

## IMPACT DE PAVAGES SUR L'ÎLOT DE CHALEUR URBAIN

Pierre Bénilde Randriamanampisoa<sup>1</sup>, Mino Patricia Randrianarison<sup>2</sup>, Bienvenue Rahelilarilalao<sup>3</sup>

- 1- Docteur, École Doctorale Ingénierie et Géosciences, 101 Antananarivo, Madagascar
- 2- Professeur, Mention Science et Ingénierie des Matériaux, École Supérieure Polytechnique d'Antananarivo, Laboratoire de Recherche en Matériaux, Procédés et Génie Civil, BP 1500, 101 Antananarivo, Madagascar
- 3- Professeur Titulaire, Mention Science et Ingénierie des Matériaux, École Supérieure Polytechnique d'Antananarivo, BP 1500, 101 Antananarivo, Madagascar

Auteur correspondant : Pierre Bénilde Randriamanampisoa

Adresse : École Supérieure Polytechnique d'Antananarivo, BP 1500, 101 Antananarivo

E-mail : [leibenildex@gmail.com](mailto:leibenildex@gmail.com)

Téléphone : +261 34 93 345 86

### RESUME

La minéralisation des espaces urbains et la réduction des espaces verts contribuent à la modification des conditions climatiques dans les villes. Les matériaux utilisés influencent la variation de la température et provoquent l'îlot de chaleur. Nos travaux d'investigation portent sur différents matériaux utilisés en pavage des espaces publics, en milieu urbain. L'objectif est d'identifier ceux qui procurent le meilleur confort thermique en milieu extérieur et de faibles impacts sur l'îlot de chaleur. L'approche méthodologique se focalise sur des expérimentations in situ permettant d'analyser le comportement thermique de divers pavages exposés au rayonnement solaire. Les expérimentations menées pendant les saisons chaude et sèche ont révélé des différences significatives dans les températures de surface et la température de l'air, en fonction des matériaux utilisés. Les pavés de déchets plastiques génèrent les températures

de surface les plus élevées, contribuant ainsi à une intensité accrue des ilots de chaleur urbaine, tandis que les pavés en terre cuite et en béton offrent une meilleure gestion thermique, surtout en période estivale. La valeur de la température physiologique équivalente calculée montre que les pavés en terre cuite procurent un meilleur confort que les pavés de déchets plastiques et de travertin. Ces résultats soulignent l'importance du choix des matériaux dans la conception urbaine pour atténuer les effets du réchauffement climatique et améliorer la qualité de vie en milieu urbain.

**Mots-clés :** Espace public, intensité de l'ICU, indice PET, matériaux de pavage, température de l'air.

### ABSTRACT

The mineralization of urban spaces and the reduction of green areas contribute to changes in climatic conditions within cities. The materials used influence temperature variations and lead to the formation of urban heat islands. Our investigation focuses on various materials used for paving public spaces in urban environments. The objective is to identify those that provide the best outdoor thermal comfort while minimizing the impact on urban heat islands. The methodological approach is based on in situ experiments to analyze the thermal behavior of different pavements exposed to solar radiation. Experiments conducted during the hot and dry seasons revealed significant differences in surface temperatures and air temperature depending on the materials used. Plastic waste pavers generated the highest surface temperatures, thereby intensifying urban heat island effects, while terracotta and concrete pavers offered better thermal management, particularly during summer. The calculated Physiological Equivalent Temperature values indicate that terracotta pavers provide better comfort compared to plastic waste and travertine pavers. These results highlight the importance of material selection in urban design to mitigate climate change effects and enhance the quality of life in urban areas.

**Keywords:** Public space, urban heat island intensity, PET index, paving materials, air temperature.

## 1. Introduction

Le changement climatique est un défi majeur pour les sociétés contemporaines. Les zones urbaines sont particulièrement vulnérables aux impacts de ce problème. Lucas (2018) a affirmé que le taux d'urbanisation mondiale est passé de 3.4% en 1800 à 69% en 2015. Selon une recherche publiée dans le rapport de l'ONU-Habitat en 2018, les pays en développement, notamment en Afrique, dans les Caraïbes et dans le Pacifique, compteront en 2030 plus de personnes vivant en milieu urbain qu'en milieu rural. À Madagascar, les taux d'urbanisation sont environ 19.3 % (INSTAT, 2018). Parmi ces chiffres, Antananarivo représente 25.5 %, Fianarantsoa 11.7 %, Toamasina 19.7 %, Mahajanga 19.1 %, Toliara 13.9 % et Antsiranana 25.4 %. Cette croissance de la population urbaine s'accompagne de l'étalement des espaces urbains. La minéralisation et la réduction des espaces verts contribuent à la modification des conditions climatiques dans les villes. En ce qui concerne l'espace public, lieux de rassemblement par excellence et de circulation, les revêtements de sol tels que l'asphalte, le béton et les pavés ont un impact important sur le climat (Santamouris, 2013, Bouyer, 2009). Ils absorbent la chaleur pendant la journée, ce qui contribue à la formation de l'Îlot de Chaleur Urbain (ICU). Celui-ci est une zone urbaine dont la température est significativement plus élevée que celle des zones environnantes. Pour la ville d'Antananarivo, la cartographie des températures montre que l'intensité de l'ICU est plus prononcée dans certaines zones comme Analakely, 67 ha, Anosibe, Soanierana, Ambanidia (Radanielina, 2019). Il peut avoir des impacts négatifs sur la qualité de l'air et la santé humaine en réduisant le confort thermique. Pour assurer un environnement agréable au niveau de cet espace public ouvert, il faut prendre en considération son climat. Il dépend d'un grand nombre de facteurs tels que la température, l'état hygrométrique de l'air, le vent au voisinage du sol, la nébulosité et l'ensoleillement. Les éléments du climat suscités peuvent être modérés ou amplifiés en fonction des éléments naturels et artificiels tels que les végétations et les matériaux utilisés. De ce fait, le choix du matériau

pour les revêtements de sol constitue un paramètre très important. Pourtant, les exigences techniques et mécaniques dictent avant tout le choix et les contraintes revêtent d'autres aspects comme l'esthétique. Il manque de normes de conception résistantes à la chaleur. L'objectif de notre étude est d'identifier les matériaux de revêtements de sol utilisés dans les espaces publics en milieu urbain, assurant de meilleur confort thermique en milieu extérieur et de faibles impacts sur l'îlot de chaleur à micro-échelle.

## 2. Matériels et méthodes

### 2.1. Intensité de l'îlot de chaleur

L'intensité de l'îlot de chaleur urbain fait référence à la différence de température entre les zones urbaines et leurs zones environnantes. En 2008, Colombert a la relie avec les éléments météorologiques tels que la nébulosité (N), la vitesse du vent ( $V_v$ ), la température (T) et l'humidité spécifique (q).

$$\Delta T_{u-r(\max)} = 2.8 - 0.1 N - 0.38 V_v + 0.02 T - 0.03q \quad (1)$$

### 2.2. Indice de confort thermique

Plusieurs indices sont utilisés pour évaluer le confort extérieur. Mouada (2020) a affirmé que la température physiologique équivalente (PET) est un indice qui reflète une réalité plus conforme du confort thermique extérieur. Cet indice est défini comme étant la température de l'air en °C à laquelle le bilan énergétique pour des conditions d'intérieur assumées est caractérisé par la même température du corps humain et de la peau et le même taux de sueur que ceux calculés pour les conditions extérieures réelles.

Tableau 1: Valeurs du PET, sensations de l'environnement thermique et les niveaux de stress thermiques (Mohammed, 2018)

PET	Sensation humaine	Niveau de stress
4 °C	Très froid	Stress extrême froid
8 °C	Froid	Stress froid fort
13 °C	Frais	Stress froid modéré
18 °C	Légèrement frais	Stress froid léger
23 °C	Confortable	Pas de stress thermique
29 °C	Légèrement chaud	Léger stress chaud
35 °C	Chaud	Stress chaud modéré
41 °C	Très chaud	Stress chaud extrême

Différentes études ont montré que l'intervalle de la PET indiquant un état acceptable de confort varie entre une région et une autre. Le résultat de Lin en 2009 citée par Fahed en 2018 montre que cet intervalle se situe entre 20 °C et 24 °C. Le calcul de cet indice est assez complexe, car il prend en compte plusieurs paramètres environnementaux tels que la température de l'air ambiant, l'humidité relative, la vitesse du vent et le rayonnement solaire. Cependant, il peut être calculé à l'aide de la formule suivante (Fahed, 2018) :

$$PET = T_s - (0.55 - 0.0055 HR)(T_s - 58) - (10.4 V_v^{0.53} - V_v + 10.4) + 0.35 \left( \frac{R_G}{1000} \right) - 19.8 \quad (2)$$

- $T_s$  est la température moyenne de la peau en degrés Celsius. Une estimation de la température moyenne de la peau peut être obtenue en utilisant la formule suivante :

$$T_s = 0.33T + 18.8 - 0.20HR .$$

- HR représente l'humidité relative en pourcentage

- $V_v$  est la vitesse du vent en mètres par seconde
- $R_G$  est le rayonnement solaire global en watts par mètre carré.

### **2.3. Site d'étude**

L'étude est menée sur un site situé à Talatamaty (18.83 S, 47.45 W) au nord-ouest de la ville d'Antananarivo. Ce site dispose d'un climat tropical d'altitude, caractérisé par l'alternance d'une saison chaude et pluvieuse (été austral) de novembre à avril, avec plus fortes précipitations en décembre et janvier et une saison fraîche et sèche (hiver) de mai à octobre, avec les plus faibles précipitations en septembre et octobre.

### **2.4. Mise en œuvre de pavages dans le site**

Quatre types de pavages ont été destinés à l'expérimentation, à savoir les pavés de déchets plastiques (PDP), les pavés en terre cuite (PTC), les pavés de travertin (PTC) et les pavés de béton (PB). Chaque pavage a pour dimensions 100 cm × 100 cm × 3 cm. Ils sont disposés sur une plate-forme exposée en plein soleil. Les quelques arbres et bâtiments environnants dont la hauteur ne dépasse pas 15 m, par les ombres qu'ils projettent, ne produisent pas d'effet de "masque" à aucun moment de la journée sur la plate-forme. Par ailleurs, le trafic est très réduit au niveau des ruelles les plus proches. Pour toutes les raisons mentionnées ci-dessus, le choix de ce site est pertinent pour mettre en exergue l'impact du pavage.

### **2.5. Collecte de données expérimentales**

La détermination expérimentale de l'impact de revêtements de sol sur le microclimat urbain s'effectue par la mesure de la température de surface, la température de l'air, l'humidité relative, la vitesse du vent et le rayonnement solaire au moyen de divers capteurs. Afin de relever la température de surface de chaque pavage, les capteurs de température numériques DS18B20 ont été sélectionnés. La température de l'air et l'humidité relative à une hauteur de 1 m a été enregistrée en utilisant les capteurs DHT1. Ceux-ci sont connectés à la centrale d'acquisition de

données et au microcontrôleur Arduino pour enregistrer les données expérimentales. Une mini station météorologique est placée sur le site expérimental pour recueillir les conditions climatiques telles que la température de l'air ambiant, l'humidité relative et la vitesse du vent.

Le rayonnement solaire a été estimé en utilisant le modèle de Perrin de Brichambeau.

Les expérimentations sont menées pendant deux périodes distinctes. La première série ont été réalisées en hiver austral au mois d'août et la deuxième série en été austral au mois décembre.

### **3. Résultats**

#### **3.1. Variation horaire des températures de surface de pavages**

La journée-type de point de vue climatique est une journée qui est caractérisée par les conditions climatiques moyennes d'une région à une période donnée. Ces conditions peuvent inclure le rayonnement solaire, la vitesse du vent, l'humidité relative et la température de l'air. Les journées-types sont souvent utilisées pour décrire les conditions climatiques dans une région donnée et pour aider à prédire les conditions météorologiques futures. Dans cette étude. Les expérimentations ont été menées le 13 août 2022, une journée-type de la saison sèche où les températures sont les plus basses, et le 18 décembre 2022, en pleine saison chaude. Chaque type de pavé est soumis aux mêmes conditions climatiques. Les courbes des figures 1 et 2 représentent l'évolution de températures superficielles des pavés en fonction du temps au cours de ces journées.

D'après ces figures, on peut avancer une catégorisation des produits eu égard aux courbes obtenues. D'une part, les pavés de déchets plastiques et les pavés de travertin sont regroupés dans la catégorie des produits notée G1. D'autre part, nous rassemblons les pavés de terre cuite et pavés de béton dans la classe des matériaux dénommée G2.

Dans l'ensemble, les courbes présentent la même allure. Pendant ces deux journées, les températures de surface de l'élément G1 sont supérieures à celles de G2. Dans chaque groupe, les deux courbes sont très proches jusqu'à se superposer à certains moments de la journée.

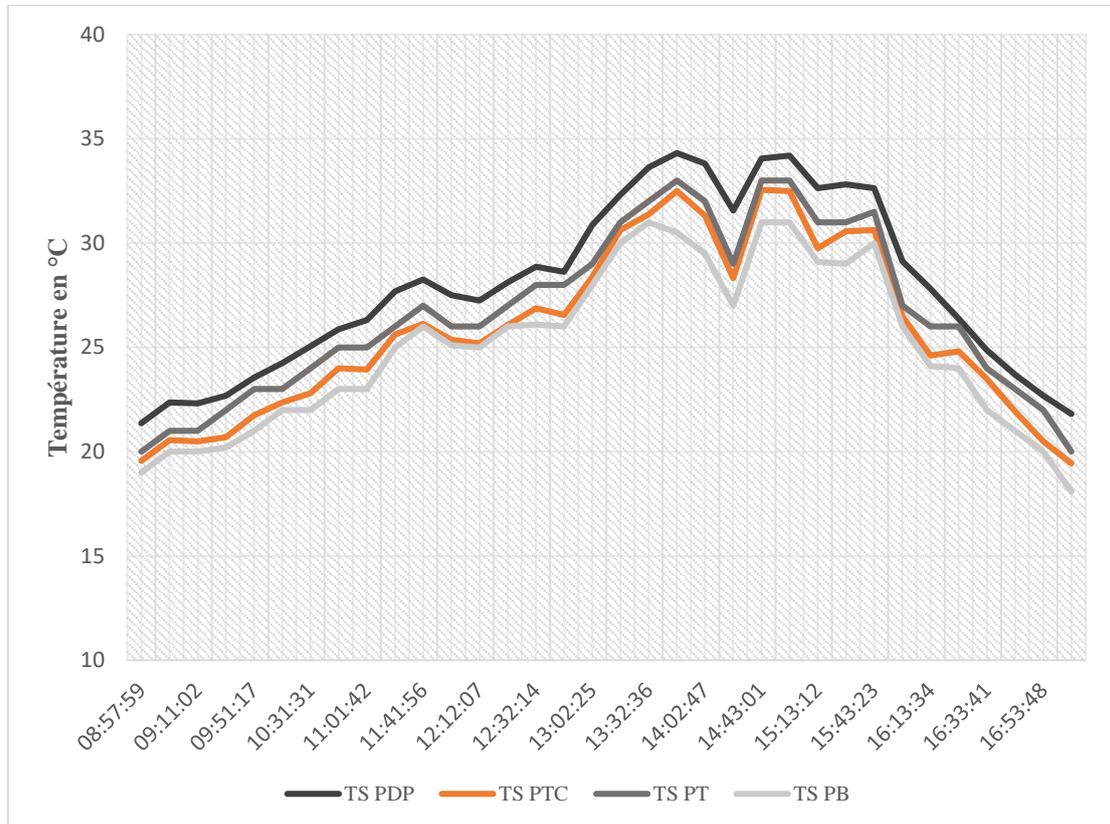


Figure 1: Variation journalière des températures de surface de pavés le 13 août 2022

Les températures de surface restent basses dans la matinée. Elles augmentent progressivement jusqu'à midi pour atteindre leurs maximums vers 15 h 30. Tout au long de la journée, les pavés de déchets plastiques enregistrent les températures les plus élevées, suivis, dans l'ordre, par les pavés de travertin puis les pavés en terre cuite et en dernier les pavés de béton.

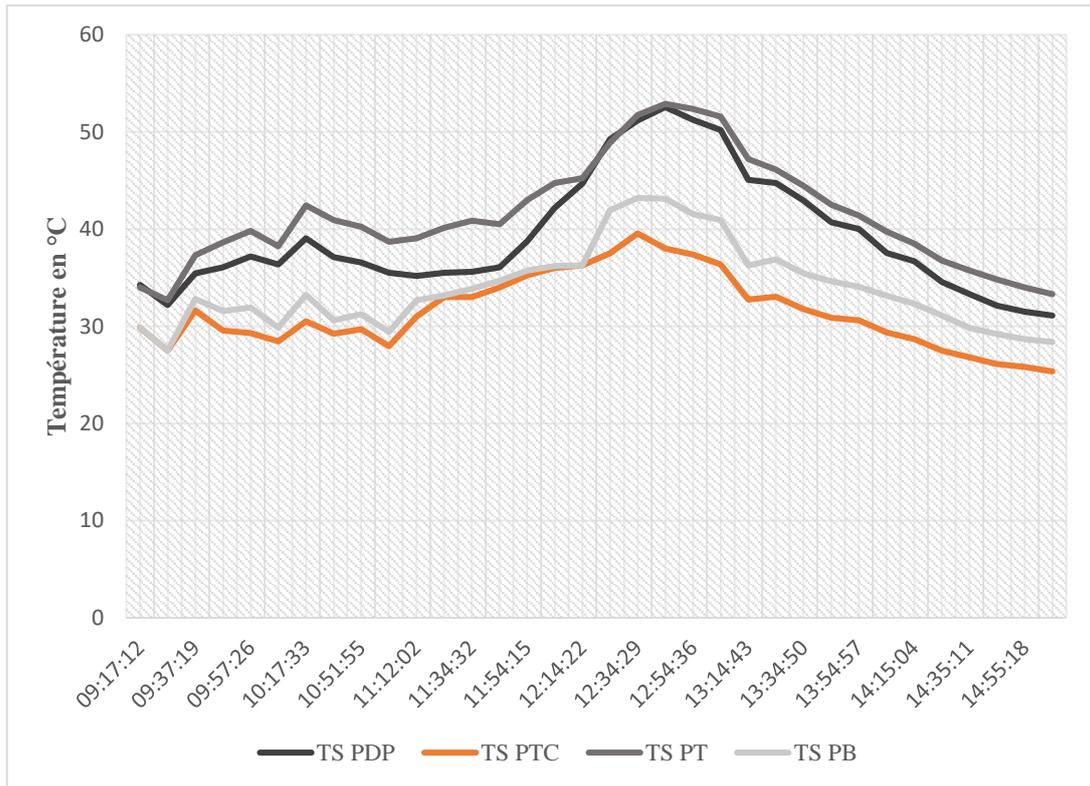


Figure 2: Variation journalière des températures de surface de pavages le 18 décembre 2022.

En été, la température de surface de pavés de béton dépasse celle de pavés en terre cuite. Cette tendance est également constatée entre deux autres. La température de ces deux pavés tourne autour de 45 °C pendant une période plus d’une heure [12 h 14, 13 h 24]. Elle peut atteindre 40 °C pour les pavés en béton entre l’intervalle [12 h 24, 13 h 04]. Pour les pavés en terre cuite, la valeur égale à 36 °C est remarquée durant cette même période.

### 3.2. Températures de surface et température de l’air à 1 m au-dessus de pavages

La figure 3 montre la température de surface de chaque pavage et la température de l’air à 1 m au-dessus de leur surface pendant les deux séries d’expérimentation effectuées en été et hiver 2022, sur trois journées successives chacune.

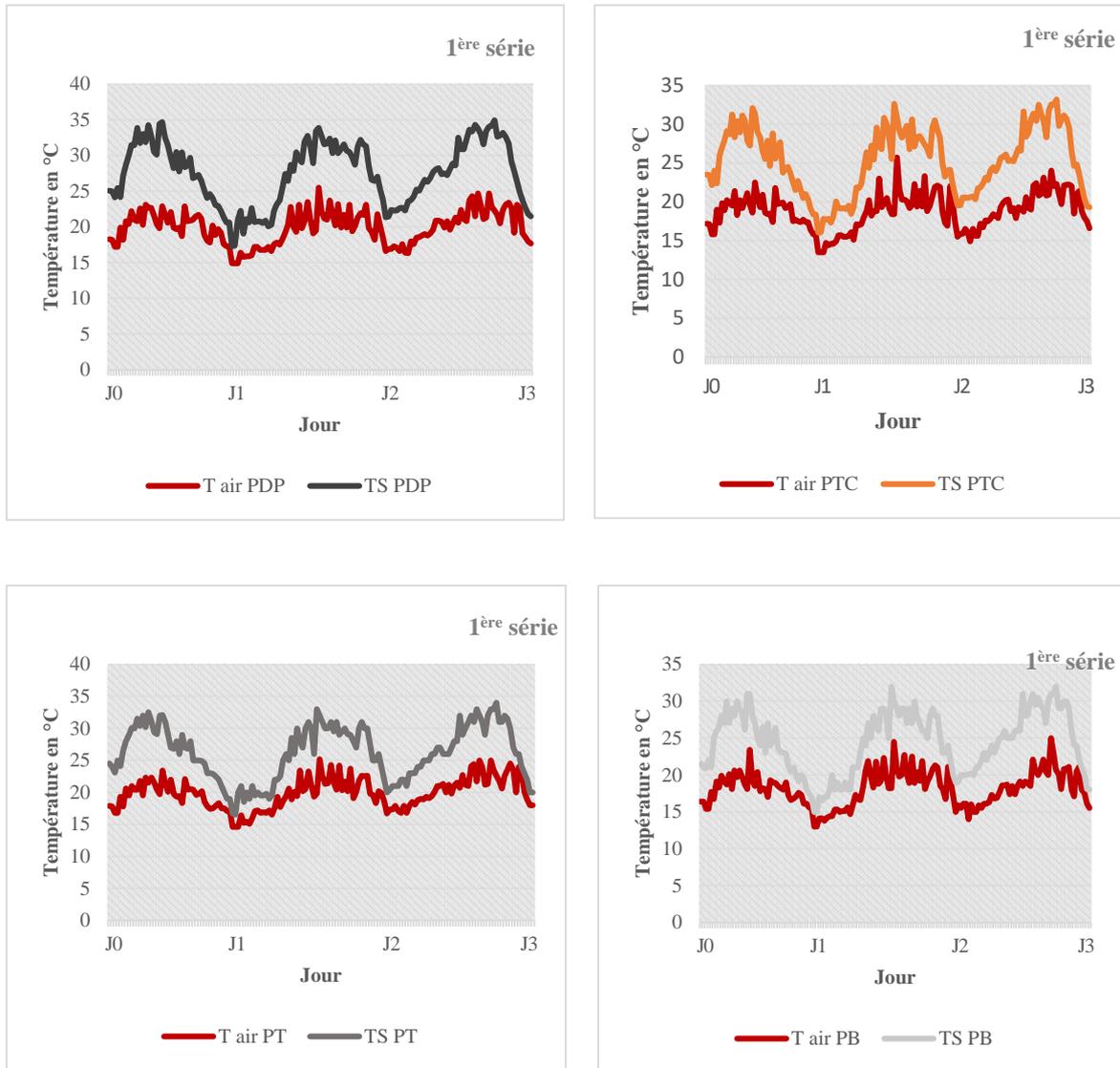


Figure 3: Variation de températures de surface et températures de l'air à 1 m au-dessus de chaque pavage durant la première série d'expérimentation

Les profils de températures de surface élevées des pavés se répercutent sur ceux de l'air à un mètre au-dessus du sol. Au-dessus de la surface de pavés du groupe G1, nous constatons que les températures de l'air sont supérieures à celles des G2. Par ailleurs, chaque groupe accuse des écarts relatifs des moyennes quasi similaires, supérieurs à ceux du groupe G2.

Les écarts relatifs comparables conduisent à des températures de l'air quasiment proportionnelles aux températures de surface. Ces dernières étant plus élevées pour le G1, il en résulte des températures de l'air notablement plus importantes au-dessus des pavés de déchets plastiques et pavés de travertin comparativement aux éléments du groupe G2.

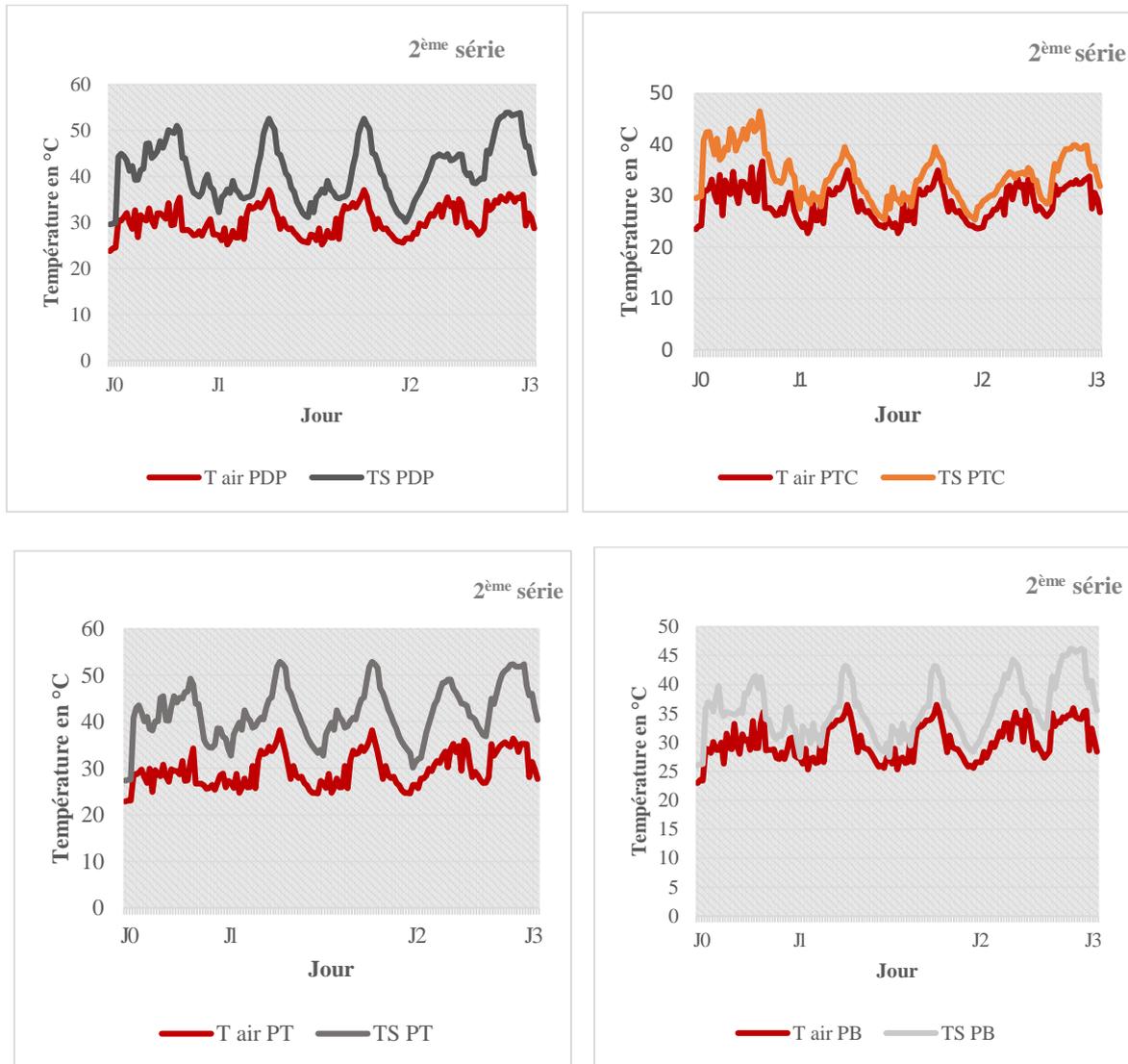


Figure 4: Variation de températures de surface et températures de l'air à 1 m au-dessus de chaque pavage durant la deuxième série d'expérimentation.

Pour la deuxième série, le coefficient de proportionnalité des températures moyennes du G1 tourne autour de 70%, celui de G2 nettement plus relevé, 79%. On pourrait s'attendre à des températures de l'air plus conséquentes, ce qui est loin d'être vérifié. Ceci montre une fois de plus la forte influence des températures de surface.

### 3.3. Évaluation de la température physiologique équivalente

Afin d'évaluer le confort thermique au niveau de pavages, nous avons utilisé l'indice PET. Il est à noter que la vitesse du vent, le rayonnement solaire, la température de l'air et humidité relative sont pris en compte dans ce concept. Le tableau 2 donne la durée journalière du confort thermique au niveau de chaque pavage pendant le 13 août et 18 décembre 2022. Nous avons compilé les différentes valeurs obtenues pour déterminer les durées des niveaux de confort. Nous pensons que les niveaux du confort « Légèrement chaud » et « Légèrement froid » sont relativement acceptables. Notre analyse se base sur le regroupement de ces trois niveaux. Une durée de 10 h a été choisie pour la comparaison.

Tableau 2: Durée du confort au niveau de chaque pavage

Niveau du confort thermique	Durée journalière (h)							
	PDP		PTC		PT		PB	
	Hiver	Été	Hiver	Été	Hiver	Été	Hiver	Été
Légèrement froid	5	0	5	0	5	0	6	0
Confortable	5	0	5	1	5	0	4	0
Légèrement chaud	0	5	0	6	0	4	0	6
<b>Durée totale</b>	<b>10</b>	<b>5</b>	<b>10</b>	<b>7</b>	<b>10</b>	<b>4</b>	<b>10</b>	<b>6</b>
Chaud	0	5	0	3	0	6	0	4

Très chaud	0	0	0	0	0	0	0	0
------------	---	---	---	---	---	---	---	---

La durée de confort thermique au niveau de chaque pavage est similaire pendant une journée hivernale. En été, les pavés en terre cuite engendrent un certain niveau de confort significatif autant que les pavés de béton. Les pavés de déchets plastiques et les pavés de travertin provoquent plus de cinq heures de confort thermique "chaud" au cours d'une journée estivale.

### 3.4. Intensité d'îlot de chaleur urbain

L'intensité d'ICU au-dessus de chaque pavage est donnée par le tableau 3. Elle représente la différence de température entre le milieu urbain et sa périphérie. Plus celles-ci sont élevées, plus ces différences sont remarquables.

Tableau 3: Intensité de l'ICU dans le site expérimental

Date	Intensité de l'ICU (°C)			
	PDP	PTC	PT	PB
13/06/2022	1.12	1.02	1.13	1.05
19/12/2022	1.93	1.75	1.95	1.80

Les résultats obtenus montrent que l'intensité de l'îlot causé par nos pavages varie entre 1.05°C et 1.93 °C. En été, elle est plus forte que celle de l'hiver. Quel que soit la saison, les pavés de déchets plastiques sont les plus impactant, suivis, dans l'ordre, par les pavés de travertin puis les pavés de béton et en dernier les pavés en terre cuite.

## 4. Discussion

L'étude a mis en évidence que le type de pavage a un impact direct sur la température de surface et, par extension, sur le confort thermique urbain. Les pavés de déchets plastiques ont montré

des températures de surface élevées, créant ainsi un effet d'îlot de chaleur plus prononcé, suivi par les pavés de travertin, tandis que les pavés en béton et en terre cuite ont eu un effet thermique moins marqué. Ces résultats sont concordance avec ceux d'études antérieures (Santamouris, 2013) et soulignent l'importance de la réflexion et de l'absorption de la chaleur par les matériaux dans la gestion thermique urbaine.

Le confort thermique, mesuré via l'indice PET, a montré que les pavés de déchets plastiques et de travertin engendrent un inconfort thermique, en particulier en été, ce qui affecte la qualité de vie des habitants. En revanche, les pavés de béton et en terre cuite semblent offrir un meilleur compromis, avec des niveaux de confort plus élevés, particulièrement pendant les saisons plus froides.

Ces observations soulignent l'importance de choisir des matériaux réfléchissants, en particulier dans les zones urbaines à forte densité, afin de réduire l'impact des îlots de chaleur et d'améliorer le confort thermique. Un cadre normatif et des stratégies d'urbanisme prenant en compte ces paramètres sont donc essentiels pour atténuer les effets du changement climatique en milieu urbain.

L'une des forces majeures de cette étude réside dans la valorisation de matériaux locaux, comme les pavés de travertin. En utilisant des matériaux disponibles localement, on réduit l'empreinte carbone liée au transport et on soutient les industries locales. De plus, l'intégration des pavés de déchets plastiques contribue à la préservation de l'environnement en recyclant des matériaux qui, autrement, pourraient polluer les espaces urbains. Cette démarche s'inscrit dans un effort plus large de gestion durable des ressources et de réduction de la pollution plastique, une problématique majeure dans de nombreuses régions du monde, y compris Madagascar.

Cependant, certains aspects peuvent être perçus comme des limites dans cette étude. D'abord, les pavés en terre cuite, bien que présentant de bons résultats en matière de gestion thermique,

sont fabriqués de manière artisanale, ce qui peut poser des défis en termes de qualité de fabrication.

## 5. Conclusion

Les matériaux de construction affectent fortement le microclimat urbain. Cette étude met en lumière l'impact des matériaux de pavage sur l'intensité des îlots de chaleur urbains et le confort thermique en milieu urbain. Les résultats montrent que les pavés de déchets plastiques génèrent des températures de surface plus élevées, contribuant ainsi à l'intensification des ICU, tandis que les pavés en terre cuite et en béton offrent des performances thermiques plus modérées, améliorant le confort thermique des espaces publics. En tenant compte des variations saisonnières et des conditions climatiques, il apparaît que le choix des matériaux revêt une importance capitale pour la gestion des températures urbaines et le bien-être des habitants.

Les pavés de matériaux recyclés, bien que bénéfiques sur le plan écologique, nécessitent un examen plus approfondi de leurs impacts thermiques, notamment en milieu urbain. Les pavés traditionnels comme les pavés de béton et les pavés en terre cuite restent des alternatives intéressantes, bien qu'ils présentent des performances thermiques plus élevées en été.

L'urbanisation croissante à Madagascar et ailleurs dans le monde impose un besoin urgent d'adopter des solutions architecturales et urbanistiques intelligentes, incluant l'utilisation de matériaux réfléchissants et une gestion raisonnée des espaces verts, pour atténuer les effets du changement climatique. De futures études devraient intégrer des approches plus globales, prenant en compte les interactions entre les matériaux, l'urbanisme et les climats locaux, afin de proposer des solutions durables pour la création de villes résilientes face au réchauffement climatique.



## 6. Références

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

Colombert M. (2008). Contribution à l'analyse de la prise en compte du climat urbain dans les différents moyens d'intervention sur la ville (Thèse de doctorat). Université Paris-Est.

Fahed J. (2018). Étude numérique du potentiel de rafraîchissement des techniques de réduction des îlots de chaleur urbain (ICU) sous climat méditerranéen (Thèse de doctorat). Université de Toulouse.

Lucas L. (2019). Modélisation 3D du bilan radiatif des milieux urbains par inversion d'images satellites en cartes de réflectance et de température des matériaux urbains (Thèse de doctorat). Université Toulouse.

MDG-INSTAT-RGPH (2018). Résultats globaux du recensement général de la population et de l'habitation de Madagascar.

Mohammed C. (2018). Amélioration des microclimats des villes par la prolifération des terrasses et toitures végétalisées en zones aride et méditerranéenne (Thèse de doctorat). Université Mohammed Seddik BENYAHIA, Algérie.

Mouada N. (2020). Étude de l'impact de la morphologie urbaine sur le confort thermique et la marchabilité dans les espaces publics extérieurs. Cas de la ville de Sidi Okba (thèse de doctorat). Université Mohamed Khider, Algérie.

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

ONU-Habitat (2018). Madagascar : Profil Urbain d'Antananarivo.

Radanielina M. (2019). Microclimat urbain : phénomène d'îlot de chaleur et confort thermique mise en évidence et variabilité spatiale sur l'agglomération d'Antananarivo. Antananarivo.

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