



AJPS PUBLICATIONS ALGERIA  
CROSSREF SPONSOR ORG  
Middle East and North Africa  
E-mail: editor@maspolitiques.com



**URBAN ART BIO**

Vol 4 Nr 01 Y 2025

ISSN: 2830-9618

Submitted : 27-08-2024 Reviewed : 23-09-2024 Accepted : 16-05-2025 Published : 31-05-2025

## **ARTIFICIALISATION DES SOLS ET DÉVELOPPEMENT DES ÎLOTS DE CHALEUR URBAINS À KORHOGO, NORD DE LA CÔTE D'IVOIRE**

### **LAND ARTIFICIALISATION AND URBAN HEAT ISLAND DEVELOPMENT IN KORHOGO, NORTHERN CÔTE D'IVOIRE**

**Dr TRAORE Kinakpefan Michel**

Enseignant - Chercheur

Département de Géographie

Université Jean-Lorougnon Guédé de Daloa (Côte d'Ivoire)

traoremichel50@yahoo.fr

#### **Résumé :**

Depuis, l'époque coloniale, la ville de Korhogo est sujette à une expansion continue de son emprise spatiale en lien avec un accroissement démographique remarquable. Cette dynamique spatiale, facteur de dévégétalisation et d'artificialisation des sols, pose le problème de la modification des conditions thermiques et du développement des Îlots de Chaleur Urbain et du risque thermique. Dès lors, comment se répartit la susceptibilité d'occurrence du risque thermique dans la ville de Korhogo ? L'étude vise à hiérarchiser la susceptibilité d'occurrence du risque thermique dans la ville de Korhogo en fonction de la structuration urbaine. L'approche méthodologique combine les techniques de la télédétection dans la plateforme Google Earth Engine et les enquêtes de terrain notamment l'observation in situ et l'entretien. À l'analyse, au cours des trois dernières décennies, la surface bâtie de Korhogo a progressé globalement de 342% passant de 805 ha à 3 558 ha soit un taux d'accroissement annuel moyen de 5,1%. Subséquemment, la biomasse végétale, à travers les moyennes annuelles du NDVI, a périclité de -2,7% par an. Ce recul des espaces végétalisés conjugué à la structure urbaine contribue à l'expansion des fortes températures des quartiers centraux vers les périphéries. La surface susceptible d'être soumise à des épisodes de vagues de chaleur extrêmes du fait des ICU est passée de 1 400 ha en 1992 à 3 500 ha en 2023 soit respectivement 17%, et 43% de l'emprise urbaine actuelle. Concernées par plus de 2 urbains sur 5, les vagues de chaleur extrêmes apparaissent comme un risque majeur dont la gestion, dans un contexte de réchauffement global, revêt un enjeu de durabilité de la ville de Korhogo. L'analyse des impacts potentiels ou avérés de ce risque climatique sur les enjeux (personnes, biens et activités) constitue une réelle perspective de recherche.

**Mots clés :** Korhogo, Urbanisation, Îlot de chaleur urbain, Risque thermique, Vulnérabilité

#### **Abstract:**

Since colonial times, the city of Korhogo has been subject to a continuous expansion of its spatial footprint, combined with a remarkable demographic growth. This spatial dynamic, which has led to artificialisation of the land, poses the problem of changing thermal conditions and the development of urban heat islands and thermal risk. What is the distribution of vulnerability to thermal risk in the city of Korhogo? The aim of the study is to rank the vulnerability to thermal risk in Korhogo according to urban structure. The methodological approach combines remote sensing techniques in the Google Earth Engine platform and field surveys, in particular in situ observations and interviews. Over the

past three decades, the built-up area of Korhogo has increased by 342%, from 805 ha to 3,558 ha, an average annual growth rate of 5.1%. Subsequently, plant biomass, as measured by average annual NDVI, declined by -2.7% per year. This decrease in vegetated area, combined with the urban structure, contributes to the spread of high temperatures from the central districts to the outskirts. The area likely to be exposed to extreme heat waves as a result of the UHI has increased from 1,400 ha in 1992 to 3,500 ha in 2023, i.e. 17% and 43% respectively of the current urban footprint. Affecting more than 2 out of 5 urban dwellers, extreme heat waves appear to be a major risk, the management of which, in the context of global warming, is a key issue for the sustainability of the city of Korhogo. The analysis of the potential or proven impact of this climatic risk on the issues at stake (people, property and activities) represents a real research prospect.

**Keywords:** Korhogo, Urbanisation, Urban heat island, Thermal risk, Vulnerability

### **Introduction :**

Longtemps restée rurale, la Côte d'Ivoire a connu sa transition urbaine en 2014 avec plus de la moitié (50,3%) de sa population vivant dans une ville (INS, 2014, K. M. Traoré et al, 2023, p. 601). Portée de prime à bord par l'agglomération abidjanaise, cette croissance urbaine est de plus en plus alimentée par les villes secondaires et les pôles régionaux comme Korhogo. La ville se caractérise par une croissance démographique soutenue. En 1960 avec 24 000 habitants et en 1975 avec 45 250 habitants, Korhogo se positionnait au rang de cinquième agglomération urbaine la plus importante en termes de démographie après Abidjan, Bouaké, Daloa et Man (RGP, 1975 ; REPCI, 2006, p.73). Alors qu'elle comptait moins de 5 000 âmes au lendemain des indépendances, entre 1975 et 1988, la ville, a connu un important accroissement démographique pour un taux annuel moyen de 7% (RGP, 1975 ; INS, 1992 ; REPCI, 2006, p.73). Avec 109 445 habitants, selon le Recensement Général de la Population et de l'Habitat de 1988, Korhogo est passée au quatrième rang des villes de plus de 100 mille habitants derrière Abidjan, Bouaké et Daloa (RGP, 1975 ; REPCI, 2006, p.73).

Si entre 1988 et 2014, le taux d'accroissement annuel moyen est tombé à 3,1%, la tendance démographique à la hausse de la cité du Poro, n'a toutefois pas fléchi. Le nombre d'habitants a atteint 142 039 en 1998 et 243 048 en 2014 (INS, 2001 ; INS, 2014). A la faveur, de la paix recouvrée, Korhogo a renoué davantage avec sa dynamique démographique. Le Recensement Général de la Population et de l'Habitat de 2021 a dénombré 440 926 résidents (INS, 2021). La ville a connu un taux d'accroissement annuel moyen exceptionnel de 51,2% entre 2014 et 2021. Le volume de population est passé presque du simple au double en moins d'une décennie pour un taux d'accroissement global de plus de 1700%.

Désormais, Korhogo représente la troisième ville ivoirienne la plus peuplée derrière Abidjan et Bouaké, rang longtemps tenu par Daloa. A l'analyse, cette lourde tendance démographique, alimentée par des facteurs à la fois historiques, géographiques et politiques (E. Grégoire et P. Labazée, 1993, p. 528 ; F. F. Soro, 2022, p. 308) va irrémédiablement se poursuivre. Aussi, la cité du Poro pourra compter environ 750 mille habitants en 2030 et plus de plus de 2 millions 500 mille à l'horizon 2050. Quelles sont les implications spatiales et environnementales de cette importante attractivité démographique de Korhogo ? L'étude envisage d'interroger les effets de la remarquable croissance démographique de la ville de Korhogo sur l'artificialisation des sols d'une part puis sur la répartition des températures de surface du sol et des îlots de chaleur urbains d'autre part.

En réalité, l'urbanisation massive a des effets prégnants sur l'environnement (C. O'malley et al, 2014, p. 72). Nous assistons à une augmentation de la fréquence et de l'intensité des phénomènes météorologiques extrêmes dans les territoires fortement urbanisés (GIEC, 2022). Les facteurs de cette recrudescence sont les changements d'utilisation des terres (C. O'malley et al, 2014, p. 73 ; M. Ymba, 2022, p. 4). En effet, bien plus que les perturbations climatiques, la littérature indique que l'artificialisation des sols est le facteur prééminent des catastrophes climatiques dans les villes (A. Sbai et O Mouadili, 2021, p.666 ; J.A.A Anache et al, 2018 ; C. B. Colman et al, 2019 et V. Simonneaux et al, 2015 ; K. M. Traoré, 2024, p. 276).

L'artificialisation des sols est entendue comme un processus de transformation de surfaces agricole, forestière ou naturelle en surfaces artificialisées par des opérations d'aménagement notamment les constructions à usage d'habitations, d'activités ou de loisirs et d'infrastructures de transport (C. Albizzati, 2017, p. 73 ; R. Quinteau, 2021, p. 3 ; I. Araujo-Oliveira et al, 2022, p. 2). Aussi, est artificialisée toute unité du territoire qui n'est plus naturelle ou agricole du fait des aménagements anthropiques (K. M. Traoré et al, 2024, p. 601). T. Y. Brou et al, (2024, p. 2) constatent, que ce processus, le plus souvent irréversible, est lié au développement urbain qui donne souvent lieu au remplacement des espaces boisés naturels par des zones bâties. L'urbanisation massive demeure, ainsi, le facteur dominant de ce processus de dévégétalisation et de dégradation des sols (B. Bechet et al, 2017, p. 13).

En réalité, l'un des impacts de la faible présence de la végétation en ville est la modification du bilan radiatif et énergétique (X. Foissard, 2015 p. 23). La dévégétalisation stimule un contenu thermique plus élevé dans les zones urbanisées (G. Kaplan 2019, p. 110 ; T. Y. Brou et al, 2024, p. 2 ; K. M. Traoré, 2024, p. 32). L'extension des surfaces minéralisées, du fait de l'urbain, participe de l'accumulation du rayonnement solaire diurne et à sa restitution la nuit sous forme de chaleur sensible (J. Crétat et al, 2023, p. 2 ; K. M. Traoré, 2024, p. 56). Cet excès de chaleur dans les zones urbanisées est appelé Îlot de Chaleur Urbains (ICU) qui indique des différences significatives de température entre des zones urbaines adjacentes, ou entre une ville et ses banlieues (C. O'malley, 2014, p. 73).

Dans un contexte de rehaussement global de la température planétaire (GIEC, 2022), la spatialisation des ICU revêt un enjeu hautement scientifique mais aussi environnemental et sanitaire important (K. Laaidi, 2019, p. 3 ; T. Y. Brou et al, 2024, p. 2). En effet, la littérature fait état de la recrudescence d'épisodes de morbidité, de détérioration du bien-être physique des populations et de surmortalité dans les villes en lien avec les températures caniculaires (R. Basu and J. M. Samet, 2002, p. 194 ; A. De Bono et al, 2004, p. 3 ; M. Laaidi, 2006 et al, p. 149 ; B. Doyon, 2008, p. 3 ; C. O'malley, 2014, p. 74 ; V. Dubreuil, 2020, p. 2 ; M. Ymba, 2022, p. 5). Outre ces enjeux ; cette étude présente également un intérêt économique et social car les ICU rendant le repos et la récupération difficile (K. Laaidi, 2012, p. 3), pourraient participer à une baisse de l'activité et subséquentement du PIB dans les pays aux économies vulnérables comme la Côte d'Ivoire (Groupe de la Banque Mondiale, 2023, p. 58). Aussi, la discrimination des sous-espaces urbains les plus susceptibles d'être exposés à des vagues de chaleur extrêmes s'inscrit dans le sillage des efforts d'adaptation aux effets des changements climatiques que le pays devra consentir pour sa durabilité. Elle ambitionne de mettre à la

disposition des gestionnaires locaux et/ou étatiques des outils d'aide à la décision pour des villes plus vertes, plus saines et plus résilientes aux chocs climatiques.

Si dans des pays développés comme la France, les ICU sont largement documentés (K. Laaidi, 2012, p. 3), ces microclimats urbains sont mal connus dans les pays du Sud (T. Y. Brou et al, 2024, p. 2). Dès lors, l'étude se structure autour des problématiques suivantes :

Quelles sont les implications spatiales de l'importante attractivité démographique de Korhogo ?

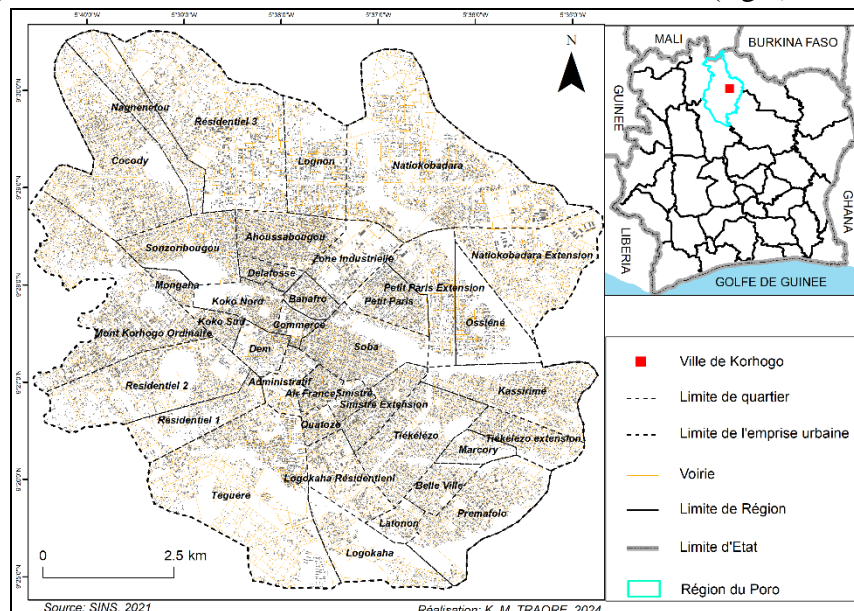
Comment se répartissent les températures de surface du sol en fonction de la structuration urbaine ?

Quels sont les sous-espaces urbains les plus enclins au risque thermique du fait de la susceptibilité d'occurrence de vagues de chaleur extrême ?

## 1. Approche méthodologique

### 1.1. Présentation et justification de la zone d'étude

La ville de Korhogo est située au Nord de la Côte d'Ivoire entre le 5°34'00" et le 5°41'00" de longitude Ouest et le 9°31'00" et la 9°24'00" de Latitude N (fig.1).



**Figure 1.** Localisation de la ville de Korhogo

La ville constitue la Capitale du District Autonome des Savanes et de Région du Poro. Korhogo est également le Chef-lieu du Département, de la Sous-Préfecture et de la Commune éponymes. Cette sorte de privilège politico-administrative a conféré à cette agglomération urbaine un dynamisme démographique remarquable. Elle se situe dans ce que la littérature indique par « zone dense » du fait des très fortes densités de population qu'on y rencontre depuis la période coloniale (D. Sylla et C. Hauhouot, 2016, p. 32 ; H. Yeo et al, 2016, p. 5 ; D. T. Yeo, 2019, p. 407). Une des conséquences de cette surcharge démographique est l'étalement de l'emprise urbaine dû à la juxtaposition de lotissements surtout villageois (D. Konaté, 2021, p. 257 ; M. A. Koné et al, 2023, p. 308). Il s'en suit un recul des zones végétalisées et des plans d'eau au profit de l'habitat et des sols nus et une artificialisation continue des sols (D. Sylla et C. Hauhouot, 2016, p. 37, D. T. Yeo, 2019, p. 416 ; F. F. Soro,

2022, p. 271). L'emprise urbaine s'étend sur environ 8 082 ha répartis entre 38 quartiers et villages intégrés.

Au demeurant, l'étude vise à mettre en exergue la modification du bilan radiatif induit par l'urbanisation du désormais troisième pôle urbain de la Côte d'Ivoire située dans le nord ivoirien. En effet, de par sa position septentrionale la ville est régie par un climat de type tropical de transition atténué appelé localement « Climat soudanais » couvrant la partie de la Côte d'Ivoire située au Nord du parallèle 8°N. Ce régime climatique est caractérisé par des températures élevées toute l'année qui oscillent entre un minimum de 23,9°C et un maximum de 35°C. Le mois de janvier reste le plus frais tandis que le mois de mars est le plus chaud. Comme l'ensemble des climats tropicaux, l'amplitude thermique reste globalement faible et inférieure à 5°C.

## 1.2. Données et outils

Si le questionnement de l'extension des ICU en lien avec l'urbanisation massive revêt un intérêt prééminent, sa cartographie se heurte, toutefois, à l'indisponibilité des données in situ (T. Y. Brou et al, 2024, p. 2). La Société d'exploitation et de développement aéroportuaire, aéronautique et météorologique (SODEXAM) en charge de la métrologie ne disposent que de moins d'une vingtaine de stations à l'échelle de la Côte d'Ivoire. La ville de Korhogo ne compte qu'une station logée à l'aéroport (9.4167 et -5.6167). Aussi, en l'absence d'un réseau de mesure dense, les images satellitaires apparaissent comme les plus adaptées pour étudier les îlots de chaleur urbains, grâce à leurs larges couvertures spatiales et à leurs bandes thermiques (K. Laaidi, 2019, p. 2 ; T. Y. Brou et al, 2024, p. 3). Ces images ont permis d'analyser, outre, la dynamique spatiale de Korhogo, également la variation le couvert végétal à travers l'indice de végétation à différence normalisée (NDVI) sur un recul de temps important (31 ans). Il s'agit des images Landsat 5 TM, 7 ETM+, 8 OLI/TIRS et 9 OLI/TIRS d'une résolution spatiale de 30 m (tableau 1).

**Tableau 1. Données de l'étude**

| N° | Données              | Scènes (Path / Row) | Résolution | Date d'acquisition |
|----|----------------------|---------------------|------------|--------------------|
| 1  | LANDSAT_5 TM +       | 197/053             | 30 m       | 29/12/1992         |
| 2  | LANDSAT_7 ETM +      | 197/053             | 30 m       | 08/02/2003         |
| 3  | LANDSAT_8 OLI-2 TIRS | 197/053             | 30 m       | 28/12/2013         |
| 4  | LANDSAT_9 OLI-2 TIRS | 197/053             | 30 m       | 30/11/2023         |

Source : CGTx, <https://earthengine.google.com>, <https://earthexplorer.usgs.gov/>

## 1.3. Méthode d'analyse des données

Le traitement des images se base essentiellement sur le *Machine Learning* (ML) ou l'apprentissage automatique (K. M. Traoré, 2024b, p. 38). Sous-catégorie de l'intelligence artificielle, le ML permet de modéliser des motifs récurrents dans un ensemble de données à partir d'algorithmes (J. Robert, 2020, p. 1 ; B. Mahesh, 2020, p. 381). Ce procédé a recours à nombre d'algorithmes pour des fins diverses telles que l'exploration de données, l'analyse prédictive ou encore le traitement d'images (B. Mahesh, 2020, p. 381). Dans cette étude, la modélisation concerne le bâti, l'indice de végétation à différence normalisée (NDVI), les Températures de Surface du Sol (TSS) et les Îlots de Chaleur Urbains (ICU). Cette

modélisation a été possible grâce à la plateforme Google Earth Engine (GEE) accessible via le lien (<https://earthengine.google.com>).

Le traitement des images s'est fait selon le processus de modélisation non supervisée. Ce processus a pour principe de laisser la latitude à l'algorithme de découvrir et présenter la structure la plus intéressante des données en entrée (B. Mahesh, 2020, p. 383). Ce procédé itératif a permis le regroupement et la réduction des caractéristiques des images satellites en classes à partir de l'algorithme *K-Means Clustering* dans GEE. Il s'agit d'un algorithme simple qui permet de discriminer un ensemble de données selon un nombre *K* de classes (B. Mahesh, 2020, p. 383). Le crédit accordé aux résultats de la classification est fonction du nombre de classes en entrée. Aussi, un nombre maximum de classes ( $K=10$ ) a été appliqué au modèle afin d'éviter au maximum la confusion entre pixels voisins dans le processus d'itération. Les différentes classes obtenues ont été à nouveau catégorisées en espaces boisés (forêt, verger, plantation), ouverts (champs, jachères, graminées) et bâtis (bâtiments, voirie, sols nus). Cette catégorisation s'est faite grâce aux observations au cours des missions de terrain et également à partir des images d'archives de Google Earth (D. R. Richards et R. N. Belcher, 2020, p. 5). L'approche a permis de cartographier la dynamique spatiale de la ville de Korhogo entre 1993 et 2023.

Les ICU ont été déterminés à partir des bandes thermiques des différents capteurs. Il s'agit de la bande B6\_VCID\_2 (Landsat 5 et 7) et de la bande 10 (Landsat 8 et 9). Dans l'interface de GEE, le principe a commencé à partir de la détermination des températures (TSS) de surface du sol selon l'équation 1 (Eq. 1) suivante :

$$\text{(Eq. 1) } TSS = (tb / (1 + (0.00115 * (tb/0.48359547432)) * \log(em))) - 273.15',$$

Avec :

**tb** : bande thermique

**em** : émissivité de la surface obtenue à partir de la fraction du sol végétalisé (S. Zhang et al, 2019, p. 7).

A partir des températures de surface, l'ICU a été évalué selon l'équation 2 (Eq. 2) :

$$\text{(Eq. 2) } UCI = TSS - TSSm / \textit{Ecart type}$$

Les résultats de la modélisation des espaces d'une occurrence importante aux vagues de chaleur ont été mis en relief avec la typologie des quartiers à partir des données de la direction régionale en charge de la construction et de l'urbanisme de Korhogo. Cette mise en relief a permis d'établir un lien entre la structuration urbaine et la distribution spatiale des ICU à l'échelle de l'emprise urbaine.

Outre, le bâti, les températures de surfaces et les îlots de chaleur, la variation de l'indice de végétation à différence normalisée (NDVI) a également été déterminée. Calculé à partir des canaux rouge et proche infrarouge (Eq. 3), le NDVI varie entre -1,0 et 1,0 et permet de générer un raster illustrant l'importance de la biomasse relative (Y. Piao et al, 2021, p. 6).

$$\text{(Eq. 2) } NDVI = ((NIR - Red)/(NIR + Red))$$

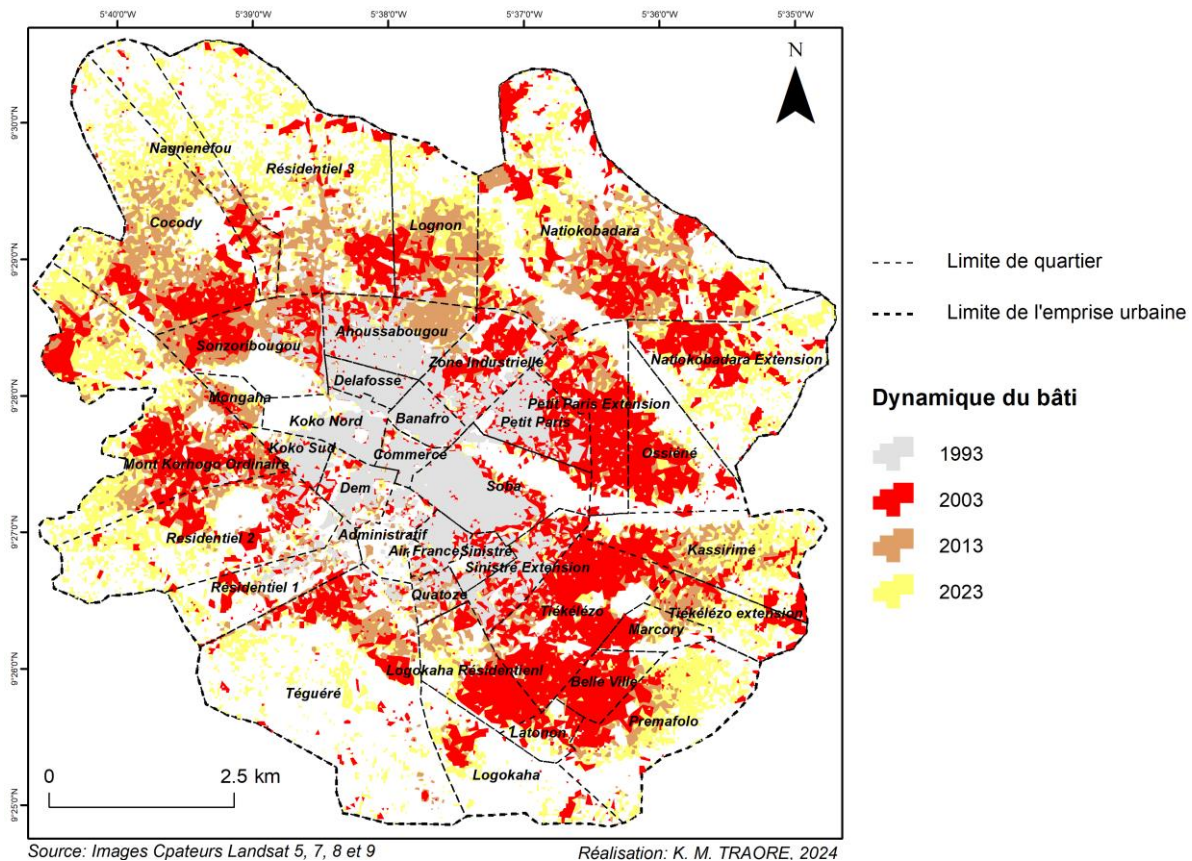
L'application de cette équation a permis de réaliser la variation de la série temporelle du NDVI sur la période (1992-2023).

## 2. Résultats et analyses

Les résultats s'organisent principalement autour de la dynamique de l'artificialisation des sols et de la régression de la biomasse végétale induite par l'urbain et la modification subséquente des conditions thermiques.

### 2.1. Une artificialisation continue des sols entre 1993 et 2023

La ville de Korhogo est sujette à une artificialisation continue des sols, induite par la dynamique du bâti (figure 2).



**Figure 2.** Dynamique du bâti de la ville de Korhogo entre 1992 et 2023

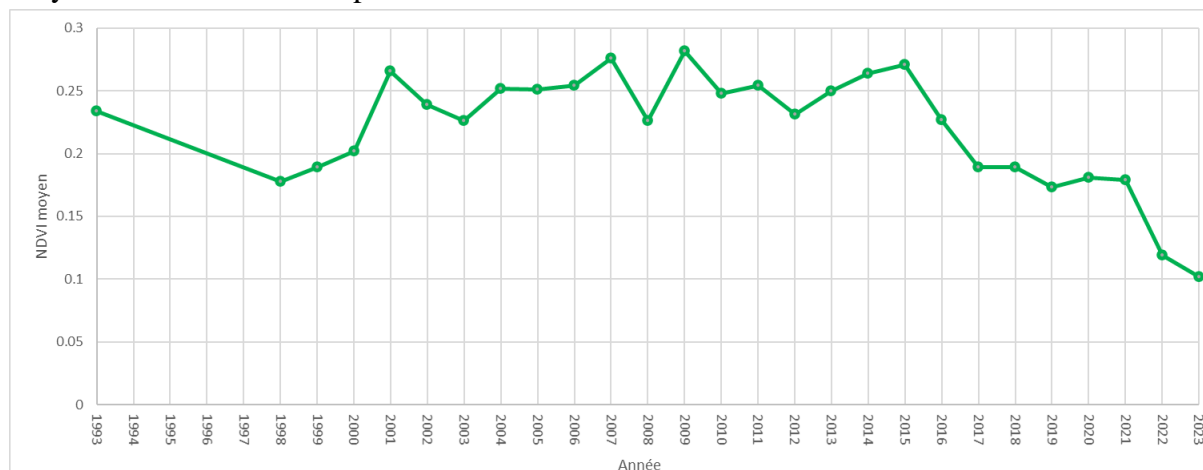
Au cours des trois dernières décennies, l'emprise spatiale du bâti est passée de 805 ha à 3558 ha. Cette expansion correspond à une augmentation de 342% pour un taux d'accroissement annuel moyen de 5,1%. Le déterminant de cette dynamique spatiale remarquable est la croissance de la population urbaine mais également par l'intégration des villages périphériques dans l'emprise urbaine. Aussi, comme l'évolution démographique, la dynamique du bâti a été fortement influencée par la crise militaro-politique survenue entre 2002 et 2011.

En effet, alors que le bâti a connu un accroissement annuel moyen de 11,4% entre 1993 et 2003, ce taux n'a été que de 0,8% entre 2003 et 2013. La surface bâtie qui est passée de 804 ha à 2 366 ha soit une augmentation de plus de 1 560 ha au cours de cette décennie n'a atteint que 2 567 ha en 2013 soit une évolution d'environ 200 ha au cours de la décennie de crise. En la faveur de la paix recouvrée, Korhogo a renoué avec la dynamique de son emprise urbaine. En 2023, le bâti couvre une surface de près de 3 560 ha. Sur la dernière décennie (2013-2023) les espaces artificialisés ont connu une progression d'environ 40% pour un taux d'accroissement moyen annuel de 3,3%, largement supérieur à celui de 0,8% de la décennie

2003-2013. Cette tendance globale à l'expansion de la surface bâtie de la ville de Korhogo se fait indéniablement au détriment du non bâti notamment les surfaces végétalisées.

## 2.2. Une déliquescence globale du couvert végétal

Inversement au construit, au cours des trois dernières décennies, la proportion du non bâti a progressivement décliné. De 90,04% en 1992, ces espaces non artificialisés occupaient 70,7% de l'emprise urbaine en 2003, 68,7% en 2013 et 55,97% en 2023. Cette déclinaison est perceptible à travers la série temporelle de l'indice normalisé de végétation (NDVI) (figure 3). L'analyse du NDVI met clairement en évidence la tendance globale à la baisse des valeurs moyennes du NDVI sur la période.



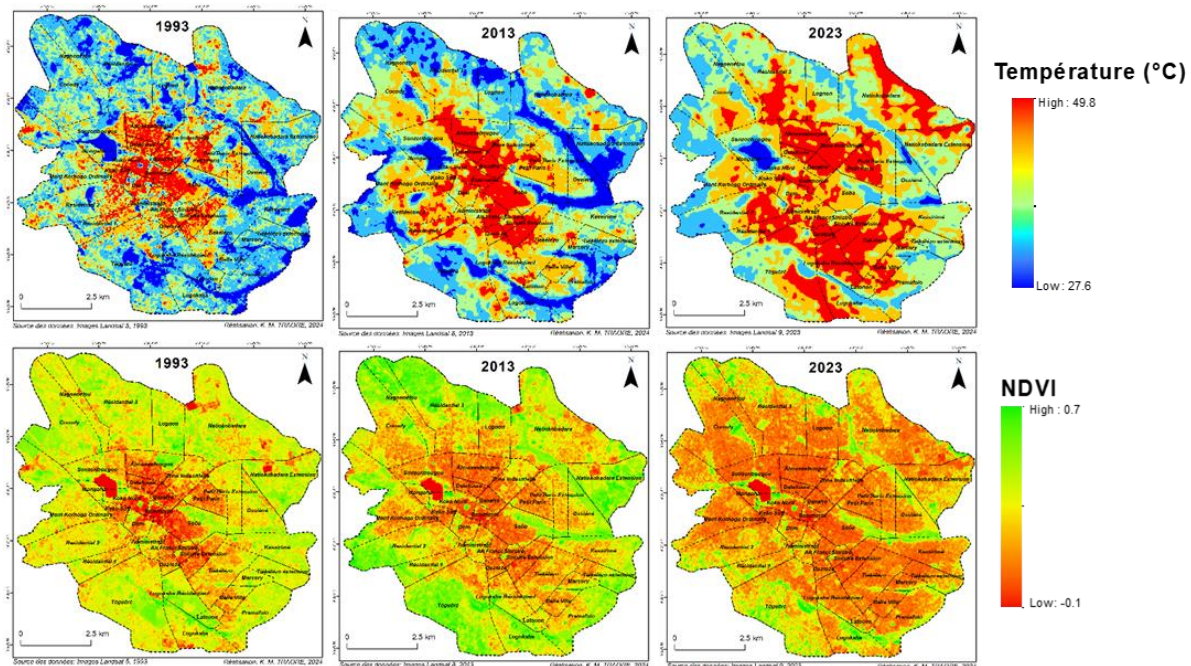
**Figure 4 :** Variation des valeurs du NDVI moyen entre 1992 et 2023

(Source des données : Images Landsat 5, 7, 8 et 9. Traitement et Réalisation : Traoré, 2024)

Cette moyenne est passée de 0,234 en 1992 à 0,102 en 2023 soit une baisse globale de plus de 56%. Si la variation de la biomasse globale a connu des oscillations pendant les années de crise, la tendance est globalement à la baisse pour un taux de régression moyen de -2,7% par an. Les années de crise passées, la déliquescence de la qualité et de la quantité de la biomasse végétale s'est accélérée à partir de 2015 selon un taux annuel moyen de -11,5%. Inéluctablement, ce recul des espaces végétalisés a des implications sur le régime thermique à travers l'expansion des ICU.

## 2.3. Une modification des conditions thermiques induite par la régression du couvert végétal

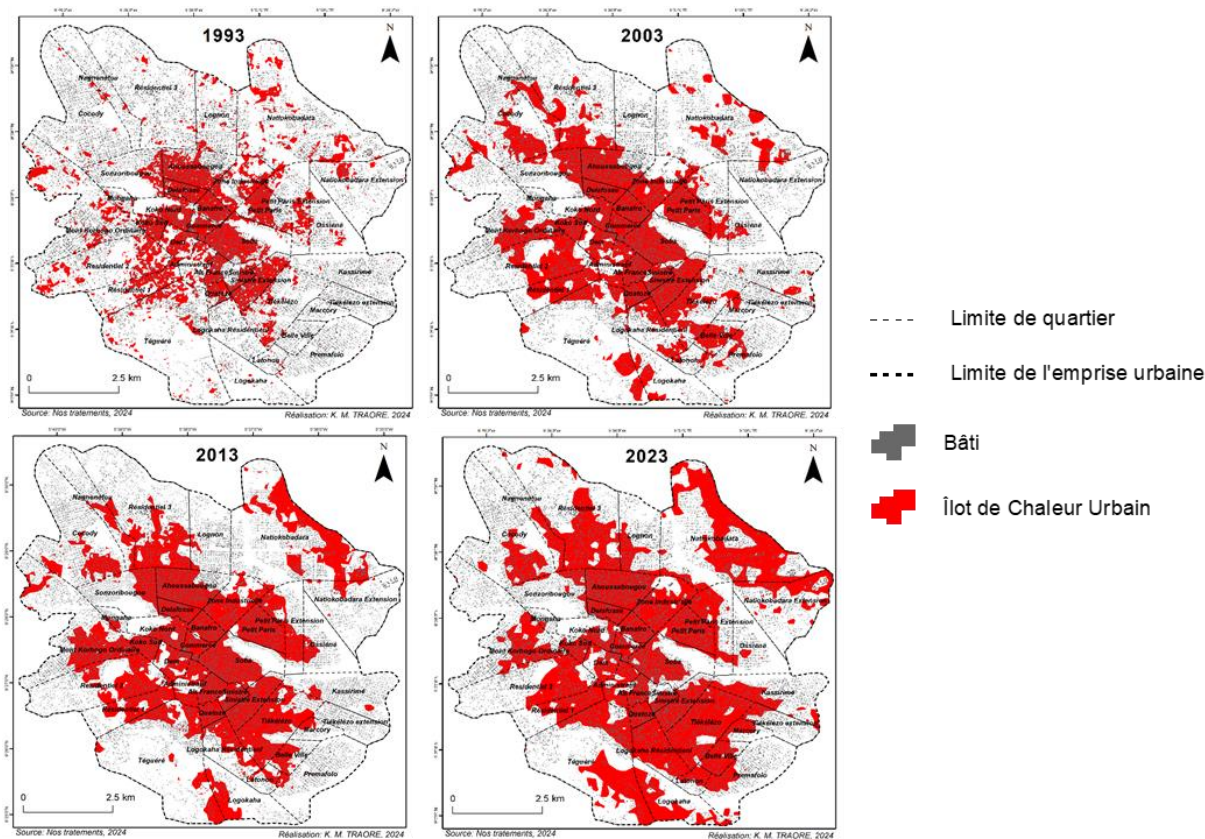
L'artificialisation du sol et le recul des espaces végétalisés induits par la dynamique du bâti favorisent le changement des conditions thermiques dans la ville de Korhogo. L'expression de ce changement thermique est la distribution spatiale des températures de surface du sol (TSS). Les cartes (planche cartographique 1) permettent d'appréhender cette distribution spatiale entre 1992 et 2023. A l'analyse, jusqu'en 1992, les surfaces chaudes se concentraient dans le centre-ville de Korhogo. Ce centre-ville concerne particulièrement les anciens quartiers comme Commerce, Administratif, Koko, Soba, Dem, Delafosse, Air-France, Sinistré et Ahoussabougou.



**Planche cartographique 1.** Distribution spatiale des TSS entre 1992 et 2023

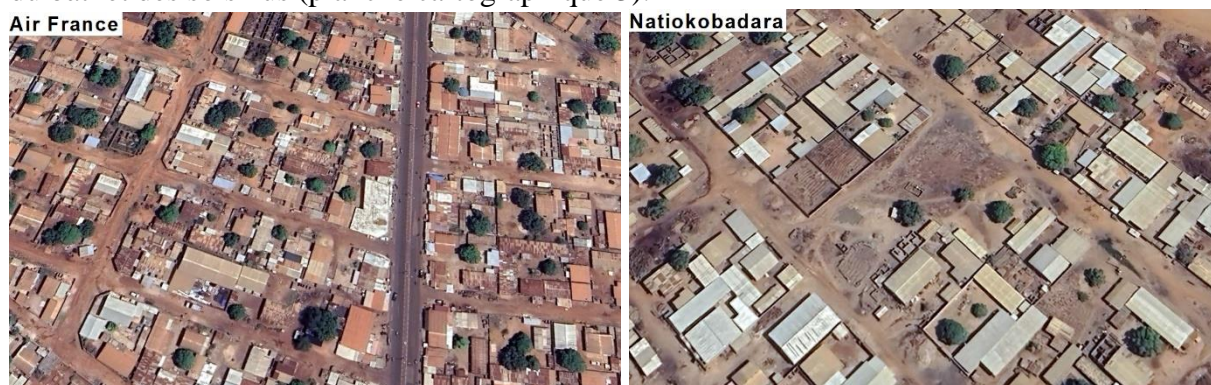
Les zones au-delà, peu anthropisées, étaient relativement plus fraîches. De la couronne centrale aux périphéries urbaines, la TSS de surface peut varier entre 27°C et à des extrêmes qui peuvent atteindre plus 49°C. En 2013, ces températures extrêmes se sont étendu des anciens quartiers du centre-ville selon un axe Nord-Sud. Certains quartiers restés peu ou prou frais en 1992 sont désormais sujets à des températures élevées. Il s’agit par exemple de Résidentiel 1, 2 et 3, Zone industrielle, Petit Paris, Tiékélézo, Quatorze, Logokaha et dans une moindre mesure Cocody. En 2023, les surfaces chaudes se sont davantage étendues. L’emprise urbaine est caractérisée par des surfaces chaudes qui s’alternent avec des zones de fraîcheurs. Outre les périphéries, les surfaces moins chaudes coïncident avec les espaces non constructibles généralement inondables et colonisés par l’agriculture urbaine. L’analyse des cartes du NDVI confirme cette influence du végétal sur la distribution spatiale des TSS. En réalité, l’expansion des espaces chauds est intrinsèquement fonction du recul des couvertures végétales.

Ce rehaussement des températures de surface du sol dans les zones urbanisées est facteur de développement d’Îlots de Chaleur Urbains (UCI) (planche cartographique 2). Dans la ville de Korhogo le développement des ICU suit la même trajectoire que l’expansion du bâti et des TSS. Les ICU restent le facteur prépondérant de la susceptibilité d’occurrence des vagues de chaleur et du risque thermique dans les espaces urbanisés. Alors qu’en 1992 elle ne concernait qu’environ 1 400 hectares, cette susceptibilité couvrait près de 2 500 en 2003, environ 2 700 en 2013 et plus de 3 500 ha en 2023 soit respectivement 17%, 29%, 33% et 43% de l’emprise urbaine actuelle. Au cours de ces trois dernières décennies, l’ICU s’est renforcé dans les quartiers centraux puis répandue vers les espaces péricentraux et les périphéries d’extension de la ville.



**Planche cartographique 2.** Expansion spatiale des ICU entre 1992 et 2023

Ces sous-espaces se distinguent par une occupation du sol caractérisée par une forte emprise du bâti et des sols nus (planche cartographique 3).



**Planche cartographique 3.** Structuration spatiale des sous-espaces enclins aux vagues de chaleur extrêmes

(Source : Google Earth, 2024)

Comme le montrent les photos aériennes de Google Earth de la figure 7, ces espaces qu'ils soient centraux (comme à Air France) ou périphériques (comme à Natiokobadara) sont caractérisés par une végétation quasi inexistante. Cette structuration artificialisée favorise l'accumulation de l'énergie du rayonnement solaire à travers le matériel de construction. En effet, quel que soit la typologie du quartier, administratif (Commerce, Administratif), Résidentiel (Cocody, Résidentiel, Air France...), populaire (Soba, Koko...), évolutif (Natiokobadara, Téguééré...) ou autres le matériel de construction est constitué quasi exclusivement de parpaing et de béton pour les murs et de zinc ou de dalle pour la toiture. Ces

Creative Commons Attribution-Non Commercial-No Derivatives 4.0 International License (CC BY-NC-ND)



surfaces artificialisées et imperméabilisées s'échauffent plus facilement. Cette structure urbaine conjuguée aux activités anthropiques entrave les échanges atmosphériques et emprisonne la température diurne et la relâche sous la forme de chaleur sensible nocturne. La susceptibilité d'occurrence des vagues de chaleurs extrêmes est désormais un risque majeur pour environs 3 urbains sur 5 à Korhogo.

### 3. Discussion

L'étude analyse la dynamique du bâti de la ville de Korhogo et ses implications sur la répartition des Îlots de Chaleur Urbains (ICU). Il faut noter que la spatialisation des ICU, dans un contexte de réchauffement global de la planète, revêt un enjeu particulièrement éminent pour la durabilité des systèmes territoriaux surtout urbains. La volonté d'une meilleure connaissance de la distribution de ce phénomène météorologique facteur de l'occurrence des vagues de chaleur extrêmes se heurte à l'indisponibilité des données in situ surtout dans les pays du Sud (Y. T. Brou et al, 2024, p. 3). A Korhogo, ville qui a connu une décennie de troubles socio-politiques, l'absence d'une série temporelle régulière de données de températures s'avère rédhibitoire. À cela, il faut ajouter le problème de densité du réseau de mesure. Aussi, les données satellitaires du capteur Landsat ont été utilisées afin de contourner cette indisponibilité des données et les biais d'observations inhérents.

Aussi, outre les enquêtes de terrain, l'approche méthodologique se base sur le *Machine Learning* ou l'apprentissage automatique dans la plateforme Google Earth Engine. Cette approche automatisée et dématérialisée permet de modéliser des motifs récurrents dans un ensemble de données, notamment des images satellites, à partir d'algorithmes (J. Robert 2020 : 1 ; B. Mahesh 2020 : 381). Contrairement aux techniques classiques de la télédétection, l'utilisation des images satellites dans un environnement automatisé est particulièrement appropriée pour cette étude (S. Ermida et al, 2020, p. 17).

En effet, il est vrai que la technologie de la télédétection s'est davantage démocratisée et imposée comme un outil pratique, rapide et efficace pour la cartographie de l'occupation du sol et le suivi de son évolution dans le temps (T. N. Phan et al, 2020, p. 2 ; J. Cui et al, 2022, p. 2). Toutefois, la réalisation d'une analyse sur des échelles spatiales et temporelles importantes nécessite de surmonter de nombreux défis techniques, tels que la rectification des différences entre plusieurs capteurs sur différentes périodes, ou la prise en compte de la qualité et de la disponibilité hétérogènes des données en raison de divers facteurs, notamment la couverture nuageuse mais également des défis en termes de ressources informatiques (J. Cui et al, 2022, p. 2 ; F. Dubertret et al, 2022, p. 3). Il serait fastidieux d'effectuer à grande échelle toutes ces opérations de collecte, stockage, traitement et extraction des informations de surface à l'aide des méthodes traditionnelles (T. N. Phaen et al, 2020, p. 2 ; J. Cui et al, 2022, p. 2).

Ainsi, Outre quelques biais liés aux données et à l'approche par pixel, la modélisation spatiale dans Google Earth Engine se présente comme une nouvelle approche capable de surmonter ces écueils et d'améliorer les résultats de la classification des images et la modélisation de l'usage des terres et de l'occupation des sols (F. Dubertret et al, 2022, p. 3). Cette plateforme d'analyse géospatiale basée sur le cloud permet de résoudre les problèmes les plus importants en matière de cartographie de l'occupation des sols sur de grandes surfaces

et à des échelles de temps considérables (S. M. Mirmazloumi et al, 2022, p. 21). Elle constitue désormais un puissant outil pour le téléchargement et le traitement d'une grande variété de données simultanément, dans un système consolidé (T. N. Phan et al, 2020, p. 2).

A l'issue de cette modélisation spatiale, il ressort que la ville de Korhogo est sujette à une artificialisation des sols induite par la dynamique du bâti. L'emprise spatiale du bâti est passée de 805 ha en 1992 à 3558 ha en 2023 soit un taux d'accroissement annuel moyen de 5,1%. A l'analyse, Korhogo a bénéficié d'une attention particulière du fait de son statut de poste administratif pendant l'époque coloniale (E. Grégoire et P. Labazée, 1993, p. 530) puis Chef-lieu de Sous-préfecture, de Département, de Région et de District. Cette volonté politique a fait de Korhogo une place centrale à travers des choix d'investissements symboliques qui ont favorisé une expansion spatiale en lien avec une croissance démographique remarquable.

L'une des implications de cette dévégétalisation est la modification des conditions thermiques et le développement des ICU. Le développement des ICU suit, en réalité, la même trajectoire que l'expansion du bâti. Alors qu'en 1992, la susceptibilité d'occurrence des vagues de chaleur et du risque thermique ne concernait qu'environ 1 400 hectares soit 17% de l'emprise urbaine, cette proportion a atteint plus de 3 500 ha en 2023 soit 43%.

Ce résultat corrobore les conclusions des études de N. Hassani et al, (2020, p. 372) ; de P. Kastendeuch et al, (2023, p. 8) ; de Y. T. Brou et al, (2024, p. 14) et de K. M. Traoré, (2024b, p. 39) respectivement dans les villes de Metz et Strasbourg en France, de Kigali au Rwanda et de Ferkessédougou en Côte d'Ivoire. La manifestation de cette variation thermique est la formation la nuit de l'ICU centré sur le centre-ville, du fait de la densité urbaine qui empêche la chaleur de s'évacuer formant ainsi un gradient climatique entre le centre et la périphérie (V. Dubreuil et al, 2020, p. 11 ; K. Laaidi, 2012, p. 3). A Korhogo, à l'instar du constat de V. Dubreuil et al (2020, p. 11) dans la ville de Rennes en France, les températures extrêmes sont relevées au centre-ville densément bâti et faiblement végétalisé. La structuration urbaine constitue ainsi le facteur prépondérant de la répartition du risque thermique dans la ville de Korhogo.

## Conclusion

L'étude vise à hiérarchiser la susceptibilité d'occurrence du risque thermique dans la ville de Korhogo sujet à une dynamique démographique et spatiale remarquable. L'atteinte de cet objectif a mobilisé des données satellitaires et empiriques analysées grâce au *Machine Learning* ou l'apprentissage automatique dans la plateforme Google Earth Engine. Le recours aux images spatiales s'est avéré prééminent dans un contexte d'absence de données in situ.

Les résultats indiquent que la dynamique spatiale du troisième pôle urbain de la Côte d'Ivoire entraîne une artificialisation continue du sol au détriment notamment des espaces végétalisés. Au cours des trois dernières décennies, la surface bâtie a progressé selon un taux d'accroissement annuel moyen de 5,1%. Subséquemment, la qualité et la quantité de la biomasse, à travers les moyennes annuelles du NDVI, a périclité -2,7% par an.

L'implication de cette dynamique remarquable du bâti est l'expansion des sous-espaces à fortes températures et le développement des ICU des quartiers centraux vers périphéries. Alors que les sous-espaces susceptibles d'être soumis à des épisodes de vagues de chaleur extrême ne concernaient qu'un plus d'un quart en 1992, cette proportion est à plus des

deux cinquièmes du territoire en 2023. A l'analyse, la susceptibilité d'occurrence du risque de thermique à Korhogo concernait plus de deux urbains sur cinq.

Au demeurant, il est admis que la méthode pourrait comporter des biais liés aux données en entrée et à l'approche de télédétection orientée pixels ou une possible confusion entre pixels. Toutefois, les résultats cartographiques confrontés aux observations in situ démontrent que les épisodes de vagues de chaleurs extrêmes apparaissent comme un risque majeur à Korhogo. Dans un contexte avéré de réchauffement global de la planète, la gestion anticipative de ce risque climatique exige des politiques volontaristes de la part des gestionnaires de la ville.

## Bibliographie

ALBIZZATI Colin, POULHES Mathilde, PARRAUD Joyce Sultan, 2017, *Caractérisation des espaces consommés par le bâti en France métropolitaine entre 2005 et 2013*, INSEE Références, p. 73-85

ANACHE Jamil AA, FLANAGAN Dennis C., SRIVASTAVA Anurag and al., 2018, «Land use and climate change impacts on runoff and soil erosion at the hillslope scale in the Brazilian Cerrado». *Sci. Total Environ.*, 622–623, 140–151, mis en ligne 1er mai 2018. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.11.257>

ARAUJO-OLIVEIRA Isadora, BACHELET Brunilde, GARCIA Andres et al, 2022, *Artificialisation des sols : rapport final*, Ecole des Ponts, ParisTech, 26 p.

BASU Rupa and SAMET Jonathan M., 2002, « Relation between Elevated Ambient Temperature and Mortality: A Review of the Epidemiologic Evidence». *Epidemiologic Reviews*, Volume 24, Issue 2, December 2002, Pages 190–202, <https://doi.org/10.1093/epirev/mxf007>

BECHET Béatrice, LE BISSONNAIS Yves, RUAS Anne et al, 2017, *Sols artificialisés et processus d'artificialisation des sols, Déterminants, impacts et leviers d'action*. INRA (France), 609 p.

BROU Téléphore Yao, RWANYIZIRI Gaspard et UWAYEZU Ernest, 2024, « Dynamique urbaine et développement d'îlots de chaleur urbains à Kigali, Rwanda », *Les Cahiers d'Afrique de l'Est /The East African Review* [En ligne], 59 | 2024, mis en ligne le 28 mars 2024, consulté le 09 mai 2024. <https://doi.org/10.4000/eastafrica.4500>

COLMAN Carina B., OLIVEIRA Paulo Tarso S., ALMAGRO Andre, et al., 2019, «Effects of climate and land-cover changes on soil erosion in Brazilian Pantanal». *Sustainability*, vol. 11, no 24, p. 7053. doi : 10.3390/su11247053

CRÉTAT Julien, RICHARD Yves, PLANCHON Olivier, et al. 2023, « Impact de la topographie et de la circulation atmosphérique sur l'îlot de chaleur urbain en situation de canicule (Dijon, France) ». *Climatologie*, vol. 20, p. 10.

CUI Jian, ZHU Mingshui, LIANG Yong, QIN Guangjiu, LI Jian and LIU Yaohui, 2022. « Land use/land cover change and their driving factors in the Yellow River Basin of Shandong Province based on google earth Engine from 2000 to 2020». *ISPRS International Journal of Geo-Information*, [En ligne], vol. 11, n°163, p. 1-18

DE BONO Andréa, PEDUZZI Pascal, KLUSER Stéphane and GIULIANI Gregory, 2004. « Impacts of summer 2003 heat wave in Europe». *Environment Alert Bulletin*, 2, 4 p. [https://www.researchgate.net/publication/313059632\\_Impacts\\_of\\_summer\\_2003\\_heat\\_wave\\_in\\_Europe](https://www.researchgate.net/publication/313059632_Impacts_of_summer_2003_heat_wave_in_Europe)

DOYON Bernard, BÉLANGER Diane ET GOSSELIN Pierre, 2008, « The potential impact of climate change on annual and seasonal mortality for three cities in Québec, Canada ». *International journal of health geographics*, vol. 7, p. 1-12.

DUBERTRET Fabrice, LE TOURNEAU François-Michel, VILLARREAL Miguel L., et al., 2022, «Monitoring Annual Land Use/Land Cover Change in the Tucson Metropolitan Area with Google Earth Engine (1986–2020) ». *Remote Sensing*, vol. 14, no 9, p. 2127.

DUBREUIL Vincent, FOISSARD Xavier, NABUCET Jean, et al, 2020, « Fréquence et intensité des îlots de chaleur à Rennes : bilan de 16 années d'observations (2004-2019) ». *Climatologie*, vol. 17, p. 6. <https://doi.org/10.1051/climat/202017006>

ERMIDA Sofia L., SOARES Patrícia, MANTAS Vasco GÖTTSCHE Frank-M. et TRIGO Isabel F., 2020. « Google earth engine open-source code for land surface temperature estimation from the landsat series ». *Remote Sensing*, vol. 12, no 9, p. 1471

GIEC, 2022, *Climate Change 2022: Impacts, Adaptation and Vulnerability*. <https://www.ipcc.ch/report/ar6/wg2/>

GRÉGOIRE Emmanuel et LABAZÉE Pascal, 1993, « Mobilité marchande et urbanisation ». *Cah. Sci. Hum*, vol. 29, no 2-3, p. 527-546.

Groupe de la Banque Mondiale, 2023, *Rapport National sur le Climat et le Développement, Afrique de l'Ouest et du Centre, Côte d'Ivoire*, 139 p.

HASSANI Nassima, LEBAUT Sébastien, DROGUE Gilles, et al, 2020, *Evolution spatio-temporelle de températures de surface diurnes dans l'aire métropolitaine de Metz à partir de données Landsat*. In : Actes du 33ème Colloque de l'Association Internationale de Climatologie, Rennes, France. p. 367-372.

HEMCHI Hassane Mahamat et COMBARY Enok Ferdinand, 2024. « Vulnérabilités, défis d'accessibilités et attractivités urbaines. Cas du centre-ville de Koudougou au Burkina-Faso. *URBAN ART BIO*, 3(1), 19-43.

INSTITUT NATIONAL DE LA STATISTIQUE (INS), 1992, *Répartition spatiale de la population et migrations, Tome 2, Analyse des résultats définitifs du RGPH-88*, Abidjan

INSTITUT NATIONAL DE LA STATISTIQUE (INS), 2001, *Recensement Général de la Population et de l'Habitation 98 : Migration – urbanisation, Volume 4, Tome 2*, Abidjan, INS

INSTITUT NATIONAL DE LA STATISTIQUE (INS), 2021, *Recensement Général de la Population et de l'Habitat 2021, RGPH-Résultats globaux*, URL : [https://www.ins.ci/RGP2021/RGPH2021-RESULTATS%20GLOBAUX\\_VF.pdf](https://www.ins.ci/RGP2021/RGPH2021-RESULTATS%20GLOBAUX_VF.pdf)

INSTITUT NATIONAL DE LA STATISTIQUE (INS-SODE), 2014, *Recensement Général de la Population et de l'Habitat (RGPH) 2014, Répertoire des localités : District Autonome d'Abidjan*, Abidjan, 13 p.

KAPLAN Gordana, 2019, « Evaluating the roles of green and built-up areas in reducing a surface urban heat island using remote sensing data », *Urbani izziv*, vol. 30, no 2, p. 105-112. DOI : [10.5379/urbani-izziv-en-2019-30-02-004](https://doi.org/10.5379/urbani-izziv-en-2019-30-02-004)

KASTENDEUCH Pierre, MASSING Naïs, SCHOTT Elsa PHILIPPS Nathalia & LECOMTE Karen, 2023. « Vulnérabilité et îlot de chaleur urbain : les facteurs du risque thermique nocturne à Strasbourg ». *Climatologie*, vol. 20, p. 14. Disponible en ligne : <https://doi.org/10.1051/climat/202320009>

KONATE Djibril, 2021, « Les nouveaux quartiers de Korhogo : des quartiers issus des lotissements villageois », *DaloGéo, Revue scientifique spécialisée en Géographie*, Université Jean Lorougnon Guédé, numéro 005, p. 251-266

KONE Monhmon Adjaratou, COULIBALY Amadou et TOURE Mamoutou, 2023, « Développement urbain et dégradation du cadre de vie à Korhogo », *DaloGéo, Revue scientifique spécialisée en Géographie*, Université Jean Lorougnon Guédé, numéro spécial 003, p. 304-317

LAAIDI Karine, 2012, *Rôle des îlots de chaleur urbains dans la surmortalité observée pendant les vagues de chaleur. Synthèse des études sur la vague de chaleur d'août 2003*, Saint-Maurice, Institut de veille sanitaire, 4 p. <http://www.invs.sante.fr>

LAAIDI Mohamed, LAAIDI Karine et BESANCENOT Jean-Pierre, 2006, « Temperature-related mortality in France, a comparison between regions with different climates from the perspective of global warming », *International journal of biometeorology*, vol. 51, p. 145-153. DOI: 10.1007/s00484-006-0045-8

MAHESH Batta, 2020. «Machine learning algorithms-a review», *International Journal of Science and Research (IJSR)*, vol. 9, no 1, p. 381-386.

MIRMAZLOUMI S. Mohammad.; KAKOOEI Mohammad.; MOHSENI Farzane.; and al, 2022, «ELULC-10, a 10 m European Land Use and Land Cover Map Using Sentinel and Landsat Data in Google Earth Engine». *Remote Sens*, 14, 3041. <https://doi.org/10.3390/rs14133041>

O'MALLEY Christopher, PIROOZFARB Poorang AE, FARR Eri c RP & GATES Jonathan, 2014. «An investigation into minimizing urban heat island (UHI) effects: A UK perspective». *Energy Procedia*, vol. 62, p. 72-80.

PHAN Thanh Noi, KUCH Verena ET LEHNERT Lukas W., 2020, «Land cover classification using Google Earth Engine and random forest classifier—The role of image composition». *Remote Sensing*, vol. 12, no 15, p. 2411.

PIAO Yong, JEONG Seunggyu, PARK Sangjin, et Dongkun Lee, 2021, « Analysis of land use and land cover change using time-series data and random forest in North Korea », *Remote Sensing*, vol. 13, no 17, 18 p.

QUINTEAU Raphael., 2021, *Note ouverte à la co-construction citoyenne-Les défis de la lutte contre, Les notes de la fabrique écologique, Fondation pluraliste de l'écologie*, Note ouverte à la co-construction citoyenne.

RAPPORT NATIONAL SUR L'ETAT ET LE DEVENIR DE LA POPULATION DE LA CÔTE D'IVOIRE (REPCI), 2007, *Population et développement : défis et perspectives pour la Côte d'Ivoire*, Ministère d'Etat, Ministère du Plan et du Développement, REPCI 2006, 190 p.

RICHARDS Daniel R. and BELCHER Richard N., 2020, «Global changes in urban vegetation cover», *Remote Sens.*, vol. 12, 23.

ROBERT Jérémy, 2020, «Machine Learning : Définition, fonctionnement, utilisations », *DataScientest*. Disponible en ligne : <https://datascientest.com/machine-learning-toutsavoir>

SBAI Abdelkader et MOUADILI Omar, 2021, « Risque d'érosion hydrique entre fragilité des équilibres environnementaux et perspectives de durabilité : Cas du bassin d'Oued El Abed (Maroc nord-est) ». *Revue Marocaine des Sciences Agronomiques et Vétérinaires*, vol. 9, no 4, p. 666-674.

SIMONNEAUX Vincent, CHEGGOUR Aouatif, DESCHAMPS Charles and al, 2015, «Land use and climate change effects on soil erosion in a semi-arid mountainous watershed (High Atlas, Morocco) ». *J. Arid Environ.* 122, pp. 64–75. [CrossRef]

SORO Fèrèlaha Fatoumata, 2022, *Etude comparative de la fabrique urbaine à Korhogo (Côte d'Ivoire) et à Franceville (Gabon) : Envers ou contre la volonté urbanistique*, Thèse de Géographie, Institut de Géographie Tropicale, Université Felix Houphouët-Boigny de Cocody, Abidjan, 385 p.

SYLLA Daouda et HAUHOUOT Célestin, 2016, « Dynamique de l'occupation du sol dans la zone dense de Korhogo à partir d'une approche « pixel par pixel » appliquée à des images Landsat TM/ETM+ », *GEOTROPE, Revue de Géographie Tropicale et d'Environnement*, n°2, EDUCI, p. 31-39

TRAORÉ Kinakpefan Michel, 2024a, « Analyse des mutations spatiales et environnementales dans une ville post-crise : Bouaké (Côte d'Ivoire) », *Revue LES TISONS*, N°0001, Vol.2, Juin, p. 45-71.

TRAORÉ Kinakpefan Michel, 2024b, « Evaluation de la susceptibilité d'occurrence du risque thermique dans une ville septentrionale de la Côte d'Ivoire : Ferkessédougou », *Revue Espaces Africains*, Numéro varia (En ligne), (Numéro 1|2024), p. 25-44, mis en ligne, le 30 juin 2024.

TRAORE Kinakpefan Michel, Sahoti OUATTARA, & KOUASSI Mangoua Akissi Hélène Francette, 2023, *Dynamique urbaine et risque pluvial dans la ville d'Arrah au Centre-Est de la Côte d'Ivoire*, Actes de la deuxième journée d'étude, Groupe de Recherche Espace, Territoires, Sociétés et Santé, 05 Octobre 2023, Université Félix Houphouët Boigny (UFHB) à Abidjan, p. 269-279.

TRAORE Kinakpefan Michel, Sahoti OUATTARA, & KOUASSI Mangoua Akissi Hélène Francette, 2023, « Artificialisation des sols et érosion hydrique dans la ville de Daloa, centre-ouest de la Côte d'Ivoire », N°06, Volume 2, *Ziglôbitha*, Revue des Arts, Linguistique, Littérature & Civilisations, p. 555-562

YEO Djibril Tenena, SORO Nambégué et TIEBRE Marie-Solange, 2019, « Dynamique de l'occupation du sol de la «zone dense» de Korhogo de 2000 à 2015 (Nord de la Côte d'Ivoire) » *Revue Ivoirienne de Géographie des Savanes*, Numéro Spécial Janvier 2019, p 405-423.

YEO Homiengnon, KRA Kouadio Joseph et KOFFI, Lath Franck Eric, 2016, « Infrastructures de transport et accessibilité géographique des populations rurales aux équipements sanitaires urbains dans la zone dense de Korhogo (nord de la Côte d'Ivoire) », *Espace populations sociétés* [En ligne], 2016/2 | 2016, mis en ligne le 29 juin 2016, consulté le 05 août 2024. URL: <http://journals.openedition.org/eps/6331>; DOI: <https://doi.org/10.4000/eps.6331>

YMBA Maïmouna, 2022, « Analyse des effets des îlots de chaleur urbains sur la santé des populations de la ville d'Abidjan (Côte d'Ivoire) », Fondation Croix-Rouge française, *Les Papiers de la Fondation*, n° 46, Décembre 2022, 24 p.

ZHANG Siqi, CHEN Hui, FU Yang, NIU Huihui, YANG Yi and ZHANG Boxiong, 2019, « Fractional vegetation cover estimation of different vegetation types in the Qaidam Basin », *Sustainability*, vol. 11, no 3, p. 864.