

26 the quadrupole model and the model based on ISO 8894. Four types of paving blocks were
27 selected for measurement. The specimen dimensions were set at 15 cm × 15 cm × 3 cm. The
28 results obtained show that travertine and concrete pavers had the highest thermal conductivities,
29 while terracotta and plastic waste pavers had a lower volumetric heat capacity. The parallel hot
30 wire method has proven its reliability in characterizing a wide range of materials, offering a
31 simple and fast solution. However, factors such as geometry, vibrations, and ambient
32 temperature variations may influence the accuracy of the results. This research contributes to
33 the understanding of materials suitable for managing urban heat islands and improving outdoor
34 thermal comfort.

35 **Keywords:** Thermal conductivity, parallel hot wire, ISO 8894 model, quadrupole model,
36 paving blocks.

37

38

39 **1. Introduction**

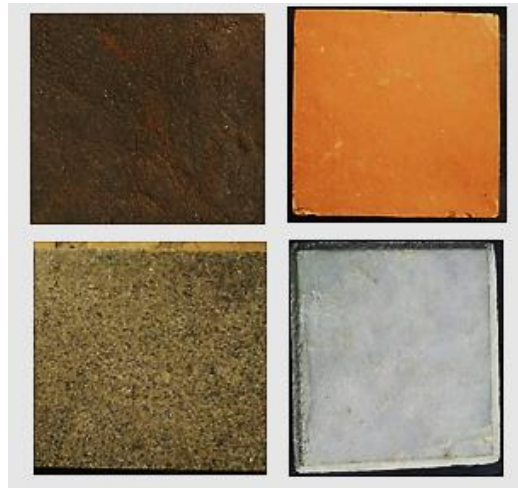
40 La concentration croissante de la population dans des agglomérations de type urbain implique
41 des aménagements et de plus en plus de construction de maisons d'habitation et de bâtiments
42 destinés à des fonctionnalités diverses. Les espaces verts sont remplacés progressivement par
43 des espaces minéralisés. L'absorption de chaleur par les revêtements du sol extérieurs, les
44 toitures et les façades de bâtiment est l'un des facteurs à l'origine de l'augmentation des
45 températures dans ces agglomérations et provoque ce qu'on appelle îlot de chaleur urbain (Oke,
46 1976, Akbari et al., 1992, Bouyer, 2009). Ceci est principalement dû aux propriétés thermiques
47 des matériaux utilisés dans ces différentes infrastructures (Santamouris, 2013, Roesler et al.,
48 2016, Hailu et al., 2020). Leur comportement par rapport au rayonnement et à la chaleur est
49 différent de celui de la terre nue ou végétalisée que l'on trouve plus facilement à la campagne.
50 Les principales variables de la performance thermique des matériaux sont l'albédo, la
51 conductivité thermique et la capacité thermique (Santamouris, 2013, Hailu et al., 2020).
52 Cependant, il n'y a pas de valeurs uniformes pour les matériaux de revêtements de sol, car elle
53 dépend fortement de la composition du mélange, de sa masse volumique, de sa température et
54 de sa méthode de fabrication. Plusieurs méthodes sont utilisées pour déterminer la conductivité
55 thermique de matériaux. Les méthodes en régime stationnaire rassemblent les méthodes de la
56 plaque chaude gardée et de la barre, ainsi que la méthode de la boîte. Toutes ces méthodes ont
57 montré leurs limites, notamment des temps de mesure excessifs et des difficultés à respecter les
58 hypothèses de base (Sibiath et al., 2017). La méthode harmonique est constituée par la méthode
59 3ω dans laquelle la perturbation thermique est périodique. La technique 3ω s'est révélée
60 précieuse pour la caractérisation des propriétés thermophysiques des matériaux solides, du
61 nanométrique au massif, ainsi que des liquides et des gaz (Sibiath et al., 2017). Néanmoins,
62 cette méthode repose sur le dépôt d'une fine bande résistive métallique à la surface de
63 l'échantillon, nécessitant une surface lisse, ce qui n'est pas le cas des matériaux de construction.

64 Les méthodes transitoires se concernent les méthodes flash, hot disque, fil chaud, trois couches
65 et plaque chaude (Yves 2011). Notre étude se focalise sur la détermination des propriétés
66 thermiques de matériaux de pavage en utilisant la méthode de fil chaud parallèle. Les modèles
67 utilisés rassemblent le modèle quadripôle et le modèle basé sur la norme ISO 8894.

68 2. Matériels et méthodes

69 2.1. Préparation des éprouvettes

70 Quatre types de pavages ont été destinés à la mesure, à savoir les pavés de déchets plastiques,
71 les pavés en terre cuite, les pavés de travertin et les pavés de béton. Les dimensions de
72 l'éprouvette sont fixées à 150 mm×150 mm×30 mm (Yves et al., 2019).



73

74 Figure 1: Éprouvettes destinées à la mesure

75 2.2. Modèles

76 Un certain nombre de méthodes de caractérisation thermique sont devenues populaires du fait
77 de la simplicité du mode d'exploitation des résultats, ce qui représentait un avantage décisif
78 lorsque les moyens de calcul étaient plus limités qu'aujourd'hui. Le développement des moyens
79 de calcul permet maintenant d'utiliser des modèles plus complets faisant appel à moins
80 d'hypothèses simplificatrices ou permettant de les vérifier plus simplement. Dans cette étude,
81 la détermination de la conductivité thermique repose sur un modèle quadripolaire complet.

82 Le système est modélisé à l'aide du formalisme des quadripôles reliant le fil chauffant et un
 83 point de l'éprouvette situé à une distance d du fil. Le fil chaud est équivalent à un cylindre plein,
 84 tandis que l'éprouvette est un cylindre creux. Les grandeurs de sortie sont les mesures
 85 effectuées au niveau du fil chauffant (indice w), alors que les grandeurs d'entrée correspondent
 86 aux mesures prises à une distance d du fil chauffant (indice d).

$$87 \quad \begin{bmatrix} \theta_w \\ \frac{\varphi_w}{p} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_w & B_w \\ C_w & D_w \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & R_c \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} A_s & B_s \\ C_s & D_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_d \\ \frac{\theta_d}{Z} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & B \\ C & D \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_d \\ \frac{\theta_d}{Z} \end{bmatrix} \quad (1)$$

88 Avec:

$$89 \quad A_w = 1$$

$$90 \quad B_w = \frac{1}{2\pi\lambda_w L q_w r_w} \frac{I_0(q_w r_w)}{I_1(q_w r_w)} - \frac{1}{\rho_w C_{pw} \pi r_w^2 L p}$$

$$91 \quad C_w = \rho_w C_{pw} \pi r_w^2 L$$

$$92 \quad D_w = \frac{q_w r_w I_0(q_w r_w)}{2I_1(q_w r_w)}$$

$$93 \quad A_s = q_s d [K_1(q_s d) I_0(q_s r_w) + K_0(q_s r_w) I_1(q_s d)]$$

$$94 \quad B_s = \frac{1}{2\pi\lambda_s L} [K_0(q_s r_w) I_0(q_s d) - K_0(q_s d) I_0(q_s r_w)]$$

$$95 \quad C_s = 2\pi L \rho_s C_{ps} r_w dp [K_1(q_s r_w) I_1(q_s d) - K_1(q_s d) I_1(q_s r_w)]$$

$$96 \quad D_s = q_s r_w [K_1(q_s r_w) I_0(q_s d) + K_0(q_s d) I_1(q_s r_w)]$$

$$97 \quad \frac{1}{Z} = 2\pi\lambda_s L q_s d \frac{K_1(q_s d)}{K_0(q_s d)} ; q_w = \sqrt{\frac{p}{a_w}} ; q_s = \sqrt{\frac{p}{a_s}}$$

98 Où :

99 θ_w : transformée de Laplace de l'augmentation de la température du fil

100 θ_d : transformée de Laplace de l'augmentation de la température à une distance d dans le solide

101 I_0, I_1, K_0, K_1 : fonctions de Bessel

102 λ_w : conductivité thermique du fil chauffant

- 103 $\rho_w C_{pw}$: capacité volumique du fil chauffant
- 104 L : longueur du fil chauffant
- 105 r_w : Rayon du fil chauffant
- 106 d : distance entre le fil chauffant et le thermocouple
- 107 λ_s : conductivité thermique de l'éprouvette
- 108 a_s : diffusivité thermique de l'éprouvette
- 109 R_c : résistance de contact à l'interface fil chauffant / éprouvette
- 110 p : variable de Laplace
- 111 φ_w : puissance dissipée dans le fil chauffant
- 112 Ainsi,

$$113 \quad \theta_d(p) = \frac{\frac{\varphi_w}{p}}{C + \frac{D}{Z}} \quad (2)$$

114 Avec:

$$115 \quad C = A_s C_w + C_s (C_w R_c + D_w)$$

$$116 \quad D = B_s C_w + D_s (C_w R_c + D_w)$$

117 Si la résistance thermique du fil chauffant est négligée, l'équation devient :

$$118 \quad \theta_d(p) = \frac{\frac{\varphi_w}{pL} K_0(q_s d)}{\rho_w C_{pw} \pi r_w^2 p K_0(q_s r_w) + 2 \pi \lambda_s q_s r_w [1 + \rho_w C_{pw} \pi r_w^2 p R_c L] K_1(q_s r_w)} \quad (3)$$

119 L'éprouvette et le thermocouple ont des propriétés différentes et ce dernier ne produit pas de
120 chaleur, on a alors :

$$121 \quad \begin{bmatrix} \theta_t \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_t & B_t \\ C_t & D_t \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & R_t \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_d \\ \Phi_d \end{bmatrix} \quad (4)$$

122 $\begin{bmatrix} A_t & B_t \\ C_t & D_t \end{bmatrix}$ est la matrice quadripolaire de thermocouple

123

124 Φ_d est la transformée de Laplace de la puissance dissipée à la distance d du fil chauffant.

125 R_t est la résistance thermique de contact entre le thermocouple et l'éprouvette.

126 En négligeant la résistance thermique du thermocouple comparée avec la résistance thermique
127 de contact entre le thermocouple et l'éprouvette, nous pouvons écrire :

128
$$A_t = 1 ; B_t = 0 ; C_t = \rho_t C_{pt} \pi r_t^2 L R_t ; D_t = 1$$

129 Avec r_t est le rayon du thermocouple, L est sa longueur, ρ_t est sa masse volumique et c_t est sa
130 chaleur spécifique.

131
$$\theta_t(p) = \frac{\theta_d(p)}{1 + C_t p} \quad (5)$$

132 Alors, cette relation nous amène à un modèle que nous appelons « modèle quadripôle ». De
133 plus, le modèle utilisé dans la norme ISO 8894–2 considère le fil chauffant ayant un rayon nul.
134 Ainsi, nous pouvons utiliser le développement limité des fonctions de Bessel au voisinage de
135 zéro.

136
$$K_0(x) \approx -\ln(x) ; K_1(x) \approx \frac{1}{x} ; I_0(x) \approx 1 ; I_1(x) \approx \frac{x}{2}$$

137 D'où :

138
$$A_w \approx 1 ; B_w \approx 0 ; C_w \approx 0 ; D_w \approx 1$$

139 D'après ces approximations, on a :

140
$$C = A_s C_w + C_s (C_w R_C + D_w) = C_s$$

141
$$D = B_s C_w + D_s (C_w R_C + D_w) = D_s$$

142 D'où :

143
$$C_s \approx 2 \pi L \sqrt{\lambda_s \rho_s C_{ps}} d \sqrt{p} I_1(q_s d)$$

144
$$D_s \approx I_0(q_s d)$$

145
$$C + \frac{D}{Z} = \frac{2 \pi L d \sqrt{\lambda_s \rho_s C_{ps}}}{K_0(q_s d)} \left[\frac{I_1(q_s d) K_0(q_s d) + K_1(q_s d) I_0(q_s d)}{K_0(q_s d)} \right]$$

146

147 Alors :

$$148 \quad \theta_t(p) = \frac{\varphi_w}{p} \frac{K_0(q_s d)}{2 \pi \lambda_s L} \quad (6)$$

$$149 \quad \text{Selon Carslaw et al. (1959), } L^{-1} \left[\frac{1}{p} K_0(x \sqrt{p}) \right] = \frac{1}{2} \int_{\frac{x^2}{4t}}^{\infty} \frac{e^{-u}}{u} du \quad (7)$$

150 Donc :

$$151 \quad T_t(t) = - \frac{\varphi_w}{2 \pi \lambda_s L} E_i \left(\frac{d^2}{4 a_s t} \right) \quad (8)$$

152 E_i : intégral exponentiel

153 2.3. Estimation de paramètres

154 Les propriétés thermiques du fil chauffant sont supposées être connue de sorte que les inconnues
155 soient la conductivité thermique λ_s , la capacité volumique $\rho_s c_s$ des éprouvettes et la résistance
156 thermique de contact R_c entre le fil chauffant et ces dernières. La constante de temps C_t peut
157 être ajouté comme paramètre inconnu si les propriétés thermiques de l'éprouvette sont très
158 différentes de ceux du thermocouple.

159 La température $T_t(t)$ peut être calculée par la transformée de la Laplace inverse appliquée à
160 $\theta_t(p)$ réalisée en utilisant la méthode du Stehfest (Stehfest, 1970). L'algorithme de Marquardt
161 (1963) est utilisé pour trouver les valeurs des paramètres inconnus qui minimisent la somme
162 des erreurs quadratiques :

$$163 \quad S = \sum_{n=1}^N [T_{t_{\text{exp}}}(t) - T_{t_{\text{mod}}}(t)]^2 \quad (9)$$

164 C'est une méthode itérative utilisée pour résoudre les problèmes de moindres carrés non
165 linéaires. Elle combine les avantages de la méthode de Gauss-Newton et de la méthode de la
166 descente de gradient. Elle utilise des valeurs initiales et ajuste les paramètres itérativement pour
167 minimiser la fonction d'erreur.

168

169 Pour l'estimation selon le modèle utilisé dans la norme ISO 8894, nous avons :

170
$$T_t(2t) = -\frac{\varphi_w}{2\pi\lambda_s L} E_i\left(\frac{d^2}{8a_s t}\right) \quad (10)$$

171
$$D'où U = \frac{T_t(2t)}{T_t(t)} = \frac{E_i\left(\frac{d^2}{8a_s t}\right)}{E_i\left(\frac{d^2}{4a_s t}\right)} = \frac{E_i\left(\frac{u}{2}\right)}{E_i(u)} \quad (11)$$

172 Yves et al. (2019) ont identifié la fonction polynomiale suivante qui permet de calculer E_i :

173
$$E_i\left(\frac{d^2}{4a_s t}\right) = a_0 + a_1 U + a_2 U^2 + a_3 U^3 + a_4 U^4 + a_5 U^5 + a_6 U^6 + a_7 U^7 \quad (12)$$

174 Avec:

175 $a_0 = 474.926168472$; $a_1 = -1574.223079517$; $a_2 = 2262.705889755$; $a_3 = -1816.820318813$;

176 $a_4 = 877.286213344$; $a_5 = -254.2662133449$; $a_6 = 40.904415135482$; $a_7 = -2.8154002849$

177 La conductivité thermique est calculée en utilisant l'équation suivante :

178
$$\lambda_s = -\frac{\varphi_w}{4\pi L T_t(t)} E_i\left(\frac{d^2}{4a_s t}\right) \quad (13)$$

179 Avec $\varphi_w = \frac{UI}{L}$

180 U représente la tension aux bornes du fil chauffant, I est l'intensité du courant qui traverse le
181 fil chauffant et L est la longueur du fil chauffant.

182 Le calcul doit être effectué dans un intervalle du temps pendant lequel les hypothèses (masse
183 du fil chauffant négligeable, milieu semi-infini) sont valides. Ainsi, il est important de bien
184 choisir l'intervalle d'estimation sur lequel la température de la face non chauffée est constante.

185 La norme ISO 8894 recommande de prendre les valeurs de conductivité thermique calculée
186 pour les valeurs de rapport $\frac{T(2t)}{T(t)}$ entre 1.5 et 2.4.

187

188

189 **2.4. Montage de dispositif**

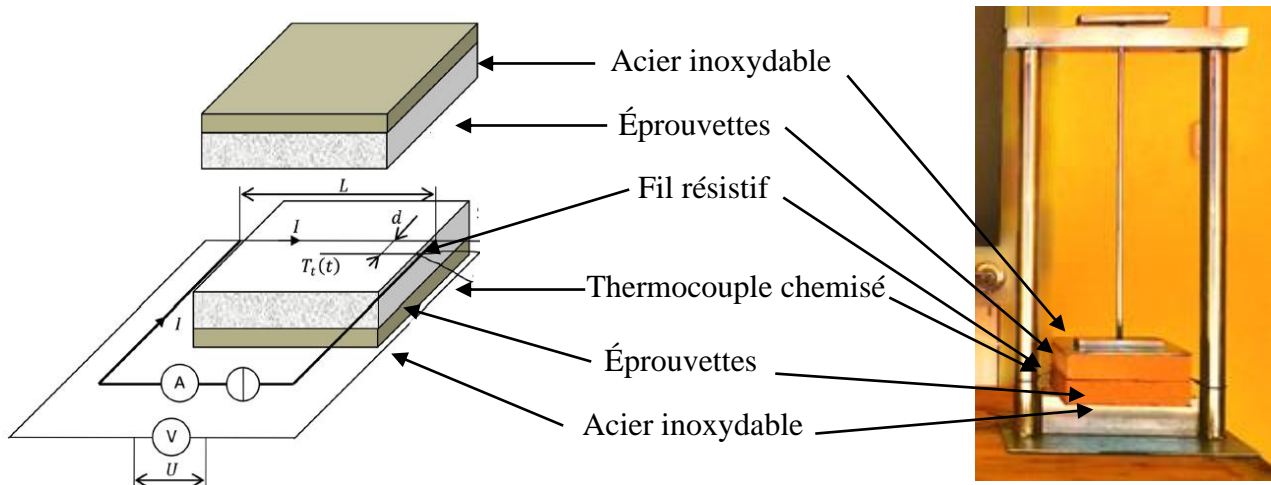
190 Les éprouvettes sont installées entre deux plaques en acier inoxydable 316L de même section
191 et d'une épaisseur de 2 mm. Celles-ci assurent une température uniforme sur leur face non
192 chauffée. Elles fournissent également une inertie thermique qui minimise les variations de leur
193 température. De plus, on applique une pression sur les éprouvettes afin de minimiser les
194 résistances de contact thermique. L'augmentation de la température $T_s(t)$ est mesurée avec le
195 thermocouple DH-1-24 type K chemisé. Ce dernier est inséré dans une rainure de section $0.5 \times$
196 0.5 mm^2 et installé sur le milieu de l'éprouvette afin de mesurer la température au centre. La
197 température est enregistrée avec un pas de temps de 0.1 s par un système d'acquisition de
198 données carte SD connecté à l'Arduino.

199 L'écart de température mesurée $T_s(t)$ avant le chauffage est de $0.01 \text{ }^\circ\text{C}$. Le fil résistif Nickel-
200 Chrome 80/20 est inséré dans une rainure de $0.5 \times 0.5 \text{ mm}^2$ de section. Il a la même longueur
201 que l'éprouvette et on le place au milieu de la face de ce dernier. La distance entre le
202 thermocouple et le fil chauffant est $d = 5 \text{ mm}$. Deux fils de longueur $L = 203 \text{ mm}$ sont soudés
203 sur le bout de ce dernier et ils sont connectés à un voltmètre. Une alimentation stabilisée produit
204 un courant électrique constant I traversant ce fil. Les mesures permettent de calculer la
205 résistance électrique par mètre du fil chauffant par $\frac{R_{el}}{L} = \frac{U}{IL}$.

206 La convection qui se produira sur la face latérale de l'éprouvette chauffée augmentera le
207 coefficient de transfert de chaleur par convection. Pour éviter ce problème, les éprouvettes ont
208 été placées dans des gaines minces scellés d'épaisseur environ 0.05 mm dans lesquels l'air
209 atteint une humidité d'équilibre avec l'éprouvette, empêchant la convection. Il a été vérifié que
210 la résistance thermique de la gaine est négligeable par rapport à la résistance thermique de ces
211 dernières (Yves et al., 2019).

212

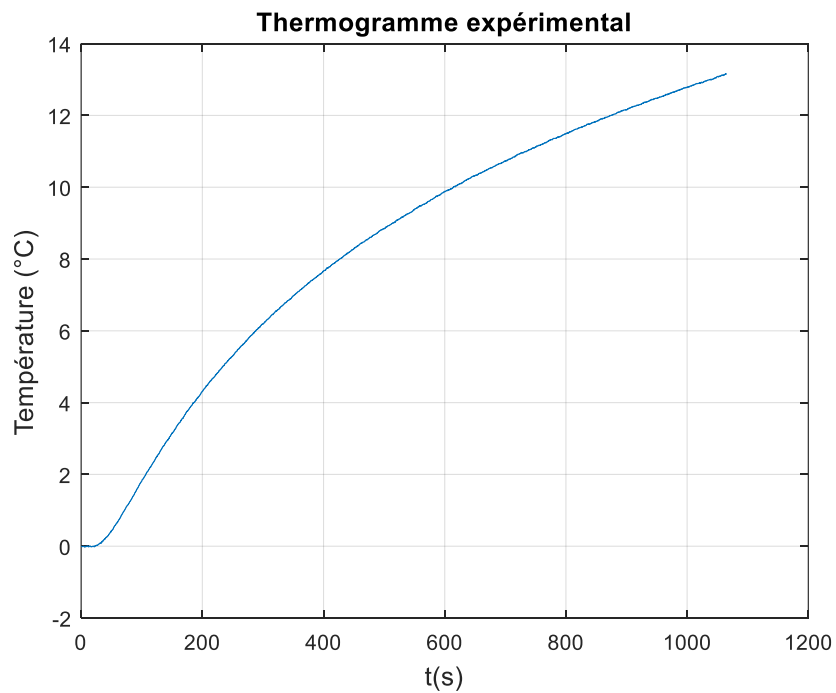
213



224 Figure 2: Vues schématique et photographique du dispositif

225 3. Résultats

226 Les données expérimentales rassemblent la température $T_t(t)$ du thermocouple. Ces données
 227 ont été traitées dans un programme développé sous MATLAB intégrant les différents modèles.
 228 La figure 3 représente la courbe de variation de la température enregistrée au centre de
 229 l'éprouvette en fonction du temps.

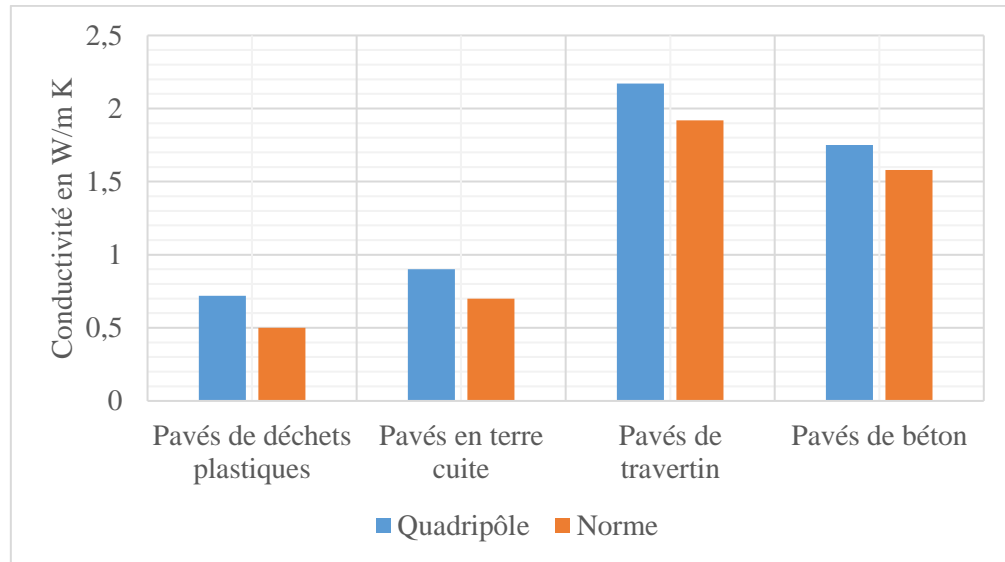


230

231

Figure 3: Thermogramme expérimental

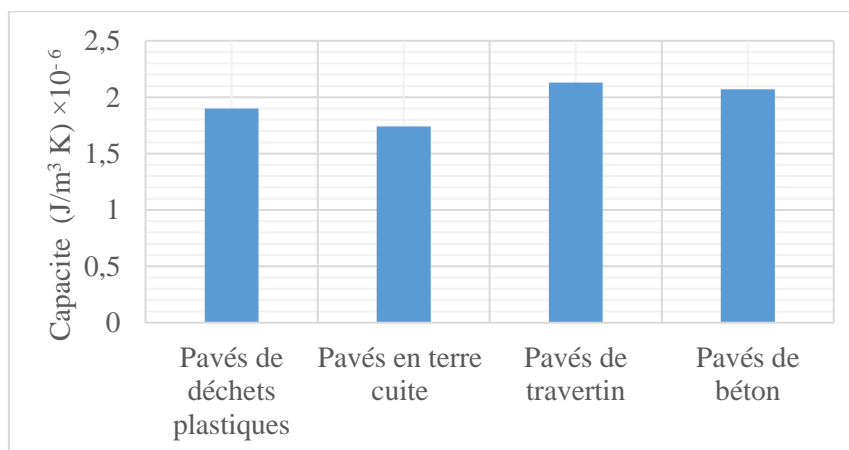
232 Les résultats obtenus suivant les deux modèles, quadripôle et norme ISO 8894–2, sont
233 représentés par la figure 4 pour la conductivité thermique et la figure 5 pour la capacité
234 thermique volumique.



235

236 Figure 4: Conductivité thermique de chaque pavé

237 Le modèle normal (ISO 8894) conduit à des valeurs inférieures à celles du modèle
238 quadripolaire. Cette différence pourrait s'expliquer par le fait que le rayon de fil chauffant est
239 négligé dans le calcul utilisant cette norme. La conductivité thermique la plus élevée est celle
240 des pavés de travertin. Ils sont suivis de près par les pavés de béton. Cette capacité caractérise
241 par ailleurs les matériaux lourds et compacts. Les masses volumiques calculées sont cohérentes
242 avec ces assertions (Tableau 1).



243

244 Figure 5: Capacité thermique volumique de chaque pavé

245 Les pavés de travertin et de béton offrent un fort stockage de la chaleur. À l'inverse, les pavés
246 de déchets plastiques et les pavés en terre cuite possèdent une capacité thermique volumique
247 plus faible, les rendant plus appropriés pour les environnements où l'on souhaite limiter
248 l'accumulation de chaleur et éviter une surchauffe excessive. Parmi ces matériaux, la terre cuite
249 est celui qui accumule le moins de chaleur, un avantage significatif pour réduire l'échauffement
250 des surfaces exposées au soleil. En calculant le rapport entre la conductivité thermique et la
251 capacité thermique volumique correspondantes, la diffusivité thermique est obtenue.

252 Tableau 1: Diffusivité thermique de chaque pavé

Types de pavages	Diffusivité thermique ($\text{m}^2/\text{s}) \times 10^7$	Masse volumique (kg/m^3)	Chaleur massique ($\text{J}/\text{kg K}$)
Pavés de déchets plastiques	3.78	1900	1000
Pavés en terre cuite	5.15	1900	920
Pavés de travertin	10.20	2370	900
Pavés de béton	8.45	2300	900

253 4. Discussion

254 La conductivité thermique de nos pavés se trouve entre 0.50 W/m K et 2.17 W/m K. Les valeurs
255 obtenues sont généralement inférieures à celles des données de la littérature (Matthew et al.,
256 2010). Les techniques de fabrication ainsi que les caractéristiques des matières premières
257 pourraient être à l'origine de ce fait. Pour le cas des pavés en terre cuite, la mise en œuvre se
258 fait manuellement et ceci affecte leur compacité. Les pavés avec une conductivité thermique
259 élevée permettent un transfert de chaleur plus rapide, ce qui peut être bénéfique dans les climats
260 froids où il est important de garder les surfaces chaudes. En revanche, dans les climats chauds,
261 ceux qui avec une conductivité thermique faible sont préférables, car ils réduisent le transfert
262 de chaleur dans l'environnement environnant. Les lourds matériaux denses tels que les pavés
263 de béton, les pavés de travertin ont une capacité thermique volumique élevée. Plus elle est

264 élevée, plus la capacité du matériau à absorber et à stocker la chaleur est importante. La méthode
265 du fil chaud est une méthode précise et sensible pour mesurer la conductivité thermique d'un
266 matériau. Elle est compatible avec une large gamme de matériaux, qu'ils soient minéraux,
267 composites, métalliques ou organiques, offrant ainsi une grande polyvalence d'utilisation. La
268 durée de mesure est relativement courte par rapport à d'autres dispositifs mentionnés dans la
269 littérature (Rositsa et al., 2018), ce qui permet un gain de temps considérable dans
270 l'expérimentation. En revanche, elle ne peut être utilisée que pour les matériaux sous forme
271 d'éprouvette solide, ce qui exclut les poudres et les fluides pour lesquels la mesure est
272 inapplicable. Cette contrainte limite son usage aux matériaux pouvant être préparés sous une
273 forme adaptée.

274 Le dispositif réalisé est économique et portable. Il nécessite une éprouvette de petite dimension,
275 réduisant ainsi la quantité de matériau requis. Cette caractéristique facilite également le test de
276 plusieurs échantillons sans engendrer de coûts supplémentaires importants. Il est également très
277 pratique pour des mesures in situ et une utilisation flexible dans différents environnements
278 d'analyse. L'appareil conçu par Asaeda (1996) exige une éprouvette de grande dimension
279 (Asaeda et al., 1996). La méthode de fil chaud parallèle nécessite une calibration préalable pour
280 obtenir des mesures précises. Celle-ci doit être réalisée avec des éprouvettes de matériaux dont
281 la conductivité thermique est connue avec précision. Cette méthode peut être affectée par des
282 facteurs tels que la géométrie, la température, les vibrations. Des erreurs peuvent survenir si la
283 géométrie du fil chaud n'est pas correctement prise en compte. Les vibrations affectent aussi la
284 précision des mesures, car elles peuvent déplacer la position du fil chaud dans le matériau testé,
285 ce qui peut fausser les mesures. Les pertes thermiques à travers les surfaces de l'éprouvette, les
286 variations de température à l'intérieur et les fluctuations du courant électrique sont parmi les
287 sources d'erreur. Il est important de prendre en compte ces facteurs pour obtenir des mesures
288 précises.

289 **5. Conclusion**

290 La caractérisation thermique des pavés contribue à la compréhension des matériaux adaptés à
291 la gestion des îlots de chaleur urbains et au confort thermique de milieu extérieur. L'étude
292 menée utilisant la méthode du fil chaud parallèle nous a permis d'obtenir des valeurs précises
293 de conductivité thermique et de capacité thermique volumique pour différents types de pavés.
294 L'analyse comparative entre le modèle quadripôle et le modèle normal ISO 8894-2 a révélé des
295 différences notables, mettant en évidence l'influence du rayon du fil chauffant sur les résultats
296 obtenus.

297 Les résultats montrent que les pavés de travertin et les pavés de béton possèdent les
298 conductivités thermiques les plus élevées, ce qui corrobore leur densité et leur structure
299 compacte. En revanche, les pavés en terre cuite et les pavés de déchets plastiques affichent des
300 capacités thermiques volumiques plus faibles, indiquant une moindre capacité à stocker la
301 chaleur. Ces propriétés thermiques influencent directement le confort thermique de l'espace
302 extérieur et leur réponse aux variations climatiques.

303 La méthode du fil chaud parallèle s'est révélée être une technique fiable et rapide pour la
304 caractérisation thermique des matériaux de pavage. Son faible coût, sa portabilité et la
305 possibilité de tester divers échantillons en font une approche intéressante pour les études sur
306 l'optimisation des matériaux en milieu urbain. Toutefois, certaines limitations doivent être
307 prises en compte, notamment l'influence de la géométrie du fil chauffant, les pertes thermiques
308 et les conditions environnementales qui peuvent affecter la précision des mesures.

309 Ces résultats ouvrent la voie à des investigations complémentaires sur l'amélioration des
310 propriétés thermiques des matériaux de pavage en fonction de leur composition et de leurs
311 procédés de fabrication. Une meilleure compréhension de ces paramètres contribuerait à la
312 conception de milieux extérieurs plus performants thermiquement, réduisant ainsi l'impact des
313 îlots de chaleur urbains et améliorant le confort des usagers.

314 **6. Remerciements**

315 Je tiens à exprimer ma profonde gratitude à Monsieur Yves Jannot pour son aide précieuse lors
316 de la réalisation de ce dispositif. Son expertise technique et son soutien constant ont été
317 essentiels à la conception et à la mise en place de l'appareil, et je lui suis reconnaissant pour sa
318 disponibilité et son efficacité tout au long de ce processus.

319 **7. Références**

320 Akbari, H., Davis, S., Dorsano, J. H. (1992). Cooling our communities: A guide book on tree
321 planting and light-coloured surfacing. USA: United States Environmental Protection Agency
322 EPA.

323 Asaeda, Takashi, C., Thanh, V., Wake, Akio (1996). Heat storage of pavement and its effect on
324 the lower atmosphere. *In Atmospheric Environment*, 30 (3) : 313-427. Great Britain.

325 Bouyer, J. (2009). Modélisation et simulation des microclimats urbains : étude de l'impact de
326 l'aménagement urbain sur les consommations énergétiques des bâtiments (thèse de doctorat).
327 École Nationale Supérieure d'Architecture de Nantes.

328 Carslaw H.S., Jaeger J.C. (1959). Conduction of Heat in Solids. London: Oxford University
329 Press.

330 Hailu Y., Kai Y., Yinghao M., Linbing W., Chen Y. (2020). Comparison of potential
331 contribution of typical pavement materials to heat island effect. *In Sustainability*. 12, 4752.

332 Marquardt D. (1963). An algorithm for least squares estimation of non-linear parameters. *In*
333 *Soc. Ind. Appl. Math.* 11: 431-441.

334 Matthew R., Pejman K., Andrew R., James G., Riccardo I. (2010). Influence of the thermo-
335 physical properties of pavement materials on the evolution of temperature depth profiles in
336 different climatic regions. UK.

337 Oke, T. (1976). The distinction between canopy and boundary layer urban heat islands. *In*
338 *Atmosphere*. 14: 268-277.

339 Roesler J., Sushobhan S. (2016). Impact of pavements on the urban heat island. USA: Centre
340 for Highway Pavement Preservation.

341 Rositsa P., Penka Z. (2018). Thermal properties of a new pavement material for using in road
342 construction. *In Civil and Environmental Engineering*. 14 (2): 99-104.

343 Santamouris M. (2013). Using cool pavements as a mitigation strategy to fight urban heat
344 island. *In Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 26: 224–240.

345 Sibiath O. G., Clément A., ·Emile A., Yves J. (2017). Hot Plate Method with Two Simultaneous
346 Temperature Measurements for Thermal Characterization of Building Materials. *Int J*
347 *Thermophys*. 38:81.

348 Stehfest H. (1970). Numerical inversion of Laplace transforms. *In Comm. ACM*. 13(1): 47-49,

349 Yves J. (2011). *Théorie pratique de la métrologie thermique*. France.

350 Yves J., Alain D. (2019). An improved model for the parallel hot wire: Application to the
351 thermal conductivity measurement of low-density insulating materials at high temperature. *In*
352 *International Journal of Thermal Sciences*. 142: 379–391.