler, S., Godschalk, B., Bakema, G. & Blum, P. Performance analysis of Aquifer Thermal Energy Storage (ATES). *Renewable Energy* **146**, 1536–1548 (2019).
3. Bayer, P. *et al.* Extracting past atmospheric warming and urban heating effects from borehole temperature profiles. *Geothermics* **64**, 289–299 (2016).
4. Previati, A., Epting, J. & Crosta, G. B. The subsurface urban heat island in Milan (Italy) - A modeling approach covering present and future thermal effects on groundwater regimes. *Science of The Total Environment* **810**, 152119 (2022).

5. Blum, P. *et al.* Is thermal use of groundwater a pollution? *Journal of Contaminant Hydrology* **239**, 103791 (2021).
6. Taylor, C. A. & Stefan, H. G. Shallow groundwater temperature response to climate change and urbanization. *Journal of Hydrology* **375**, 601–612 (2009).
7. Rivera, J. A., Blum, P. & Bayer, P. Analytical simulation of groundwater flow and land surface effects on thermal plumes of borehole heat exchangers. *Applied Energy* **146**, 421–433 (2015).
8. Soubeyroux, J.-M. *et al.* *Les nouvelles projections climatiques de référence pour la métropole.* (2020).