



# Performance d'un système enerdrape

## Parking souterrain de Sébeillon

2022

# Table des matières

# SOMMAIRE

01.

Contexte

02.

Etude de cas

03.

Installation pilote

04.

Protocole d'essai

05.

Puissance et performance thermique

06.

Influence sur la température du mur

07.

Influence de l'air et des conditions  
environnementales

08.

Résultats des simulations numériques

09.

Conclusions

# CONTEXTE

Le but de ce document est de présenter les résultats de la première installation pilote d'un système enerdrapé dans un environnement représentatif de l'utilisation typique de l'installation.

Les objectifs de ce pilote étaient de réaliser une installation à l'échelle du sous-système et d'analyser la performance de la solution enerdrapé.

Les questions qui sont abordées dans ce rapport sont les suivantes :

- Quelle est la performance thermique typique des systèmes enerdrapé ?
- L'énergie récoltée par les systèmes enerdrapé est-elle stable dans le temps ?
- La température de l'air ambiante influence-t-elle de manière significative le fonctionnement des systèmes enerdrapé ?
- Le coefficient de performance associé au fonctionnement des systèmes enerdrapé varie-t-il de manière significative dans le temps ?
- Quels sont les effets à long terme de l'exploitation des systèmes enerdrapé sur les conditions thermiques du sous-sol ?

# RÉSUMÉ

Les résultats de la première année d'exploitation de panneaux géothermiques, innovation mondiale développée par l'entreprise enerdrappe, sont résumés dans ce rapport. L'étude porte sur les performances énergétiques d'une installation du système enerdrappe dans un parking souterrain situé à Lausanne, en Suisse.

Ce POC a permis de :

- démontrer la faisabilité technique des installations enerdrappe.
- quantifier la puissance thermique exploitable.
- analyser l'influence des conditions environnementales sur le comportement thermique et performances énergétiques du système.
- analyser l'influence de l'exploitation du système lui-même sur l'environnement.

En particulier, les résultats confirment ce qui suit :

01

## **Puissance thermique jusqu'à 170 W/m<sup>2</sup>**

Des puissances thermiques allant jusqu'à 170 W/m<sup>2</sup> sont exploitées par le système enerdrappe considéré.

02

## **Stabilité de la puissance thermique dans le temps**

La puissance thermique récoltée par les systèmes enerdrappe est très stable dans le temps et s'approche d'un état stable après quelques heures de fonctionnement (5 heures, dans cette installation pilote).

03

## **La température de l'air influence jusqu'à 15 % les performances**

La température de l'air souterrain influence considérablement les performances des systèmes enerdrappe si des flux d'air importants sont présents dans le sous-sol. Dans les conditions du pilote, typique des parkings, la température de l'air n'influence le rendement du système que de 15 % au cours de l'année.

04

## **Efficacité stable dans le temps**

Le coefficient de performance des systèmes enerdrappe est stable dans le temps.

05

## **L'exploitation à long terme est assurée**

Les systèmes enerdrappe offrent des performances optimales, même au-delà de 50 ans de fonctionnement, en recourant à une conception et à une installation appropriée.

# ETUDE DE CAS

Le projet pilote est localisé dans le quartier de Sébeillon, à l'avenue de Sévelin à Lausanne.

Il s'agit du lot d'immeubles desservis par un parking souterrain privé accueillant le système enerdrapé. Ce parking souterrain a un niveau de sous-sol, complètement enterré et un total de 200 places de parking desservant 5 immeubles en surface. Ce parking est à usage des habitants des immeubles et n'est pas caractérisé par un trafic intense de véhicules. Le parking dispose de plusieurs sauts-de-loups, système de désenfumage ainsi qu'une ventilation mécanique standard régulant les niveaux de CO sur base des seuils mesurés en temps réel.



Figure 1: Photo du quartier de Sébeillon à Lausanne © marcello mariana

Afin de démontrer la performance d'une installation enerdrapé à l'échelle, un sous-système représentatif constitué de dix panneaux connectés en série, est testé dans le parking du Sébeillon. Chaque panneau est espacé de 20 cm afin d'évaluer son effet propre sur le mur.

La Figure 2 illustre le sous-système de panneaux enerdrapé installés sur le site pilote.



Figure 2: Photo de l'arrangement des panneaux installés

# INSTALLATION PILOTE

L'installation pilote située au quartier de Sébeillon a été réalisée en partenariat avec Realstone SA.

Une mesure de température est effectuée en continu à l'entrée et à la sortie de chaque panneau pour mesurer les variations de température du liquide caloporteur à toutes les étapes du sous-système. Le débit total et la pression sont également mesurés à la sortie de la pompe à chaleur.

L'installation pilote est composée des éléments suivants, illustrés à la Figure 3:

- Un dispositif test correspondant à une pompe à chaleur type air/eau. Ce dispositif permet en particulier de fixer indépendamment la température et le débit d'entrée du fluide dans le système énerdrape et de mesurer la pression dans le réseau hydraulique.
- Un réseau de distribution hydraulique aller-retour, à savoir des tubes en plastique de diamètre 6 mm avec une isolation (type armafex) de 25 mm.
- 10 panneaux énerdrape branchés en série.
- 13 capteurs de température.
- Un système d'acquisition de données collectant toutes les mesures du site.

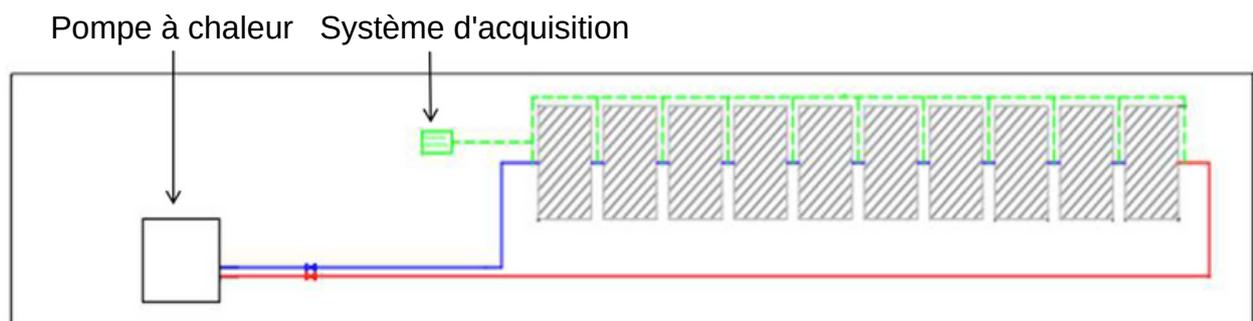


Figure 3: Schéma conceptuel de l'installation

# PROTOCOLE D'ESSAI

Plusieurs types d'exploitation ont été testés afin de recueillir toutes les informations nécessaires pour définir les propriétés du système et caractériser un fonctionnement "normal".

Les différents tests réalisés sont les suivants :

- Extraction de chaleur à température fixe à différentes saisons, afin de quantifier l'influence de la température de l'air ambiant et des variations saisonnières.
- Extraction de chaleur à différente température d'injection, afin de définir une courbe de puissance en fonction de la température d'exploitation du système.
- Injection de chaleur, afin d'étudier le comportement du système en mode free-cooling à différentes températures de fluide caloporteur.
- Différent cycle d'exploitation (ON/OFF) afin de définir le comportement de l'installation pour des productions de pic et étudier l'inertie thermique du mur et de l'installation.

Des relevés de température de l'air ambiant dans le parking tout au long de l'année ont été réalisés afin d'établir le profil de température de l'air ambiant dans le parking en fonction de l'air extérieur. Les données ont également servi de base à l'établissement d'un modèle numérique détaillé au chapitre 5, utilisé pour l'étude des effets à long terme.

Le protocole d'essai des différents tests conduits au site de Sébeillon, suit les étapes suivantes:

- Température et débit fixe injecté dans le système enerdrappe.
- Mesure en continu des températures du fluide aller et retour, à chaque entrée et sortie des panneaux et température de l'environnement (mur et ambiante).
- Calcul de la performance thermique du système et de la puissance thermique extraite/injectée nominale.

# PUISSANCE ET PERFORMANCE THERMIQUE

L'installation est exploitée depuis plus d'une année, une récolte de données pour une période de chauffe et une période de climatisation a été réalisée. Durant l'année 2022, le système a fonctionné à différentes températures de consigne afin de tester différents profils d'exploitation.

La Figure 4 d'installation de Sébeillon et des tests de performances sont caractérisées par une température moyenne du sol de 13°C, un débit constant de 2.1 l/min d'une eau glycolée à 10%.

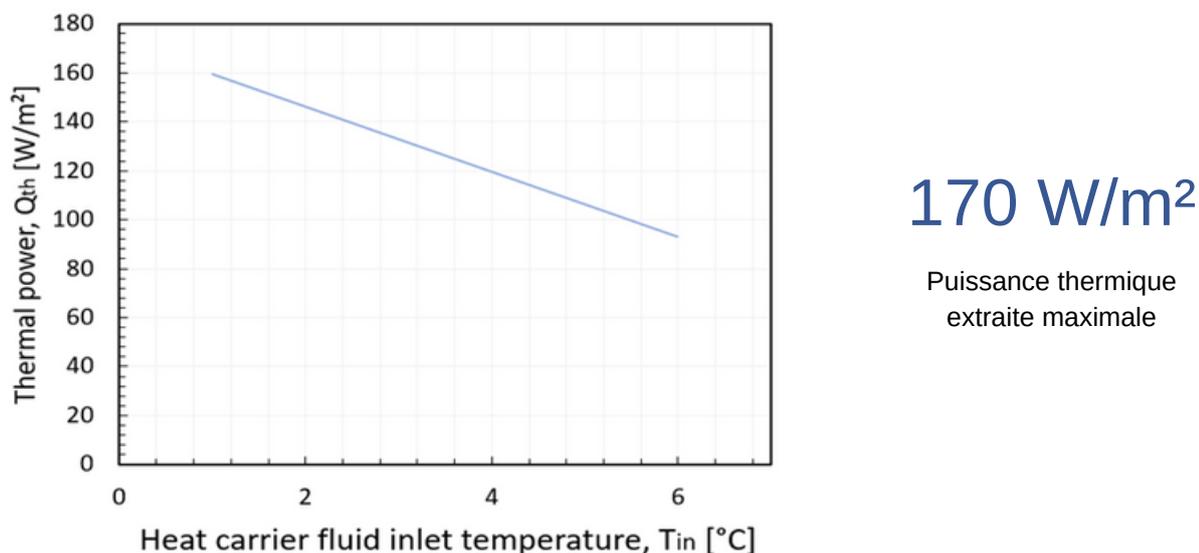


Figure 4: Puissance extraite en fonction de la température d'entrée du fluide dans les panneaux

Cette relation ne peut toutefois être établie que pour un lieu défini. Chaque site dispose de ses conditions locales de température et de terrain, ce qui lui donne une fonction de puissance unique.

En un lieu fixe, les conditions thermiques (température et conductivité thermique) du terrain sont stables, ce qui permet de décrire la puissance du sous-système en fonction de la différence entre la température d'entrée du fluide caloporteur dans le système énerdrape et la température moyenne du mur, pour un débit constant.

Sur le site pilote, caractérisé par une température du sol d'environ 13°C et une température de surface du mur initiale de 14°C, la puissance extraite du système pour un débit constant de 2.1 l/min peut être décrite comme suit :

$$Q_{th} = -13,3 T_{in} + 172,9$$

# PUISSANCE THERMIQUE EXTRAITE

Il peut être observé qu'une puissance thermique de 150 W/m<sup>2</sup> et plus peut être extraite du système en toute saison en considérant une température d'entrée de 2°C, température qui correspond à une condition standard d'exploitation d'une pompe à chaleur à saumure (géothermique).

Plusieurs températures d'entrées du fluide caloporteur dans les panneaux ont été testées pendant l'exploitation. La Figure 5 illustre les puissances extraites mesurées aux différentes températures d'entrées du fluide caloporteur le long de l'année.

- Température d'entrée 2°C
- Température d'entrée 6°C
- Température d'entrée 7°C

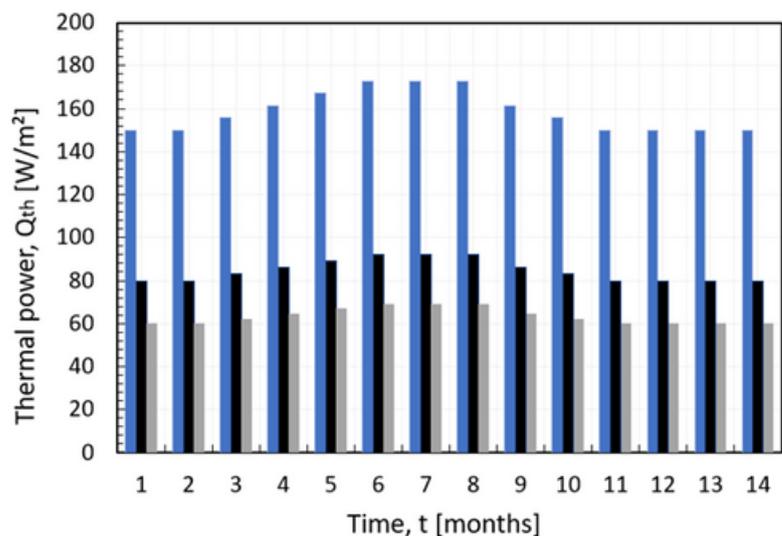


Figure 5: Influence des saisons sur la puissance thermique du système

La puissance extraite atteinte par le système enerdrapé est donc 2 à 3 fois plus élevée que celles d'échangeurs géothermiques conventionnels (e.g. 20 à 40 W/m<sup>2</sup> pour des murs énergétiques).

Dans les conditions du site pilote, l'installation permet une production annuelle de 350 kWh/m<sup>2</sup> pour une période de chauffe de 2300 heures.

**350**  
**kWh/m<sup>2</sup>**

*Dans les conditions du site pilote, l'installation permet une production annuelle de 350 kWh/m<sup>2</sup> pour une période de chauffe de 2300 heures.*

# INFLUENCE DE LA TEMPÉRATURE DU MUR

Une mesure de la température du mur en continue à l'aide d'un thermocouple inséré dans un perçage de 50 mm de profondeur dans le béton a permis d'évaluer l'influence de l'exploitation des panneaux enerdrappe sur le gradient thermique du mur.

La Figure 6 montre l'évolution de la température du mur pendant l'exploitation du système de panneaux enerdrappe.

- Température d'entrée du fluide caloporteur
- Température de sortie du fluide caloporteur
- Température du mur
- Température de l'air ambiant du parking

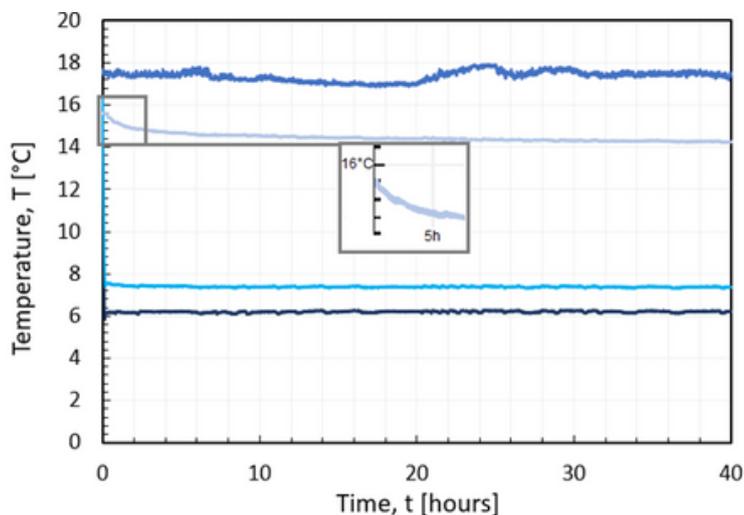


Figure 6: Comportement de stabilisation du système

Il peut être observé que la température du mur est affectée par le phénomène de conduction de chaleur induite par les panneaux. La température du mur se stabilise après 5 heures d'utilisation du système. En effet, au bout de 5 heures la variation de température dans le mur en fonction du temps est inférieure à 5%.

Plus aucune variation de température n'est observée au bout de 40 heures d'utilisation en continue.

Après 5 heures d'exploitation, le système enerdrappe accède donc à une source de température constante.

**5 heures**

La température du mur se stabilise après 5 heures d'exploitation

# INFLUENCE DE L'AIR ET DES CONDITIONS ENVIRONNEMENTALES

Il peut être observé que la température ambiante du parking bénéficie d'une plus grande stabilité face aux changements de température saisonniers et ponctuels, ce qui est tout à fait typique des environnements souterrains.

La Figure 7 décrit les mesures annuelles de la température de l'air ambiant dans le parking au cours de l'année et celle de la température extérieure à Lausanne.

L'inertie thermique du sol environnant est la principale cause de la stabilité de la température de l'air dans le parking. La chaleur fatale libérée par les véhicules peut également influencer sur la température ambiante du parking, néanmoins cette chaleur est rapidement dissipée et a pour conséquence des variations de température journalières de +/- 0.5 à +/- 1.0 °C en moyenne.

La température de l'air du parking n'est pas influencée par l'utilisation du système. Aucune différence de la température de l'air du parking n'a été mesurée suite à l'exploitation du système. La conduction de chaleur entre les panneaux, le mur et le terrain domine l'échange thermique du système énerdrape.

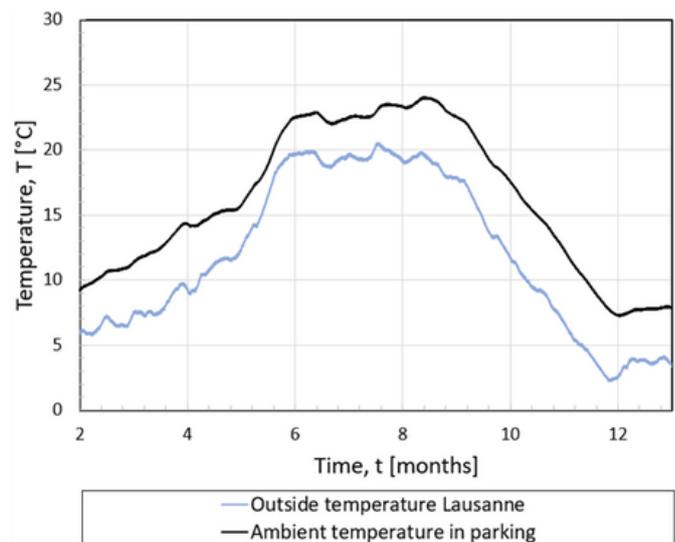


Figure 7: Évolution de la température de l'air durant une année

Dans le contexte d'un parking souterrain, où la circulation d'air est limitée aux abords du panneau, les échanges par convection entre l'air et le panneau (convection naturelle et forcée) sont limités. Une relation entre la température de l'air du parking et la puissance thermique du panneau peut être observée mais reste marginale. En effet, sur le site pilote, une différence maximale de puissance de 15% suite à une variation naturelle de la température de l'air dans le parking est observée sur toute l'année.

La Figure 8 illustre la variation de puissance pour une température d'injection fixe de 7 degrés testée à différentes températures ambiantes de l'air dans le parking.

Il peut être observé ici qu'une augmentation de température de l'air de 50% augmente la puissance extraite instantanée de 12%.

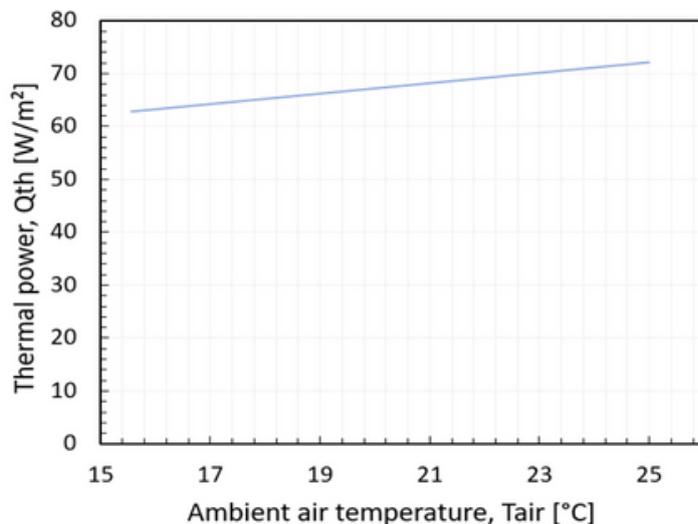


Figure 8: Puissance extraite en fonction de la température de l'air

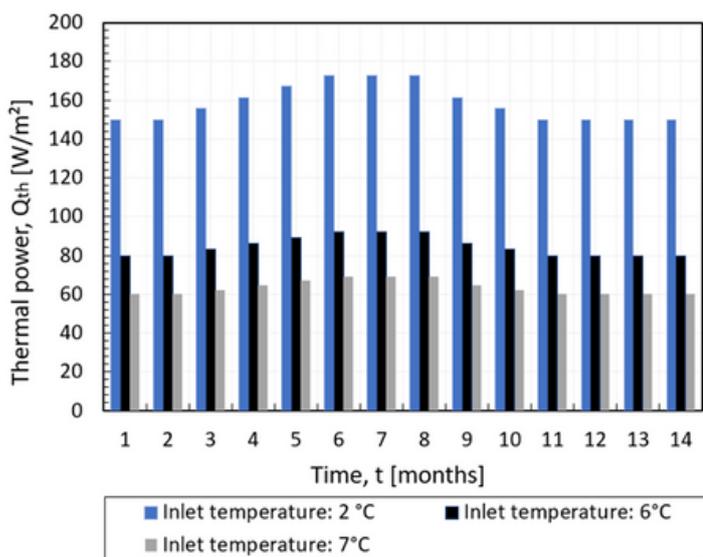


Figure 9: Influence des saisons sur la puissance thermique

A l'échelle annuelle, la Figure 9 détaillant les puissances extraites par mois illustre également ce phénomène. Une légère augmentation saisonnière est observée mais se limite à 15% de variation annuelle sur la performance du système. L'influence de la température de l'air sur la puissance thermique du panneau géothermique enerdrap n'est donc pas le facteur prépondérant de la puissance nominale.



# RÉSULTATS DES SIMULATIONS NUMÉRIQUES

Afin de déterminer l'influence de l'exploitation du système sur le comportement du sol environnant, des simulations numériques dynamiques ont été réalisées sur plus de 50 ans d'exploitation.

Les données récoltées durant toute l'exploitation du système de Sébeillon ont permis de calibrer un modèle numérique. Les critères de dimensionnement définis par la norme SIA 384/6 pour les sondes géothermiques sont utilisés.

La Figure 10 décrit le profil de charge horaire utilisé pour les simulations thermiques dynamiques.

Une saison de chauffe de 8 mois au cours de laquelle une puissance constante de 100W/m<sup>2</sup> est extraite par le système pendant 9 heures par jour suivi d'une recharge saisonnière de 4 mois sont simulés pendant 50 ans.

La Figure 11 décrit l'évolution de la température dans le sol à 10 cm du mur équipé et à 10 m du mur équipé.

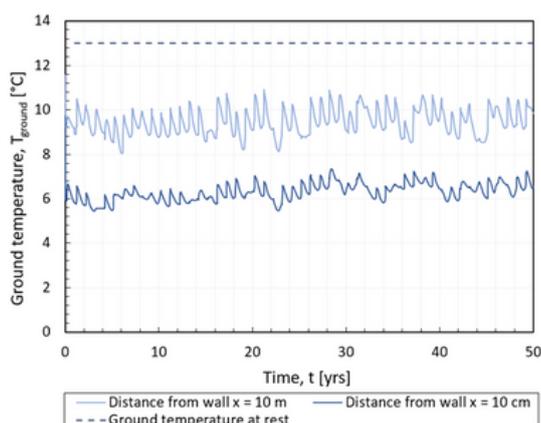
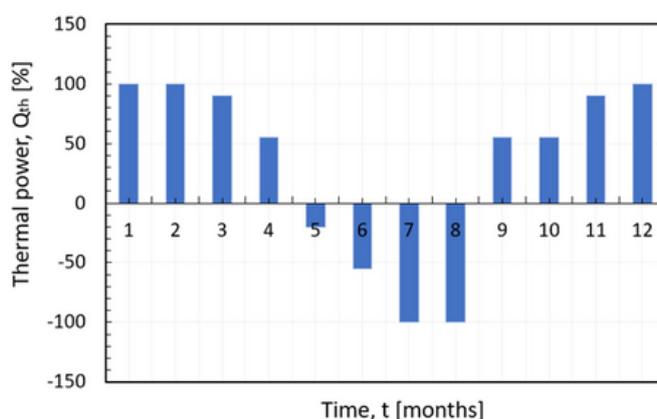


Figure 10: Profil de charge annuel



La température initiale du sol et du mur est de 13°C. Il peut être observé que proche du mur ( $x = 10$  cm) la température du sol est perturbée d'environ 6°C, tandis que loin du mur ( $x = 10$  m) la perturbation de la température du sol est limitée à une variation de 3°C. Il est intéressant de noter ici que les perturbations de température du sol sont relativement constantes au fil des années pour ce profil de charge et se stabilise dès les premières années d'exploitation du système. Les oscillations résultent des saisons et des changements de type d'exploitation (chauffage/free-cooling).

Figure 11: Évolution de la température du sol

Le critère de dimensionnement d'un système géothermique après 50 ans selon la SIA 384/6 (art. 3.1.2) à savoir une température moyenne minimale de l'échangeur à  $-1.5^{\circ}\text{C}$  est ici respectée. On peut donc en conclure que l'exploitation du système enerdrape à hauteur de  $100\text{ W/m}^2$  et pour le profil de charge simulé ici répond aux critères de dimensionnement sur 50 ans et assure la pérennité de la source dans le temps.

Les Figures 12 et 13 illustrent la température du sol après une période de 50 ans respectivement en janvier et en juillet, à une puissance d'extraction maximale de  $100\text{ W/m}^2$ .

Le sol après 6 mètres de profondeur maintient une température stable d'environ  $13^{\circ}\text{C}$ . Plus en surface, la température fluctue de quelques degrés avec les saisons. En effet, les couches superficielles du sol sont davantage soumises à des variations de températures liées aux conditions climatiques extérieures (ensoleillement, intempéries, température de l'air).

Toutefois, ce phénomène est moins observé en zone urbaine et dense où les constructions humaines protègent les couches superficielles.

Il peut être observé qu'aux abords directs de la surface activée par le système enerdrape le cycle de comportement thermique du sol reste au dessus de  $2^{\circ}\text{C}$  après 50 ans.

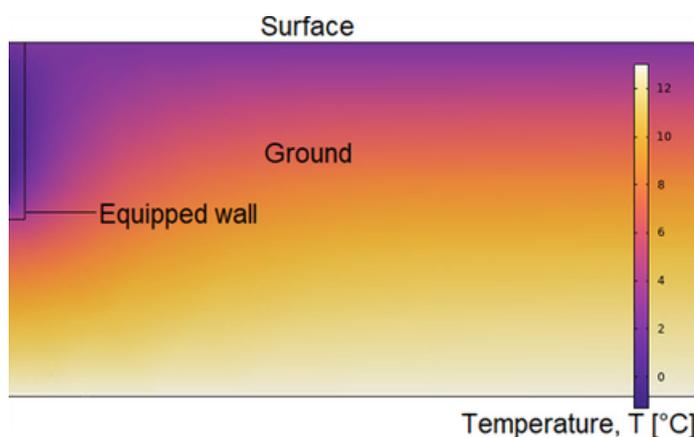


Figure 12: Température du sol en janvier après 50 ans d'exploitation

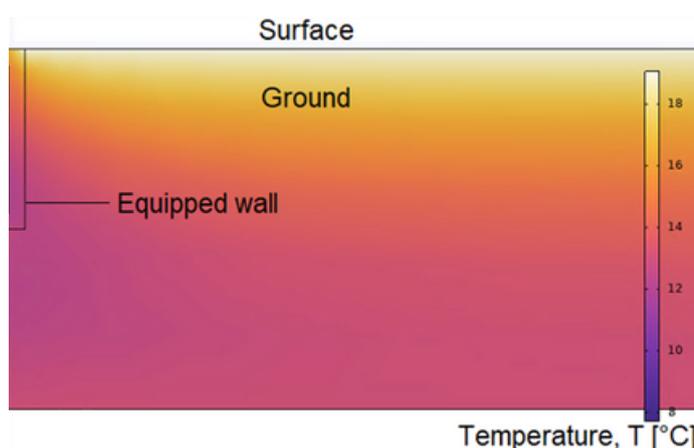


Figure 13: Température du sol en juin après 50 ans d'exploitation

# CONCLUSIONS

Ce rapport résume les résultats obtenus dans la première installation pilote d'un système enerdrape. Les résultats confirment une performance énergétique exceptionnelle des installations enerdrape et démontrent une large applicabilité de cette technologie dans des environnements bâtis souterrains. Les principales conclusions qui peuvent être tirées de cette étude sont les suivantes :

1

La puissance d'extraction et d'injection du système dépend de la température d'entrée dans le système du fluide caloporteur et la température moyenne du mur. Pour les conditions de fonctionnement testées dans le cadre de ce pilote, une puissance thermique maximale de plus de 170 W/m<sup>2</sup> a été atteinte.

2

Un comportement thermique stable est observé à partir de 5 heures d'utilisation. Après 5 heures d'exploitation, le système soutire une puissance stable ; la puissance nominale est donc fiable.

3

La puissance du système est peu influencée (environ 15%) par la température ambiante de l'air du parking. Grâce à cela, la puissance du système reste stable en hiver et ne souffre pas d'une grande baisse de performance durant les périodes froides de l'année.

4

La température ambiante de l'air du parking n'est pas influencée par le fonctionnement du système. La température ressentie dans le parking ne sera pas influencée par l'utilisation des panneaux, aucun inconfort ne sera donc vécu par les utilisateurs des parkings.

5

Le système enerdrape bénéficie d'une grande stabilité saisonnière, ce qui garantit un Coefficient de Performance (COP) relativement constant. Le système enerdrape peut donc être utilisé à puissance nominale tout au long de l'année.

6

Aux puissances d'utilisation préconisées, l'inertie du sol est garantie pour 50 ans d'utilisation. Le système enerdrape peut donc être utilisé pendant plus de 50 ans sans altération de la puissance ou gel du terrain.

Nous remercions *REALSTONE SA* pour son soutien et sa confiance dans la réalisation et le succès de la première installation pilote d'enerdrape.

---

## CONTACT

**enerdrape**

**EPFL Innovation Park**

Building C

CH-1015 Lausanne

[www.enerdrape.com](http://www.enerdrape.com)

[info@enerdrape.com](mailto:info@enerdrape.com)

**enerdrape**

