

La performance thermique d'un pieu énergétiques dans la craie

Thermal performance of an energy pile in chalk

M'hammed TAGHLAOU^{1*}, Hussein MROUEH¹, Diana SALCIARINI²

1 Laboratoire de Génie Civil et Géo-Environnement (LGCgE)- ULR 4515- Université de Lille Université de Lille- Cité Scientifique- 59650 Villeneuve-d'Ascq, France

2 Département de Génie Civil et Environnemental, Université de Pérouse, via G. Duranti, Perugia 06125, Italie

**mhammed.taghlaoui@univ-lille.fr*

RESUME : Comprendre la performance des géostructures énergétiques dans des conditions de sol complexes est essentiel pour le développement durable du géotechnique et des technologies d'énergies renouvelables. Les géostructures énergétiques utilisent le sol en place comme échangeur thermique afin de valoriser l'énergie géothermique pour le chauffage et le refroidissement. Le transfert de chaleur y est régi par des processus thermo-hydrauliques (TH) couplés. Parmi les différents contextes géologiques rencontrés en pratique, la craie constitue un milieu particulièrement complexe pour ce type d'ouvrage. Il s'agit d'un matériau poreux, principalement composé de calcite et souvent partiellement saturé dans la zone vadose. Malgré sa porosité élevée, son comportement hydraulique est fortement influencé par la microstructure et les fractures, si bien que sa réponse thermo-hydraulique (TH) peut être spécifique. Cet aspect reste peu documenté lorsqu'il s'agit d'évaluer la performance des pieux thermo-actifs implantés dans des terrains partiellement saturés. Cet article étudie, par modélisation numérique tridimensionnelle, l'effet de l'insaturation du sol sur la performance thermique d'un pieu énergétique implanté dans la craie, en comparaison à un sol plus conventionnel (sable) soumis aux mêmes cycles de chauffage/refroidissement.

Les résultats montrent que à l'interface pieu-sol, la craie maintient un S_r plus élevé et une conductivité thermique effective supérieure au voisinage du pieu. Les profils de la température $T(z)$ et $S_r(z)$ à l'interface confirment que la craie possède une frange capillaire épaisse, et naturellement mince dans le sable. En régime saturé, le profil $T(z)$ est uniforme, lorsque la nappe s'abaisse, le profil de Température devient bi-zone : une température d'interface plus élevée dans la zone vadose, puis une décroissance en s'approchant du niveau piézométrique.

ABSTRACT: Understanding the performance of energy geostructures under complex ground conditions is essential for the sustainable development of geotechnical engineering and renewable energy technologies. Energy geostructures use the ground as a heat exchanger to exploit shallow geothermal energy for heating and cooling. Heat transfer in these systems is governed by coupled thermo-hydraulic (TH) processes. Among the various ground conditions encountered in practice, chalk stands out as a particularly complex soil. It is a porous material, composed mainly of calcite and often partially saturated within the vadose zone. Despite its high porosity, its hydraulic behaviour is strongly influenced by microstructure and fracturing, so that its thermo-hydraulic response can be distinct from that of more conventional soils. This aspect remains poorly documented when assessing the performance of thermo-active piles installed in partially saturated ground. This paper uses three-dimensional numerical modelling to investigate the effect of soil unsaturation on the thermal performance of an energy pile embedded in chalk, in comparison with a more conventional soil (sand) subjected to the same heating/cooling cycles.

The results show that, at the pile-soil interface, chalk maintains a higher degree of saturation S_r and a higher effective thermal conductivity in the vicinity of the pile. The profiles of temperature $T(z)$ and degree of saturation $S_r(z)$ along the interface confirm that chalk develops a thick capillary fringe, whereas this zone is naturally thin in sand. Under fully saturated conditions, the $T(z)$ profile is nearly uniform; as the groundwater table is lowered, the temperature profile becomes bi-zonal, with an elevated interface temperature in the vadose zone followed by a decrease when approaching the piezometric level

Mots-clés : Géostructures énergétiques, Craie, Couplage thermo, hydraulique, Réponse thermique du sol

1. INTRODUCTION

Les besoins croissants en géo-énergie et la réduction de l'empreinte carbone des systèmes de chauffage/refroidissement favorisent le développement des géostructures énergétiques, en particulier les pieux thermo-actifs, dit énergétiques, qui combinent fonctions structurales à l'échange thermique avec le sol. La performance de ces systèmes dépend fortement de flux thermiques et hydriques à l'interface pieu-sol, et donc des conditions hydriques du sol. Or, dans de nombreuses situations réelles, le milieu est partiellement saturé, avec des gradients de succion et une zone capillaire susceptibles de modifier la conductivité thermique effective et, donc, l'efficacité de l'échange énergétique pieu-sol. Parmi les matériaux rencontrés en contexte urbain du nord de la France, la craie se distingue par une porosité élevée, une microstructure hétérogène (microfissures, cimentation) et une sensibilité marquée à l'humidification. Malgré cela, la réponse thermo-hydraulique (TH) de la craie reste moins documentée que celle de milieux granulaires classiques tels que le sable, notamment lorsque l'on considère des cycles thermiques saisonniers et des variations du niveau de nappe susceptibles de déplacer la longueur active d'échange. Ce déficit de connaissances limite la calibration des modèles et l'applicabilité des paramètres utilisés en pratique. Cette étude a pour objectif de caractériser et comparer le rendement thermique d'un pieu énergétique implanté dans la craie d'Estreux (Ma et al. 2019), et dans le sable (Matziaris et al. 2023), sous conditions partiellement saturées et cycles chauffage/refroidissement. Pour cela, nous développons un modèle TH tridimensionnel intégrant (i) une formulation d'écoulement en milieu non saturé, (ii) des propriétés thermiques dépendantes de l'état hydrique.

2. MODELE NUMERIQUE

2.1. Géométrie

La Figure 1 présente le domaine d'étude. Il comporte un massif modélisé par un parallélépipède 3D de 20 m en x, y et 30 m en z choisies de façon à rendre négligeables les effets de bord. Un pieu énergétique en béton armé de 0,60 m de diamètre et de 20 m de longueur est implanté au centre de domaine de sol. La longueur active s'étend de la tête à la pointe (voir

coupe A-A). L'échangeur interne est de type 2U (aller-retour) ; les tubulures présentent un diamètre intérieur de 25mm. Les conditions d'entrée et de sortie du fluide sont appliquées sur la section circulaire au niveau de la tête du pieu (coupe A-A).

2.2. Formulation multiphysique.

Le modèle met en œuvre un couplage énergétiquement conservatif entre la conduction transitoire dans les solides (sol + béton du pieu) et le transfert thermique dans la conduite (fluide caloporteur en 1-D via « Heat Transfer in Pipes »), avec un échange tube-pieu-sol explicitement pris en compte. Dans les solides, la température évolue par diffusion, avec des propriétés dépendantes de la température et du degré de saturation : la craie est traitée en milieu partiellement saturé (état hydrique issu d'une résolution de type Richards alimentant les lois λ et C_p). Dans les conduites, la température est résolue le long de l'axe en tenant compte de la convection par l'écoulement moyen, de la diffusion axiale et d'un terme d'échange linéique avec la paroi.

2.3. Interface conduit-pieu-sol

Aux interfaces conduit-pieu-sol, on impose la continuité de température et un transfert thermique global qui intégrant la convection interne, la conduction à travers la paroi du tube et le béton adjacent. Le cas échéant, une résistance thermique d'interface pieu-sol peut être introduite. Le bilan énergétique est strictement conservatif : la puissance extraite du fluide est égale à la puissance reçue par le béton puis le sol le long des lignes d'échange, ce qui exclut toute perte numérique parasite.

2.4. Conditions aux limites.

Les frontières latérales éloignées sont non réfléchissantes (limite ouverte amont et flux thermique sortant aval) afin de laisser se dissiper le signal thermique. La base du domaine est fixée à la température géothermique de référence, et la surface supérieure est isolée thermiquement.

2.5. Stratégie numérique.

Le maillage est raffiné au voisinage des conduites et du fût pour capturer la zone d'échange. La résolution transitoire implicite et des itérations serrées garantissent la conservation stricte de l'énergie et la réciprocity immédiate entre température d'entrée/sortie et réponse du massif. Cette configuration restitue fidèlement la migration du front thermique, la localisation de la longueur active d'échange et l'impact des variations d'état hydrique, éléments déterminants pour apprécier la performance saisonnière du pieu énergétique dans la craie comparativement au sable.

Le fluide caloporteur est imposé à l'entrée par une température d'entrée (scénarios chauffage /

refroidissement) et une vitesse moyenne dans les tubes, permettant à COMSOL Multiphysics de calculer le profil de température et la température de sortie.

Le modèle numérique résout la température du fluide caloporteur depuis l'entrée jusqu'à la sortie du GHE et calcule la température moyenne du fluide T_{avg} entre l'entrée et la sortie pour chaque scénario. Le dispositif hydraulique est imposé par une vitesse moyenne dans les tubes de 0,4 m/s (tube d'échange $\phi=25$ mm), soit un débit volumique d'environ 11,8 l/min. À l'entrée, le chauffage est piloté par une température d'entrée fixée à 40 °C ; la sortie est traitée en sortie convective.

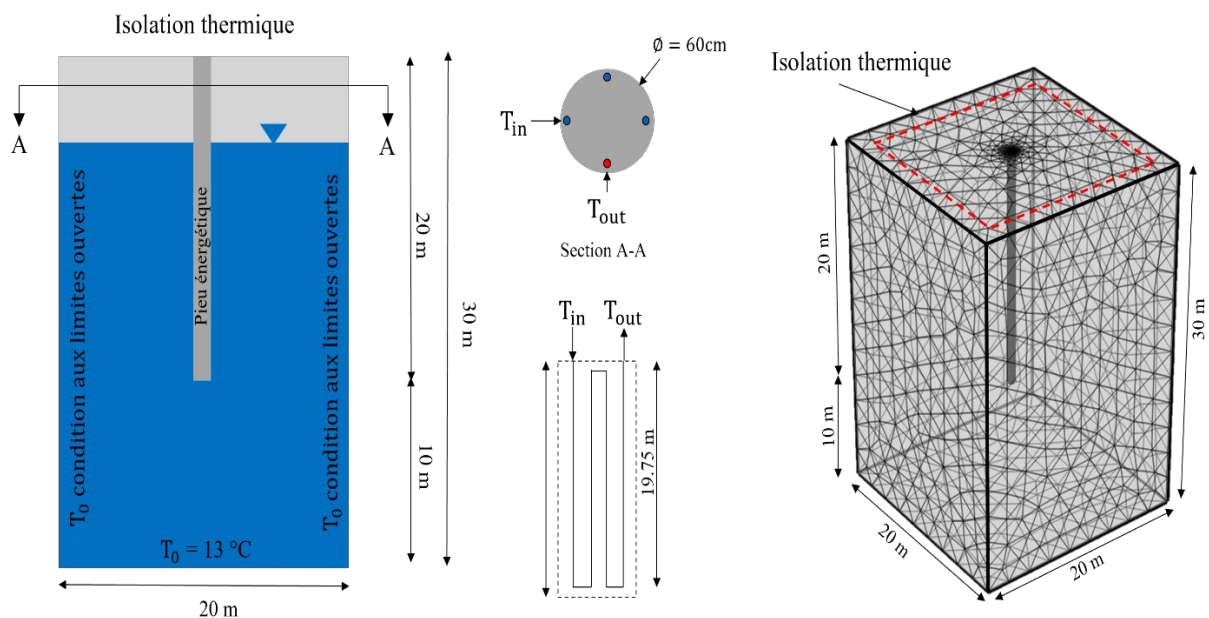


Figure 1 : Configuration du modèle numérique du pieu énergétique.

La Figure 2 présente les températures moyennes mensuelles du climat lillois et la répartition des régimes d'exploitation retenus. Les zones bleutées correspondent au chauffage (novembre-mars, prolongé d'octobre à début avril dans notre scénario), la zone rosée à la climatisation estivale (juillet-août), et les zones grisées aux périodes de récupération (mai-juin puis septembre-octobre). Les courbes illustrent la dynamique saisonnière avec des minima hivernaux proches de 1-2 °C (autour de février) et des maxima estivaux proches de 24-26 °C (début août), tandis que les points annotés marquent des jalons thermiques (13 juin, 5 août, 11 sept.). Cette répartition justifie le cycle annuel de simulation adopté : chauffage 01/10 → 01/04 ($T_{in} = 40$ °C), récupération au printemps,

refroidissement 01/07 → 01/09 ($T_{in} = 2$ °C), puis récupération d'automne. Elle permet d'évaluer, à conditions climatiques réalistes, la performance du pieu énergétique et la capacité de reconstitution du champ thermique du sol entre saisons.

Le cycle d'exploitation annuel (365 jours) est le suivant : chauffage du 1^{er} octobre au 30 avril (40 °C, 0,4 m/s), puis repos du 1^{er} mai au début juillet, ensuite refroidissement/climatisation du 1^{er} juillet au 1^{er} septembre, enfin repos jusqu'au 1^{er} octobre. Contrairement à des approches « homogènes » à paramètres fixés, l'étude considère explicitement le comportement non saturé du sol et la variation saisonnière du niveau piézométrique observée dans la région de Lille (nappe entre 7 m et 11 m sous la surface). Les conditions aux limites tiennent compte

d'un amont ouvert pour l'écoulement souterrain et d'un flux thermique aval non réfléchi, de manière à minimiser les effets de bord.

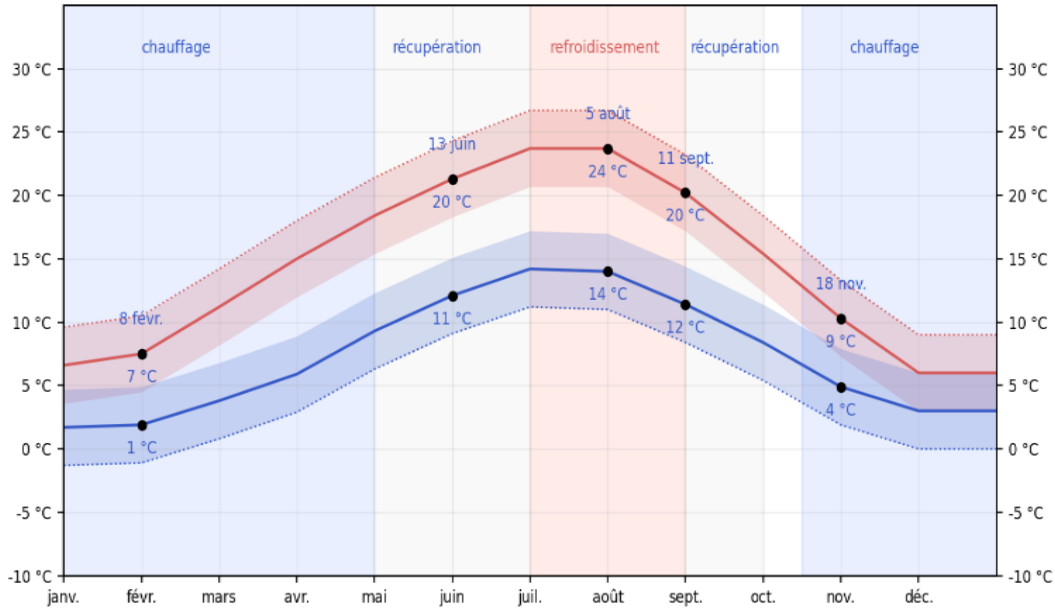


Figure 2 : Températures moyennes mensuelles et répartition des régimes de chauffage / refroidissement pour le climat de Lille

$$\eta = 9.92 - 4.39.n_{vg} \quad (3)$$

3. MODELISATION DE COMPORTEMENT NON SATURE

Deux milieux sont étudiés craie et sable de référence soumis au même cycle d'exploitation. La comparaison porte sur $\Delta T = T_{out} - T_{in}$, les profils $T(z)$, $S_r(z)$ et la longueur active. Le non saturé est décrit par la courbe de rétention de (Van Genuchten 1980) (α, n, m) ; la nappe (GWT) fixe l'état initial et la frange capillaire (épaisse dans la craie, mince dans le sable). Le modèle de Richards fournit $S_r(z, t)$, utilisé en ligne pour mettre à jour les propriétés thermiques. La conductivité thermique représentée dans l'équation (1) suit (Lu and McCartney 2024); $\lambda(S_r, T)$; la capacité volumique est actualisée avec les fractions eau/air. Le couplage conduit-pieu-sol est conservatif, garantissant un bilan d'énergie strict. Cette configuration isole efficacement l'effet de l'humidité sur la performance saisonnière du pieu.

$$\frac{\lambda - \lambda_{sec}}{\lambda_{sat} - \lambda_{sec}} = \left[1 - \frac{1 - S_{rw}^\eta}{1 + \left(\frac{S_{rw}}{S_c}\right)^\eta} \right]^{1-1/\eta} \quad (1)$$

$$\lambda_{sec} = 4.1 \times 10^{-7} \cdot \psi_{max} \quad (2)$$

Avec λ_{sec} et λ_{sat} représentent les conductivités thermiques à l'état sec et à l'état totalement saturé, S_c est le degré de saturation correspondant au début du régime de rétention capillaire et η est un paramètre de forme qui contrôle la vitesse à laquelle λ varie avec S_{rw} . The parameter η traduit l'influence de la distribution des tailles de pores et de la connectivité de l'eau dans les pores. Il est supposé être lié au paramètre n_{vg} (van Genuchten), qui caractérise la distribution des tailles de pores dans le modèle SWRC proposé par (Lu 2016)

La Figure 3 montre les profils verticaux de la conductivité thermique $\lambda(z)$ (gauche) et de degré de saturation $S_r(z)$ (droite) pour un niveau de nappe à 10 m. Dans la craie d'Estreux (noir), $S_r = 1$ bien au-dessus de la nappe (frange capillaire épaisse) et λ reste quasi constant ($1,6 W.m^{-1}.K^{-1}$). Dans le sable (jaune), la frange capillaire est mince : S_r chute rapidement dans la zone vadose, entraînant une λ_{eff} faible près de la surface (1,2 - 1,3 m) alors qu'en zone saturée (sous 10 m) λ_{eff} remonte jusqu'à 2,6 - 2,7 $W.m^{-1}.K^{-1}$. Ainsi, au-dessus de la nappe la craie maintient une λ_{eff} plus élevée et plus homogène que le sable, ce qui favorise l'échange thermique du pieu dans la partie supérieure du massif.

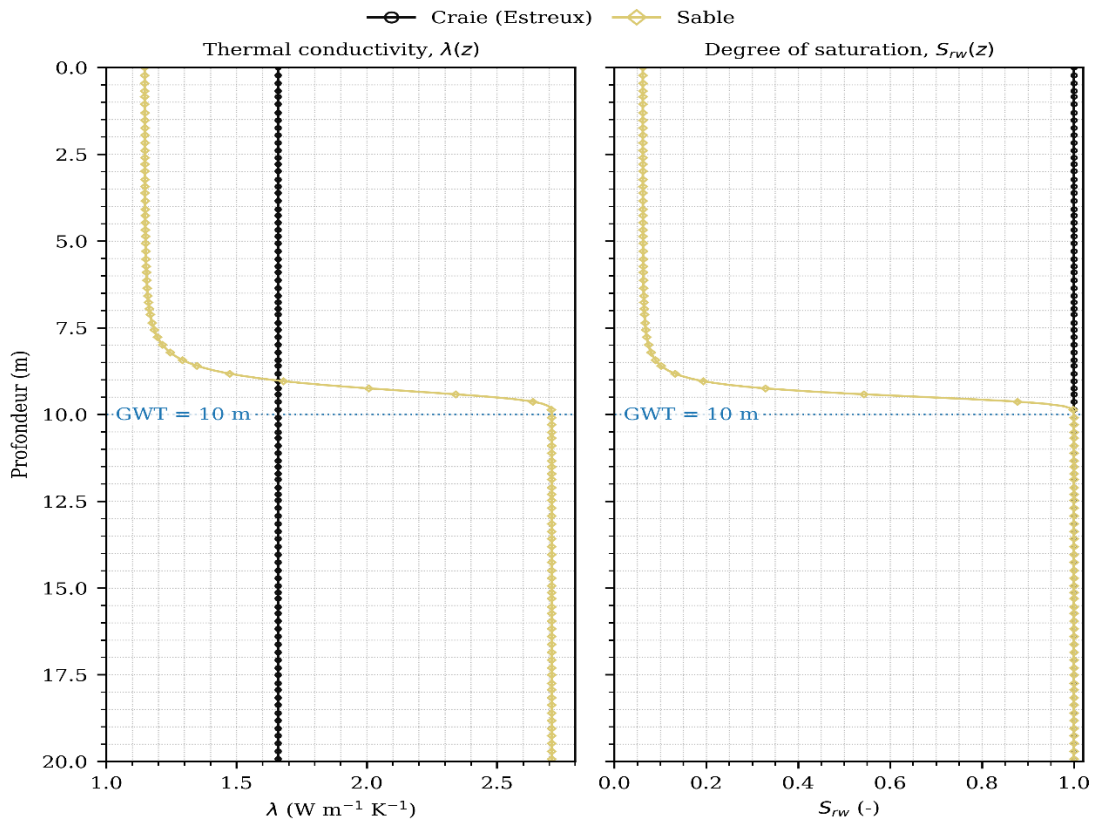


Figure 3 : Profils verticaux de conductivité thermique $\lambda(z)$ et de saturation ($S_r(z)$) (GWT = 10 m) - Craie d'Estreux et sable

4. RESULTATS ET DISCUSSION

4.1. Evolution de T_{in} et T_{out} sur deux cycles annuels

La Figure 4 représente deux cycles annuels successifs avec les séquences chauffage ($T_{in} = 40\text{ °C}$) → récupération ($T_{in} = 13\text{ °C}$) → refroidissement/climatisation ($T_{in} = 2\text{ °C}$) → récupération. En chauffage, T_{out} augmente rapidement puis se stabilise autour de $32\text{--}33\text{ °C}$ dans le sable et $31\text{--}32\text{ °C}$ dans la craie d'Estreux, ce qui conduit à un $\Delta T = T_{in} - T_{out}$ légèrement plus élevé dans la craie, indiquant un transfert vers le sol plus efficace. Lors des phases de récupération, la craie revient plus vite vers la température de fond ($T_0 = 13\text{ °C}$), alors que le sable reste plus chaud plus longtemps, signe d'une conductivité effective plus faible dans sa zone vadose. En climatisation, T_{out} atteint $6\text{--}7\text{ °C}$; la craie affiche systématiquement une sortie plus basse que le sable, confirmant une capacité d'échange supérieure lorsque le fluide est froid. La superposition des courbes entre la 1re et la 2e année révèle l'absence

de dérive thermique notable du champ lointain sur l'horizon simulé. L'écart persistant entre milieux s'explique par la frange capillaire plus épaisse et un S_r moyen plus élevé dans la craie, qui maintiennent une λ_{eff} plus favorable au voisinage du fût.

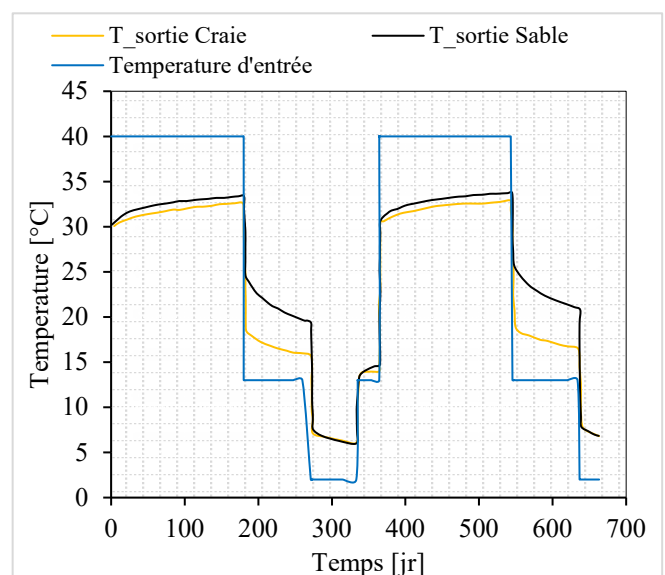


Figure 4 : Températures du fluide à l'entrée et à la sortie du pieu énergétique

4.2. Effet du niveau de nappe sur la longueur active

La Figure 5 met en évidence un profil bi-zone contrôlé par la position de la nappe (GWT = 10 m). Au-dessus de la nappe (0-10 m), le sable présente des températures plus élevées (24-26 °C) et un gradient plus étalé, traduisant une conductivité effective plus faible en zone vadose. La craie d'Estreux reste plus froide (23-24 °C) avec un gradient plus abrupt, signe d'une évacuation de chaleur plus efficace liée à une frange capillaire épaisse et un S_r moyen plus élevé. Entre 10 et 20 m (transition capillaire), la craie revient rapidement vers 20-21 °C alors que le sable demeure réchauffé plusieurs mètres sous le niveau piézométrique. Cette structure explique les écarts de performance observés : lorsque la nappe s'abaisse, la longueur active d'échange se déplace vers le bas et la perte de puissance est nettement plus marquée dans le sable que dans la craie d'Estreux.

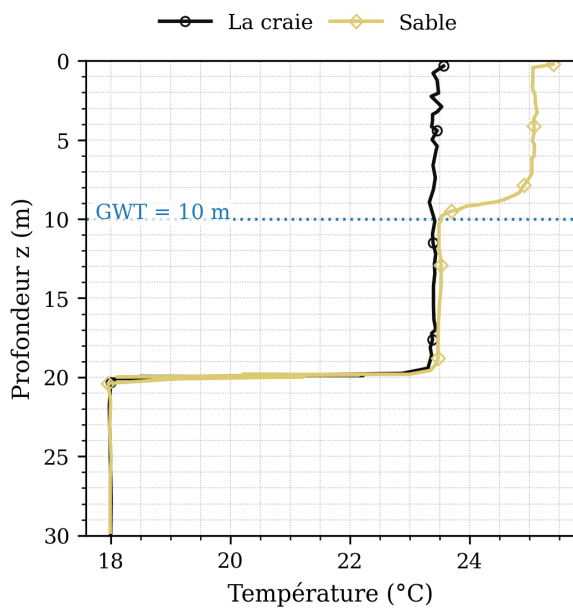


Figure 5: Distribution verticale de température du pieu (GWT = 10 m) - craie vs sable

4.3. Chauffage Puissance thermique extraite q (W/m)

La puissance linéique extraite du sol par le pieu énergétique est évaluée à partir du bilan thermique du fluide caloporteur circulant dans les échangeurs. En supposant un débit massique constant et des propriétés thermiques du fluide invariantes, la puissance moyenne par unité de longueur de pieu s'écrit :

$$q = (\dot{m}C_p|T_{out} - T_{in}|)/L_p$$

Avec où \dot{m} est le débit massique du fluide, C_p sa capacité calorifique massique, T_{in} et T_{out} les températures d'entrée et de sortie du fluide dans le pieu, et L_p la longueur active du pieu.

La Figure 6 illustre l'évolution temporelle de la puissance linéique transférée du fluide vers le sol, q (W/m), pendant la saison de chauffage, même hydraulique pour les deux milieux). Les courbes comparent la craie d'Estreux au sable. Le pic initial (460 W/m dans la craie, 400 W/m dans le sable) correspond au fort gradient thermique entre le fluide chaud et le sol non perturbé. Ensuite, q décroît par déplétion thermique autour du fût : l'échauffement radial du sol réduit progressivement le gradient à l'interface, ce qui est conforme à un régime transitoire de conduction où q diminue typiquement comme une loi en $t^{-1/2}$ avant d'atteindre un quasi-palier. À 180 j, on obtient 340 W/m, dans la craie contre 270-275 W/m dans le sable, soit une baisse d'environ -26 % dans la craie et -32 % dans le sable par rapport aux valeurs initiales. L'avantage relatif de la craie (gain 15 - 25 % sur toute la période) s'explique par un degré de saturation moyen S_r plus élevé et une frange capillaire épaisse, maintenant une conductivité thermique effective λ_{eff} plus grande au voisinage du pieu et donc une résistance thermique sol-pieu plus faible. En pratique, à hydraulique et géométrie identiques, la craie soutient transferts de chaleur plus élevés et plus stables que le sable sur la durée de la saison de chauffage.

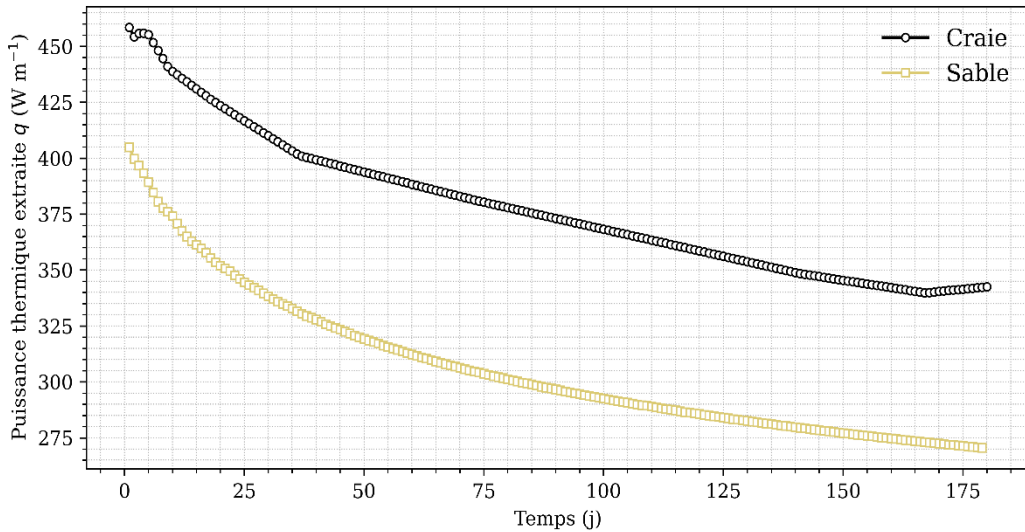


Figure 6: Puissance extraite au cours du chauffage - milieux crayeux et sableux

4.4. Climatisation - Puissance thermique extraite q (W/m)

Figure 7 représente l'évolution temporelle de la puissance linéique extraite du sol, q (W/m), pendant la phase de climatisation (même hydraulique, T_{in} froid). Le démarrage de la saison (jour 273) présente des valeurs initiales proches de l'état non perturbé mais avec un fort gradient dirigé du sol vers le fluide : craie d'Estreux 233 W/m, sable 223 W/m. Ensuite, q décroît de façon monotone sous l'effet de la déplétion thermique autour du fût, qui réduit le gradient radial. En fin de période (= jour 333), on obtient 185 W/m, dans la craie versus 160 W/m, dans le sable, soit une baisse d'environ -21 % dans la craie contre -28 % dans le sable.

Deux points ressortent :

- La craie maintient un flux supérieur sur toute la saison (avantage relatif = 5 % au début, jusqu'à 15 - 16 % à la fin), avec une pente de décroissance plus faible.
- Cette performance tient à une frange capillaire épaisse et à un S_r moyen plus élevé dans la craie, qui conservent une conductivité thermique effective λ_{eff} plus forte dans la zone vadose et abaissent la résistance thermique sol - pieu.

Les niveaux de q restent inférieurs à ceux observés en chauffage, ce qui est cohérent avec un ΔT moteur plus faible et une durée de sollicitation estivale plus courte. En conception, à géométrie et hydraulique identiques, la craie d'Estreux offre une capacité d'échange plus robuste que le sable durant la climatisation.

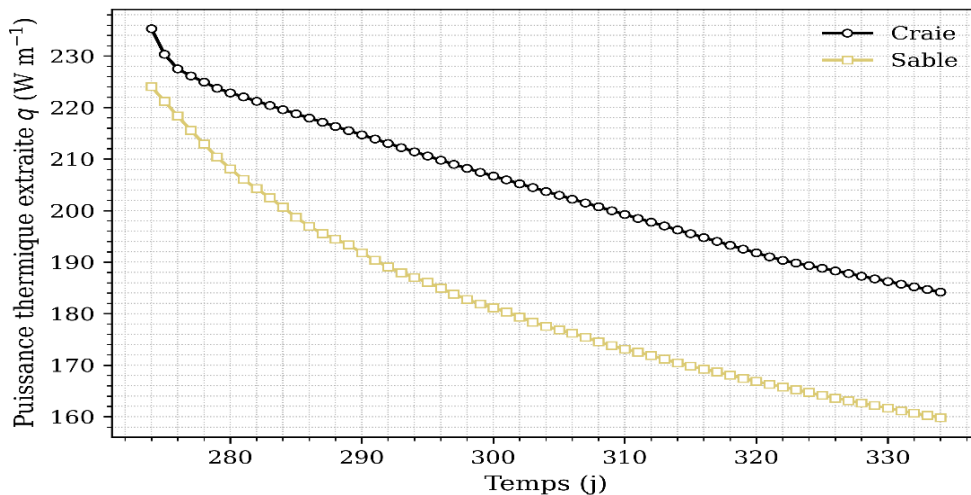


Figure 7 : Puissance extraite au cours du climatisation - milieux crayeux et sableux

5. CONCLUSION

Cette étude numérique TH 3D montre que, sous un cycle annuel réaliste et en conditions partiellement saturées, un pieu énergétique implanté dans la craie d'Estreux offre une performance thermique plus stable et plus robuste que dans le sable. La craie, grâce à sa frange capillaire épaisse et à un degré de saturation globalement plus élevé, maintient une conductivité thermique effective plus favorable au voisinage du pieu. Chauffage ainsi moins sensible aux variations saisonnières de la nappe et aux alternances chauffage-climatisation, Pour la conception, cela signifie qu'en contexte crayeux, à géométrie et hydraulique équivalentes, on peut attendre des échanges plus réguliers, une déplétion thermique plus contenue et une résilience accrue face aux fluctuations hydriques.

6. REMERCIEMENTS

Les résultats présentés dans cette communication ont été obtenus dans le cadre du projet européen **CETPartnership** (Clean Energy Transition Partnership), un partenariat multilatéral et stratégique rassemblant des programmes nationaux et régionaux de recherche, développement et innovation (RDI) des États membres et pays associés, visant à accélérer la transition énergétique et à soutenir la mise en œuvre du Strategic Energy Technology Plan (SET-Plan) européen. Les auteurs remercient l'ensemble des partenaires du projet pour leur soutien et pour l'autorisation de publier ces données.

7. REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- COMSOL Multiphysics. COMSOL Multiphysics [Internet]. 2026 [cited 2026 Jan 6]. Available from: <https://doc.comsol.com/6.4/docserver/#!/com.comsol.help.comsol/helpdesk/helpdesk.html>
- Lu N. Generalized Soil Water Retention Equation for Adsorption and Capillarity. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. American Society of Civil Engineers; 2016 Oct 1;142(10):04016051.
- Lu Y, McCartney JS. Thermal Conductivity Function for Fine-Grained Unsaturated Soils Linked with Water Retention by Capillarity and Adsorption. *J.*

- J. Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*. 2024 Jan;150(1):06023009.
- Ma T, Wei C, Chen P, Li W. Chemo-mechanical coupling constitutive model for chalk considering chalk–fluid physicochemical interaction. *Géotechnique*. 2019 Apr;69(4):308–19.
- Matziaris V, Osinski P, Vimalan J, Koda E. Soil water retention curve of silty sand – experimental investigation using different laboratory methods. *E3S Web of Conf*. EDP Sciences; 2023;382:25005.
- Van Genuchten. A Closed-form Equation for Predicting the Hydraulic Conductivity of Unsaturated Soils - Genuchten - 1980 - Soil Science Society of America Journal - Wiley Online Library [Internet]. 1980 [cited 2026 Jan 6]. Available from: <https://access.onlinelibrary.wiley.com/doi/abs/10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x>