

Couplage entre diffusion de la chaleur et évaporation d'eau dans le béton pour la réduction des ICU

Asma Bessassi, Frédéric Grondin, Benoît Hilloulin, Ahmed Loukili

Nantes Université, Ecole Centrale Nantes, CNRS, GeM, UMR 6183, F-44000 Nantes, France

RESUME

Les îlots de chaleur urbains (ICU) sont des zones urbaines où la température est significativement plus élevée que celle des zones rurales environnantes. Leur formation est due à plusieurs facteurs : les matériaux urbains absorbent et retiennent la chaleur du soleil, le manque de végétation qui limite l'évapotranspiration naturelle, la densité des bâtiments qui limite la circulation de l'air et retient la chaleur, les sources de chaleur artificielles comme les voitures, les climatiseurs, les industries, etc. Les conséquences sont néfastes avec un inconfort thermique accru pour les habitants, une consommation énergétique plus élevée, des effets sur la santé ou encore l'aggravation de la pollution de l'air. Les solutions étudiées depuis quelques années sont par exemple l'augmentation de la végétalisation, l'utilisation de matériaux réfléchissants pour les chaussées, l'amélioration de la planification urbaine pour favoriser la ventilation naturelle. Une autre solution plus récemment à l'étude est le rafraîchissement par évaporation d'eau stockée dans les chaussées poreuses.

L'étude réalisée a porté sur une approche numérique pour aider à concevoir un dispositif expérimental pour l'étude de solutions efficaces de rafraîchissement urbain. La modélisation a porté sur le potentiel de rafraîchissement de chaussées urbaines en béton-graves par le calcul des flux thermiques et hydriques diurnes (rayonnement + conduction + convection) et nocturnes (conduction + convection). Le pouvoir évaporatif du béton a été évalué par le modèle de Penman-Monteith (modèle de calcul de l'évapotranspiration des stomates) modifié ici pour les matériaux poreux. L'écoulement hydrique dans la structure a été ensuite calculé par la loi de Fick (VAP). Il a été considéré une circulation d'eau à température constante en sous-sol capable d'absorber une partie de la chaleur emmagasinée le jour (ABS). Les résultats montrent que la capacité de rafraîchissement existe bien avec un ordre croissant de performance dans les situations suivantes :

$VAP_{\text{matériau-sec}} < ABS < ABS + VAP_{\text{matériau-sec}} < ABS_{\text{vitesse-écoulement-sup}} + VAP_{\text{matériau-sec}} < VAP_{\text{matériau-saturé}}$.

Mots-clefs Ilots de chaleur urbains ; rafraîchissement ; évapotranspiration ; Méthode des éléments finis ; couplage thermo-hydrique

I. Introduction

Le réchauffement climatique combiné à l'urbanisation croissante motivée par la recherche d'un mode de vie plus moderne a profondément impacté la qualité de vie en milieu urbain. Ce changement est traduit par une élévation des températures des villes d'une façon beaucoup plus marquée par rapport aux zones rurales avoisinantes, conduisant à la formation des îlots de chaleurs urbains (ICU) surtout pendant la nuit[1]. Ce phénomène ne cesse de s'aggraver, affectant directement les conditions de vie des habitants en augmentant l'inconfort thermique dans les villes, en entraînant une consommation énergétique excessive dans les zones urbaines pour des besoins de climatisation et en aggravant les risques sanitaires liés aux vagues de chaleurs.

Face à ce phénomène, plusieurs stratégies d'atténuation ont été proposées. Parmi elles on trouve la végétation urbaine qui est souvent mise en avant comme une solution prometteuse en raison du pouvoir rafraîchissant de l'évapotranspiration des plantes et de l'effet de l'ombrages[2]. Cependant des études

récentes ont montré que la combinaison entre l'évapotranspiration et la pollution urbaine peut contribuer à la dégradation de la qualité de l'air. [3]

D'autres approches reposent sur l'utilisation des matériaux réfléchissants, capables de renvoyer une partie de rayonnement solaire reçue vers l'atmosphère et maintenir des surfaces plus fraîches. Toutefois, leur efficacité reste limitée à leurs utilisations sur les toits. En effet si ces matériaux réfléchissants sont appliqués sur les chaussées, une grande partie de la chaleur sera renvoyée vers les piétons, ce qui aggrave l'inconfort thermique ressenti.[4] D'autres alternatives s'appuient sur la ventilation selon les formes urbaines qui peut sembler être une piste intéressante mais qui nécessite des transformations profondes et ne peut être envisagée qu'à long terme [5]. Enfin des solutions basées sur l'aménagement de plans d'eau, comme les lacs artificiels et les fontaines ont été proposées, mais leurs effets restent locaux et limité à l'endroit où le plan d'eau est implanté [6].

De nos jours des alternatives innovantes et durables émergent, notamment la construction de chaussées en béton poreux, qui se démarquent par leur capacité à rafraîchir passivement l'air ambiant grâce à l'évaporation de l'eau infiltrée dans leur structure en s'inspirant du processus de l'évapotranspiration des plantes. L'objectif est de limiter la surchauffe urbaine en exploitant le pouvoir rafraîchissant de l'évaporation, surtout la nuit. En effet, plusieurs études sur le béton poreux ont montré que, le jour, l'évaporation est souvent excessive et neutralisée par le fort rayonnement solaire, ce qui réduit son efficacité[7]. A l'inverse la nuit, cette évaporation abaisse la température de l'air au-dessus des chaussées, ce qui intensifie les échanges thermiques avec les constructions urbaines, favorisant leur refroidissement progressif. Ce refroidissement contribue à diminuer l'humidité relative de l'air, qui devient alors plus apte à absorber de la vapeur d'eau, renforçant à son tour le processus évaporatif. Ce mécanisme en chaîne atténue les îlots de chaleur urbains et permet de maintenir des environnements intérieurs plus frais, participant ainsi à un rafraîchissement global.

Cependant, cette solution nécessite une analyse approfondie en raison de la grande diversité des matériaux poreux et de leurs comportements thermo-hydriques variables. De légères variations de propriétés peuvent en effet influencer significativement les transferts couplés de chaleur et d'eau au sein de la structure.

Dans ce contexte, notre projet vise à mieux comprendre ces interactions et leur impact sur l'efficacité du refroidissement urbain. Avant d'entreprendre la phase expérimentale, une étude préliminaire a été menée à l'aide du logiciel COMSOL Multiphysics. Le modèle développé, basé sur une version adaptée de Penman-Monteith et la loi de Fick, a permis de simuler le comportement évaporatif des chaussées en béton poreux selon trois scénarios : une structure sèche en considérant que l'évaporation se produit à partir d'un réservoir d'eau en dessous de la structure ($VAP_{matériau-sec}$), une structure totalement saturée en eau ($VAP_{matériau-saturé}$), et un cas avec circulation d'eau au-dessous de la chaussée (ABS), jouant un rôle de régulation thermique.

II. Présentation du modèle numérique

A. Cadre théorique de l'étude

- Le transfert de chaleur dans la structure :

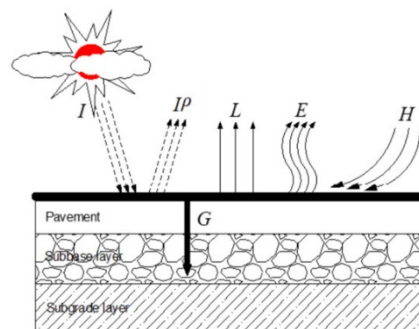


Figure 1 Le bilan énergétique qui se produit à la surface de chaussée [7]

A la surface de la chaussée, plusieurs mécanismes d'échange thermique interviennent entre la surface et son environnement incluant les couches profondes et l'air environnant (figure1[8]). Ces mécanismes incluent l'absorption du rayonnement solaire incident, la convection avec l'air ambiant, le rayonnement infrarouge de la surface, la conduction thermique vers les couches internes et l'évaporation de l'eau en surface. Le bilan énergétique global qui se produit est décrit par l'équation suivante :

$$I(1 - \alpha) = G + L + H + E \quad (1)$$

Où I désigne le rayonnement solaire incident exprimé en (W.m⁻²), G la conduction de la surface vers les couches profondes exprimée en (W.m⁻²), H est la convection de la chaleur exprimée en (W.m⁻²), L désigne le rayonnement infrarouge de la surface exprimé en (W.m⁻²), et E est l'évaporation à la surface exprimée en (W.m⁻²). α ici désigne l'albédo, c'est-à-dire la fraction de l'énergie solaire réfléchiée par la surface.

La conduction de surface vers les couches profondes est présentée par la formule suivante

$$G = k_{cond} \times \left(\frac{T_s - T_1}{\Delta x} \right) \quad (2)$$

Où k_{cond} est la conductivité thermique de la surface en béton exprimé en (W.m⁻¹.K⁻¹), T_s et T_1 sont respectivement les températures de la surface et le premier point dans les couches profondes en (K) et Δx est le déplacement entre les deux points.

Le flux convectif de la chaleur est exprimé par :

$$H = h_{conv}(T_s - T_{amb}) \quad (1)$$

Où T_{amb} est la température ambiante et h_{conv} (W.m⁻². K⁻¹) représente le coefficient de convection thermique qui peut être estimé selon la vitesse du vent comme suit [9]:

$$h_{conv} = 5.6 + 4.0 v_{wind} \quad \text{si } v_{wind} \leq 5 \text{ m/s} \quad (4)$$

$$h_{conv} = 7.2 \times v_{wind}^{0.78} \quad \text{si } v_{wind} \geq 5 \text{ m/s} \quad (5)$$

Le rayonnement infrarouge émis par la surface vers l'environnement extérieur est calculé par cette formule

$$L = \sigma \epsilon_s (T_s^4 - T_{amb}^4) \quad (6)$$

Où S (m²) représente la surface d'échange thermique, T_s et T_{amb} sont respectivement la température de surface du matériau et la température ambiante en (K), σ constante de Stefan-Boltzmann (5.67 × 10⁻⁸ W.m⁻².K⁻⁴) et ϵ_s est l'émissivité de surface

Le flux de chaleur résultant de l'évaporation de l'eau est calculé selon l'équation ci-après

$$E = ER \times \frac{h_{lv}}{3.6} \quad (7)$$

Avec h_{lv} la chaleur latente d'évaporation exprimé en (kJ.kg⁻¹) et ER est le taux d'évaporation exprimé en (kg.m⁻².s⁻¹)

Le taux d'évaporation en surface est estimé par l'équation de Penman-Monteith adaptée ici pour les matériaux poreux. Ce choix repose sur la capacité de ce modèle à intégrer les diverses conditions climatiques extérieures. Ce modèle, initialement conçu pour calculer l'évapotranspiration des plantes, est ajusté dans cette étude afin d'estimer le taux d'évaporation à travers les structures poreuses en supposant que les deux mécanismes reposent sur des principes similaires, notamment en ce qui concerne le couplage entre le transfert de chaleur et d'humidité. Seule l'équation principale du modèle de Penman-Monteith est présentée dans cet article. Les développements détaillés des calculs des variables intermédiaires sont disponibles dans les publications de la FAO[10]. L'équation générale du

modèle permet de définir alors l'évapotranspiration potentielle estimée (ETP), exprimée en millimètres par jour (mm.j⁻¹):

$$ER = TE = \frac{[E_{eva}] + [E_{atm}]}{\lambda \cdot [R_{eva}]} = \frac{\Delta \cdot (R_n - G) + \frac{\rho \cdot C_p \cdot \delta e}{r_a}}{h_{lv} \left[\Delta + \gamma \left(1 + \frac{r_s}{r_a} \right) \right]} \quad (8)$$

Où Δ (kPa. °C⁻¹) représente la pente de la courbe de pression de vapeur à la température moyenne de l'air, R_n [W.m⁻²] La radiation nette, G (W.m⁻²) la quantité de chaleur dans le sol, ρ (Kg.m⁻³) la masse volumique de l'air à pression constante, C_p (1.013 10⁻³ (J.kg⁻¹. °C⁻¹)) la capacité calorifique spécifique de l'air humide a pression constante, δe la différence entre la pression de vapeur saturante e^o et la pression de vapeur effective e_a (KPa), r_a (s.m⁻¹) la résistance aérodynamique, r_s (s.m⁻¹) la résistance au passage de la vapeur à travers l'ensemble de la surface des feuilles, γ (KPa. °C⁻¹) la constante psychométrique.

Le modèle a été ajusté au niveau de la résistance au passage des vapeurs. En effet chez les plantes cette constante est bien définie dans la littérature mais ce n'est pas le cas pour les matériaux de construction, nous l'avons donc approximé comme l'inverse de la perméabilité à l'eau.

- Le transport de vapeur dans la structure :

Dans ce modèle, le processus de transport de vapeur au sein du matériau poreux est régi par le gradient de concentration de vapeur d'eau (∇c_i) et le coefficient de diffusion (D_e) conformément à la première loi de Fick [11]

$$J = -D_e \nabla c_i \quad (9)$$

Le coefficient de diffusion dépend fortement de l'état de saturation du milieu, c'est-à-dire s'il est saturé ou partiellement saturé.

Dans un milieu partiellement saturé, la saturation en eau intervient dans l'expression du coefficient de diffusion qui devient [12] :

$$D_e = \frac{\theta}{\tau_L} D_L \quad (10)$$

Avec D_L le coefficient de diffusion dans le liquide exprimé en (m².s⁻¹) et θ la teneur volumique en eau, c'est à dire la quantité d'eau disponible dans le milieu poreux qui s'exprime comme suit:

$$\theta = S \times \varepsilon_p \quad (11)$$

Avec S la saturation en eau (fraction de la porosité occupée par l'eau)

Dans un milieu saturé (c'est-à-dire $S=1$), le coefficient de diffusion est une fonction de la porosité ε_p et de la tortuosité du milieu τ_L , et se calcule comme suit :

$$D_e = \frac{\varepsilon_p}{\tau_L} D_L \quad (12)$$

- L'écoulement de l'eau en dessous de la structure de chaussée :

L'écoulement de l'eau au-dessous de la structure de chaussée est modélisé à l'aide des équations de Navier-Stokes, qui traduisent la conservation de la quantité de mouvement et de la masse dans un fluide. Pour un fluide newtonien incompressible comme l'eau, l'équation modélisant le mouvement s'exprime comme suit [13]:

$$\frac{\partial u}{\partial t} + (u \cdot \nabla)u = -\frac{1}{\rho} \nabla p + \nu \Delta u + f \quad (13)$$

Où u désigne ici le champ de vitesse du fluide qui dépend du temps t et de la position (x,y) .

La conservation de la masse du fluide en mouvement est décrite par l'équation de continuité. En prenant en compte l'incompressibilité du fluide (ρ est constante), cette équation s'écrit comme suit :

$$\text{div } u = 0 \Leftrightarrow \nabla \cdot (\rho u) = 0 \quad (14)$$

B. Géométrie de la structure et hypothèses de modélisation

La structure modélisée est composée d'un réservoir contenant de l'eau pour alimenter le processus d'évaporation qui est située entre les niveaux 0 et 0,3 m. La base du réservoir d'eau est maintenue à une température de 20°C pour simuler une alimentation continue de cette eau en souterrain. Le réservoir est surmonté de graves de porosité égale à 35% et d'une hauteur de 0,5 m, sur lequel une fine couche de sable 0,02 m est posée pour assurer le coulage d'une couche de béton d'épaisseur 0,2 m. La surface du béton se situe à 1,02 m au-dessus de laquelle est modélisée une couche d'air d'épaisseur 0,3 m (Figure 2).

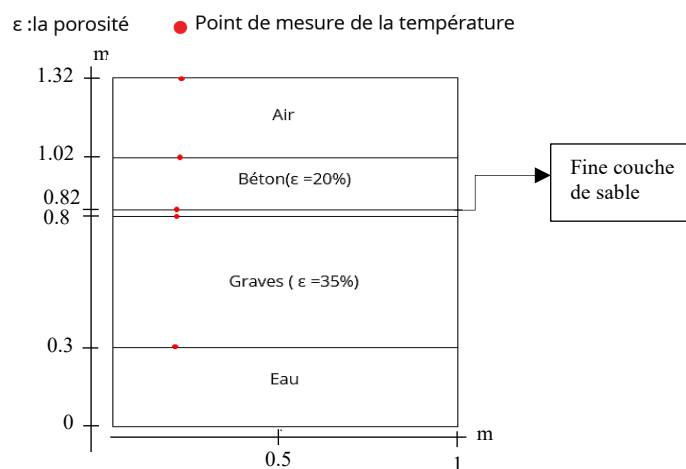


Figure 2 Schéma simplifié du système multicouche étudié avec les points stratégiques d'étude de profil de température

Dans cette étude 3 scénarios sont considérés :

- Evaporation dans la structure poreuse sèche ($VAP_{\text{matériau-sec}}$) : On suppose ici une période estivale très sèche. Le béton est donc considéré sec (où la présence d'eau adsorbée dans les pores est négligeable sur les phénomènes simulés) et l'humidité initiale de l'air est très faible ce qui favorise l'évaporation.
- Evaporation d'eau avec un milieu saturé ($VAP_{\text{matériau-saturé}}$) : dans ce cas on suppose que la structure de chaussée est saturée en eau, par exemple suite à un arrosage en surface, mais l'humidité de l'air reste faible, permettant une évaporation de l'eau contenue dans les matériaux
- Ecoulement d'eau froide sous la structure des chaussées chaudes (ABS) : dans ce cas de l'eau pure circule sous la structure de chaussée. L'objectif est d'évaluer l'effet de transfert de chaleur entre l'eau froide et la structure chaude.

Le cas de refroidissement naturel (sans prendre en compte ni l'évaporation ni l'écoulement de l'eau) est pris comme un cas de référence pour une comparaison d'efficacité des différentes stratégies de rafraîchissement.

La simulation diurne a été réalisée sur une durée de 8h équivalant à 8h d'ensoleillement constant. Au début de cette phase, l'ensemble du système (structure multicouche de chaussée, air ambiant et eau) est initialement mis à basse température afin de représenter un état thermique froid. Les valeurs de température initiales utilisées sont répertoriées dans le tableau présenté en annexe.

La simulation nocturne a été réalisée sur 10h, correspondant à une période sans ensoleillement. Les résultats se stabilisent au cours de cet intervalle, seules ces données ont été retenues afin de faciliter leur visualisation.

Les conditions aux limites

Pour les conditions aux limites diurnes, on a pris en compte les différents flux de chaleur qui interviennent dans le bilan énergétique présenté dans l'équation 1.

Un rayonnement solaire incident constant et égale à 800 W.m^{-2} est appliqué à la surface de la chaussée, représentant une valeur moyenne estivale où les températures diurnes atteignent des niveaux élevés. Le flux de chaleur net absorbé par la surface de béton est calculé selon cette formule :

$$\mathbf{R} = \mathbf{I} \times (\mathbf{1} - \alpha) \quad (15)$$

Ce flux génère des échanges convectifs avec l'air ambiant, et le béton émet également une partie de l'énergie reçue sous forme de rayonnement infrarouge. Les paramètres utilisés pour chaque équation sont détaillés dans l'annexe.

La simulation nocturne représente les conditions en l'absence de rayonnement solaire. On élimine le flux thermique incident, focalisant le transfert de chaleur sur le rayonnement infrarouge du béton et de l'air.

Pour inclure l'effet de l'évaporation qui se produit à partir de l'eau contenue dans le réservoir, on considère tout d'abord un équilibre qui se produit entre le vapeur d'eau et l'eau liquide qui peut être modélisé par l'équation de Magnus-Tetens suivante [14], où la pression est calculée en kPa :

$$P_v(T) = 0.6108 \exp \left[\frac{17.27 \times (T - 273.15)}{T_a - 35.85} \right] \quad (16)$$

La concentration de vapeur d'eau à saturation, c_{sat} exprimée en mol.m^{-3} est définie par :

$$c_{sat} = \frac{P_v(T)}{RT} \quad (17)$$

Cette concentration correspond à la quantité maximale de vapeur d'eau que l'air peut supporter à cette température. Le transfert de masse qui se produit dans le domaine de l'eau et du béton est modélisé par :

$$m_{evap} = K_{evap} (a_w \times (c_{sat} - c)) \quad (18)$$

où a_w représente l'activité de l'humidité relative au sein du matériau (comprise entre 0 et 1), K_{evap} le coefficient de transfert de masse (s^{-1}) et c la concentration de vapeur effective.

Finalement, le flux associé à l'évaporation qui refroidit l'air et la surface du béton (Q (W.m^{-2})) est donné par :

$$Q = -h_{lv} \times m_{evap} \quad (19)$$

où h_{lv} représente la chaleur latente d'évaporation exprimée en (J.mol^{-1}). Ce flux de chaleur négatif (refroidissement) est essentiel pour modéliser l'effet de rafraîchissement dû à l'évaporation dans le système.

Dans cette étude un flux évaporatif a été appliqué à la surface selon le modèle de Penman-Monteith. L'ensemble des équations de transfert thermique et de masse a été implémenté dans le logiciel COMSOL Multiphysics en couplant les modules de transfert de chaleur et de transport de matière dans les milieux poreux. Deux vitesses d'entrée de l'eau ont été imposées dans le modèle pour analyser l'impact de la vitesse de circulation sur l'efficacité du rafraîchissement. Les valeurs des différents paramètres utilisés dans le modèle sont répertoriées dans le tableau de [l'annexe 1](#).

III. Les résultats et discussions

A. La simulation diurne

En appliquant un flux de chaleur constant comme une moyenne de rayonnement solaire estivale, le calcul donne, pendant la journée, des températures élevées comparables à celles observées en milieu urbain lors du phénomène des îlots de chaleurs (figure 3).

La température à la surface du béton atteint un maximum d'environ 350 K. À l'interface Eau-Graves ($H = 0,3$ m), la température reste relativement stable, oscillant autour de sa valeur initiale. Aux interfaces Graves-Sable et Sable-Béton les températures augmentent progressivement avec le temps, atteignant des valeurs autour de 315 K. Ces températures serviront de conditions initiales pour les simulations nocturnes au cours desquelles différents scénarii sont comparés afin d'évaluer les efficacités de rafraîchissement selon différentes approches.

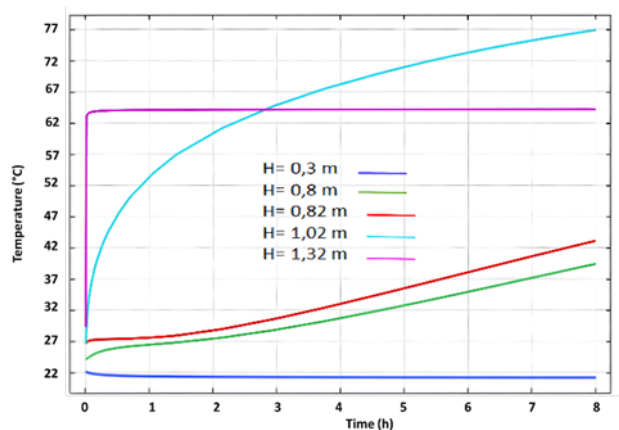


Figure 3 Flux de température dans la structure soumis au rayonnement solaire durant la journée

A. La simulation nocturne en milieu sec

Pour commencer l'étude, un premier cas a été considéré avec une structure de chaussée sèche (l'eau piégée dans les pores est négligée). La courbe (a) de la figure 4 présente les résultats de refroidissement naturel qui prennent en compte uniquement la convection naturelle de chaleur dans l'air. En l'absence d'humidité, la surface ne bénéficie d'aucun mécanisme de rafraîchissement actif. Ce cas constitue une base de comparaison. On remarque une baisse lente de la température de surface due à la restitution de la chaleur emmagasinée dans la structure dans les couches profondes et dans l'air au-dessus de la surface.

Le béton renvoie une partie de la chaleur stockée dans l'air et une partie dans le sable qui avait au début de la nuit une température plus faible. Lorsque la température dans le béton devient inférieure à celle dans le sable et les graves, ces derniers renvoie la chaleur dans l'eau souterraine. En supposant un maintien de la base du réservoir d'eau à 20°C , cela permet au système de voir sa chaleur diminuer.

L'introduction de l'évaporation comme mécanisme de transfert thermique améliore significativement le rafraîchissement et permet de réduire la température d'environ 4°C supplémentaires (courbes (b) de la figure 4). Ceci s'explique par le transfert de chaleur des couches profondes vers l'eau qui utilise une partie de cette énergie sous forme de chaleur latente pour s'évaporer et qui explique la baisse thermique observée.

Les deux courbes (c) et (d) (figure 4) correspondent aux cas intégrant une circulation d'eau qui se trouve dans la couche inférieure avec deux vitesses différentes tel que $V_1 < V_2$. Dans ce cas, le mécanisme de rafraîchissement repose sur l'échange direct de chaleur entre l'eau froide injectée et la structure chaude. Ce mécanisme entraîne une baisse marquée de la température par rapport au cas de référence. De plus, l'effet de refroidissement est plus marqué si on augmente la vitesse de circulation de l'eau, grâce à la capacité de l'eau en mouvement d'absorber une plus grande quantité de chaleur.

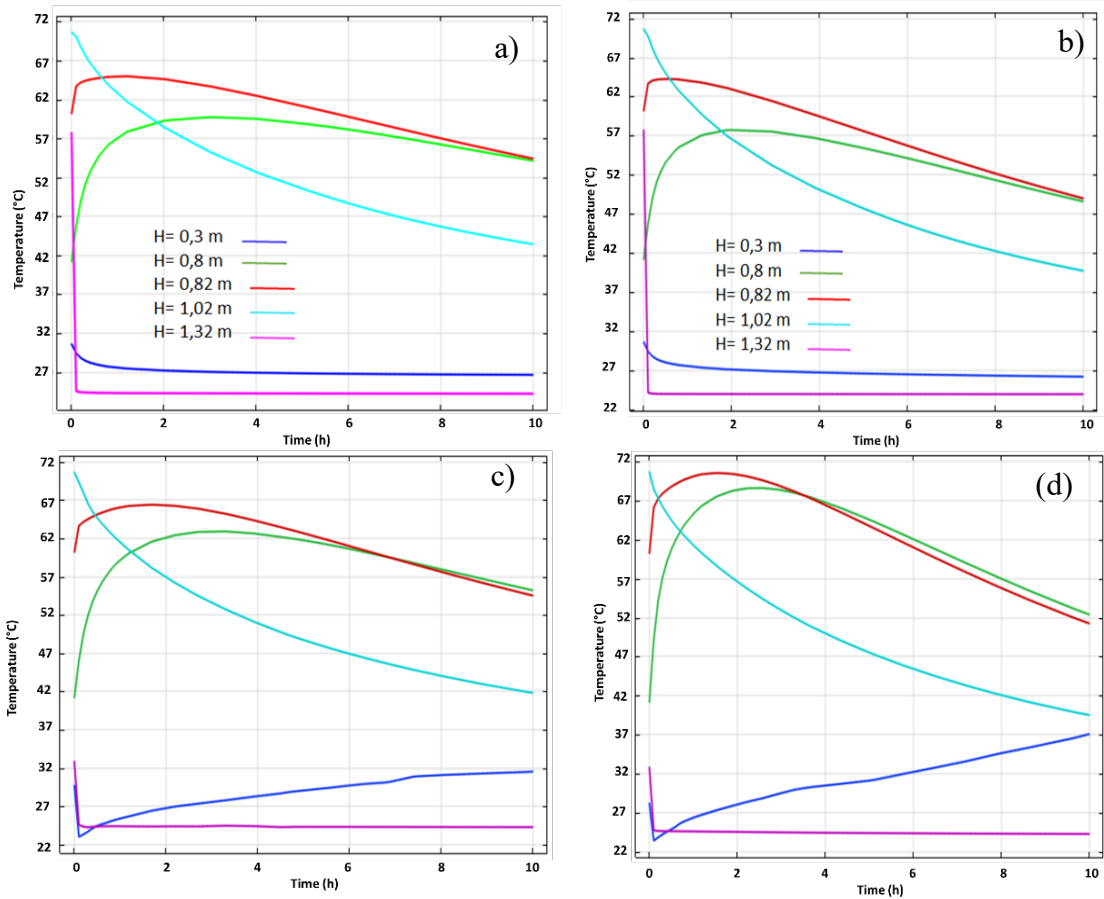


Figure 4 Les profils de température durant la nuit : a) Les températures nocturnes en cas de refroidissement naturel, b) Les températures nocturnes en cas d'évaporation d'eau, c) Les températures nocturnes dans le cas de circulation d'eau froide avec une vitesse V1, d) Les températures nocturnes dans le cas de circulation d'eau froide avec une vitesse V2

B. La simulation nocturne dans milieu saturé en eau

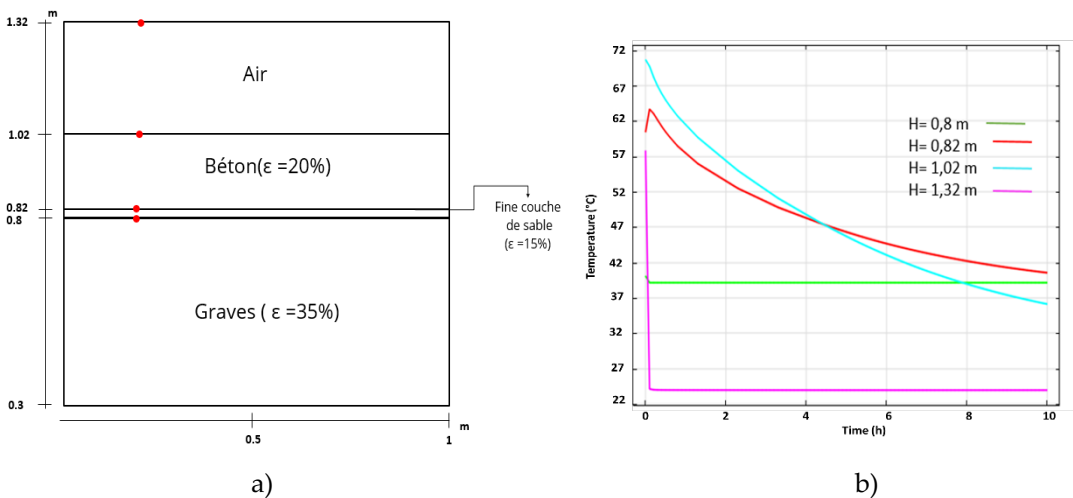


Figure 5 Les résultats de simulation dans le cas du milieu saturé : a) la géométrie modélisée dans le cas du milieu saturé, b) les profils de température nocturnes dans le cas du milieu saturé en eau

Dans ce scénario, le matériau est entièrement saturé en eau (c'est-à-dire que tous les pores internes du matériau sont remplis en eau). L'air ambiant n'étant pas saturé en humidité, un gradient de pression de vapeur se crée favorisant ainsi l'évaporation de l'eau vers l'atmosphère.

On remarque à partir de la courbe (b) de la [figure 5](#) une diminution significative de la température atteignant les 35°C en surface. Le refroidissement observé est dû à l'évaporation de l'eau contenue dans les pores de surface, couplée à une migration capillaire interne qui permet de faire remonter l'eau vers la surface au fur et à mesure de son évaporation. La température de surface diminue rapidement au début, preuve d'un flux évaporatif actif. Après cette baisse marquée, il se produit une stabilisation progressive de la température due à la diminution de la quantité de l'eau disponible à l'évaporation. Malgré cette stabilisation, cette configuration reste la plus efficace en matière de rafraîchissement urbain passif, grâce à l'effet combiné de l'évaporation et de la capillarité.

IV. Conclusions et perspectives

Cette étude propose des approches innovantes pour rafraîchir le milieu urbain en se basant sur l'utilisation des matériaux poreux pour la construction des chaussées. Le modèle numérique développé repose sur l'analyse couplée des phénomènes de transfert thermique et de diffusion de vapeur d'eau dans ces matériaux. Il a été élaboré en prenant compte des conditions climatiques réelles diurnes et nocturnes, et en exploitant le potentiel rafraîchissant liée à l'évaporation ainsi qu'à la circulation d'eau sous-sol, permettant de comparer de manière pertinente différentes approches de refroidissement passif.

Les résultats montrent que la baisse de température dans ce type de structure est principalement due à la capacité d'absorption de chaleur par le réservoir d'eau souterrain ; à condition de maintenir sa base à une température constante. La comparaison entre les différents scénarii testés a montré l'efficacité décroissante selon l'ordre suivant :

$$\text{VAPmatériau-sec} < \text{ABS} < \text{ABSvitesse-écoulement-sup} < \text{VAPmatériau-saturé}.$$

Des travaux sont en cours pour améliorer et optimiser ce modèle. Un développement est en cours pour intégrer un flux de chaleur dynamique, plus représentatif des variations journalières réelles. Par ailleurs, le modèle ne met pas en évidence d'effet significatif sur la température de l'air à 30 cm au-dessus de la surface, on cherche donc des approches afin d'améliorer la représentativité des conditions urbaines réelles et d'évaluer plus précisément l'impact du système sur l'air ambiant. L'une des perspectives majeures de ce travail consiste à approfondir le couplage entre les mécanismes d'évaporation et de circulation de l'eau afin de mieux comprendre les dynamiques de transfert de chaleur et d'humidité.

Le modèle numérique ainsi développé constitue une base solide pour orienter la conception du protocole expérimental à venir. Il permettra d'identifier les matériaux et configurations les plus performants pour atténuer les effets des îlots de chaleur urbains (ICU) et améliorer le confort thermique en ville.

V. Annexe

paramètre	Valeur	Coefficient de convection thermique ($\text{W.m}^{-2}.\text{K}^{-1}$)	25 [15]
Température initiale de l'eau (K)	297.15	Masse volumique de béton (kg.m^{-3})	2300
Température initiale de l'air (K)	297.15	Capacité de chaleur spécifique de béton ($\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$)	880
Température initiale de la structure de chaussée (K)	300.15	Conductivité thermique de béton ($\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$)	1,33
Flux de chaleur (W.m^{-2})	800	Masse volumique de graves (kg.m^{-3})	1680
Albedo	0.2 [16]	Capacité de chaleur spécifique de graves ($\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$)	850
Emissivité de surface	0.95 [17]	Conductivité thermique de graves ($\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$)	0.4
		Masse volumique de sable (kg.m^{-3})	2400
		Capacité de chaleur spécifique de sable ($\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$)	800
		Conductivité thermique de sable ($\text{W.m}^{-1}.\text{K}^{-1}$)	0.4
		Coefficient de diffusion de vapeur dans l'air ($\text{m}^2.\text{s}^{-1}$)	2.69 -5 [18]

VI. Références

- [1] G. Del Serrone, P. Peluso, et L. Moretti, « Evaluation of Microclimate Benefits Due to Cool Pavements and Green Infrastructures on Urban Heat Islands », *Atmosphere*, vol. 13, n° 10, p. 1586, sept. 2022, doi: 10.3390/atmos13101586.
- [2] N. H. Wong et C. Yu, « Study of green areas and urban heat island in a tropical city », *Habitat Int.*, vol. 29, n° 3, p. 547-558, sept. 2005, doi: 10.1016/j.habitatint.2004.04.008.
- [3] D. Kofel, I. Bourgeois, R. Paganini, A. Pulfer, C. Grossiord, et J. Schmale, « Quantifying the impact of urban trees on air quality in Geneva, Switzerland », *Urban For. Urban Green.*, vol. 101, p. 128513, nov. 2024, doi: 10.1016/j.ufug.2024.128513.
- [4] N. Nasrollahi, A. Ghosouri, J. Khodakarami, et M. Taleghani, « Heat-Mitigation Strategies to Improve Pedestrian Thermal Comfort in Urban Environments: A Review », *Sustainability*, vol. 12, n° 23, p. 10000, nov. 2020, doi: 10.3390/su122310000.
- [5] D. Han, T. Zhang, Y. Qin, Y. Tan, et J. Liu, « A comparative review on the mitigation strategies of urban heat island (UHI): a pathway for sustainable urban development », *Clim. Dev.*, vol. 15, n° 5, p. 379-403, mai 2023, doi: 10.1080/17565529.2022.2092051.
- [6] C.-E. Revaud *et al.*, « Thermoregulatory effect of green spaces and wetlands in Paris. », présenté à ICUC9 - 9th International Conference on Urban Climate jointly with 12th Symposium on the Urban Environment, 2015.
- [7] Y. Lu, Y. Qin, C. Huang, et X. Pang, « Albedo of Pervious Concrete and Its Implications for Mitigating Urban Heat Island », *Sustainability*, vol. 15, n° 10, p. 8222, mai 2023, doi: 10.3390/su15108222.
- [8] J. Xie et Z. Zhou, « Numerical Analysis on the Optimization of Evaporative Cooling Performance for Permeable Pavements », *Sustainability*, vol. 14, n° 9, p. 4915, avr. 2022, doi: 10.3390/su14094915.
- [9] Y. Qin, « Pavement surface maximum temperature increases linearly with solar absorption and reciprocal thermal inertial », *Int. J. Heat Mass Transf.*, vol. 97, p. 391-399, juin 2016, doi: 10.1016/j.ijheatmasstransfer.2016.02.032.
- [10] R. G. ALLEN, L. S. PEREIRA, D. RAES, et M. SMITH, « FAO Irrigation and Drainage Paper N.56 Crop Evapotranspiration (guidelines for computing crop water requirements) ». 2006.
- [11] A. K. Datta, « Porous media approaches to studying simultaneous heat and mass transfer in food processes. I: Problem formulations », *J. Food Eng.*, vol. 80, n° 1, p. 80-95, mai 2007, doi: 10.1016/j.jfoodeng.2006.05.013.
- [12] Y. Yang, R. A. Patel, N. I. Prasianakis, S. V. Churakov, G. Deissmann, et D. Bosbach, « Elucidating the role of water films on solute diffusion in unsaturated porous media by improved pore-scale modeling », *Vadose Zone J.*, vol. 23, n° 3, p. e20321, mai 2024, doi: 10.1002/vzj2.20321.
- [13] G. Łukaszewicz et P. Kalita, *Navier–Stokes Equations*. in *Advances in Mechanics and Mathematics*. Cham: Springer International Publishing, 2016. doi: 10.1007/978-3-319-27760-8.
- [14] Monteith, John, and Mike Unsworth, *Principles of environmental physics: plants, animals, and the atmosphere*. Academic press, 2013.
- [15] P.-Y. LAGRÉE, « Le coefficient d'échange h, applications en 1D et aux Ailettes. Cours Mécavenir EPU de Thermique, GM3C. », *Ecole Polytech. Univ. UPMC*, 2010.
- [16] A. Sweeney, R. P. West, et C. O'Connor, « Parameters affecting the albedo in concrete », *Dep. Civ. Struct. Environ. Eng. Trinity Coll. Dublin*, 2011.
- [17] X. Zhong, L. Zhao, X. Zhang, J. Yan, et P. Ren, « Investigating the effects of surface moisture content on thermal infrared emissivity of urban underlying surfaces », *Constr. Build. Mater.*, vol. 327, p. 127023, avr. 2022, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2022.127023.
- [18] D. Quenard et H. Sallee, « Water vapour adsorption and transfer in cement-based materials: a network simulation. », *Mater. Struct.*, 1992.

