

Impact de l'interférence thermique sur la performance de tunnels énergétiques bi-tubes en présence d'écoulement souterrain

Impact of thermal interference on the performance of twin energy tunnels in the presence of groundwater flow

Alaaeldin Magdy^{1*}, Alice Di Donna², Hussein Mroueh¹

1 Université de Lille, IMT Lille Douai, Univ. Artois, Junia, ULR 4515 - LGCgE, Laboratoire de Génie Civil et géo-Environnement, F-59000 Lille, France.

2 Université Grenoble Alpes, CNRS, Grenoble INP, 3SR, Grenoble, France

**alaaeldin.ogail@univ-lille.fr*

RESUME : Avec la demande croissante en infrastructures souterraines, les configurations de tunnels bi-tubes sont de plus en plus privilégiées afin d'optimiser l'utilisation du sol et de soutenir le développement des zones urbaines denses. Parallèlement, l'intérêt grandissant pour la géothermie de faible profondeur motive cette étude, qui vise à analyser l'impact des interférences thermiques entre les tunnels bi-tubes en présence d'un écoulement d'eau souterraine. Un modèle numérique a été élaboré sur la base d'une approche validée par les essais in situ de la ligne 1 du métro de Turin (Italie). Ce modèle permet d'évaluer les influences de la vitesse de l'écoulement souterrain, du niveau de la nappe phréatique et de la distance libre entre les deux tunnels sur les échanges thermiques et les phénomènes d'interférence dans un sol sableux. Les résultats montrent que, lorsque les tunnels sont totalement immergés sous la nappe phréatique, les panaches thermiques générés par le tunnel amont réduisent l'efficacité des échanges thermiques du tunnel aval. Pour une distance libre entre les tunnels égale à leur diamètre (D), cette diminution est d'autant plus marquée lorsque la vitesse d'écoulement augmente jusqu'à $0,5$ m/j. Au-delà de ce seuil, l'effet de la recharge thermique devient prépondérant et atténue l'influence des panaches thermiques entre les deux tunnels. De plus, la réduction de la distance libre de $4D$ à $0,5D$ intensifie les interférences thermiques, ce qui entraîne une baisse supplémentaire de l'efficacité du tunnel aval. L'impact des panaches thermiques du tunnel amont devient négligeable lorsque le niveau de la nappe phréatique est inférieur ou égal au radier des tunnels.

ABSTRACT: With the growing demand for underground infrastructure, twin-tunnel configurations are increasingly adopted to optimize land use and support the development of densely urbanized areas. At the same time, the rising interest in shallow geothermal energy motivates this study, which aims to analyze the impact of thermal interferences between twin tunnels in the presence of groundwater flow. A numerical model was developed based on an approach validated against in-situ tests on Line 1 of the Turin Metro (Italy). This model evaluates the influences of groundwater flow velocity, groundwater level, and clear distance between the two tunnels on heat exchange and thermal interferences in a sandy soil. The results show that when both tunnels are fully submerged below the groundwater table, the thermal plumes generated by the upstream tunnel reduce the heat exchange efficiency of the downstream tunnel. For a clear distance between the tunnels equals to their diameter (D), this reduction becomes more pronounced as the groundwater flow velocity increases up to 0.5 m/day. Beyond this threshold, the effect of thermal recharge becomes dominant and mitigates the influence of thermal plumes between the two tunnels. Moreover, reducing the clear distance from $4D$ to $0.5D$ intensifies thermal interferences, leading to a further decrease in the efficiency of the downstream tunnel. The impact of thermal plumes from the upstream tunnel becomes negligible when the groundwater level is below or at the invert of the tunnels.

Mots-clés: Géostrucures énergétiques; énergie géothermique; tunnels énergétiques; tunnels bi-tubes; écoulement souterrain.

1 INTRODUCTION

La dépendance mondiale aux combustibles fossiles a conduit à l'épuisement des ressources non renouvelables et accentué la nécessité de recourir à des sources d'énergie durables. Parmi celles-ci, la géothermie de faible profondeur constitue une solution

prometteuse pour le chauffage et le rafraîchissement décentralisés dans les environnements urbains. Les géostrucures, telles que les fondations, les murs de soutènement et les tunnels, peuvent être thermiquement activées par l'intégration de tubes échangeurs de chaleur dans le béton, permettant ainsi un échange thermique efficace avec le sol. Les tunnels énergétiques, au cœur de cette étude, permettent

également un échange de chaleur avec l'air circulant à l'intérieur du tunnel (Magdy, et al., 2025a). Plusieurs études ont examiné les facteurs influençant leur performance thermique, notamment les propriétés thermiques du sol, la vitesse et la direction de l'écoulement d'eau souterraine, ainsi que les conditions d'écoulement d'air interne. Des essais in situ réalisés sur la ligne 1 du métro de Turin (en Italie) ont montré que des conditions hydrogéologiques favorables, en particulier un écoulement d'eau souterraine perpendiculaire à l'axe du tunnel, améliorent significativement l'efficacité des échanges thermiques (Insana et Barla, 2020). Des vitesses d'écoulement plus élevées favorisent le transfert de chaleur et accélèrent la récupération thermique (Barla et al., 2016), mais élargissent également la zone d'influence thermique, pouvant entraîner des interférences entre géostructures voisines. Ce phénomène devient particulièrement pertinent dans le cas des configurations à tunnels bi-tubes, de plus en plus utilisées dans les systèmes de transport urbain. Ces tunnels, généralement construits en alésages parallèles, optimisent l'espace souterrain et minimisent les mouvements du sol, mais leur potentiel en tant que tunnels énergétiques demeure encore peu exploré. Baralis et al. (2018) ont étudié le potentiel géothermique des tunnels bi-tubes du métro de Varsovie (Pologne). Dans le sable et les sols stratifiés, le tunnel aval a montré une légère amélioration de sa performance thermique lors du deuxième cycle de chauffage (hiver) attribuée à la migration d'un panache thermique chaud généré pendant la précédente période de rafraîchissement (été) par le tunnel amont. Compte tenu du manque de connaissances sur les interactions thermiques entre tunnels énergétiques bi-tubes, cette étude analyse leur comportement thermique couplé en présence d'un écoulement d'eau souterraine. Un modèle numérique a été développé afin d'évaluer l'influence de la vitesse de l'écoulement souterrain (V_e), du niveau de la nappe (Z_n) et de la distance libre (D_L) entre tunnels sur l'efficacité des échanges thermiques et les effets d'interférence.

2 MODELE NUMERIQUE

Le modèle numérique a été développé à l'aide de la méthode des éléments finis, implémentée dans le logiciel COMSOL Multiphysics®. L'approche de modélisation a été validée à partir d'essais in situ à grande échelle réalisés sur la ligne 1 du métro de Turin (Insana et Barla, 2020), par les mêmes auteurs dans des travaux antérieurs (Magdy et al., 2025 b,c). Le modèle a ensuite été utilisé pour analyser la performance thermique de tunnels énergétiques bi-tubes dans un sol sableux. Le comportement des tunnels énergétiques,

en tenant compte de l'état partiellement saturé au-dessus du niveau phréatique, est simulé à l'aide des modules couplés de transfert de chaleur et d'écoulement de fluide. L'écoulement de l'eau souterraine est décrit par l'équation de Richards, valable aussi bien en régime saturé (réduite à la loi de Darcy) qu'en régime partiellement saturé, comme exprimé par l'eq. 1.

$$\phi S_e \frac{\partial \rho_w}{\partial t} + \phi \rho_w \frac{\partial S_e}{\partial P_w} \frac{\partial P_w}{\partial t} + \nabla \cdot \left[\rho_w \left(-\frac{k_r k}{\mu_w} \right) \nabla (P_w + \rho_w g z) \right] = 0 \quad (1)$$

où ϕ est la porosité, ρ_w et μ_w sont respectivement la densité et la viscosité dynamique de l'eau souterraine. S_e est le degré de saturation effectif, P_w la pression interstitielle de l'eau, k la perméabilité intrinsèque et k_r la perméabilité relative.

Le transfert thermique dans le sol est modélisé comme un transfert de chaleur au sein d'un milieu poreux, régi par l'équation de conservation de l'énergie incluant les effets de conduction et d'advection liés à l'écoulement souterrain (eq. 2), où la conductivité thermique équivalente (phases solide et liquide) et la capacité calorifique volumique effective sont définies en fonction du degré de saturation. Le revêtement du tunnel et le coulis ont été représentés par des éléments solides.

$$C_{eff} \frac{\partial T}{\partial t} + \rho_w c_w v_w \cdot \nabla T - \nabla \cdot (\lambda_{eff} \nabla T) = 0 \quad (2)$$

où C_{eff} et λ_{eff} sont respectivement la capacité calorifique volumique effective et la conductivité thermique effective. c_w et v_w sont respectivement la capacité calorifique massique et la vitesse d'écoulement de l'eau souterraine. T est le champ de température, résolu à la fois dans le sol et dans le revêtement.

Le transfert thermique dans les tubes a été modélisé en tenant compte de l'échange convectif entre le fluide et la paroi du tube, ainsi que de la conduction entre la paroi et le revêtement du tunnel. Les tubes sont simplifiés en sources de chaleur linéaires 1D, ce qui reflète le fait que, en raison du faible rapport diamètre/longueur des tubes, le transfert axial prédomine naturellement, tout en réduisant le coût de calcul (Alqawasmeh et al., 2025).

Pour une description détaillée des formulations mathématiques, le lecteur est renvoyé à Magdy et al. (2025 b,d).

2.1 Géométrie et conditions aux limites hydrothermiques

La géométrie du modèle et les conditions aux limites (C.L.) du modèle 3D sont présentées à la figure 1. Chaque tunnel est représenté par un seul anneau, ce qui

suffit pour reproduire correctement le comportement thermo-hydraulique, puisque l'écoulement d'eau souterraine est perpendiculaire à l'axe du tunnel et n'induit donc pas d'interférences thermiques entre anneaux (Barla et al., 2016). Le modèle mesure 75 m de hauteur, 200 m de largeur et 1,4 m d'épaisseur. Les bords du domaine ont été placés suffisamment loin de la zone d'intérêt afin de ne pas influencer les résultats. Les deux tunnels sont situés à 16,6 m de profondeur, avec un diamètre interne de 6,8 m, un revêtement de 0,30 m et un coulis de 0,11 m. Le revêtement est thermiquement activé selon la configuration ENERTUN (Brevet PoliTo n° 102016000020821; Barla et al., 2019) via un circuit unique. Les tubes, de 20 mm de diamètre externe et 2 mm d'épaisseur, sont intégrés perpendiculairement à l'axe du tunnel (figure 1).

Une température initiale (T_0) de 17,3 °C est imposée sur l'ensemble du domaine, correspondant à la température naturelle du sol mesurée sur la ligne 1 du métro de Turin. Pour les conditions limites thermiques, une condition de type Cauchy est appliquée à l'interface sol/air et revêtement/air. Ce flux thermique convectif, perpendiculaire à ces surfaces, est exprimé par:

$$q_c = h_c (T_l - T) \quad (3)$$

où T_l représente la température en surface du sol (interface sol/air) ou la température de l'air à l'intérieur du tunnel (interface revêtement/air). h_c , qui représente le coefficient de convection entre l'air et la surface, est fixé à 15 W/m²·K pour l'interface sol/air et à 5.3 W/m²·K pour l'interface revêtement/air. Le coefficient h_c à l'interface revêtement/air a été défini à partir des calibrations effectuées par Insana et Barla (2020) sur leur essais in situ. Cette approche de condition de type Cauchy a été validée dans l'étude de

Ten Bosch et al. (2025) et a été utilisée dans de nombreuses études précédentes (e.g. De Feudis et al., 2024; Magdy et al., 2026).

Une condition de Dirichlet est imposée sur les bords latéraux et à la base du modèle, en imposant une température constante égale à T_0 . Pour les conditions hydrauliques, la surface supérieure, la base et les parois verticales coupant l'axe du tunnel sont considérées comme imperméables. Le Z_n est fixé en imposant deux hauteurs de charge hydraulique différentes sur les côtés gauche et droit. Cette différence de charge hydraulique est ajustée afin de générer la vitesse d'écoulement souterrain requise.

2.2 Propriétés des matériaux

Les propriétés du sol ont été obtenues à partir de données expérimentales disponibles dans la littérature, choisies de manière à représenter des valeurs typiques pour les sols sableux. La courbe de rétention du sol a été déterminée par ajustement des données expérimentales de Roshani et Sedano (2016) à l'aide du modèle de Van Genuchten (1980), tandis que les paramètres thermiques ont été dérivés par ajustement des données expérimentales de Chen (2008) selon le modèle de Lu et Dong (2015). La figure 2 présente les courbes ajustées par rapport aux données expérimentales, tandis que le Tableau 1 fournit un résumé succinct des propriétés. Les propriétés du revêtement et du coulis ont été sélectionnées à partir des essais in situ réalisés sur la ligne 1 du métro de Turin (Insana et Barla, 2020) et sont présentées dans le Tableau 2. Le fluide caloporteur est de l'eau, avec toutes ses propriétés (densité, conductivité thermique, capacité calorifique massique et viscosité) dépendantes de la température et mises à jour automatiquement dans le calcul.

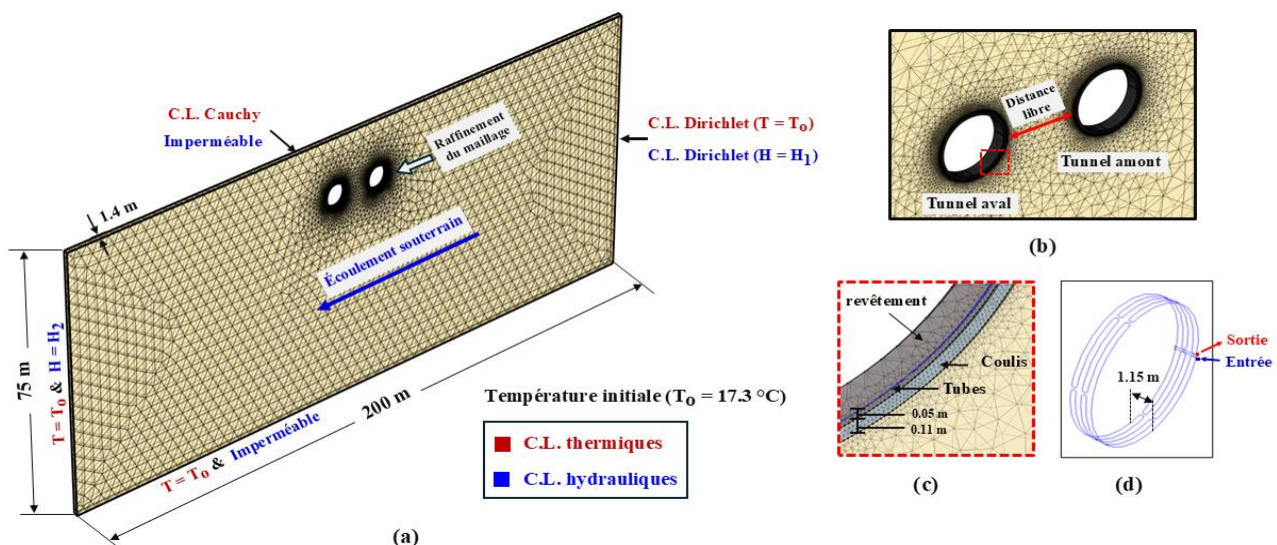


Figure 1. Modèle numérique: (a) géométrie du modèle, (b) la zone des tunnels énergétiques bi-tubes, (c) Une portion du tunnel montrant le revêtement, le coulis et les tubes, et (d) configuration des tubes.

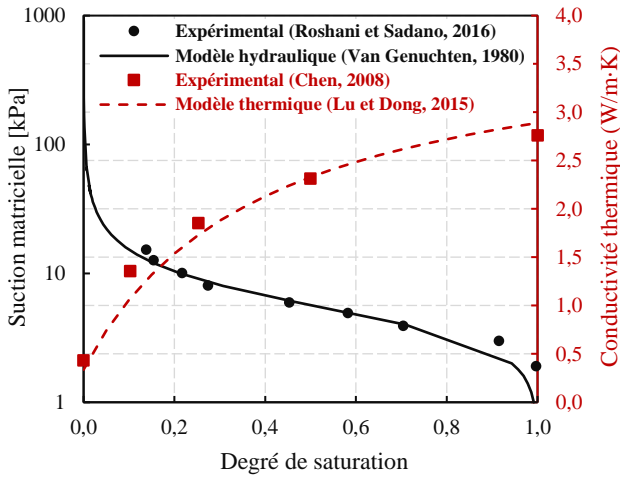


Figure 1. Courbe de rétention et conductivité thermique du sol (données expérimentales vs modèles)

Tableau 1. Propriétés du sol sableux

Matériau	Sable
Porosité	0,39
Masse volumique sèche [kg/m ³]	1650
Perméabilité intrinsèque [m ²]	$1,1 \times 10^{-10}$
Conductivité thermique saturée [W/m·K]	2,89
Conductivité thermique sèche [W/m·K]	0,34
Paramètres de Van Genuchten	n
	α [1/kPa]
	0,22

Tableau 2. Propriétés du revêtement et du coulis

Matériau	Revêtement	Coulis
Densité [kg/m ³]	2500	1850
Conductivité thermique [W/m·K]	1,12	0,655

2.3 Opérations thermiques

Chaque simulation comprend trois étapes: (i) initialisation hydraulique, (ii) initialisation thermique et (iii) activation thermique. Lors de l'initialisation hydraulique (i), le niveau de la nappe phréatique (Z_n) est défini et le modèle est exécuté jusqu'à l'équilibre. L'initialisation thermique (ii) applique la température de l'air dans le tunnel et à la surface du sol pendant deux ans afin d'établir le profil des températures de référence en fonction de la profondeur (Magdy et al., 2025b). L'activation thermique (iii) inclut une période de chauffage du 30 novembre au 28 février (90 jours), suivi de 96 jours de récupération et d'une période de rafraîchissement du 4 juin au 2 septembre (90 jours) (figure 3). Les températures d'entrée du fluide sont constantes pendant chaque phase: 4 °C pour le chauffage et 28 °C pour le rafraîchissement, avec une vitesse du fluide caloporteur de 0,9 m/s. La figure 3

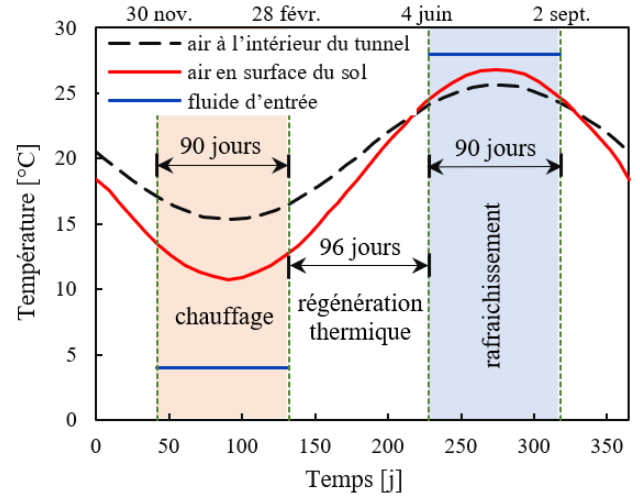


Figure 3. Températures imposées au modèle.

présente également les températures de l'air en surface du sol et de l'air à l'intérieur du tunnel, définies à partir d'une interpolation continue des données relevées sur la ligne 1 du métro de Turin (Insana, 2020).

3 RESULTATS ET DISCUSSIONS

Cette étude a été menée en faisant varier trois paramètres clés, à savoir la vitesse de l'écoulement souterrain (V_e), le niveau de la nappe (Z_n) et la distance libre (D_L) entre les deux tunnels, afin d'évaluer leur influence sur l'efficacité des échanges thermiques. Les résultats sont présentés en termes de puissance thermique moyenne échangée (c'est-à-dire extraite en mode chauffage -hiver- et injectée en mode rafraîchissement -été-). La puissance thermique échangée par unité de surface du revêtement, $Q(t_n)$ [W/m²], à un instant donné, est calculée comme suit:

$$Q(t_n) = \dot{m} c_f |T_{\text{out}} - T_{\text{in}}| / A_l \quad (4)$$

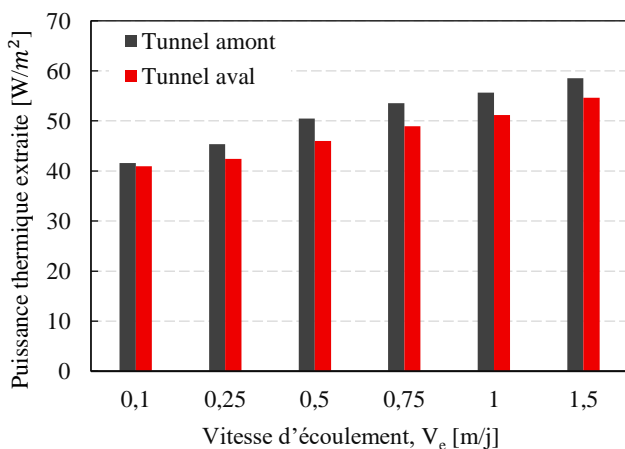
où \dot{m} est le débit massique [kg/s], c_f est la capacité thermique spécifique du fluide caloporteur, qui varie automatiquement en fonction de la température dans le logiciel. Toutefois, elle est ici considérée constante et égale à 4186 J/kg·K pour simplifier le calcul. A_l est la surface thermiquement activée en contact avec le sol [m²], et T_{out} et T_{in} sont respectivement les températures de sortie et d'entrée du fluide [K]. Pour calculer la puissance moyenne échangée sur la période de fonctionnement, la puissance thermique échangée pour un petit intervalle de temps est approximée par une forme trapézoïdale fine. Ensuite, la puissance thermique moyenne échangée sur la durée de fonctionnement de 90 jours pour chaque saison est calculée en sommant les contributions individuelles et en les divisant par la durée totale (intégrale de l'éq. 4).

3.1 Influence de la vitesse d'écoulement (V_e)

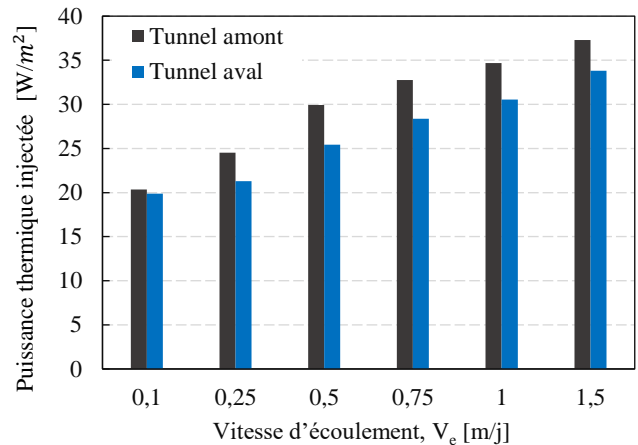
L'influence de la vitesse de l'écoulement souterrain (V_e) est présentée à la [figure 4](#). Les tunnels, dans ce cas, sont totalement immergés sous la nappe phréatique ($Z_n = 9\text{m}$) et la distance libre (D_L) est égale au diamètre extérieur du tunnel (D). L'effet est analysé sur la puissance thermique échangée en modes chauffage (en hiver) et rafraîchissement (en été). La [figure 5](#) illustre, pour une seule valeur de $0,1\text{ m/j}$, les interférences thermiques entre les deux tunnels à titre d'exemple.

Lorsque V_e augmente, la différence d'échange thermique entre les tunnels amont et aval augmente jusqu'à $0,5\text{ m/j}$ puis diminue pour des vitesses plus élevées. Les différences de puissance thermique extraite moyenne sont de $1,46\%$, $6,42\%$, $8,85\%$, $8,64\%$, $7,99\%$ et $6,60\%$ pour V_e de $0,10$, $0,25$, $0,50$, $0,75$, $1,0$ et $1,5\text{ m/j}$, respectivement ([figure 4a](#)), tandis que les différences de puissance thermique injectée moyenne en mode rafraîchissement sont de $2,18\%$, $13,19\%$, $15,09\%$, $13,47\%$, $11,91\%$ et $9,36\%$ pour les mêmes vitesses ([figure 4b](#)). Jusqu'à $0,5\text{ m/j}$, les panaches thermiques du tunnel amont réduisent fortement l'efficacité du tunnel aval, provoquant des variations notables de la température du sol. Ces panaches thermiques intensifient les interférences thermiques entre les tunnels, entraînant une diminution notable dans la zone d'extraction en hiver ou une augmentation de la température du sol dans la zone d'injection en été ([figure 5](#)).

Pour des vitesses supérieures à $0,5\text{ m/j}$, la tendance à la diminution de la différence de puissance thermique entre les deux tunnels est attribuée à l'influence croissante de la recharge thermique. Cet effet réduit l'impact des panaches thermiques, rendant les interférences thermiques moins significatives.

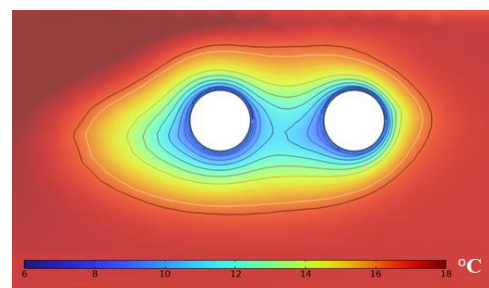


a- Mode chauffage (hiver)

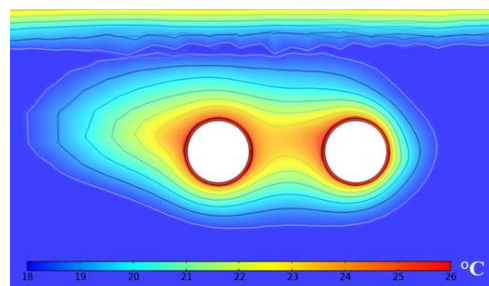


b- Mode rafraîchissement (été)

Figure 4. Puissance thermique moyenne échangée selon la vitesse d'écoulement ($Z_n = 9\text{m}$, $D_L = D$)



a- Mode chauffage (hiver)



b- Mode rafraîchissement (été)

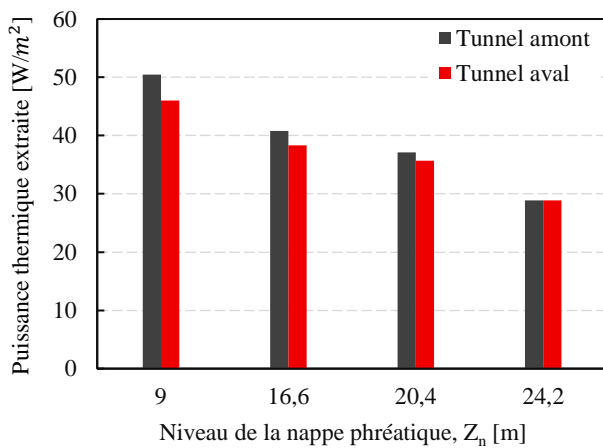
Figure 5. Interférences thermiques des tunnels bi-tubes à une vitesse d'écoulement souterrain (V_e) de $0,10\text{ m/j}$ ($Z_n = 9\text{m}$, $D_L = D$)

3.2 Influence du niveau de la nappe phréatique (Z_n)

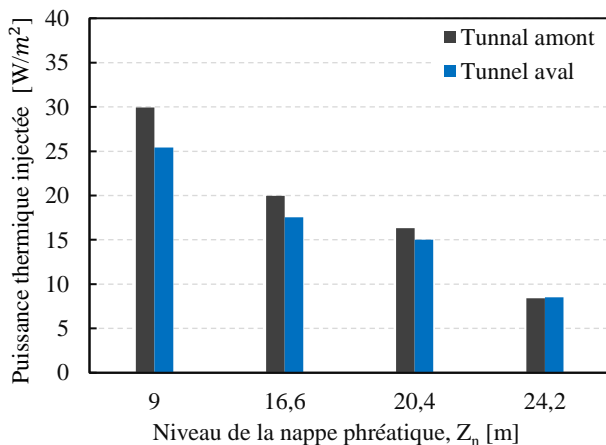
L'influence du niveau de la nappe phréatique (Z_n) sur la puissance thermique échangée moyenne, pour des vitesses d'écoulement de $0,50\text{ m/j}$, est présentée dans la [figure 6](#). Lorsque le Z_n se rapproche du radier du tunnel ($20,4\text{ m}$), la différence de puissance échangée entre les tunnels amont et aval diminue fortement, aussi bien en mode chauffage qu'en mode rafraîchissement. Par exemple, cette différence passe de $8,85\%$ à $3,75\%$ en mode chauffage et de $15,09\%$ à $7,92\%$ en mode rafraîchissement lorsque le Z_n est abaissé de

9 m (tunnels totalement immergés) jusqu'au radier. Cette diminution résulte de la réduction des interférences thermiques, comme montré dans la [figure 7](#).

Lorsque le Z_n est encore abaissé à 24,2 m (sous le radier), la puissance échangée devient identique dans les deux tunnels en raison de l'absence d'eau souterraine, ce qui empêche la propagation des panaches thermiques du tunnel amont vers le tunnel aval. Cette absence est également attribuée à la faible conductivité thermique du sable en conditions sèches, ce qui limite l'extension de la zone d'influence thermique.

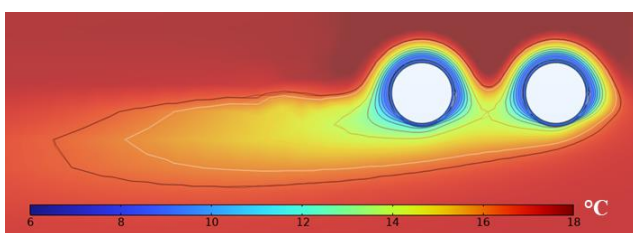


a- Mode chauffage (hiver)

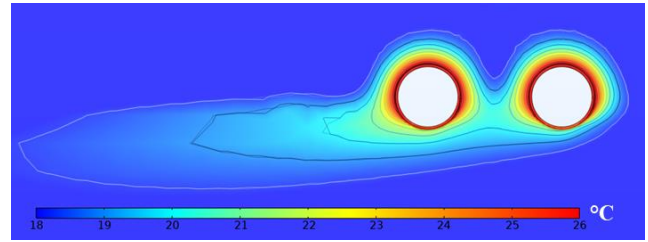


b- Mode rafraichissement (été)

Figure 6. Puissance thermique moyenne échangée selon le niveau de la nappe ($V_e = 0.5m/j$, $D_L = D$)



a- Mode chauffage (hiver)



b- Mode rafraichissement (été)

Figure 7. Interférences thermiques des tunnels pour $Z_n = 20,4$ m (radier du tunnel) – ($V_e = 0,5$ m/j, $D_L = D$)

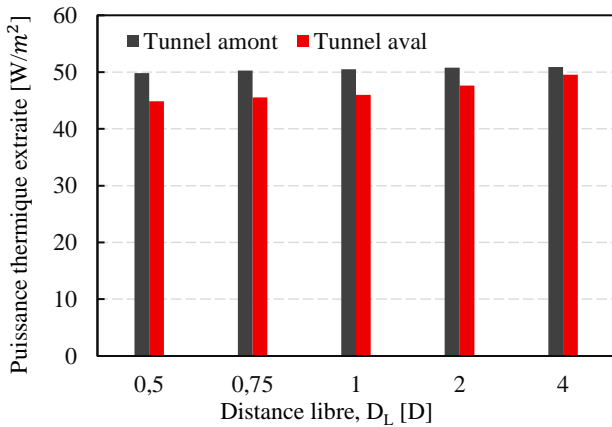
3.3 Influence de distance libre (D_L)

L'influence de la D_L a été étudiée pour des D_L entre $0.5D$ et $4D$ pour V_e de $0,25$, $0,50$ et $1,0$ m/j ([figure 8](#) pour $0,5$ m/j, à titre d'exemple). Globalement, les différences de puissance thermique échangées entre les tunnels amont et aval diminue lorsque la D_L augmente, avec une différence maximale à $0.5D$ pour toutes les V_e , en raison de l'influence marquée des panaches thermiques et des fortes interférences thermiques. Lorsque la D_L augmente, l'effet des panaches thermiques diminue nettement. Pour V_e égale à $0,50$ m/j, le tunnel aval extrait respectivement $9,90\%$, $9,45\%$, $8,85\%$, $6,26\%$, et $2,66\%$ de moins que le tunnel amont aux D_L de $0.5D$, $0.75D$, D , $2D$ et $4D$; les valeurs de puissance injectée présentent des réductions similaires de $16,52\%$, $15,85\%$, $15,09\%$, $11,58\%$, et $6,43\%$. À faible D_L , les interférences thermiques diminuent également la puissance extraite par le tunnel amont: par exemple, à $D_L = 0.5D$, la puissance est $2,2\%$ inférieure à celle obtenue à $D_L = 4D$.

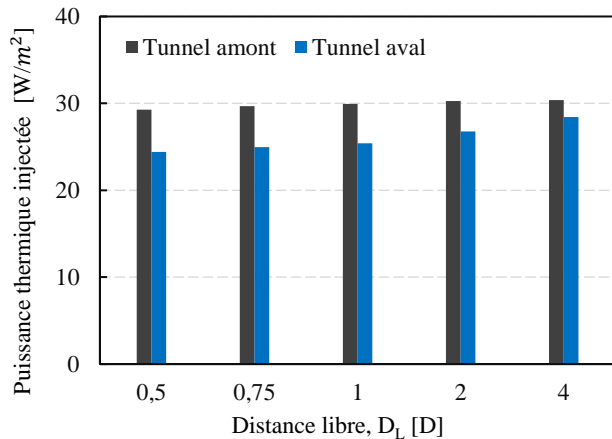
Les résultats mettent en évidence une relation étroite entre D_L et V_e . À $V_e = 0,25$ m/j, les différences de puissance thermique échangée entre le tunnel aval amont et le tunnel amont diminue fortement lorsque D_L passe de $0,5D$ à $2D$, puis devient marginale ([figure 9](#)). Lorsque $V_e = 0,50$ m/j, une réduction quasi linéaire de la différence est observée avec l'augmentation de D_L de $0,5D$ à $4D$. Les différences restent supérieures à celles observées pour $V_e = 0,25$ m/j. Par exemple, pour $V_e = 0,25$ m/j et $D_L = 2D$, cette différence atteint $2,62\%$ en chauffage et $6,45\%$ en rafraîchissement, un comportement attribué à l'augmentation de la D_L entre les tunnels et au retard d'arrivée des panaches thermiques. Pour une même D_L , les différences atteignant $6,26\%$ en chauffage et $11,58\%$ en rafraîchissement. Cette augmentation est liée à l'arrivée plus rapide des panaches thermiques.

À $V_e = 1$ m/j, les différences sont inférieures à celles observées pour $V_e = 0,50$ m/j jusqu'à $D_L = 2D$. Ce comportement est attribué à l'effet de recharge thermique induit par l'écoulement rapide, comme discuté précédemment. Au-delà de $D_L = 2D$, les

différences deviennent légèrement inférieures dans le cas de $V_e = 0,50 \text{ m/j}$, en raison du retard d'arrivée des panaches thermiques. Par ailleurs, pour de $V_e = 0,25 \text{ m/j}$ et des D_L allant jusqu'à $2D$, l'écoulement d'air à l'intérieur en période de chauffage contribue à réduire les différences entre les deux tunnels. En revanche, en période de rafraîchissement, les échanges thermiques avec l'air intérieur du tunnel étant quasi négligeables en raison du faible écart de température (figure 3), l'influence du panache thermique chaud devient significative pour $V_e = 0,25$ et $0,5 \text{ m/j}$, accentuant ainsi les différences entre les deux tunnels. À l'inverse, pour $V_e = 1 \text{ m/j}$, la recharge thermique, réduisant les différences par rapport aux cas $V_e = 0,25$ et $0,5 \text{ m/j}$. Cette réduction survient pour le cas de $V_e = 0,25 \text{ m/j}$ avec des D_L inférieures à environ $1,25D$ et se prolonge jusqu'à environ $3,50D$ pour $V_e = 0,5 \text{ m/j}$. Au-delà, les différences entre les deux tunnels pour les cas $V_e = 0,25$ et $0,5 \text{ m/j}$ sont inférieure à celui de $V_e = 1 \text{ m/j}$, à cause du retard d'arrivée des panaches thermiques. Ces résultats soulignent l'importance de considérer conjointement V_e et D_L dans l'évaluation des tunnels énergétiques bi-tubes.

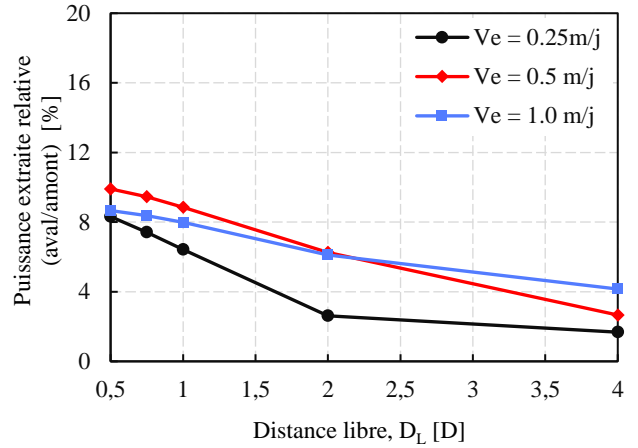


a- Mode chauffage (hiver)

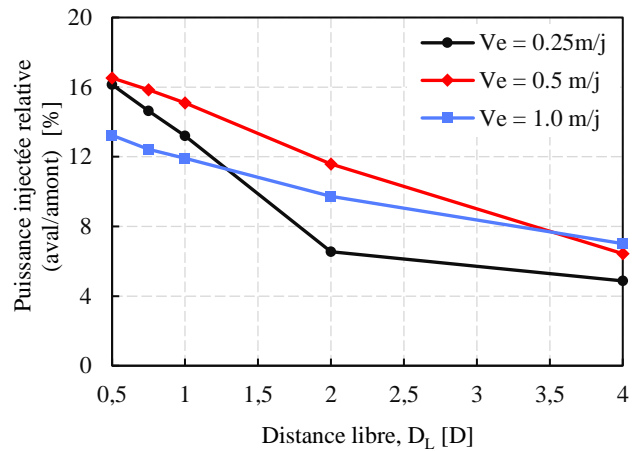


b- Mode rafraîchissement (été)

Figure 8. Puissance thermique moyenne échangée selon la distance libre (D_L) ($V_e = 0,5 \text{ m/j}$, $Z_n = 9 \text{ m}$)



a- Mode chauffage (hiver)



b- Mode rafraîchissement (été)

Figure 9. Puissance thermique moyenne échangée relative (aval/amont)% selon la distance libre (D_L) et la vitesse d'écoulement (V_e) - ($Z_n = 9 \text{ m}$)

4 CONCLUSIONS

Après la validation de l'approche numérique, un modèle éléments finis 3D a été développé pour étudier la performance thermique de deux tunnels énergétiques bi-tubes dans un sol sableux. Les principales conclusions de cette étude sont les suivantes:

- Les panaches thermiques générés par le tunnel amont réduisent l'efficacité d'échange thermique du tunnel aval, et cette diminution devient plus marquée lorsque la vitesse d'écoulement souterrain augmente jusqu'à $0,5 \text{ m/j}$ (pour une distance entre les tunnels égales à leur diamètre).
- Au-delà de $0,5 \text{ m/j}$, l'influence croissante de la recharge thermique devient prédominante, ce qui atténue l'effet des panaches thermiques du tunnel amont sur le tunnel aval.
- L'impact des panaches thermiques devient moins significatif lorsque la nappe atteint le radier des

tunnels, ceux-ci se trouvant alors en conditions partiellement saturées.

- La différence des puissances échangées entre les tunnels amont et aval diminue avec l'augmentation de la distance libre.
- La distance libre optimale dépend fortement de la vitesse d'écoulement souterrain.

Les résultats montrent que les interférences thermiques entre les tunnels énergétiques bi-tubes réduisent l'efficacité thermique du tunnel aval. Cependant, en connaissant le niveau de la nappe phréatique et la vitesse d'écoulement souterrain, il est possible d'optimiser la distance libre afin de minimiser efficacement ces interactions thermiques.

Enfin, cette étude s'est limitée à un écoulement perpendiculaire à l'axe des tunnels. D'autres directions d'écoulement souterrain courantes en milieu urbain, notamment parallèles ou inclinées, devraient être explorées dans de futurs travaux, car elles pourraient induire des interférences thermiques plus faibles et donc une amélioration de l'efficacité d'échange.

REMERCIEMENTS

Ce travail a été financé par le gouvernement français, via l'Agence Nationale de la Recherche (ANR) dans le cadre du programme France 2030 (référence ANR-22-EXSS-0011). Le laboratoire 3SR fait partie du LabEx Tec 21 (Investissements d'Avenir – convention de subvention n° ANR-11-LABX-0030).

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

- Alqawasmeh, Q.I., Kreitmair, M.J., & Narsilio, G.A. (2025). The role of ground hydrothermal spatial variability on energy pile group thermal performance. *Computers and Geotechnics*, 179, 106983. <https://doi.org/10.1016/j.compgeo.2024.106983>
- Baralis, M., Barla, M., Bogusz, W., Di Donna, A., Rzyński, G., Żeruš, M. (2018). Geothermal potential of the NE extension Warsaw (Poland) metro tunnels. *Environmental Geotechnics*, Vol. 7, pp. 282–294. <https://doi.org/10.1680/jenge.18.00042>
- Barla, M., Di Donna, A. and Perino, A. (2016). Application of energy tunnels to an urban environment. *Geothermics*, Vol. 61, pp. 104–113. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2016.01.014>
- Barla, M., Di Donna, A. and Insana, A. (2019). A novel real-scale experimental prototype of energy tunnel. *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 87, pp. 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2019.01.024>
- Chen, S.X. (2008). Thermal conductivity of sands. *Heat and Mass Transfer*, Vol. 44, pp. 1241–1246. <https://doi.org/10.1007/s00231-007-0357-1>
- De Feudis, S., Insana, A., & Barla, M. (2024). Seizing the opportunity of energy retrofitting of existing tunnels. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 154, 106109. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2024.106109>
- Insana, A. and Barla, M. (2020). Experimental and numerical investigations on the energy performance of a thermo-active tunnel. *Renewable Energy*, Vol. 152, pp. 781–792. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2020.01.086>
- Insana, A. (2020). Thermal and structural performance of energy tunnels. PhD Thesis, Politecnico di Torino. https://theses.hal.science/tel-03245445v1/file/86159_INSANA_2020_archivage.pdf
- Lu, N. and Dong, Y. (2015). Closed-form equation for thermal conductivity of unsaturated soils at room temperature. *Journal of Geotechnical and Geoenvironmental Engineering*, Vol. 141. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)GT.1943-5606.0001295](https://doi.org/10.1061/(ASCE)GT.1943-5606.0001295)
- Magdy, A., Ogunleye, O., Mroueh, H., Di Donna, A. and Singh, R. M. (2025a). A review of exploiting shallow geothermal energy through tunnels: current status and future prospects. *Renewable Energy*, Vol. 238, p. 121958. <https://doi.org/10.1016/j.renene.2024.121958>
- Magdy, A., Di Donna, A. and Mroueh, H. (2025b). Impact of groundwater level and soil air entry suction on energy tunnels' thermal performance. *Environmental Geotechnics*, pp. 1–17. <https://doi.org/10.1680/jenge.25.00020>
- Magdy, A., Di Donna, A. and Mroueh, H. (2025c). Thermal influence zone of energy tunnels in sandy soils under the hydrostatic condition. *Geomechanics for Energy and the Environment*, p. 100716. <https://doi.org/10.1016/j.gete.2025.100716>
- Magdy, A., Di Donna, A. and Mroueh, H. (2025d). Heat exchange and thermal interactions of twin energy tunnels in sand. *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 166, p. 106958. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2025.106958>
- Magdy, A., Di Donna, A., & Mroueh, H. (2026). Thermal performance of energy tunnels in partially saturated soils. In *International Conference of the International Association for Computer Methods and Advances in Geomechanics* (pp. 800–805). Singapore: Springer Nature Singapore. https://doi.org/10.1007/978-981-95-5969-5_113
- Roshani, P. and Sedano, J.A.I. (2016). Incorporating temperature effects in soil–water characteristic curves. *Indian Geotechnical Journal*, Vol. 46, pp. 309–318. <https://doi.org/10.1007/s40098-016-0201-y>
- ten Bosch, S., Ravera, E., Tobler, M., Bettelini, M., & Laloui, L. (2025). Evaluating the geothermal potential of a metro station considering its airflow conditions. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 163, 106697. <https://doi.org/10.1016/j.tust.2025.106697>
- van Genuchten, M.T. (1980). A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Science Society of America Journal*, Vol. 44, pp. 892–898. <https://doi.org/10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x>