

ETUDE DE L'INTERACTION ENTRE PAVAGES ET ILOTS DE CHALEUR URBAIN PAR SIMULATION

Pierre Bénilde Randriamanampisoa¹, Mino Patricia Randrianarison², Bienvenue Rahelilarilalao³

- 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

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. La nature des matériaux utilisés et leurs propriétés thermiques conductives et radiatives influencent la variation de la température. Notre travail vise à identifier les pavages qui procurent le meilleur confort thermique en milieu extérieur et de faibles impacts sur l'îlot de chaleur. L'approche méthodologique combine des études expérimentales, de modélisation et de simulation. Les résultats de mesure in situ et les propriétés thermiques des pavages ont servi à l'élaboration de modèles mathématiques en vue de la simulation. L'outil développé nommé « I-PATHCLIM » a pour but de faire des prédictions et d'étendre l'étude à d'autres sites, autres zones climatiques. Il permet de modéliser les effets

des différents types de pavés sur la température et le confort thermique des espaces urbains. Les résultats de l'étude montrent que les pavés de déchets plastiques et les pavés de travertin apportent les meilleures performances thermiques, en particulier dans les villes de Toamasina et Antsiranana.

Mots-clés : I-PATHCLIM, 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 nature of the materials used and their conductive and radiative thermal properties influence temperature variations. Our study aims to identify paving materials that provide the best outdoor thermal comfort while minimizing the impact on urban heat islands. The methodological approach combines experimental studies, modeling, and simulation. In situ measurements and the thermal properties of paving materials were used to develop mathematical models for simulation purposes. The developed tool, named "I-PATHCLIM," is designed to make predictions and extend the study to other sites and climatic zones. It enables the modeling of the effects of different types of paving materials on temperature and thermal comfort in urban spaces. The study results show that plastic waste pavers and travertine pavers offer the best thermal performance, particularly in the cities of Toamasina and Antsiranana.

Keywords: I-PATHCLIM, 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 % (MDG-INSTAT-RGPH2018). 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). 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. Les expérimentations in situ se limitent sur une étude de quelques types de pavages. Afin de tester plusieurs scénarios, un outil de simulation a été développé. Cette étude a pour but de faire des prédictions et d'étendre l'étude à d'autres sites, autres zones climatiques et autres matériaux.

2. Matériels et méthodes

2.1. Modèles

La phase expérimentale de nos travaux d'investigation nous a permis de réunir d'une part, des données climatiques et, d'autre part, plusieurs caractéristiques thermiques des matériaux testés ainsi que l'indicateur température de surface. L'ensemble de ces données empiriques sont utilisées pour le développement des modèles mathématiques. Ces derniers serviront à faire des simulations d'impacts sur le microclimat urbain de revêtements de sol en fonction de la nature des matériaux mis en œuvre.

2.1.1. Température

Le modèle mathématique de la prédiction de la température basée sur l'expérimentation a été développé en utilisant la méthode de régression linéaire multiple.

$$y_i = \beta_0 + \sum_J^P \beta_J X_{i,j} + \varepsilon_i \quad (1)$$

y_i : variables réponses

$X_{i,j}$: variables indépendantes

β : coefficient inconnu

ε_i : zero erreur moyen

D'après la balance thermique au niveau des pavages, les paramètres qui influencent leur température sont la vitesse du vent (V_v), le rayonnement solaire (R_g), l'humidité relative (HR), l'albédo (ρ), la conductivité thermique, la chaleur spécifique et la masse volumique. La diffusivité thermique (a) est utilisée dans le modèle pour représenter ces trois derniers afin de réduire le nombre de paramètres. Nous avons pris donc la température de surface et la température de l'air à 1 m au-dessus de la surface de pavage comme variables dépendantes. Les variables indépendantes rassemblent l'heure légale (HL), la hauteur par rapport au sol (h) et les différents paramètres précédents.

Dans cette étude, nous penchons vers la machine learning afin de développer le modèle mathématique à partir de données expérimentales. L'apprentissage SUPERVISÉ a été retenu dans cette étude. Il consiste à superviser l'apprentissage de la machine en lui montrant des exemples de la tâche qu'elle doit réaliser, généralement sous forme de données.

La modélisation suit les trois étapes fondamentales (Figure 1).

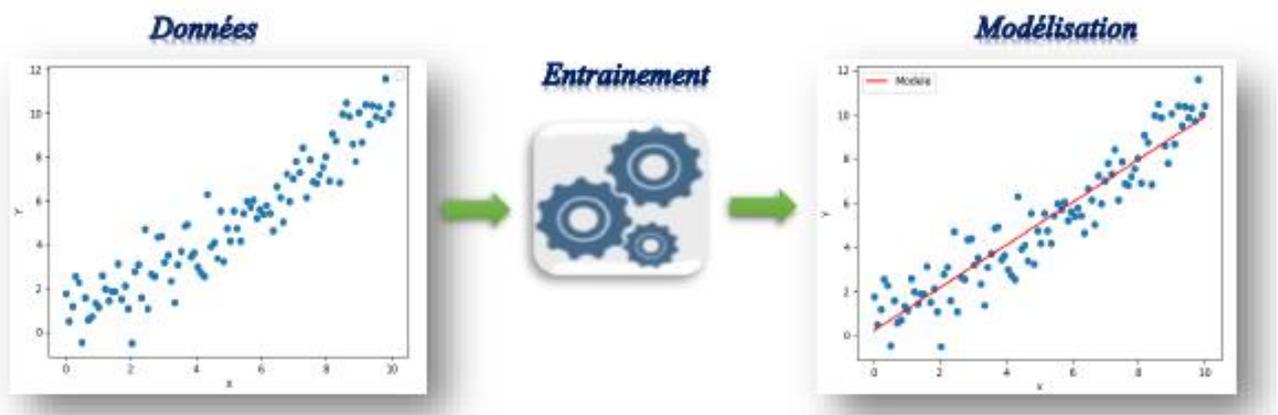


Figure 1: Différentes étapes de la modélisation

❖ **Analyses des données**

Cette étape aide à connaître les valeurs manquantes dans les données et le type des variables. Les résultats obtenus pendant les périodes du 11 au 13 août 2022 et du 17 au 19 décembre 2022 sont les données servant à l'apprentissage SUPERVISÉ. Elles sont enregistrées dans un fichier de format "xlsx".

❖ **Entraînement de données**

La phase d'entraînement est une étape de prétraitement des données réparties aléatoirement en deux groupes. Le premier en contient 20% qui servent dans la modélisation appelée « test ». Leur rôle est d'entraîner le modèle. Les 80% constituant le second groupe, réservées dans le traitement de modèle appelés « train ». Leur fonction consiste à évaluer la performance du modèle. L'objectif est de transformer les données pour le mettre dans un format propice au Machine Learning.

❖ **Modélisation**

Le modèle mathématique que nous avons créé est linéaire. Une fois que le modèle a été entraîné, il est évalué en utilisant l'ensemble de validation.

Nous avons choisi le langage de programmation Python. Le modèle mathématique de température de pavage est donc donné par l'équation suivante :

$$T = 0.02 HL - 7.72 h - 1.41 Vv + 0.096 Rg - 0.02 HR - 21.48 \rho + 2514361.47 a + 53.50 \quad (2)$$

Le coefficient négatif signifie qu'une augmentation de la valeur d'un paramètre correspondance diminue la température. En revanche, le coefficient positif augmente cette dernière.

Afin d'identifier les paramètres les plus influents de notre modèle, on utilise l'analyse de sensibilité réduite. La méthode de décomposition de Sobol est appliquée dans cette étude.

L'indice de sensibilité réduite de l'albédo est le plus élevé, ayant pour valeur égale à 0.43. Cela indique que ce paramètre contribue à environ 43% de la variance totale de la température. En revanche, l'heure légale et la diffusivité thermique présentent des indices très faibles. Les trois autres possèdent un indice de sensibilité quasiment similaire, soit 11%.

2.1.2. 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).

$$\Delta T_{u-r(max)} = 2.8 - 0.1 N - 0.38 V_v + 0.02 T - 0.03q \quad (3)$$

2.1.3. 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

PET	Sensation humaine	Niveau de stress
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) :

$$PET = T_s - (0.55 - 0.0055HR)(T_s - 58) - (10.4 V_v^{0.53} - V_v + 10.4) + 0.35 \left(\frac{R_G}{1000} \right) - 19.8 \quad (4)$$

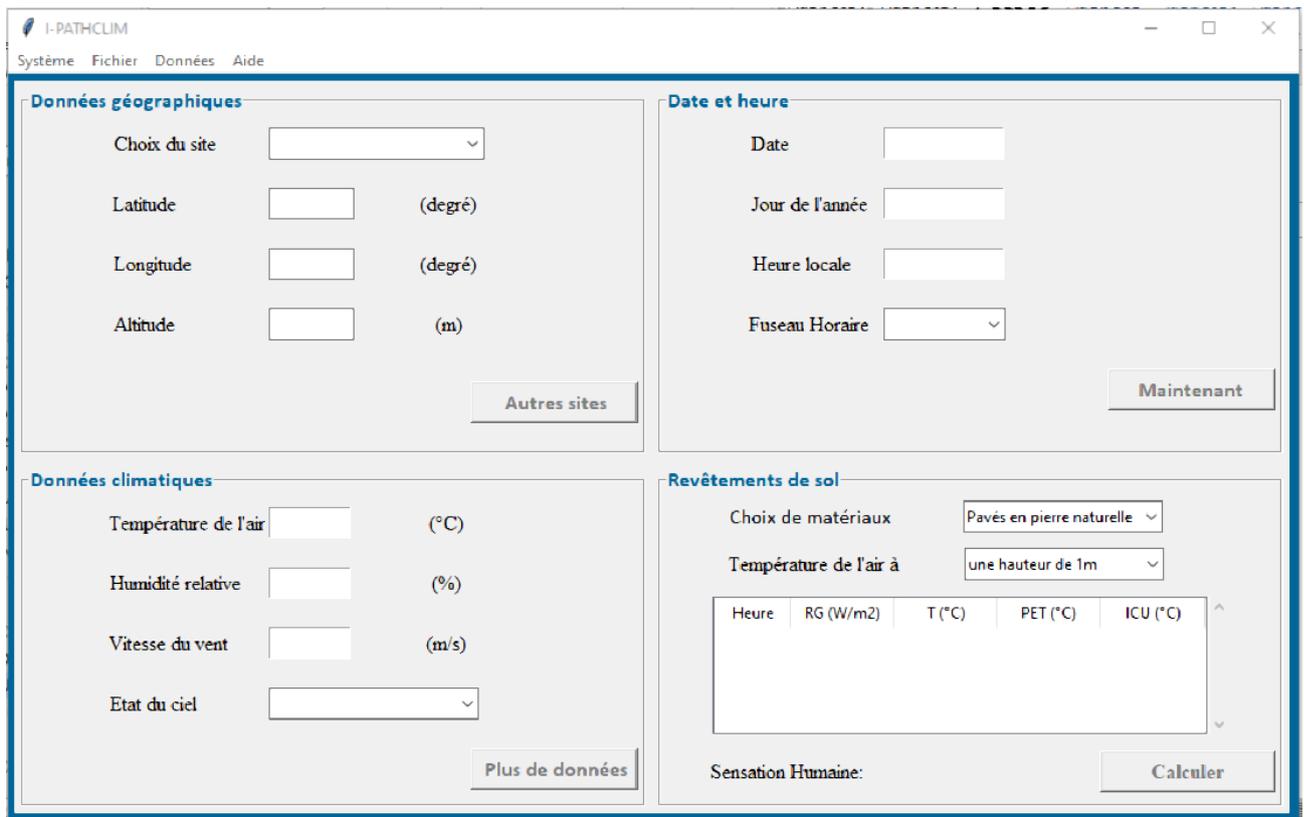
- T_s est la température moyenne de la peau en degrés Celsius. Une estimation de la température moyenne de la peau peut être obtenue en utilisant la formule suivante :

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

- 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.

2.2. Outil de simulation

Les modèles précédemment développés ont été intégrés dans notre outil de simulation. Nous avons conçu plusieurs interfaces permettant de saisir les données d'entrée requises et de visualiser les résultats de la simulation. Grâce à cet outil, nous sommes en mesure de simuler une large gamme de scénarii bâtis sur le tandem nature de matériaux de pavage et conditions climatiques de divers sites. Le but est de proposer des solutions pour un confort extérieur optimal en fonction du type d'environnement urbain afin d'anticiper la formation d'îlot de chaleur. Il est spécifiquement conçu pour étudier les espaces publics tels que les jardins, les cours, les rues et les avenues à l'échelle micro, sans prendre en compte les bâtiments.



Données géographiques

Choix du site

Latitude (degré)

Longitude (degré)

Altitude (m)

Date et heure

Date

Jour de l'année

Heure locale

Fuseau Horaire

Données climatiques

Température de l'air (°C)

Humidité relative (%)

Vitesse du vent (m/s)

Etat du ciel

Revêtements de sol

Choix de matériaux

Température de l'air à

Heure	RG (W/m2)	T (°C)	PET (°C)	ICU (°C)

Sensation Humaine:

Figure 2: Interface de l'outil I-PATHCLIM

Afin de valider cet outil, les données climatiques du 12 août 2022 ont été utilisées pour prédire la température de l'air à une hauteur de 1 mètre. Ces prédictions ont été comparées aux valeurs expérimentales obtenues lors de cette journée. Dans le cadre de cette validation, les pavés de béton ont été sélectionnés comme revêtements de sol.

Le tableau 2 présente les écarts relatifs (en %) calculés à partir des valeurs fournies par l'outil et celles obtenues à partir des données expérimentales.

Tableau 2: Comparaison de résultats expérimentaux et résultats de simulation

Heures	Température expérimentale (°C)	Température prédite (°C)	Écart relatif
08 :00	13.0	12.3	5%
09 :00	14.4	13.5	6%
10 :00	15.9	14.5	9%
11 :00	21.9	20.0	9%
12 :00	22.3	20.5	8%
13 :00	19.8	18.0	9%
14 :00	18.9	17.5	7%
15 :00	19.8	18.3	8%
16 :00	18.1	16.5	9%
17 :00	17.1	15.5	9%

Généralement, un écart relatif inférieur à 10% est considéré comme acceptable dans de nombreux domaines scientifiques et techniques (Billoux et al., 2016). Dans le cas présent, les écarts relatifs varient entre 5% et 9%. Ces valeurs indiquent que les températures prédites par l'outil sont généralement proches des températures expérimentales, avec une légère différence. Sur la base de ces résultats, il est possible de considérer que l'outil présente une précision raisonnable dans la prédiction des températures.

3. Résultats

Les résultats des simulations sont représentés par le tableau 3-5. Ceux-ci donnent la température de l'air et la température physiologique équivalente à 1 m au-dessus de chaque type de pavage, ainsi que l'intensité de l'îlot de chaleur urbain.

4.1. Température de l'air à 1 m

Quels que soient la ville, les températures les plus faibles émanent des PTC. L'écart par rapport aux PB s'avère relativement faible (Tableau 3). Les températures d'air générées par les PDP et les PT sont similaires et plus élevées. On trouve la catégorisation en deux groupes des quatre pavés. Ces températures de l'air se répercutent avec la température physiologique équivalente (Tableau 4). Les résultats obtenus nous amènent vers une catégorisation des produits eu égard aux résultats obtenus. 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.

Pour la ville d'Antananarivo, les plages horaires de valeurs maximales se situent entre 12 h 00 et 14 h 00. Les écarts relatifs entre l'hiver et l'été sont notables, environ 20 % quels que soient les groupes. En revanche, la température maximale n'excède pas 23 °C en hiver pour la ville d'Antsirabe. Cette valeur est enregistrée au cours de 11 h 00 à 13 h 00. En été, elle tourne autour

de 20 °C dans l'intervalle [10 h 00, 12 h 00]. L'écart relatif de deux saisons de G1 est inférieur à celui de G2.

L'écart relatif entre la température maximale estivale et hivernale est identique pour les deux groupes dans la ville de Fianarantsoa et Toliara. Ces températures sont relevées entre les plages horaires de [12 h 00, 13 h 00] en hiver et [10 h 00, 12 h 00] en été pour la première ville et elle est égale à 33 °C pour G1 tandis que 31 °C pour G2 entre 10 h 00 et 12 h 00 dans la seconde ville.

Pour la ville de Toamasina et Antsiranana, l'écart relatif de G1 est nettement supérieur que celui de G2. En été, la température maximale de G1 dans la ville de Toamasina tourne autour de 30 °C, soit une différence de 4 °C par rapport à celle de G2. Ces valeurs sont enregistrées dans l'intervalle du temps [10 h 00, 12 h 00] tandis qu'elle est maximale entre 11 h 00 et 13 h 00 pour Antsiranana. Ces plages horaires se situent entre 12 h 00 et 14 h 00 pour la ville de Mahajanga. En été, la température maximale dans cette ville atteint la valeur de 33 °C contre seulement 25 °C en hiver. Il est à noter que les écarts relatifs entre ces deux saisons sont très élevés.

4.2. Température physiologique équivalente

Les données climatiques de 8 h 00 à 17 h 00, soit sur une durée totale de 10 heures, dès 15 juin et 15 décembre 2023, ont été choisies dans la simulation. Nous avons compilé les différentes valeurs obtenues pour déterminer les durées des niveaux de confort présentées dans le tableau 4. 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 faciliter la comparaison.

Ce tableau nous montre qu'en hiver, les PTC procurent le meilleur confort thermique pour la ville d'Antananarivo suivi de PB. Le PT et le PDP possèdent la même durée de confort pendant

deux journées estivales et hivernales. Ils provoquent de niveau « chaud » en été. Dans la ville d'Antsirabe, tout le pavage engendre de niveau du confort « Froid » quelles que soient les saisons. Il est remarqué que les PDP et les PT offrent une durée élevée, environ six heures pour une journée d'hiver et neuf heures en été. Les PTC et les PB sont les plus adaptables dans la ville de Fianarantsoa. Il est à noter aussi que les PDP et les PT offrent de niveau confort tolérable. Pour Toliara, le confort thermique le plus significatif est enregistré au niveau de PTC et PB. Les deux autres provoquent de niveau presque « Légèrement chaud ». La durée du confort pour chaque pavage est identique pendant les deux journées estivales et hivernales. Les PT et les PDP constituent les pavages les plus appropriés pour la ville de Toamasina puisqu'ils procurent de niveau « Confortable » durant cinq heures pour ces mêmes périodes. Les PTC et les PB n'engendrent que trois heures. Les PB et les PTC offrent de meilleurs confort pour Mahajanga. En été, les PDP et les PT provoquent de niveau du confort « Très chaud » pendant deux heures. La durée du confort reste la même pendant l'été et l'hiver quels que soient les pavages. Il est observé que les PDP et les PT sont les plus habitués pour la ville d'Antsiranana, car ils causent un niveau « confortable » qui dure quatre heures durant ces périodes.

4.3. Intensité de l'ICU

L'intensité d'ICU au-dessus de chaque pavage appliqué dans les grandes villes de Madagascar est donnée par le tableau 5. Elle représente la différence de température entre le milieu urbain et sa périphérie. Plus celles-ci sont élevées, plus ces différences sont remarquables. Pour cet ensemble, nous remarquons qu'elle est quasiment identique pour tout le pavage pendant une même saison.

Nous constatons que l'intensité de l'îlot de chaleur en été est supérieure à celle de l'hiver. Pour Antananarivo, elle atteint plus de 2 °C en été. La valeur la plus élevée est enregistrée dans la ville de Toliara, touchant le 3 °C. La valeur minimale est observée à Antsiranana. Cela peut

s'expliquer par le fait que les vitesses du vent dans cette ville sont élevées, qui tourne autour de [4.41 m/s, 7.01 m/s]. Ceci favorise les pertes de chaleur par convection. Nous remarquons que les écarts entre l'intensité d'ICU au-dessus de chaque pavage sont faibles pour une même journée.

4. Discussion

Cette étude réside dans sa capacité à prédire les effets des pavages sur le microclimat urbain sans nécessiter une expérimentation directe dans chaque ville. En utilisant des données climatiques existantes et un modèle mathématique basé sur des paramètres bien définis, nous avons pu évaluer les performances thermiques des différents pavages dans des zones urbaines variées. Cela permet d'obtenir des résultats pertinents pour plusieurs villes de Madagascar, comme Antananarivo, Toamasina, Fianarantsoa, et d'autres, sans avoir à mener des expérimentations longues et coûteuses.

De plus, l'outil de simulation développé s'avère très facile à utiliser, ce qui facilite la mise en œuvre des solutions proposées pour le confort thermique dans les villes. Il peut être adapté pour d'autres zones climatiques, et permet de tester différents matériaux de pavage afin de sélectionner ceux qui offriront le meilleur confort thermique en fonction des conditions climatiques locales.

L'étude met également en lumière la nécessité d'intégrer des matériaux plus écologiques dans les aménagements urbains, comme les pavés de déchets plastiques. Cette approche non seulement aide à réduire les déchets plastiques, mais elle participe également à la lutte contre la pollution tout en contribuant à une meilleure gestion thermique des espaces urbains. De plus, l'utilisation de matériaux comme le travertin valorise les ressources locales et renforce la durabilité des infrastructures urbaines.

Cependant, certains aspects limitent l'étendue des résultats. Tout d'abord, les simulations se sont concentrées sur un nombre restreint de types de pavages (quatre types seulement). Cette limitation pourrait restreindre la généralisation des résultats à d'autres types de matériaux qui pourraient être plus adaptés selon les contextes locaux spécifiques. Par exemple, l'étude ne prend pas en compte l'impact des pavés en argile cuite, matériaux utilisés dans certaines régions et qui peuvent offrir des performances différentes. L'intégration d'autres matériaux pourrait fournir une analyse plus exhaustive des options disponibles pour les aménagements urbains.

De plus, l'étude ne considère pas l'effet de la pluie sur la performance thermique des pavages. En réalité, les conditions météorologiques, notamment les précipitations, jouent un rôle important dans le confort thermique en modifiant les propriétés thermiques des matériaux (notamment leur capacité à conserver la chaleur ou à favoriser son évacuation). L'absence de ces données pourrait entraîner une sous-estimation de l'impact des conditions climatiques variables sur le confort thermique.

5. Conclusion

Le changement climatique, avec ses impacts croissants sur les zones urbaines, constitue un défi majeur pour les sociétés contemporaines. Les espaces urbains, de par leur densification et leur étalement, modifient les conditions climatiques locales, particulièrement à travers la formation des îlots de chaleur urbains. Ces phénomènes contribuent à l'augmentation des températures et à une baisse du confort thermique, affectant ainsi la santé publique et la qualité de vie des habitants.

Cette étude a permis de démontrer l'importance du choix des matériaux de pavage comme levier pour moduler les effets du changement climatique, notamment en réduisant l'intensité de l'ICU et en améliorant le confort thermique dans les espaces publics urbains. L'outil de simulation développé dans ce cadre offre une méthode efficace pour prédire et évaluer les impacts

thermiques des différents matériaux utilisés dans le pavage. En utilisant des données climatiques réelles, cet outil permet d'identifier les pavés les mieux adaptés aux conditions spécifiques de chaque ville malgache, avec une attention particulière à l'impact environnemental, en privilégiant les pavés à base de déchets plastiques.

Nous avons enregistré que les pavés de déchets plastiques et les pavés de travertin apportent les meilleures performances thermiques, en particulier dans des villes comme Toamasina et Antsiranana. Ces matériaux sont non seulement adaptés à la gestion de l'ICU, mais ils contribuent également à la conservation de l'environnement, en offrant des solutions écologiques aux défis urbains.

Les résultats de cette recherche soulignent l'importance d'adopter une approche intégrée pour la conception des espaces urbains, prenant en compte les matériaux de pavage et leur influence sur le climat local. L'optimisation de ces facteurs pourrait significativement améliorer la résilience des villes face au changement climatique et assurer un environnement plus confortable et durable pour les générations futures.

6. Références

Billoux, N. Sas, C. (2016). Développement et validation d'une méthodologie de quantification des images planaires.

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.

7. Tableaux

Tableau 3: Températures de l'air prédites dans un espace public dans les grandes villes

Grandes villes	Groupe	Température minimale (°C)		Température maximale (°C)		Écart relatif entre les températures maximales
		Hiver	Été	Hiver	Été	
Antananarivo	G1	13	17	24	30	20%
	G2	16	20	22	28	21%
Antsirabe	G1	8	10	20	23	13%
	G2	5	8	17	20	15%
Fianarantsoa	G1	16	22	28	30	7%
	G2	15	19	25	27	7%
Toliara	G1	22	20	28	33	16 %
	G2	20	19	26	31	15 %
Toamasina	G1	15	18.5	22	30	27%
	G2	12	17	20	26	23%
Mahajanga	G1	18	20	25	33	24%
	G2	16	18	23	31	26%
Antsiranana	G1	19	21	28	31	10%

	G2	19	18	25	30	17%
--	----	----	----	----	----	-----

Tableau 4: Température physiologique équivalente prédite dans un espace public dans les grandes villes

Villes	Durée journalière du confort thermique en heure							
	PDP		PTC		PT		PB	
	Hiver	Été	Hiver	Été	Hiver	Été	Hiver	Été
Antananarivo	10	6	10	10	10	5	10	6
Antsirabe	6	9	5	7	6	9	5	6
Fianarantsoa	10	4	10	8	10	4	10	6
Toliara	6	6	10	10	5	6	9	10
Toamasina	10	10	10	10	10	10	10	10
Mahajanga	10	5	10	6	10	5	10	6
Antsiranana	10	10	10	10	10	10	10	10

Tableau 5: Intensité de l'ICU prédites dans un espace public dans les grandes villes

Villes	Date	Intensité de l'ICU (°C)			
		PDP	PTC	PT	PB
Antananarivo	15/06/2023	1.26	1.21	1.28	1.22
	15/12/2023	2.02	1.97	2.03	1.99
Antsirabe	15/06/2023	1.54	1.49	1.56	1.49
	15/12/2023	2.00	1.95	2.02	1.95
Fianarantsoa	15/06/2023	1.67	1.62	1.68	1.64
	15/12/2023	2.10	2.05	2.11	2.06
Toliara	15/06/2023	1.63	1.58	1.63	1.45
	15/12/2023	2.95	2.90	2.96	2.91
Toamasina	15/06/2023	1.22	1.17	1.23	1.18

	15/12/2023	2.74	2.69	2.75	2.70
Mahajanga	15/06/2023	0.94	0.89	0.95	0.91
	15/12/2023	1.05	1.00	1.07	1.02
Antsiranana	15/06/2023	0.34	0.39	0.32	0.38
	15/12/2023	0.58	0.53	0.60	0.54