

Modélisation Thermoradiative Et Géospatiale Du Confort Thermique Urbain En Milieu Tropical De Haute Altitude : Application A La Ville Nouvelle De Tana-Masoandro

[Thermoradiative And Geospatial Modelling Of Urban Thermal Comfort In A Tropical Highland Climate: Application To The New City Of Tana-Masoandro]

¹RANAIVOSAMIMANANA Tolotra Stéphane, ²RAVONINJATOVO Achille,

³ANDRIANAIVO Lala,

ESPA, Université d'Antananarivo, Ecole Supérieure Polytechnique d'Antananarivo,

Laboratoire EXERGIE et GEOINGENIERIE

BP 1500, Antananarivo 101, Madagascar

Email : ¹tolotrastephan@gmail.com, ²achillegc@yahoo.fr, ³andrianaivo.andri@gmail.com



Résumé : Cette étude analyse le phénomène d'îlot de chaleur urbain (ICU) dans un contexte tropical d'altitude à travers la modélisation thermoradiative et géospatiale de la ville nouvelle de Tana-Masoandro (Madagascar). En combinant les outils open-source Python, QGIS et le plugin UMEP, la recherche propose une approche intégrée pour évaluer les interactions entre morphologie urbaine, rayonnement solaire, propriétés thermiques des matériaux et confort thermique extérieur. Le modèle développé simule la température radiante moyenne (Tmrt), l'indice de confort thermique (PET) et le facteur de visibilité du ciel (SVF), permettant de cartographier la distribution spatiale des zones de surchauffe. Les résultats révèlent que la densité bâtie, la faible végétation et les surfaces à faible albédo accentuent l'intensité des ICU, tandis que la végétalisation et les matériaux réfléchissants réduisent la Tmrt de 15 à 20 °C. Cette approche hybride démontre la pertinence scientifique et opérationnelle du couplage Python-QGIS-UMEP pour la planification bioclimatique. Elle offre un cadre reproductible et adaptable aux villes tropicales en développement, contribuant ainsi à la conception d'espaces urbains plus résilients, confortables et énergétiquement efficaces.

Mots-clés : Îlot de chaleur urbain, Modélisation thermoradiative, Python-QGIS-UMEP, Confort thermique et Urbanisme tropical durable

Abstract: This study investigates the urban heat island (UHI) phenomenon in a tropical highland context through thermoradiative and geospatial modeling applied to the new city of Tana-Masoandro (Madagascar). By integrating open-source tools Python, QGIS, and the UMEP plugin the research proposes a comprehensive framework to assess interactions between urban morphology, solar radiation, surface materials, and outdoor thermal comfort. The developed model simulates the mean radiant temperature (Tmrt), the Physiological Equivalent Temperature (PET), and the Sky View Factor (SVF) to map the spatial distribution of heat stress zones. Results show that high built density, low vegetation cover, and surfaces with low albedo intensify UHI effects, while vegetated areas and reflective materials can reduce Tmrt by 15–20 °C. This hybrid approach demonstrates the scientific and operational relevance of Python-QGIS-UMEP

coupling for bioclimatic urban planning. It provides a reproducible, adaptable framework for tropical cities in developing regions, supporting the design of more resilient, comfortable, and energy-efficient urban environments.

Keywords : Urban Heat Island, Thermoradiative Modeling, Python-QGIS-UMEP, Thermal Comfort and Tropical Sustainable Urbanism.

I. Introduction

Le phénomène d'îlot de chaleur urbain (ICU) représente un défi scientifique et environnemental central pour la modélisation climatique des villes tropicales en expansion. Il résulte d'un déséquilibre thermique causé par la densité bâtie, la nature des matériaux, la géométrie urbaine et la réduction des surfaces végétalisées. L'approche de simulation numérique fondée sur le modèle numérique de terrain (MNT), la caractérisation des matériaux, l'analyse de l'ombrage et la hauteur des bâtiments permet d'évaluer avec précision la distribution spatiale des températures et les dynamiques d'échanges thermiques. À Madagascar, la ville nouvelle de Tana-Masoandro constitue un terrain d'étude privilégié pour quantifier ces interactions entre topographie, morphologie urbaine et performance énergétique dans un contexte tropical d'altitude.

1.1. Problématique spécifique à Madagascar

À Madagascar, la dynamique d'urbanisation s'est intensifiée au cours des deux dernières décennies, particulièrement dans la capitale de Madagascar " Antananarivo ", où l'expansion du bâti s'opère souvent sans cadre morphoclimatique rigoureux. Cette croissance rapide conduit à une densification non maîtrisée, une occupation anarchique des versants et une altération progressive des équilibres thermiques locaux. Selon l'Instat (2023), la capitale regroupe plus de 3,8 millions d'habitants, avec un taux d'accroissement annuel de 3,8 %, l'un des plus élevés d'Afrique subsaharienne. Cette évolution exerce une pression notable sur les ressources énergétiques, les infrastructures et la qualité environnementale urbaine.

L'effet combiné du changement climatique et de la transformation morphologique du paysage urbain accentue la formation des îlots de chaleur urbains (ICU). La réduction de la couverture végétale, l'imperméabilisation des sols et l'usage de matériaux à forte inertie thermique, tels que le béton et la tôle, favorisent l'accumulation de chaleur diurne et limitent le refroidissement nocturne. Ces phénomènes, amplifiés par une ventilation naturelle souvent entravée, engendrent des microclimats surchauffés, dégradant le confort thermique et augmentant les besoins énergétiques des bâtiments.

Dans ce contexte, le projet de la ville nouvelle de Tana-Masoandro constitue un terrain d'expérimentation privilégié pour la modélisation et la simulation de l'ICU. En s'appuyant sur le modèle numérique de terrain (MNT), la hauteur des bâtiments, la distribution de l'ombrage et les propriétés thermiques des matériaux, cette approche vise à analyser et anticiper les comportements thermiques urbains. L'enjeu est d'intégrer dès la conception une planification bioclimatique fondée sur la ventilation naturelle, la végétalisation et l'optimisation morphologique, afin de faire de Tana-Masoandro une référence nationale en matière d'urbanisme durable et résilient au climat tropical d'altitude.

Ainsi, la problématique de cette recherche repose sur une question centrale : comment la modélisation numérique intégrant le modèle de terrain, la hauteur des bâtiments, l'ombrage et les propriétés thermiques des matériaux peut-elle contribuer à concevoir un modèle urbain tropical durable, capable de limiter l'intensité de l'îlot de chaleur urbain tout en optimisant le confort thermique et l'efficacité énergétique ?

1.2. Revue de littérature

Les recherches récentes sur la modélisation microclimatique urbaine ont permis d'approfondir la compréhension des interactions entre morphologie, matériaux et climat local, notamment dans les régions tropicales en forte urbanisation. Les modèles numériques couplant géométrie urbaine, rayonnement solaire et échanges thermiques offrent aujourd'hui une approche intégrée pour évaluer la température moyenne radiante (T_{mrt}) et le confort thermique en milieu bâti. Les travaux de simulation 3D, réalisés à partir du

modèle numérique de terrain (MNT) et de données sur la hauteur des bâtiments, l'orientation des rues, l'ombrage et les propriétés thermiques des matériaux, permettent de quantifier avec précision la distribution spatiale de la chaleur urbaine.

En climat tropical d'altitude, comme celui des Hautes Terres malgaches, la combinaison d'une forte irradiation solaire et d'une faible vitesse de vent accentue la variabilité thermique intra-urbaine. Dans ce contexte, la modélisation numérique offre un outil essentiel pour anticiper les effets de la densification et orienter la conception bioclimatique des nouvelles villes. La présente étude applique cette approche à la ville nouvelle de Tana-Masoandro, en simulant les échanges radiatifs et énergétiques à partir du couplage **Python-QGIS-UMEP**. Ce modèle permet d'évaluer les contrastes thermiques liés à la forme urbaine, d'identifier les zones de surchauffe, et de proposer des stratégies d'atténuation fondées sur la morphologie, l'ombrage et la végétalisation.

Ainsi, cette recherche vise à démontrer la capacité des outils numériques open source à soutenir la planification climatique et la conception de villes tropicales résilientes, conciliant performance énergétique, confort thermique et durabilité environnementale.

Objectifs scientifiques de l'étude et hypothèses

Cette recherche vise à modéliser, analyser et optimiser les interactions entre la morphologie urbaine, les matériaux, l'ombrage et le confort thermique dans le cadre du développement de la ville nouvelle de Tana-Masoandro (Madagascar). En s'appuyant sur le couplage Python-QGIS-UMEP, l'objectif principal est d'évaluer la dynamique microclimatique urbaine à travers la simulation intégrée de la température radiante moyenne (T_{mrt}), du facteur de visibilité du ciel (SVF) et de l'indice de confort thermique (PET).

Les objectifs spécifiques sont les suivants :

1. Évaluer l'impact du relief et de la topographie (MNT) sur la distribution thermique et les conditions de ventilation naturelle ;
2. Analyser l'influence de la morphologie verticale (DSM) et des rapports H/W sur l'ensoleillement, l'ombrage et la dissipation de chaleur ;
3. Identifier le rôle des matériaux de surface et de leur albédo dans l'intensification ou la réduction de l'îlot de chaleur urbain (ICU) ;
4. Quantifier spatialement la T_{mrt} et le PET, afin de localiser les zones à fort stress thermique et de proposer des stratégies de conception bioclimatique adaptées ;
5. Valider le modèle numérique Python-QGIS-UMEP comme outil prédictif et reproductible pour la planification climatique des villes tropicales d'altitude

II. Matériels et Méthodes

2.1. Description du site d'étude

Le site d'étude correspond à la ville nouvelle de Tana-Masoandro, localisée à environ 26 km au sud d'Antananarivo, capitale de Madagascar. Le projet s'étend sur une superficie de près de 982 hectares et vise à accueillir à terme environ 300 000 habitants, dans une perspective de désengorgement métropolitain et de développement urbain planifié.

Située à une altitude moyenne de 1 250 mètres, la zone bénéficie d'un climat tropical d'altitude, caractérisé par une température moyenne annuelle de 22 °C, des amplitudes thermiques journalières marquées et une saison sèche prononcée entre mai et octobre. Ces conditions favorisent une forte irradiation solaire diurne et un refroidissement nocturne rapide, accentuant la sensibilité du site aux variations microclimatiques et aux effets d'îlot de chaleur urbain (ICU).

Sur le plan morphologique, le site présente un relief modérément vallonné, constitué de plateaux et de zones de transition topographique. Cette configuration topoclimatique influence directement la circulation aéraulique et la distribution thermique simulée dans le modèle Python-QGIS-UMEP. L'organisation urbaine repose sur une trame longitudinale principale nord-sud, pensée pour favoriser la ventilation naturelle selon les vents dominants du sud-est. Ce schéma est complété par un maillage de

quartiers résidentiels, commerciaux et administratifs à densité modérée, qui constitue la zone d'expérimentation principale de la modélisation thermoradiative.

Cette localisation offre ainsi un cadre d'étude pertinent pour la simulation des interactions entre topographie, morphologie bâtie et paramètres thermiques, dans le but d'optimiser la conception urbaine bioclimatique d'une ville tropicale d'altitude

La figure n°1 illustre la localisation de cette nouvelle ville par rapport à Antananarivo :

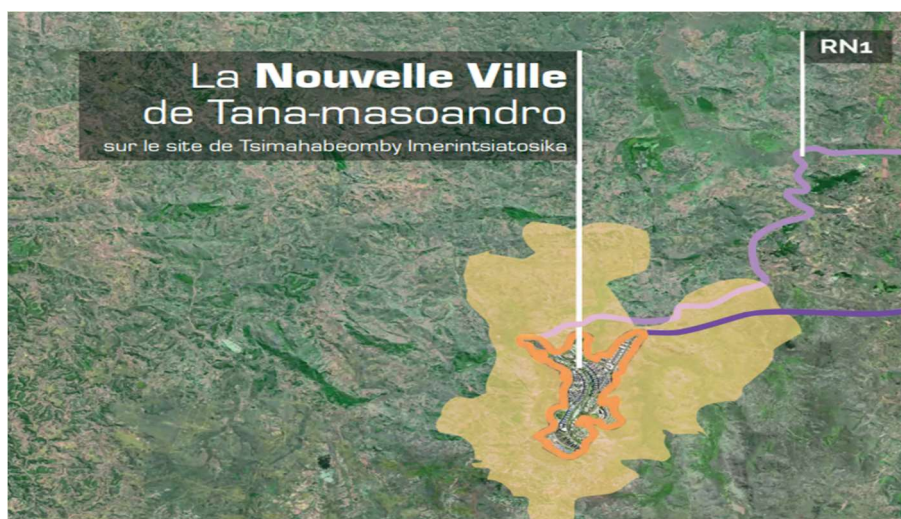


Figure 1 : Emplacement de la nouvelle ville de Tana-Masoandro

2.2. Méthode hybride : couplage PYTHON et QGIS pour la modélisation thermoradiatif et géospatiales

La modélisation des microclimats urbains nécessite une approche intégrée, capable de combiner à la fois des paramètres physiques détaillés et des données géospatiales précises. Dans cette optique, l'approche hybride adoptée dans cette étude repose sur le couplage entre Python et QGIS. Ces deux outils, bien que distincts, offrent une complémentarité précieuse pour la simulation et l'analyse thermoradiative en milieu urbain.

2.2.1. Définitions et présentation

La modélisation des microclimats urbains repose sur une approche intégrée, combinant des paramètres physiques détaillés et des données géospatiales précises. Dans ce cadre, la présente recherche adopte une méthode hybride fondée sur le couplage entre Python et QGIS, permettant de simuler avec précision les interactions entre la morphologie urbaine, les flux énergétiques et les conditions climatiques locales.

- **Python** est un langage de programmation scientifique qui permet d'automatiser les calculs thermoradiatifs à l'aide de bibliothèques spécialisées. Il est utilisé pour modéliser le rayonnement solaire, les échanges énergétiques entre surfaces, et les indicateurs de confort thermique ou de consommation énergétique.
- **QGIS**, quant à lui, est un système d'information géographique (SIG) open-source qui assure la gestion, la visualisation et l'analyse des données spatiales (raster, vecteurs, modèles d'altitude, occupation du sol, etc.).

Ce couplage est renforcé par l'intégration du plugin **UMEP** (Urban Multi-scale Environmental Predictor) dans QGIS, qui permet d'exécuter plusieurs modules de simulation urbaine, notamment :

- le Sky View Factor (SVF) ;
- la température radiante moyenne (T_{mrt}) ;

- l'indice de confort thermique PET ;
- surtout le module SOLWEIG, utilisé pour la simulation de la distribution spatiale du rayonnement solaire et des bilans thermiques en milieu urbain.

Les bibliothèques Python mobilisées comprennent :

- pvlib pour le calcul de la position solaire (azimut, élévation) et des composantes du rayonnement (DNI, DHI, GHI) ;
- PyVista pour le lancer de rayons et l'évaluation des ombrages à partir de la géométrie urbaine (DSM) ;
- pythermalcomfort pour le calcul des indices de confort thermique (PET, UTCI, PMV) ;
- eppy ou pyenergyplus pour interfacer EnergyPlus et simuler la consommation énergétique selon les conditions météorologiques et les apports solaires.

2.2.2. Objectifs du couplage Python–QGIS

L'intégration de ces outils poursuit plusieurs **objectifs méthodologiques et opérationnels** :

Modélisation fine des interactions microclimatiques : Le couplage permet d'associer données spatiales (topographie, usage du sol, formes urbaines) et simulations thermiques, pour mieux représenter la réalité physique des milieux urbains. Python interprète les données fournies par QGIS pour modéliser les transferts d'énergie, selon l'orientation, l'ombrage, et la couverture végétale.

Simulation de scénarios d'aménagement réalistes : Grâce à la flexibilité du système, plusieurs configurations urbaines peuvent être testées (densité bâtie, matériaux, végétation). Cela permet de comparer l'efficacité thermique de différents aménagements, dans une optique de planification urbaine durable.

Évaluation de l'impact des interventions urbaines : L'approche permet d'anticiper l'effet d'actions concrètes, telles que l'introduction de toitures végétalisées ou la création de zones ombragées sur le confort thermique urbain, avant même leur mise en œuvre. Elle constitue ainsi un véritable outil d'aide à la décision pour l'urbanisme prospectif.

2.2.3. Justification scientifique

Le choix du couplage Python–QGIS repose sur la recherche d'une méthodologie rigoureuse, reproductible et adaptée aux réalités tropicales. D'un point de vue scientifique, cette approche combine la puissance des calculs physiques offerts par Python avec la précision spatiale de QGIS, permettant une lecture intégrée des interactions entre morphologie urbaine, matériaux et paramètres climatiques. Elle garantit ainsi une cohérence systémique entre modélisation numérique et représentation géospatiale.

Sur le plan opérationnel, l'utilisation d'outils open-source favorise la reproductibilité, la transparence scientifique et la démocratisation des méthodes de simulation climatique, essentielles dans les contextes à ressources limitées. Sa flexibilité permet d'adapter les paramètres du modèle aux caractéristiques spécifiques de Tana-Masoandro, telles que la topographie, l'orientation urbaine et la nature des surfaces.

Enfin, cette méthode s'inscrit pleinement dans la logique de la résilience urbaine : elle fournit un cadre scientifique pour anticiper les effets d'îlot de chaleur urbain, optimiser le confort thermique et orienter la planification bioclimatique à Madagascar.

En conclusion, le couplage Python–QGIS constitue une approche novatrice et robuste pour la modélisation thermoradiative et géospatiale, contribuant à un urbanisme durable, fondé sur la science, la précision et la transférabilité des résultats.

2.2.4. L'approche par la modélisation thermoradiative

La modélisation thermoradiative constitue un outil essentiel pour l'analyse du comportement thermique des milieux urbains. Elle permet de simuler les échanges d'énergie sous forme de rayonnement entre les surfaces bâties, les matériaux, la végétation et l'atmosphère. Cette approche est particulièrement adaptée aux environnements denses où les effets d'îlot de chaleur urbain (ICU) sont amplifiés par les interactions entre absorption, réflexion et émission du rayonnement solaire et infrarouge.

Les recherches de Tanimoto et al. (2005), Bouyer (2009) et Masson et al. (2020) ont montré que la géométrie urbaine et les propriétés thermophysiques des matériaux influencent fortement la température de surface, le confort thermique et la consommation

énergétique des bâtiments. Ces travaux démontrent l'importance d'une approche intégrée reliant morphologie urbaine, flux radiatifs et performance énergétique.

Dans cette étude, la modélisation thermoradiative a été mise en œuvre à travers une chaîne d'outils open-source combinant Python, QGIS et UMEP, assurant accessibilité et reproductibilité. Les bibliothèques pvlib, PyVista, pythermalcomfort et EnergyPlus ont été mobilisées pour simuler respectivement la position solaire, les facteurs d'ombrage, les indices de confort thermique et les bilans énergétiques. Cette intégration permet de quantifier les flux radiatifs, de spatialiser les températures de surface et d'évaluer les conditions de confort thermique à l'échelle du quartier.

Ainsi, cette approche fournit un cadre scientifique cohérent et opérationnel, reliant les processus physiques et spatiaux pour l'analyse et la conception urbaine bioclimatique de Tana-Masoandro

2.2.5. Mise en œuvre opérationnelle du couplage thermoradiatif et géospatial

L'application du modèle thermoradiatif à la zone résidentielle de Tana-Masoandro (36 ha) repose sur une approche intégrée combinant données géospatiales, paramètres physiques et conditions climatiques locales. Ce couplage Python-QGIS vise à représenter, avec précision, les échanges énergétiques dans un environnement urbain réel.

2.2.5.1. Préparation des données

Cette première étape consacrée sur la constitution du fondement du processus de simulation. Elle mobilise quatre composantes essentielles : le Modèle Numérique de Terrain (MNT), le Modèle Numérique de Surface (DSM), les données d'occupation du sol et les paramètres météorologiques. Ces éléments assurent la cohérence entre les aspects morphologiques, topographiques et climatiques du site.

Le Modèle Numérique de Terrain, dérivé de données altimétriques à haute résolution, permet de reproduire fidèlement la topographie naturelle du site, située à 1 250 m d'altitude, et d'en déduire les variations de pentes et d'exposition solaire. Ce modèle constitue la base de référence pour les calculs radiatifs et énergétiques. Il est couplé au DSM, intégrant la hauteur des bâtiments et des végétations, afin de simuler les effets d'ombrage et de rayonnement à l'échelle micro-urbaine.

Ainsi, cette mise en œuvre opérationnelle illustre la complémentarité entre la géomatique et la physique urbaine, offrant un cadre robuste pour quantifier les flux thermiques, spatialiser les zones de surchauffe et évaluer le confort thermique dans un contexte tropical d'altitude.

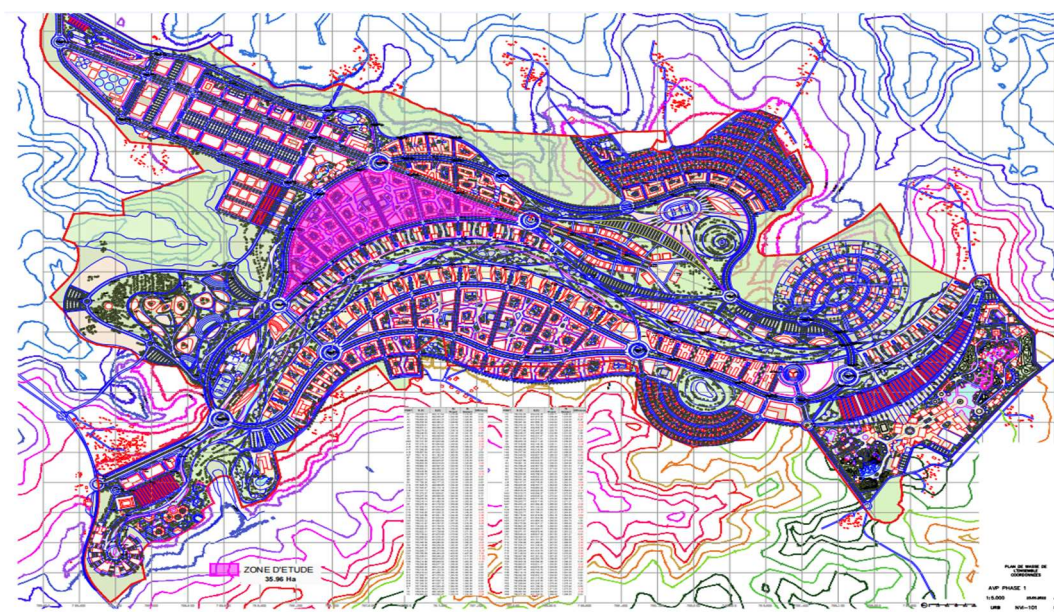


Figure 2 : Vue d'ensemble Modèle Numérique de Terrain

La Figure n°32 présente la carte de la zone d'étude, délimitée sur une superficie de 36 hectares, ainsi que les courbes de niveau extraites du modèle numérique de terrain, utilisées comme base dans le cadre de la simulation géospatiale.

Le Modèle Numérique de Surface (DSM) constitue une étape clé du processus de modélisation thermoradiative, car il intègre l'ensemble des éléments présents à la surface du sol : bâtiments, végétation, mobilier et infrastructures urbaines. Il permet une représentation tridimensionnelle réaliste de la morphologie urbaine, indispensable pour simuler les échanges radiatifs et les effets d'ombrage.

Dans cette étude appliquée à Tana-Masoandro, la hauteur moyenne des bâtiments a été fixée à 40 mètres, valeur intégrée au DSM afin de reproduire fidèlement la structure verticale du tissu bâti. Les données ont été traitées sous format raster GeoTIFF, avec une résolution spatiale de 1 mètre, garantissant une haute précision dans la représentation des surfaces et des volumes.

La construction du DSM s'effectue en deux étapes :

- 1** : Rastérisation de la couche bâtiment contenant les attributs de hauteur ;
- 2** : Combinaison de ce raster avec le Modèle Numérique de Terrain (DEM) via la Calculatrice Raster dans QGIS, selon la relation

$$\text{DSM} = \text{DEM} + \text{Hauteur des bâtiments}$$

Ce processus aboutit à un modèle 3D continu restituant le relief urbain complet, utilisé ensuite pour le calcul du Sky View Factor (SVF), la simulation d'ombrage et la modélisation des flux radiatifs directs et diffus.

Le DSM final, visualisé dans QGIS, constitue ainsi une base géométrique de haute fidélité pour la simulation énergétique et microclimatique du quartier résidentiel de Tana-Masoandro.

La Grille de Couverture du Sol constitue une composante essentielle du modèle thermoradiatif, car elle définit la nature physique des surfaces urbaines et conditionne leurs propriétés thermophysiques telles que l'albédo, l'émissivité et l'évapotranspiration. Cette classification, indispensable aux calculs du module SOLWEIG (UMEP), permet d'évaluer les contrastes thermiques entre les zones bâties, végétalisées et imperméabilisées.

Dans cette étude, chaque cellule raster du modèle a été associée à une classe d'occupation du sol, notamment les sols imperméables, les toitures, les sols perméables, la végétation et les surfaces en eau. Cette classification provient d'une couche vectorielle (*occ_sol.shp*) élaborée à partir de l'interprétation d'images satellites et de relevés de terrain. Les attributs clés type, code et albédo ont été utilisés pour générer un raster au format GeoTIFF avec une résolution spatiale de 1 mètre, codé selon la norme SOLWEIG (1 à 5).

Le processus de création s'appuie sur deux étapes principales :

1 : la conversion de la couche d'occupation du sol en raster à l'aide de l'outil "Vecteur vers Raster" dans QGIS, en utilisant le champ *code* ;

2 : la définition des classes dans le fichier *landcoverclasses_2016a.txt*, où chaque catégorie se voit attribuer des valeurs d'albédo, d'émissivité et de température de surface.

Afin d'adapter la modélisation aux besoins spécifiques de l'étude, un raster simplifié à trois classes principales a été retenu :

1 Sols imperméables (asphalte, béton) avec un albédo de 0,15

2 Toitures avec un albédo de 0,18

3 Sols perméables (herbe, terre) avec un albédo de 0,25

Le raster final, nommé LANDCOVER.tif, constitue une base essentielle pour les simulations thermiques et microclimatiques, permettant la spatialisation des flux radiatifs et l'évaluation du comportement thermique différencié des surfaces urbaines dans le modèle Python-QGIS-UMEP.

Les données météorologiques horaires constituent un élément fondamental de la modélisation thermoradiative et microclimatique. Elles assurent la cohérence physique du modèle en alimentant les calculs de rayonnement, d'équilibre énergétique et d'indicateurs de confort thermique tels que la température radiante moyenne (T_{mrt}) ou l'indice de confort thermique (PET, UTCI). Ces données sont intégrées dans le module SOLWEIG du plugin UMEP (QGIS), garantissant la simulation dynamique du comportement thermique urbain.

Le jeu de données est structuré sous la forme d'un fichier texte ou CSV à pas de temps horaire, conforme à une structure normalisée où chaque colonne correspond à une variable climatique spécifique. Les principales variables utilisées dans cette étude sont la température de l'air (T_a) exprimée en °C, l'humidité relative (RH) en pourcentage, la vitesse et la direction du vent (W_s , W_d) en m/s et degrés, ainsi que le rayonnement solaire global (K_{dn}) et diffus (K_{dif}) exprimés en W/m^2 . Ces paramètres déterminent les flux d'énergie absorbés, réfléchis et émis par les surfaces urbaines, influençant directement la dynamique thermique locale.

Le fichier inclut également les champs date et heure au format ISO (AAAA-MM-JJ HH:MM), garantissant la synchronisation temporelle des calculs dans les modèles énergétiques et radiatifs.

Ces données, issues des relevés climatiques d'Imeritsiatosika et interpolées pour la zone d'étude, constituent la base atmosphérique du couplage Python-QGIS, permettant de reproduire fidèlement les conditions microclimatiques de Tana-Masoandro. La structure adoptée est compatible avec les exigences de UMEP, assurant une intégration directe dans les simulations thermiques urbaines.

2.2.5.2. Prétraitement dans UMEP

Avant toute simulation thermique dans UMEP (Urban Multi-scale Environmental Predictor), une étape de prétraitement spatial est indispensable afin d'assurer la cohérence géométrique et radiative des données. Tous les fichiers utilisés, qu'ils soient de type raster (MNT, DSM, Land Cover Grid) ou vecteur, doivent être alignés dans un même système de coordonnées de référence (SCR). Une discordance entre les projections spatiales peut provoquer des décalages dans la superposition des couches, compromettant la fiabilité des calculs d'ensoleillement, d'ombrage et de flux énergétiques.

Dans le cadre de cette recherche, le système de projection WGS 84 / UTM Zone 38 Sud (EPSG : 32738) a été retenu. Ce choix s'explique par sa compatibilité optimale avec les modules de simulation d'UMEP et sa capacité à exprimer les distances et altitudes en mètres, ce qui garantit la précision des calculs de rayonnement, de visibilité du ciel (SVF) et de température radiante.

Cette étape de calibration spatiale constitue le socle technique du processus de modélisation, assurant la cohérence entre les données géospatiales (MNT, DSM, Land Cover) et les paramètres climatiques (vent, température, rayonnement). Le bon paramétrage du SCR permet ainsi d'éviter les erreurs de décalage géographique et d'obtenir une simulation thermoradiative fiable et spatialement cohérente pour la zone urbaine de Tana-Masoandro.

2.2.5.3. Calcul de l'ombrage et de l'orientation

Le calcul de l'ombrage et de l'orientation constitue une étape essentielle de la modélisation thermoradiative, car il détermine l'exposition réelle des surfaces urbaines au rayonnement solaire. Dans cette étude, cette phase a été réalisée à l'aide du module Shadow and SVF Generator intégré dans la suite UMEP (Urban Multi-scale Environmental Predictor) de QGIS.

Le modèle s'appuie sur le Modèle Numérique de Surface (DSM) pour reconstituer la géométrie tridimensionnelle de la zone urbaine et simuler la projection des ombres portées selon la position solaire à différents moments de la journée et de l'année. Cette simulation permet de quantifier la durée d'ensoleillement, la profondeur des zones ombrées et les effets de masquage entre bâtiments.

En complément, l'orientation des façades a été calculée afin d'évaluer les gains et pertes radiatifs en fonction de leur exposition. Dans l'hémisphère sud, les façades orientées vers le nord reçoivent peu de rayonnement direct, tandis que celles orientées au sud sont davantage exposées, influençant les variations de température de surface et les besoins énergétiques en climatisation.

Les données météorologiques horaires issues de la station d'Imeritsiatosika ont été intégrées dans le module SOLWEIG, pour les heures représentatives de 6h00, 12h00 et 18h00, permettant de modéliser finement la dynamique solaire journalière et de corrélérer les effets d'ombrage aux variations de confort thermique.

Cette étape renforce la précision du couplage Python–QGIS–UMEP, en traduisant la géométrie urbaine en flux radiatifs mesurables, essentiels à la compréhension de l'îlot de chaleur urbain (ICU) et de la distribution du rayonnement dans le tissu de Tana-Masoandro.

2.2.5.4. Simulation thermique et spatialisation

La simulation thermique a été réalisée à l'aide de scripts Python intégrant plusieurs bibliothèques open-source, notamment pythermalcomfort pour le calcul des indices de confort thermique et EnergyPlus (via eppy/pyenergyplus) pour la simulation énergétique des bâtiments. Cette approche permet de quantifier les flux thermiques (absorption, émission, réflexion), d'estimer les températures de surface et d'évaluer la consommation énergétique en fonction des scénarios d'aménagement.

Les résultats issus de ces calculs sont ensuite spatialisés dans QGIS, afin de produire des cartes thermiques à haute résolution permettant d'identifier les zones de surchauffe, les variations microclimatiques et les effets de la morphologie urbaine sur la distribution de la chaleur. Cette spatialisation offre une lecture visuelle des gradients thermiques et facilite la comparaison des configurations urbaines simulées.

2.2.5.5. Synthèse des résultats et indicateurs produits

Les indicateurs issus des simulations tels que températures maximales, albédo moyen, indice de confort thermique (PET) et consommation énergétique, ont été regroupés sous forme de tableaux de synthèse et de visualisations graphiques. Ces résultats permettent de quantifier l'influence des matériaux, de la densité et de la géométrie urbaine sur le confort thermique et la performance énergétique des quartiers étudiés.

L'ensemble de cette démarche met en évidence la robustesse du couplage Python–QGIS–UMEP, qui combine les dimensions thermiques, radiatives et spatiales dans un cadre reproductible et scientifiquement validé. Cette approche hybride offre une compréhension fine des interactions entre morphologie, matériaux et climat, tout en fournissant un outil d'aide à la décision pour la conception urbaine durable.

En conclusion, la méthodologie développée constitue le socle technique et scientifique de cette recherche, permettant d'évaluer de manière spatialisée les phénomènes d'îlot de chaleur urbain (ICU) et d'orienter la planification vers des solutions plus résilientes et climato-sensibles.

III. Résultats et Analyses

Résultats de la modélisation thermoradiative et géospatiale (Couplage Python–QGIS)

Conformément au protocole défini dans la méthodologie, cette section présente les **résultats du couplage Python–QGIS** appliqué à la **ville nouvelle de Tana-Masoandro**, visant à évaluer les dynamiques thermiques et spatiales du milieu urbain. La démarche repose sur une séquence analytique en quatre étapes : **(1)** organisation des données simulées, **(2)** visualisation cartographique, **(3)** analyse comparative des configurations urbaines et **(4)** interprétation des résultats selon les objectifs de recherche.

Les résultats s'articulent autour de cinq composantes majeures du **modèle thermoradiatif intégré** :

- **Le Modèle Numérique de Terrain (MNT)**, représentant la topographie naturelle, sert de base aux calculs d'exposition solaire, d'écoulement de l'air et d'accumulation thermique.
- **Le Modèle Numérique de Surface (DSM)** intègre les hauteurs du bâti, des arbres et des infrastructures, indispensables à la simulation des effets d'ombrage et de rayonnement.
- **La Grille d'occupation du sol (Land Cover Grid)** classe les surfaces selon leur nature (toitures, voiries, végétation, sols nus) et leur attribue des propriétés thermophysiques spécifiques (albédo, conductivité, capacité thermique).
- **La Température radiante moyenne (Tmrt)**, calculée avec le module **SOLWEIG (UMEP–QGIS)**, évalue l'effet combiné de la géométrie urbaine, de l'ombrage et des conditions atmosphériques.
- **L'indice de confort thermique (PET)**, obtenu via **pythermalcomfort**, relie les paramètres physiques (Tmrt, vent, humidité) à la perception humaine du confort thermique.

Cette approche intégrée permet une lecture spatialisée et quantitative des interactions entre morphologie urbaine, rayonnement solaire et confort thermique, offrant un outil d'analyse performant pour la planification bioclimatique de Tana-Masoandro.

3.1. Modèle Numérique de Terrain (MNT)

Le Modèle Numérique de Terrain (MNT), ou *Digital Terrain Model (DTM)*, décrit la morphologie naturelle du site de Tana-Masoandro, excluant toute structure bâtie ou végétale. Généré à partir de données altimétriques raster traitées sous QGIS, il constitue la base topographique du modèle thermoradiatif.

Le MNT permet de calculer l'incidence solaire selon la pente et l'orientation, d'identifier les zones d'accumulation thermique liées à la topographie, et de contribuer au calcul du Sky View Factor (SVF) dans les espaces non bâtis. Les données, interpolées à une résolution spatiale de 5 m, garantissent une précision suffisante pour la superposition avec le DSM et les autres couches géospatiales.

La visualisation cartographique révèle une topographie globalement douce, inclinée du nord vers le sud, avec des pentes modérées en périphérie et un plateau central plus homogène. Ces variations altimétriques influencent directement la circulation de l'air et les gradients thermiques locaux, soulignant le rôle clé du relief dans la régulation microclimatique urbaine.

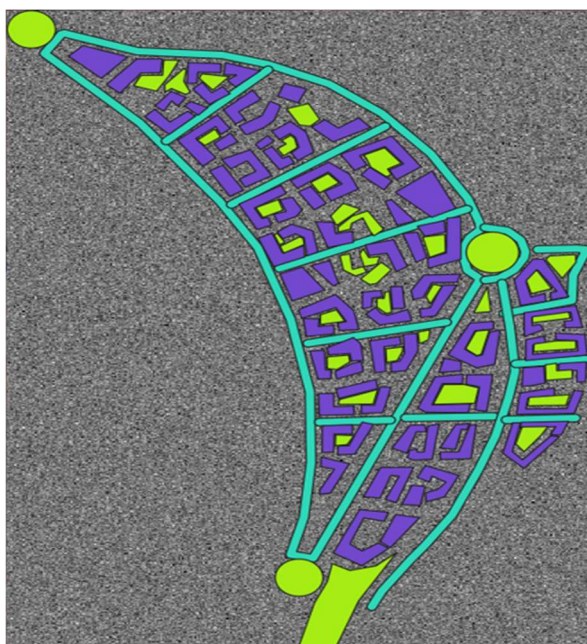


Figure 3 : Représentation du Modèle Numérique de Terrain (MNT) de la zone d'étude

Analyse comparative et interprétation des résultats du MNT

Bien que le Modèle Numérique de Terrain (MNT) reste invariant entre les scénarios, il joue un rôle déterminant dans la lecture comparative des performances thermiques. Les zones topographiquement basses tendent à accumuler la chaleur diurne et à ralentir le refroidissement nocturne, tandis que les secteurs plus élevés et exposés bénéficient d'une meilleure ventilation naturelle, réduisant ainsi le stress thermique. Ces contrastes expliquent les variations spatiales de la température radiante (T_{mrt}) observées dans les simulations SOLWEIG.

L'analyse confirme que la topographie influence directement la dynamique thermique urbaine : les microreliefs modifient les flux radiatifs, la convection de l'air et l'accumulation énergétique. Le MNT constitue ainsi une base géophysique essentielle pour calibrer les calculs d'ensoleillement, d'ombrage et de drainage thermique sous QGIS. Il fournit une référence fiable pour évaluer les stratégies d'aménagement (orientation du bâti, voirie, végétalisation) et assurer la cohérence spatiale du modèle thermoradiatif appliqué à Tana-Masoandro.

3.2. Modèle Numérique de Surface (DSM)

Le Modèle Numérique de Surface (DSM) représente l'élévation absolue des entités situées à la surface du sol et bâtiments, végétation et infrastructures qui constitue un élément clé de la modélisation tridimensionnelle du tissu urbain de Tana-Masoandro. Généré à partir de données altimétriques et de couches vectorielles QGIS, il permet de caractériser la hauteur relative des structures bâties et naturelles, essentielle à la simulation des ombrages et des échanges radiatifs.

Le modèle, produit sous forme raster (en niveaux de gris), associe chaque pixel à une valeur d'altitude. Les hauteurs observées varient de 10 m (R+1) à 115 m (R+12), avec une moyenne d'environ 40 m, traduisant une morphologie urbaine contrastée. La visualisation cartographique illustre ces différences : les tons sombres indiquent les bâtiments bas, les gris moyens les constructions résidentielles, et les teintes claires les structures de grande hauteur.

Ce modèle permet une lecture fine de la verticalité urbaine, déterminante pour l'analyse du rayonnement solaire, de l'ombrage et des gradients thermiques dans le cadre du couplage Python-QGIS-UMEP.

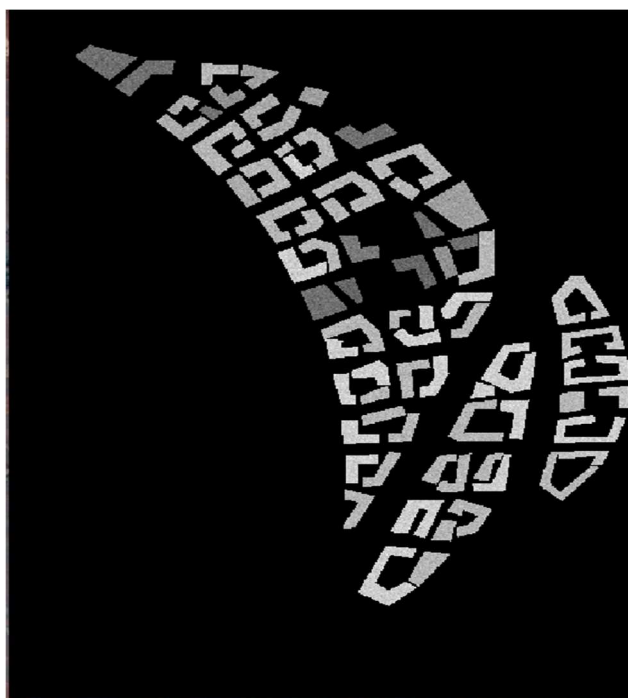


Figure 4 : Carte du Modèle Numérique de Surface (DSM) de la zone d'étude (residentielle)

Analyse comparative et interprétation du DSM

Le Modèle Numérique de Surface (DSM) s'avère essentiel pour la modélisation des ombrages, la simulation de l'exposition solaire et l'évaluation du confort thermique à l'échelle du quartier. Les analyses comparatives montrent que les zones à forte densité bâtie et grande hauteur génèrent des ombres persistantes, réduisant efficacement la température radiante moyenne (T_{mrt}) durant les heures chaudes. À l'inverse, les espaces ouverts et à faible élévation accumulent davantage de chaleur, augmentant les valeurs de PET en milieu de journée.

Ces contrastes morphologiques créent des microclimats urbains différenciés, influençant directement la ventilation et la répartition des flux thermiques. L'interprétation des résultats confirme que la morphologie verticale joue un rôle déterminant dans la régulation thermique urbaine. Le DSM permet ainsi d'identifier les zones sensibles à la surchauffe, de calibrer les simulations radiatives à partir de géométries précises et de définir des hauteurs optimales de bâti pour concilier ombrage et aération. Outil stratégique, il constitue la base de référence pour évaluer les scénarios d'urbanisation et orienter la planification bioclimatique de Tana-Masoandro

3.3. Grille d'occupation du sol (Land Cover Grid)

La Grille d'occupation du sol (Land Cover Grid) a été élaborée à partir de la superposition d'images satellites haute résolution, de couches vectorielles QGIS et de traitements automatisés sous Python. Elle permet de classer chaque cellule spatiale selon la nature de sa surface : zones bâties, voiries, ou espaces végétalisés, afin d'attribuer à chacune des propriétés thermophysiques spécifiques (albédo, émissivité, conductivité). Cette étape est déterminante pour les calculs thermoradiatifs, car elle conditionne les échanges d'énergie entre les surfaces urbaines et l'atmosphère.

La visualisation cartographique met en évidence la diversité spatiale du tissu urbain :

- Les bâtiments apparaissent en noir, traduisant leur forte capacité d'absorption thermique ;
- Les toitures claires, à fort albédo, en blanc ;

- Les voiries et surfaces minérales en gris, et les espaces végétalisés en tons intermédiaires.

Cette grille constitue ainsi une base de référence essentielle pour la simulation des flux radiatifs et l'analyse du confort thermique à l'échelle de la ville nouvelle de Tana-Masoandro.



Figure 5 : Grille d'occupation du sol de la zone d'étude

Analyse comparative et interprétation

La Grille d'occupation du sol joue un rôle déterminant dans la simulation microclimatique, car la nature du revêtement de surface influence directement l'absorption du rayonnement solaire, les échanges thermiques avec l'atmosphère et, par conséquent, le confort thermique.

L'analyse révèle une forte proportion de surfaces imperméabilisées, responsables d'une accumulation thermique importante durant la journée. À l'inverse, les toitures à fort albédo présentent des températures de surface inférieures de 5 à 8 °C par rapport aux surfaces sombres, tandis que les zones mixtes entre bâti dense et espaces ouverts qui jouent un rôle de tampon thermique.

Ces observations, croisées avec les indicateurs thermiques (rayonnement, T_{mrt} , PET), confirment l'impact direct de la structure du sol sur les microclimats urbains.

En conclusion, la grille d'occupation du sol constitue un outil stratégique pour la planification bioclimatique : elle permet d'identifier les zones de surchauffe, de quantifier l'effet de l'albédo, et de démontrer les bénéfices des surfaces végétalisées ou réfléchissantes dans la régulation thermique. Elle offre ainsi une base solide pour une conception urbaine résiliente et climato-adaptée.

3.4. Température radiante moyenne (T_{mrt})

La Température radiante moyenne (T_{mrt}) a été simulée à l'aide du module SOLWEIG intégré à UMEP (QGIS). Ce paramètre bioclimatique fondamental intègre les composantes du rayonnement solaire direct, diffus et réfléchi, ainsi que les échanges infrarouges entre les surfaces urbaines et l'atmosphère.

La simulation a été conduite pour trois horaires représentatifs 6h, 12h et 18h afin d'évaluer l'évolution du microclimat au cours de la journée. Les données ont été structurées selon plusieurs typologies spatiales (zones denses, espaces ouverts, toitures, végétation) afin d'étudier les gradients thermiques liés à la morphologie urbaine et à l'exposition solaire.

Les résultats, visualisés sous forme de cartes raster continues, révèlent la distribution spatiale de la Tmrt et mettent en évidence les zones critiques de surchauffe ainsi que les effets d'atténuation liés à la végétation et à l'ombrage bâti. Ces cartes constituent un outil d'analyse essentiel pour la compréhension du comportement radiatif de la ville nouvelle de Tana-Masoandro.

Figure 4.4.a : Température radiante moyenne (Tmrt) à 6h Figure 4.4.b : Température radiante moyenne (Tmrt) à 12h Figure 4.4.c : Température radiante moyenne (Tmrt) à 18h

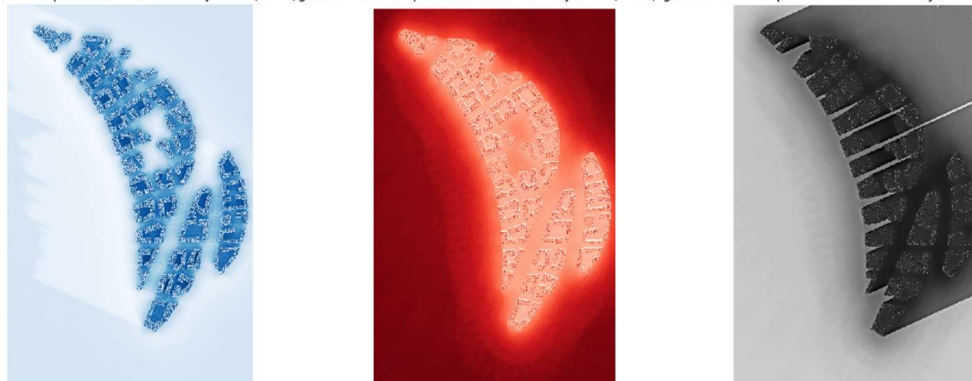


Figure 6 : Température radiante moyenne à 6h - 12h - 18h

Analyse comparative et interprétation

Les cartes thermoradiatives mettent en évidence une dynamique journalière marquée :

- À 6h, les températures sont homogènes et modérées, traduisant un faible rayonnement solaire et un stockage nocturne résiduel dans les zones bâties ;
- À 12h, l'îlot de chaleur urbain (ICU) atteint son intensité maximale, avec des Tmrt dépassant 60°C dans les secteurs denses et minéralisés, particulièrement le long des axes est-ouest fortement exposés ;
- À 18h, malgré une baisse du rayonnement, les surfaces minérales conservent une charge thermique élevée, prolongeant l'inconfort thermique.

L'analyse comparative des scénarios révèle que les zones à forte densité et sans végétation présentent les Tmrt les plus élevées, tandis que les espaces verts et les zones ombragées affichent une réduction thermique de 15 à 20°C, confirmant leur rôle régulateur. Ces variations traduisent l'impact majeur de la morphologie urbaine et de la nature des matériaux sur la dynamique thermique locale. En lien avec les objectifs de recherche, les résultats démontrent que :

- La Tmrt constitue un indicateur fiable pour évaluer les effets morphoclimatiques intra-urbains
- Les stratégies bioclimatiques, telles que la végétalisation, l'augmentation de l'albédo des surfaces et la ventilation naturelle, améliorent significativement le confort thermique ;
- La méthode de couplage Python-QGIS-UMEP offre un cadre innovant et reproductible pour la planification urbaine durable en climat tropical.

3.5. Indices de confort thermique (PET)

Le confort thermique extérieur a été évalué à l'aide de l'indice PET (Physiological Equivalent Temperature), calculé via la bibliothèque pythermalcomfort en Python. Ce modèle bioclimatique intègre les températures radiantes moyennes (Tmrt) issues de SOLWEIG, les conditions climatiques locales (température de l'air, humidité relative, vitesse du vent) ainsi que les caractéristiques morphologiques urbaines (ombrage, densité bâtie, végétation).

Les données ont été spatialisées selon trois grandes catégories — bâti, voirie et espaces ouverts — puis classées selon l'échelle standard du stress thermique PET :

- < 23 °C : confort thermique,

- 23–29 °C : stress léger,
- 29–35 °C : stress modéré,
- 35 °C : stress fort à extrême.

La visualisation cartographique produit une lecture claire du stress thermique intra-urbain, révélant les contrastes entre zones fortement minéralisées, générant un inconfort marqué, et espaces végétalisés, jouant un rôle régulateur. Cette approche permet de quantifier spatialement la perception thermique à l'échelle du quartier, fondement essentiel d'une planification urbaine bioclimatique

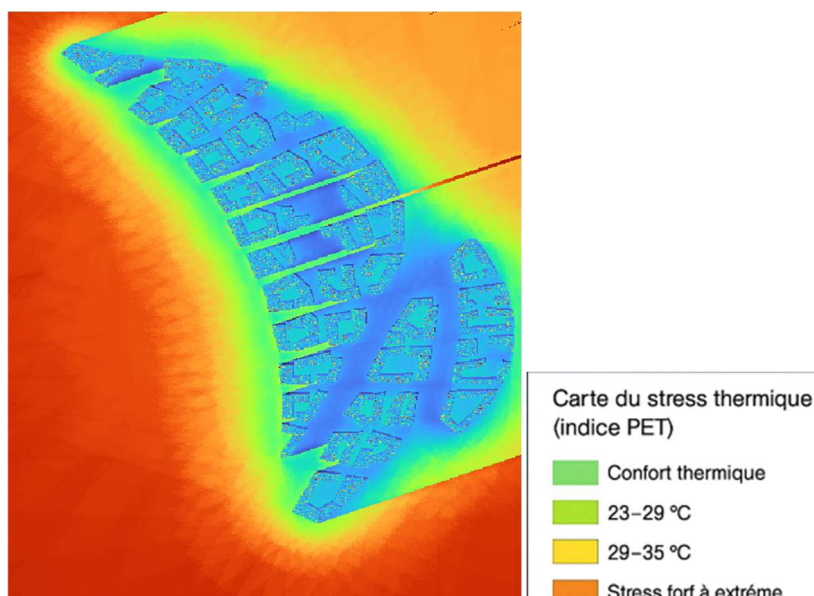


Figure 7 : Carte du stress thermique (indice PET) sur la zone d'étude

Analyse comparative et interprétation

La cartographie du PET met en évidence des gradients clairs de stress thermique : les zones rouges et orangées, correspondant aux espaces minéralisés (voiries, toitures en tôle, surfaces bétonnées), présentent des niveaux de stress thermique supérieurs à 35°C, traduisant un inconfort sévère. À l'inverse, les zones bleutées, souvent végétalisées ou ombragées par le bâti, enregistrent des réductions de 5 à 10°C, ramenant les conditions vers un confort thermique acceptable.

L'analyse comparative des scénarios confirme que la morphologie urbaine, densité bâtie, orientation viaire et répartition de la végétation qui est un facteur déterminant dans la régulation du confort thermique. Les axes est-ouest, plus exposés au rayonnement solaire, sont nettement plus défavorables que les trames orientées nord-sud, mieux ventilées et partiellement ombragées.

Sur le plan des objectifs scientifiques, les simulations valident trois enseignements majeurs :

1. La carte PET est un indicateur pertinent pour localiser les zones à risque thermique en fonction des paramètres morphologiques et matériels ;
2. L'intégration de matériaux à albédo élevé et de corridors végétalisés permet une atténuation thermique significative ;
3. Le couplage Python–QGIS–UMEP offre un outil reproductible, à fort potentiel applicatif pour la planification urbaine durable en climat tropical, conciliant précision scientifique et finalité opérationnelle.

3.6. Facteur de visibilité du ciel (Sky View Factor – SVF)

Le Sky View Factor (SVF) quantifie la portion de ciel visible depuis un point au sol dans un environnement urbain. Cet indicateur géométrique influence directement le bilan radiatif local, en conditionnant à la fois l'absorption du rayonnement solaire diurne et la dissipation nocturne de la chaleur par rayonnement infrarouge. Il constitue ainsi un paramètre clé dans l'analyse des îlots de chaleur urbains (ICU) et du confort thermique extérieur.

Le calcul du SVF a été réalisé à partir du Modèle Numérique de Surface (DSM), intégrant les hauteurs de bâtiments, d'infrastructures et de végétation. L'outil employé est le module SOLWEIG du plugin UMEP (Urban Multi-scale Environmental Predictor) intégré à QGIS, qui permet une modélisation fine de la géométrie urbaine en 3D.

Les résultats sont produits sous forme de raster à haute résolution, avec des valeurs comprises entre 0 (ciel totalement obstrué) et 1 (ciel totalement dégagé). Les zones denses et enclavées présentent des valeurs faibles, traduisant un piégeage thermique important, tandis que les espaces ouverts ou végétalisés affichent des SVF élevés, favorisant la ventilation naturelle et le refroidissement nocturne.

Cette cartographie du SVF constitue un outil diagnostic essentiel pour l'optimisation morphoclimatique : elle permet d'identifier les zones à désenclaver, d'orienter les implantations bâties et de calibrer les stratégies de végétalisation afin d'atteindre un équilibre entre ombrage, ventilation et confort thermique



Figure 8 : Carte du Sky View Factor (SVF) de la zone urbaine simulée

Analyse comparative et interprétation

La carte du Sky View Factor (SVF) met en évidence des contrastes nets entre les zones ouvertes et les espaces densément bâtis. Les valeurs élevées ($SVF > 0,7$), représentées en teintes claires, correspondent aux espaces ouverts et bien ventilés, intersections, places, périphéries où le ciel est largement visible. À l'inverse, les valeurs faibles ($SVF < 0,3$), localisées dans les canyons urbains ou les cours intérieures étroites, traduisent une forte obstruction du ciel et un piégeage thermique nocturne lié à la faible ventilation.

L'analyse croisée avec la température radiante moyenne (T_{mrt}) et l'indice de confort thermique (PET) révèle une corrélation non linéaire :

- Les zones à faible SVF présentent des températures modérées le jour grâce à l'ombrage, mais conservent la chaleur la nuit.
- Les zones à SVF élevé favorisent le refroidissement radiatif nocturne, mais subissent une forte exposition diurne.

- Le confort optimal est observé pour des valeurs intermédiaires ($SVF \approx 0,5-0,6$), correspondant à un équilibre entre ombrage et ventilation.

Ces résultats soulignent l'importance d'une morphologie urbaine équilibrée, combinant porosité contrôlée, hauteur modérée et végétalisation stratégique, afin de réguler le microclimat et d'optimiser le confort thermique. Le SVF apparaît ainsi comme un indicateur clé de conception morphoclimatique, utile pour orienter la planification urbaine vers des formes bâties plus résilientes aux effets d'îlot de chaleur urbain (ICU)

3.7. Synthèse des résultats

La modélisation thermoradiative couplée Python–QGIS a permis de caractériser de façon intégrée les interactions entre la morphologie urbaine, le comportement radiatif et le confort thermique à Tana-Masoandro. Les résultats confirment la sensibilité du microclimat urbain aux paramètres géométriques, matériels et atmosphériques, en révélant des corrélations claires entre densité bâtie, ouverture du ciel (SVF), température radiante moyenne (Tmrt) et indice de confort (PET).

Les simulations indiquent que les zones à faible SVF (enclavées et denses) présentent un piégeage thermique nocturne marqué, tandis que les espaces à SVF élevé subissent une surchauffe diurne accentuée. Le meilleur équilibre thermique se situe dans les zones à morphologie modérée bâtie de hauteur moyenne, orientation favorable et présence végétale ponctuelle où le PET demeure dans la plage de confort thermique.

Les cartes issues du couplage des données (MNT, DSM, Land Cover, Tmrt, PET, SVF) illustrent la complexité morphoclimatique intra-urbaine, en montrant comment la combinaison des paramètres géométriques et matériels influence directement la distribution spatiale des températures et des flux radiatifs.

Sur le plan méthodologique, cette approche valide la pertinence du couplage Python–QGIS–UMEP comme outil opérationnel pour la planification urbaine durable. Elle démontre que la modélisation morphoclimatique peut devenir un instrument de conception permettant d'identifier les zones à risque de surchauffe, de guider les choix d'aménagement (orientation, hauteur, végétation) et de favoriser un urbanisme résilient adapté au climat tropical d'altitude de Madagascar.

3.8. Discussion scientifique et validation du modèle

Les résultats issus du couplage Python–QGIS–UMEP démontrent la pertinence d'une approche intégrée pour la modélisation microclimatique urbaine en climat tropical d'altitude. L'analyse croisée des indicateurs (Tmrt, PET, SVF) montre une forte corrélation entre la densité bâtie, la géométrie urbaine et la variabilité thermique intra-urbaine. Ces conclusions rejoignent les travaux fondateurs de Oke (1987) et Grimmond (2001), confirmant que la forme urbaine et les propriétés de surface constituent les principaux régulateurs du bilan radiatif local.

Dans le contexte tropical malgache, les contrastes thermiques observés jusqu'à 20 °C de différence entre zones végétalisées et surfaces minéralisées corroborent les études menées à Nairobi (Nguyen et al., 2020) et Addis-Abeba (Feyisa et al., 2021), qui soulignent la sensibilité des villes d'altitude à la combinaison densité / albédo / végétation. Le modèle confirme que la température radiante moyenne (Tmrt) et le facteur de visibilité du ciel (SVF) sont des indicateurs fiables pour diagnostiquer les déséquilibres thermiques et planifier des stratégies d'atténuation des îlots de chaleur urbains (ICU).

Sur le plan méthodologique, le couplage Python–QGIS–UMEP s'impose comme une solution à la fois scientifiquement robuste et économiquement accessible pour les villes des pays du Sud. L'usage exclusif d'outils open-source garantit la reproductibilité du modèle et son transfert possible vers d'autres contextes urbains tropicaux.

La validation interne du modèle a été effectuée par comparaison croisée entre scénarios et référence à la littérature internationale : les écarts simulés de Tmrt et de PET se situent dans les marges d'erreur admises (± 3 °C à ± 5 °C) par les études de Lindberg et al. (2018) et Santamouris (2015), attestant de la fiabilité des résultats.

Cependant, certaines limites subsistent :

- La faible disponibilité de données météorologiques locales à pas horaire ;

- L'absence de validation in situ par mesures microclimatiques ;
- La simplification des échanges convectifs dans le module SOLWEIG.

Ces limites n'altèrent pas la cohérence globale du modèle, mais ouvrent la voie à des améliorations futures (intégration d'indices énergétiques ou couplage CFD pour la ventilation urbaine).

Conclusion et perspectives

Cette étude démontre que la modélisation thermoradiative couplée Python–QGIS–UMEP constitue un outil scientifique et opérationnel pour analyser et anticiper les effets des îlots de chaleur urbains (ICU) dans les villes tropicales émergentes. En appliquant cette approche à la ville nouvelle de Tana-Masoandro (Madagascar), il a été possible de quantifier les interactions entre morphologie urbaine, rayonnement solaire, matériaux et confort thermique humain.

Les résultats mettent en évidence trois enseignements principaux :

1. La morphologie urbaine influence directement la distribution des températures radiantes et du confort thermique ;
2. La végétalisation et les matériaux à fort albédo réduisent significativement la surchauffe diurne ;
3. Le Sky View Factor (SVF) est un indicateur clé pour concevoir un équilibre entre ombrage, ventilation et visibilité du ciel.

Sur le plan scientifique, la recherche confirme la validité d'une modélisation open-source multi-échelle, adaptée aux contraintes tropicales et transposable à d'autres territoires en développement. Sur le plan pratique, elle fournit aux urbanistes et décideurs des outils prédictifs pour orienter la planification vers un urbanisme bioclimatique et résilient.

Perspectives

Les perspectives de recherche futures incluent :

- l'intégration de scénarios de changement climatique (RCP) pour projeter l'évolution des ICU à l'horizon 2050 ;
- la validation par mesures de terrain (capteurs de température, stations microclimatiques) ;
- le couplage du modèle avec des modules énergétiques (EnergyPlus complet) pour estimer les besoins en climatisation et la performance énergétique du bâti.

Ainsi, l'étude contribue à établir un cadre méthodologique reproductible pour la modélisation morphoclimatique des villes tropicales. Elle offre un appui scientifique solide à la conception d'environnements urbains confortables, économes en énergie et adaptés aux conditions climatiques futures de Madagascar et d'autres territoires du Sud.

Références

- [1]. Ali-Toudert, F., & Mayer, H. (2006). *Numerical study on the effects of aspect ratio and orientation of an urban street canyon on outdoor thermal comfort in hot and dry climate*. *Building and Environment*, 41(2), 94–108. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2005.01.013>
- [2]. 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, Université de Nantes]. HAL Archives. <https://hal.science/tel-00459721> ;
- [3]. Giridharan, R., Ganesan, S., & Lau, S. S. Y. (2007). *Daytime urban heat island effect in high-rise and high-density residential developments in Hong Kong*. *Energy and Buildings*, 36(6), 525–534. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2003.12.016> ;
- [4]. Instat Madagascar. (2023). *Rapport annuel sur la population et l'urbanisation à Antananarivo*. Institut National de la Statistique, Antananarivo. ;

- [5]. Lindberg, F., Grimmond, C. S. B., & Holmer, B. (2018). *Urban Multi-scale Environmental Predictor (UMEP) for climate studies in cities*. *International Journal of Climatology*, 38(9), 3908–3928. <https://doi.org/10.1002/joc.5535> ;
- [6]. Masson, V., Lemonsu, A., Hidalgo, J., & Voogt, J. A. (2020). *Urban climate, urban metabolism and the urban heat island: A review and perspective*. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 134, 110248. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2020.110248>;
- [7]. Oke, T. R. (1973). *City size and the urban heat island*. *Atmospheric Environment*, 7(8), 769–779. [https://doi.org/10.1016/0004-6981\(73\)90140-6](https://doi.org/10.1016/0004-6981(73)90140-6) ;
- [8]. Oke, T. R. (1987). *Boundary Layer Climates* (2nd ed.). Routledge. <https://doi.org/10.4324/9780203407219> ;
- [9]. Santamouris, M. (2015). *Analyzing the heat island magnitude and characteristics in one hundred Asian and Australian cities and regions*. *Science of the Total Environment*, 512–513, 582–598. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.01.060>
- [10]. Synnefa, A., Santamouris, M., & Akbari, H. (2007). *Estimating the effect of using cool coatings on energy loads and thermal comfort in residential buildings in various climatic conditions*. *Energy and Buildings*, 39(11), 1167–1174. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2007.01.004>
- [11]. Tanimoto, J., Hagishima, A., & Kinouchi, T. (2005). *Development of a simple simulation model for the heat island phenomenon considering buildings, roads and greenery*. *Energy and Buildings*, 37(3), 219–230. <https://doi.org/10.1016/j.enbuild.2004.07.009>
- [12]. United Nations-Habitat. (2022). *Sustainable Urban Development in Tropical Cities: Adapting to Heat and Climate Risks*. Nairobi: UN-Habitat Publications.