

Analyse diachronique de l'occupation du sol et de la température de surface de la terre dans la ville de Dakar au cours des 30 dernières années

INCLUDEPICTURE "/Users/ibrahimacamara/Library/Group Containers/UBF8T346G9.ms/WebArchiveCopyPasteTempFiles/com.microsoft.Word/Le-projet-de-bus-rapide-de-transit-.jpg" * MERGEFORMATINET

Source: Think Tank « INTERFACE » de L'Université Cheikh Anta Diop de Dakar (UCAD) sur la finance climat

Année : mars 2025

Sommaire

I) INTRODUCTION	3
II) Matériels et méthodes	3
II.1) Zone d'étude.....	3
II.2) Matériels.....	4
II.2.1) Outils.....	5
II.2.2) Données utilisées.....	7
II.3) Méthodes.....	7
II.3.1) Conversion des DN (<i>Digital number</i>) en réflectance et filtrage des images.....	7
II.3.2) Calcul du NDVI, de la fraction de végétation et de l'émissivité.....	8
II.3.3) Estimation de la température de la surface terrestre (LST).....	9
II.3.4) Estimation de l'indice îlot de chaleur urbain (UHI).....	10
II.3.5) Estimation de l'indice de variation du champ thermique urbain (UTFVI).....	10
II.3.6) Extraction des autres indices spectraux.....	11
II.3.7) Classification d'occupation et d'utilisation du sol (OS).....	12
II.3.8) Evaluation de la précision des modèles de classification.....	13
II.3.9) Méthode d'analyse statistique.....	14
III) Résultats	14
III.1) Analyse de l'occupation du sol (OS).....	14
III.2) Evaluation de la précision de la classification.....	15
III.3) Cartographie de la température de la surface terrestre (LST) de la ville de Dakar.....	16
III.4) L'analyse de l'îlot de chaleur urbain (UHI).....	18
III.5) L'indice de variation du champ thermique urbain (UTFVI).....	19
III.6) Résultats d'analyse statistique.....	20
III.6.1) Variation de la LST dans les différentes classes d'occupation du sol.....	20
III.6.2) Variation de la LST dans les terres végétalisées.....	21
III.6.3) Variation de la LST dans les terres humides.....	23
III.6.4) Variation de la LST dans les zones bâtis.....	25
IV) Discussion	26
IV.1) Croissance rapide de l'urbanisation et changement thermique à Dakar.....	26
IV.2) Influence limitée de la végétation sur la LST.....	27
IV.3) Faire progresser la recherche sur la LST et le OS.....	27
V) Conclusion	27
VI) Bibliographie	29

Liste des figures

Figure 1 : Carte de localisation de la ville de Dakar.....	6
Figure 2 : Organigramme de la méthodologie générale.....	7
Figure 3 : Schéma illustratif de l'Îlot de chaleur.....	12
Figure 4 : Organigramme de la classification de l'utilisation et de l'occupation du sol.....	15
Figure 5 : Carte d'occupation du sol de la ville de Dakar de 1986 à 2023.....	17
Figure 6 : Histogramme des classes d'occupation du sol de 1986 à 2023.....	17
Figure 7 : Carte de la distribution de LST de 1986 à 2023.....	19
Figure 8 : Variation des valeurs moyennes, maximales et minimale de la LST en fonction des années.....	19
Figure 9 : Carte de la distribution d'UHI au fil des années.....	20
Figure 10 : Variation des valeurs de UHI entre les différentes classes d'occupation du sol.....	21
Figure 11 : Carte de distribution spatiale de l'UTFVI au cours des années.....	22
Figure 12 : Variation des valeurs de LST entre les différentes classes d'occupation du sol.....	23
Figure 13 : Cartes des NDVI pour les années 1986, 2000, 2013 et 2023.....	24
Figure 14 : Corrélation entre les LST et les NDVI des années 1986, 2000, 2013 et 2023.....	25
Figure 15 : Cartes des NDWI pour les années 1986, 2000, 2013 et 2023.....	26
Figure 16 : Corrélation entre les LST et les NDWI des années 1986, 2000, 2013 et 2023.....	26
Figure 17 : Cartes des NDBI pour les années 1986, 2000, 2013 et 2023.....	27
Figure 18 : Corrélation entre les LST et les NDBI des années 1986, 2000, 2013 et 2023.....	28

Liste des tableaux

Tableau 1 : Présentation des différents outils et logiciels utilisés.....	9
Tableau 2 : Présentation des données de Landsat utilisées.....	10
Tableau 3 : Répartition des points d'échantillons en fonctions des années.....	15
Tableau 4 : Matrices de confusion, coefficients de Kappa et précisions globales des différentes classes d'OS.....	19

Ce rapport a été élaboré dans le cadre du projet UNI-LEAD, qui vise à renforcer les capacités des universités du Consortium des universités des PMA sur le changement climatique à fournir des conseils et des services techniques à leurs gouvernements pour un meilleur accès au financement climatique. Ce projet est financé par le Fonds pour l'environnement mondial (FEM), mis en œuvre par le Programme des Nations Unies pour l'environnement (PNUE) et exécuté par START International en partenariat avec Climate Analytics, Inc. Préparé par le Think Tank du Sénégal en collaboration avec ses partenaires listés dans le tableau ci-dessous, ce document est accompagné d'une note d'orientation et d'une proposition d'idée de projet destinée à être soumise aux institutions accréditées au niveau national.

Prénom et nom	Rôle (s)	Institution
Anastasia MENDY	Leader du Groupe de Travail Ville Durable, chargé des études diachroniques et de la revue bibliographique	FLSH/UCAD
Sidia BADIANE	Chargé des études diachroniques et de la revue bibliographique	FLSH/UCAD
Awa NIANG	Chargé des études diachroniques et de la revue bibliographique	FLSH/UCAD
Mbayang THIAM	Chargé des études diachroniques et de la revue bibliographique	Institut de Gouvernance Territoriale (IGT)/UCAD
Elhadji Mamadou SONKO	Chargé des études diachroniques et de la revue bibliographique, production idée de projet	Institut des Sciences de l'Environnement (IST)/UCAD
Mamoudou DEME	Chargé des études diachroniques et de la revue bibliographique	FLSH/UCAD
Demba NDAO NIANG	Chargé des études sur les aérosols et de la revue bibliographique	ESP/UCAD
Malick Mbow	Chargé des études diachroniques et de la revue bibliographique	FLSH/UCAD
Abdoulaye SYLLA	Chargé de la validation des thématiques et des fiches de projet	Mairie de Dakar
Laurice FAYE	Chargé de la validation des thématiques et	DiREC/METE

	des fiches de projet	
Ameth BA	Chargé de la validation des thématiques et des fiches de projet	Direction Espaces Verts
Aissatou SALL	Chargé de la validation des thématiques et des fiches de projet, renforcement de capacité	CSE

Ce groupe a été établi suite à plusieurs échanges entre les chercheurs, les acteurs publics et privés. Prof. Anastasie MENDY, chef du département géographie de l'UCAD, est le leader de ce groupe composé de 14 personnes dont 5 femmes. Le groupe est aussi constitué de plusieurs jeunes chercheurs (doctorant et post-doctorant).

Coordination:

Prof. Amadou Gueye

Dr. Ibrahima Camara

I) INTRODUCTION

L'urbanisation pose des problèmes majeurs, dont l'altération des conditions de surface du sol qui conduit à un climat thermique modifié qui rend les villes plus chaudes que les zones rurales environnantes (M. E. Awuh, P. O. Japhets, M. C. Officha, A. O. Okolie, & I. C. Enete, 2019). Les modifications de l'utilisation et de la couverture des sols (OS) en réponse aux activités humaines au fil du temps entraînent plusieurs conséquences environnementales à plusieurs échelles (par exemple, mondiale, régionale et locale), telles que des changements dans l'équilibre énergétique et la température de la surface terrestre (LST) (Mirza & Sajjadb, 2022).

La LST est le résultat de la façon dont les surfaces de la Terre interagissent avec l'atmosphère, produisant de la chaleur qui affecte les personnes. Elle est influencée par des aspects météorologiques tels que le rayonnement solaire, la vitesse du vent et les propriétés de surface. L'îlot de chaleur urbain (UHI) est un phénomène dans lequel les températures sont plus élevées dans les zones urbaines par rapport aux zones rurales ou naturelles environnantes. Les UHI et les LST élevés sont principalement causés par les activités humaines et les environnements bâtis, présentant une interconnexion évidente (Jianga & Tiana, 2023).

Plusieurs auteurs ont reconnu que l'intégration de LST/OS par télédétection et d'outils statistiques peut fournir des données spatialement continues sur l'ensemble d'une ville ou d'une région, permettant de visualiser les relations spatiales entre les modèles de température et les utilisations des terres, y compris les caractéristiques infrastructurelles (M. E. Awuh, P. O. Japhets, M. C. Officha, A. O. Okolie, & I. C. Enete, 2019). Des analyses statistiques et comparatives peuvent être réalisées pour examiner la causalité de l'association entre le LST et certains indices standardisés d'utilisation et de couverture terrestre tels que le *Normalized Difference Vegetation Index* (NDVI), le *Normalized Difference Built-Up Index* (NDBI) et le *Normalized Difference Water Index* (NDWI).

La ville de Dakar a connu un afflux important de personnes au cours des trois dernières décennies. Cette augmentation de la population a favorisé l'urbanisation rapide pour accueillir cette population croissante. Étant donné que l'urbanisation est généralement associée à la dynamique du paysage, cette étude tente de répondre aux deux questions de recherche suivantes : (1) Comment les classes de couverture terrestre ont changé au cours des trois dernières décennies à travers la ville de Dakar ? (2) Comment la température de la surface terrestre de la ville a varié en lien avec les changements de l'occupation du sol.

II) Matériels et méthodes

II.1) Zone d'étude

La ville de Dakar est située à l'extrême ouest de la Presqu'île du Cap-Vert, au bord de l'Océan Atlantique. Elle s'étend sur une superficie approximative de 83 Km², dont la latitude varie de 14°40' à

14°46' N et la longitude de -17°32' à -17°24' O. Elle compte 18 Communes et couvre une population totale de 1 278 469 hbts en 2023 selon ANSD (RGPH-5, 2024).

Elle correspond à la capitale politique et économique du Sénégal avec des activités commerciales, industrielles, et portuaires. La ville concentre de nombreuses entreprises et multinationales ainsi que des services publics, et des institutions financières et diplomatiques.

Le climat de Dakar est de type **tropical aride**, avec une longue saison sèche allant de novembre à mai, et une saison des pluies qui s'étend approximativement de juillet à début octobre. En raison de l'emplacement, le climat est plus doux que dans le reste du Sénégal. Pendant la saison sèche, des vents océaniques frais soufflent du nord, et de la brume peut parfois se former. Dans la période chaude, humide et pluvieuse, au contraire, le vent est plus faible et de direction variable (Source : (Climats et voyages, s.d.)

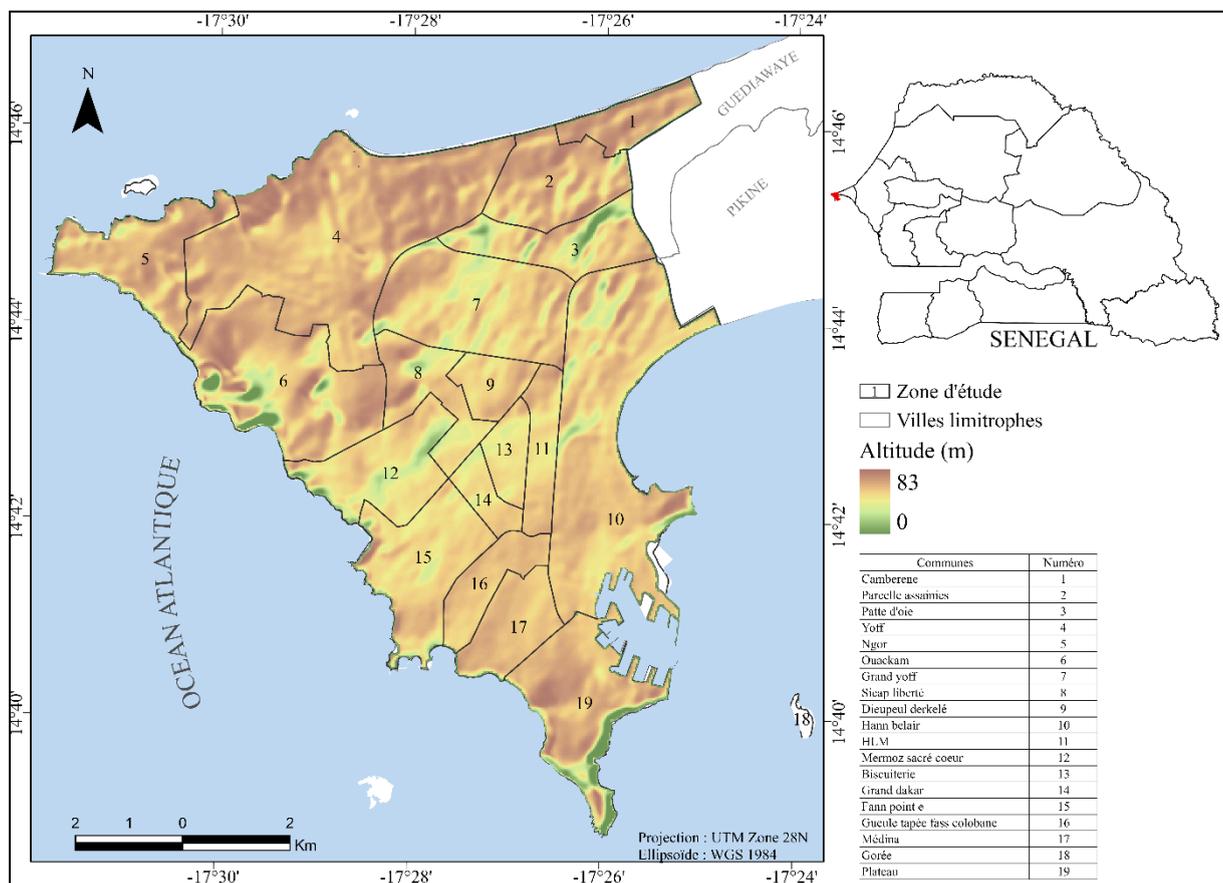


Figure 1: Carte de localisation de la ville de Dakar

II.2) Matériels

Pour mener à bien cette étude, une approche méthodologique basée sur l'analyse de données satellitaires et les systèmes d'information géographique (SIG) a été adoptée, en intégrant des outils

spécifiques pour l'analyse spatio-temporelle de l'occupation du sol et de la température de la surface terrestre. Le schéma ci-dessous indique l'organigramme de la méthodologie générale de l'étude.

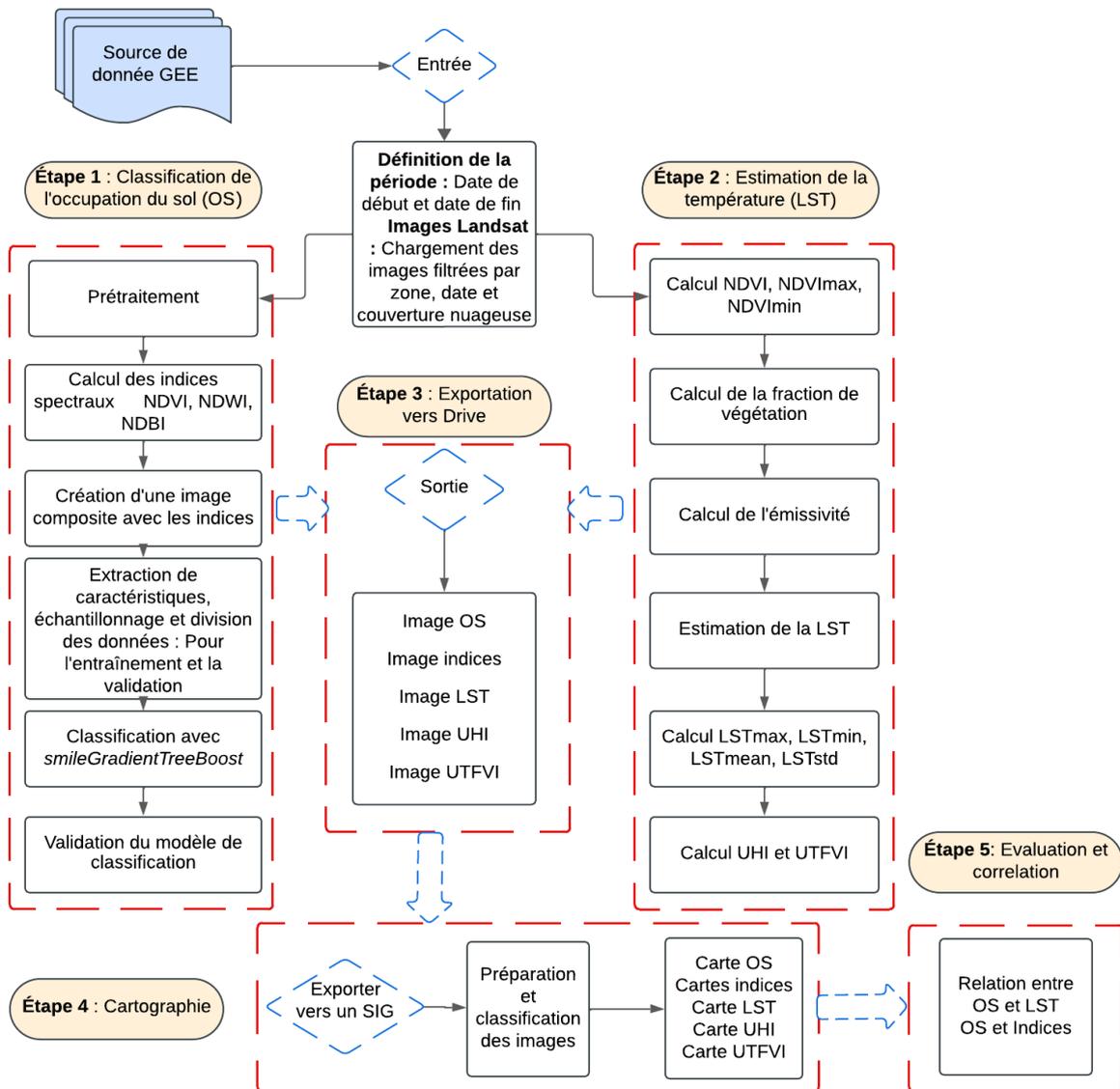


Figure 2 : Organigramme de la méthodologie générale

II.2.1) Outils

Les outils et logiciels de traitement et d'analyse géospatiale utilisés dans cette étude ont été essentiels, offrant des fonctionnalités avancées pour le traitement des images satellitaires, la cartographie et l'intégration des données, permettant ainsi une analyse approfondie des phénomènes observés.

Tableau 1: Présentation des différents outils et logiciels utilisés

Logiciels & Outils	Fonctionnalités principales	Utilisations
Google Earth Engine (GEE)	<p>Analyse et traitement des données géospatiales à grande échelle.</p> <p>Accès à une vaste bibliothèque d'images satellitaires et de données géospatiales.</p> <p>Langage de script pour l'analyse des données.</p>	<p>Analyse des séries temporelles pour la LST et le OS.</p> <p>Calcul des indices (NDVI, NDBI, NDWI).</p>
QGIS	<p>Logiciel SIG open-source pour la visualisation, le traitement et l'analyse des données géospatiales.</p> <p>Prise en charge de nombreux formats de fichiers et plug-ins pour les analyses avancées.</p>	<p>Cartographie et visualisation des données OS et LST.</p> <p>Fusion et transformation des couches géospatiales</p>
ArcGIS Pro & ArcMap	<p>Outils avancés pour l'analyse et la visualisation des données géospatiales.</p> <p>Géotraitement, analyse spatiale et modélisation.</p> <p>Interface utilisateur conviviale avec des fonctionnalités de cartographie étendues.</p>	<p>Analyse spatiale détaillée des données OS et LST. Création de cartes thématiques et rapports géospatiaux.</p>
Excel	<p>Gestion et analyse de données sous forme de tableaux.</p> <p>Calcul statistique et visualisation de données sous forme de graphiques.</p>	<p>Analyse statistique des résultats de LST.</p> <p>Création de graphiques et de tableaux récapitulatifs pour les données de OS.</p>
R/RStudio	<p>Un environnement de développement gratuit, libre et multiplateforme pour R, un langage de programmation utilisé pour le traitement de données et l'analyse statistique.</p>	<p>Analyse de corrélation entre la LST et les indices spectrales</p>

II.2.2) Données utilisées

Landsat 5 TM pour 1986, Landsat 7 TM 2000 et Landsat 8 OLI 2013 et 2023 ont été sélectionnés en raison de leur disponibilité et leur résolution spatiales pour les bandes multispectrales et thermiques, ce qui favorise une localisation précise des différentes utilisations des terres et une surveillance de la LST. Toutes les images ont été acquises sur la période d'une année avec l'extraction de l'image médiane par synthèse.

Tableau 2 : Présentation des données de Landsat utilisées

Satellites	Capteurs	Années	Projection	Résolution spatiale	Nbrs de bandes
Landsat 5	TM	1986	UTM Zone 28 N	30 m	7
Landsat 7	ETM+	2000	UTM Zone 28 N	30 m	7
Landsat 8	OLI	2013 & 2023	UTM Zone 28 N	30 m	11

II.3) Méthodes

Les méthodes utilisées ont consisté au prétraitement des images et leur classification, le calcul des indices de couverture terrestre (NDVI, NDBI, NDWI), le calcul de l'îlot de chaleur urbain et la détermination de la Température de Surface Terrestre (LST) à l'aide de bandes thermiques pour l'ensemble des données Landsat.

La méthodologie utilisée pour calculer la LST s'appuie sur les données du capteur Landsat. Le capteur TM a été utilisé pour les images de Landsat 5, ETM+ pour Landsat 7, et le capteur OLI a été utilisé pour celles de Landsat 8.

Les différentes étapes qui ont été suivies pour extraire la température de surface du sol à partir des bandes thermiques des images LANDSAT se présentent comme suit :

II.3.1) Conversion des DN (*Digital number*) en réflectance et filtrage des images

La conversion des DN et le filtrage des données ont des étapes essentielles pour garantir la précision des mesures issues des images satellitaires.

Voici une description de ces étapes qui a été effectuée sur la plateforme de google earth engine :

II.3.1.1) Conversion des DN (*Digital number*) en réflectance

Digital number (DN) : C'est une valeur numérique brute enregistrée par un capteur satellitaire. Elle représente l'intensité du signal reçu par le capteur pour une bande spectrale donnée. Les DN ne sont pas directement comparables entre différentes images ou même entre différentes bandes d'une même image.

Réflectance : C'est la proportion de la lumière incidente qui est réfléchiée par une surface. Elle est exprimée en pourcentage et est une mesure physique plus significative que les DN, car elle permet de comparer différentes surfaces et d'analyser les propriétés des matériaux.

L'objectif de la conversion des valeurs *Digital Numbers* (DN) en réflectance est de rendre les données satellites comparables et utilisables pour des analyses quantitatives. Elle est appliquée aux bandes optiques et thermiques en utilisant des facteurs d'échelle spécifiques. Pour les bandes optiques (bandes SR_B.), un facteur de correction est appliqué : $SR_B.^* = SR_B. * 0,0000275 + (-0,2)$. Pour les bandes thermiques (ST_B.*), la correction est effectuée avec la formule $ST_B.^* = ST_B. * 0,00341802 + 149,0$. Ces coefficients sont utilisés pour convertir les valeurs numériques brutes en valeurs physiquement significatives (réflectance).

II.3.1.2) Filtrage des données

Le filtrage des données est important pour éliminer les pixels affectés par les nuages, les ombres de nuages ou d'autres anomalies qui pourraient introduire des erreurs dans les calculs. En retirant ces pixels indésirables, la qualité des images utilisées pour l'analyse peut être nettement améliorée.

Cette étape consiste à identifier et masquer les pixels affectés par les nuages en utilisant des algorithmes comme le *QA_PIXEL* pour détecter les nuages et leurs ombres dans les images Landsat. Le masque est appliqué pour conserver uniquement les pixels clairs (non-nuageux) et fiables pour les calculs ultérieurs.

II.3.2) Calcul du NDVI, de la fraction de végétation et de l'émissivité

II.3.2.1) Calcul du NDVI

L'indice de végétation par différence normalisée (NDVI) est un indice de végétation largement utilisé en télédétection et en sciences environnementales. Il quantifie la présence et la santé de la végétation en fonction de la réflectance de la lumière visible et proche infrarouge. Les valeurs NDVI varient généralement de -1 à 1, les valeurs les plus élevées indiquant une végétation plus saine ou plus dense.

Le NDVI est calculé selon la formule suivante :

$$NDVI = \frac{PIR-Rouge}{PIR+Rouge}$$

Le PIR (proche infrarouge) est la réflectance dans la partie proche infrarouge du spectre électromagnétique.

Rouge est la réflectance dans la partie rouge du spectre électromagnétique.

Après le calcul du NDVI, nous avons procédé à une détermination de ses valeurs minimum et maximum qui seront utilisées pour estimer la fraction végétale.

II.3.2.2) Estimation de la fraction de végétation (FV)

La fraction de végétation (FV) est une mesure utilisée pour quantifier l'abondance relative de la végétation dans une zone spécifiée en analysant les valeurs de l'indice de végétation par différence normalisée (NDVI). Elle est définie comme le rapport entre la surface de projection verticale de la végétation (contenant des feuilles, des tiges et des branches) sur le sol et la surface totale de la végétation. Elle fournit des informations précieuses sur la couverture terrestre et la santé des écosystèmes, les valeurs de FV plus élevées indiquant une plus grande présence de végétation et vice versa.

La FV est calculée selon la formule suivante :

$$FV = \left(\frac{NDVI - NDVI_{min}}{NDVI_{max} - NDVI_{min}} \right)^2$$

NDVI_{min} représente le NDVI minimale et NDVI_{max} représente le NDVI maximale

II.3.2.3) Estimation de l'émissivité (ε)

Elle est calculée en fonction de la PV, reflétant l'efficacité avec laquelle une surface émet un rayonnement thermique. Les valeurs d'émissivité proches de 1,0 sont typiques des surfaces naturelles comme le sol et la végétation, tandis que les valeurs inférieures sont souvent associées aux plans d'eau ou aux zones urbaines. ε est calculée selon la formule ci-dessous :

$$\varepsilon = 0,004 * FV + 0,986$$

Le coefficient 0,004 représente la variation d'émissivité due à la végétation et 0,986 représente l'émissivité de base pour les autres surfaces.

II.3.3) Estimation de la température de la surface terrestre (LST)

La LST, exprimée en °C, a été dérivée des bandes thermiques de Landsat 5 et 7 TM (bande 6) et de Landsat 8 OLI (bande 10). Les zones à forte température présentent des valeurs de LST plus élevée et vice versa. La LST est obtenue en utilisant la formule ci-dessous (Pal & Ziaul, 2017) , (Niladri, Prolay, Subhasish, & Ranajit, 2021) :

$$LST = \left(\frac{BT}{1 + \left(\frac{h * BT}{\rho} \right) * \ln \varepsilon} \right) - 273,15$$

Où BT est la bande thermique de Landsat, ρ est la longueur d'onde de la radiance émise (11,5μm) (Mwangi, Faith, & Peter, 2018) , $\rho = \frac{h * c}{\sigma} = 1,438 * 10^{-2} mK$ (σ = constante de Boltzmann (1,38 * 10⁻²³ J/K), h = constante de Planck (6,626 * 10⁻³⁴ J s), et c = vitesse de la lumière (2,998 * 10⁸ m/s)) (Pal & Ziaul, 2017).

II.3.4) Estimation de l'indice îlot de chaleur urbain (UHI)

Un îlot de chaleur urbain est le nom donné pour décrire la chaleur caractéristique de l'atmosphère et des surfaces des villes (zones urbaines) par rapport à leur environnement (non urbanisé). Les îlots de chaleur sont causés par l'urbanisation, lorsque les bâtiments, les routes et les surfaces pavées emmagasinent la chaleur pendant la journée, puis la libèrent lentement pendant la soirée, ce qui maintient les zones urbaines plus chaudes que les zones environnantes (Mwangi, Karanja, & Kamau, 2018). Les zones les plus denses en infrastructures présentent des valeurs de UHI beaucoup plus élevées et une mauvaise condition écologique.

UHI est déterminé selon la formule suivante :

$$UHI = \frac{LST - LST_{mean}}{LST_{std}}$$

Où LST_{mean} représente la température de surface moyenne et LST_{std} l'écart type de la température de surface.



Figure 3 : Schéma illustratif de l'Îlot de chaleur

II.3.5) Estimation de l'indice de variation du champ thermique urbain (UTFVI)

L'indice de variation du champ thermique urbain est une mesure quantitative qui développe l'idée d'intensité des îlots de chaleur urbains. Il examine les différences de LST dans une zone urbaine. Un score UTFVI élevé corrèle avec une diminution de la biodiversité, souligne l'importance d'un phénomène d'îlot de chaleur urbain exacerbé et une augmentation des températures extrêmes en milieu urbain. Cet écart dans la répartition de la température est une caractéristique déterminante d'un effet d'îlot de chaleur urbain en surface (SUHI). Diverses études ont utilisé l'équation donnée par (Yong et al., 2006) pour extraire l'UTFVI des données LST (Gajani, 2024).

$$UTFVI = \frac{T_s - T_{mean}}{T_{mean}}$$

Où T_s est le LST du pixel et T_{mean} signifie le LST moyen de la zone d'étude. Selon les variations, nous avons classé l'UTFVI en six catégories distinctes : aucune, faible, moyenne, forte, plus forte et la plus forte.

II.3.6) Extraction des autres indices spectraux

Les indices spectraux sont utilisés pour mettre en évidence des caractéristiques ou des phénomènes spécifiques dans les images de télédétection. Nous créons des indices spectraux en transformant les données spectrales en utilisant des rapports entre les bandes pour réduire les données en informations significatives. Les caractéristiques qui peuvent être extraites en utilisant des indices spectraux vont de la végétation, des bâtiments, des surfaces humides parmi beaucoup d'autres.

II.3.6.1) Indice d'eau par différence normalisée (NDWI)

L'indice d'eau par différence normalisée (NDWI) est utilisé pour détecter les bassins d'eau ouverts sur l'image satellitaire : le corps hydrique «se démarque» du sol et de la végétation. Il a été proposé par McFeeters en 1996. Aujourd'hui, il est utilisé principalement pour détecter et surveiller de faibles changements de la teneur en eau aux bassins d'eau. En utilisant les avantages du NIR (proche infrarouge) et du GREEN (vert visible). Il est obtenu selon la formule suivante :

$$NDWI = \frac{GREEN - NIR}{GREEN + NIR}$$

GREEN est la bande verte et NIR est la bande proche infrarouge.

II.3.6.2) Indice de construction par différence normalisée (NDBI)

Indice de construction par différence normalisée (NDBI) décrit la densité de construction de toute zone géographique. Le NDBI est un rapport entre l'infrarouge à ondes courtes (SWIR) et le proche infrarouge (NIR). Le NDBI a été calculé selon (Pal & Ziaul, 2017) par :

$$NDBI = \frac{SWIR - NIR}{SWIR + NIR}$$

SWIR est la bande courte infrarouge et NIR est la bande infrarouge.

II.3.6.3) Indice de sol nu (BSI)

L'indice de sol nu (BSI) est un indicateur numérique qui combine les bandes spectrales bleues, rouges, proches infrarouges et infrarouges à ondes courtes pour capturer les variations du sol. Le BSI peut être utilisé dans de nombreuses applications de télédétection, comme la cartographie des sols etc. Il est calculé selon la formule suivante :

$$BSI = \frac{(RED + SWIR) + (-1 * (NIR + BLUE))}{(RED + SWIR) + (NIR + BLUE)}$$

RED est la bande rouge, BLUE est la bande bleue

II.3.7) Classification d'occupation et d'utilisation du sol (OS)

Pour générer les cartes OS, la technique de classification d'image supervisée avec méthode de *smileGradientTreeBoost* a été utilisée sur la plateforme de google earth engine.

Un grand nombre de points d'entraînement ont été collectés de par une interprétation visuelle et une combinaison de couleur à partir de l'ensemble de l'imagerie. Au total, 2 730 points ont été collectés pour les quatre années de l'étude répartis comme suit :

- 1885 utilisés pour la calibration du modèle soit 70% des points d'entraînements
- 845 utilisés pour la validation du modèle soit 30% des points d'entraînements

Le tableau ci-dessous donne la répartition des échantillons pour chaque année

Tableau 3 : Répartition des points d'échantillons en fonctions des années

Années	Points d'échantillons		
	Calibrations	Validations	Totals
1986	564	235	799
2000	491	229	720
2013	465	244	709
2023	365	137	502
TOTALS	1885	845	2730

A cette fin, quatre classes ont été définis et répartis comme suit :

- Bâti : elle couvre les bâtiments à des fins résidentielle et commerciales, les routes, les aéroports, le port
- Végétation : ces espaces comprennent les champs, les espaces verts, les arbres, la végétations naturelles, les végétations humides
- Eau : il s'agit des zones couvertes par l'océan, les lacs, les eaux stagnantes
- Sol nu : il s'agit des espaces vides sans structures bâtis ni aucune occupation du sol

Le diagramme ci-dessous indique l'ensemble du processus de classification supervisée :

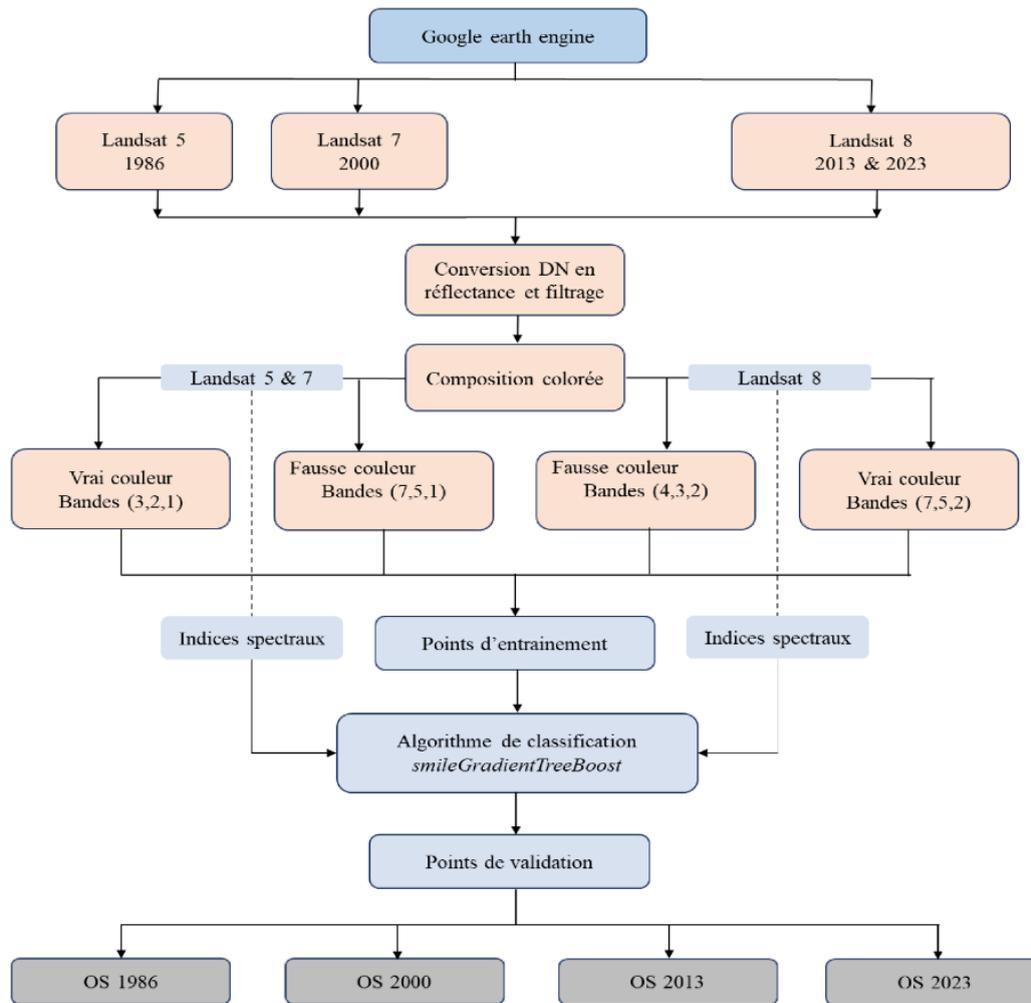


Figure 4 : Organigramme de la classification de l'utilisation et de l'occupation du sol

II.3.8) Evaluation de la précision des modèles de classification

La précision de la classification a été évaluée à l'aide du coefficient kappa (K) et la précision globale (OA) a été obtenue à l'aide d'une matrice de confusion qui est une méthode largement utilisée pour la précision de la classification (Ullah, Fan, & Liu, 2019). L'OA est exprimée en pourcentage du nombre de pixels correctement classés divisé par le nombre total de pixels. Pour évaluer les écarts entre la précision de classification attendue et la précision de classification réelle, l'indice statistique Kappa a été utilisé. Dans cette étude, 30% des points collectés ont été utilisés pour évaluer la précision de la classification pour chaque image.

Les équations mathématiques utilisées pour estimer les statistiques mentionnées précédemment sont décrites ci-dessous :

- $$OA = \frac{\sum_{i=1}^r nij}{N}$$

- $$K = N \sum_{i=1}^n nii - \sum_{i=1}^r \frac{col\ lig}{N^2} - \sum_{i=1}^r col\ lig$$

nii est le nombre de pixels correctement classés dans une catégorie ; N est le nombre total de pixels dans la matrice de confusion ; r est le nombre de lignes ; et nicol et nlig sont le total des colonnes (données de référence) et des lignes (classes prédites).

II.3.9) Méthode d'analyse statistique

L'analyse statistique a été réalisée avec le logiciel de R/Rstudio. Les différents indices spectraux ont été combinés avec la LST pour connaître sa relation avec ces différents paramètres.

III) Résultats

III.1) Analyse de l'occupation du sol (OS)

Compte tenu de l'intérêt de l'étude et du OS dominant, quatre (04) classes ont été générées. Peu d'autres classes OS peuvent être générées, mais leur proportion est trop faible et n'est même pas reflétée clairement. Pour cela, ces pixels non définis ont été incorporés dans les classes voisines au sein du système. Le résultat final donne une image qui montre le changement de l'occupation du sol entre 1986, 2000, 2013 et 2023 (fig. 6).

Le graphique présente un ensemble de données complet sur les superficies soumises à différents OS (fig. 7).

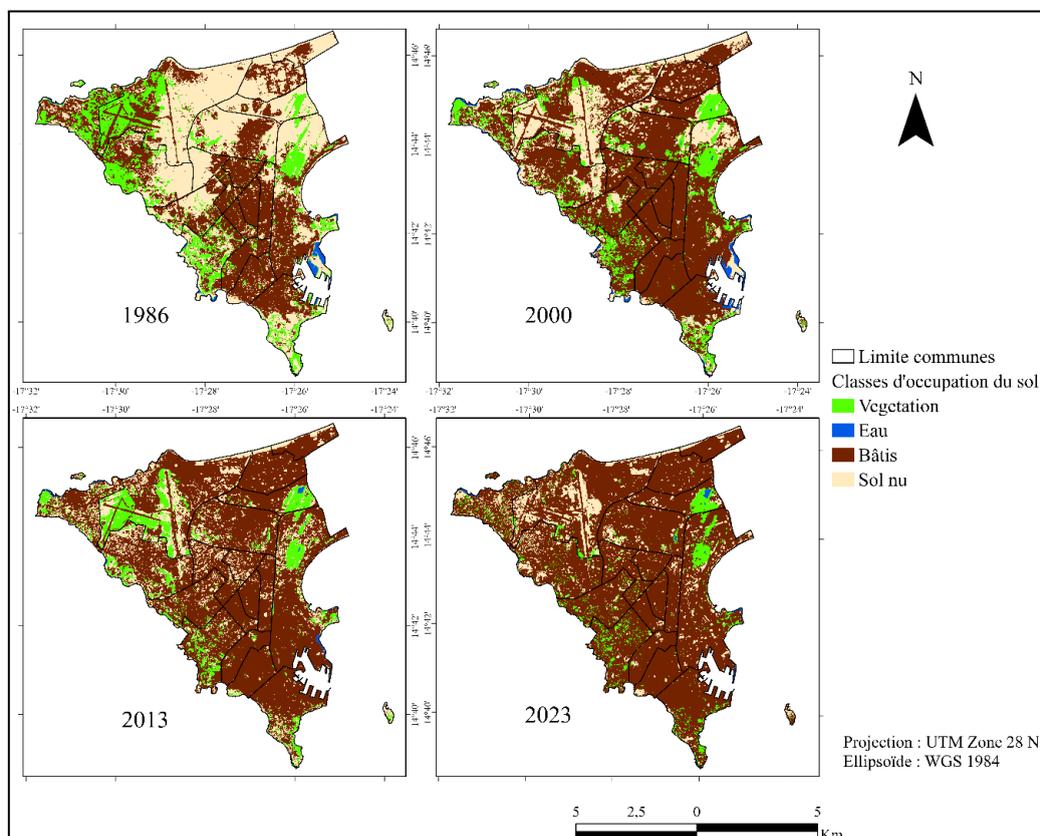


Figure 5 : Carte d'occupation du sol de la ville de Dakar de 1986 à 2023

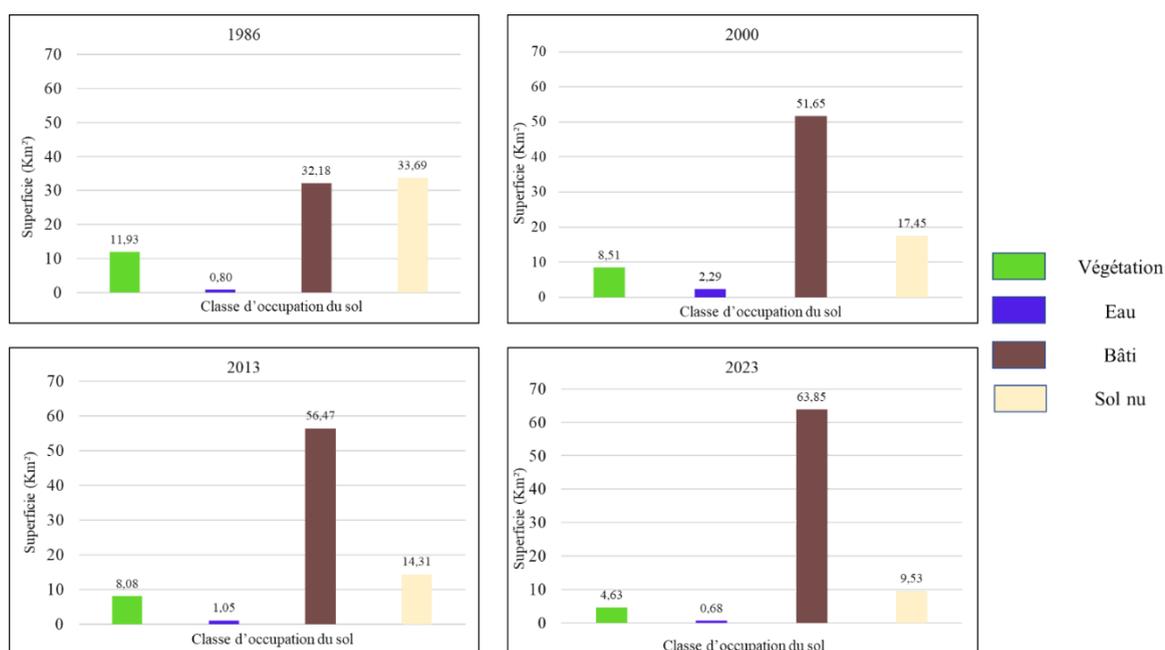


Figure 6 : Histogramme des classes d'occupation du sol de 1986 à 2023

III.2) Evaluation de la précision de la classification

Le principe de base pour toute évaluation de l'exactitude est de comparer les estimations avec la réalité, et de quantifier la différence entre les deux. Dans le contexte des classifications de l'occupation du sol basées sur la télédétection, les « estimations » sont les classes cartographiées pour chaque pixel, et la « réalité » est l'occupation réelle du sol dans les zones correspondant à chaque pixel.

La précision de la classification a été évaluée via la plateforme *Google Earth Engin*. Pour valider les cartes classifiées, les points collectés ont été de 565 pour l'année 1986, 490 pour l'année 2000, 464 pour l'année 2013 et 364 pour l'année 2023. La précision globale indique dans quelle mesure les résultats de classification répondent exactement à nos attentes. Les précisions globales des images classées étaient respectivement de 87,9% ; 77,7% ; 86,4% et 91,9% pour les années 1986, 2000, 2013, 2023 avec des coefficients Kappa de 0,8 ; 0,656 ; 0,806 et 0,807. Il faut noter que le coefficient Kappa est une mesure de l'amélioration proportionnelle (ou en pourcentage) du classificateur par rapport à une affectation purement aléatoire aux classes (Pal & Ziaul, 2017) (Tableau 4).

Tableau 4 : Matrices de confusion, coefficients de Kappa et précisions globales des différentes classes d'OS

Année		Végétation	Eau	Bâti	Sol nu	Totale	Précision globale	Coefficient Kappa
1986	Végétation	44	0	3	8	55	0,879 (87,9%)	0,8
	Eau	0	12	0	0	12		
	Bâti	3	0	30	7	40		
	Sol nu	7	0	3	118	128		
	Totale	54	12	36	133	235		
2000	Végétation	32	0	6	1	39	0,777 (77,7%)	0,656
	Eau	0	14	1	0	15		
	Bâti	6	0	37	13	56		
	Sol nu	1	1	22	95	119		
	Totale	39	15	66	109	229		
2013	Végétation	42	0	1	2	45	0,864 (86,4%)	0,806
	Eau	1	26	0	0	27		
	Bâti	3	0	57	16	76		
	Sol nu	2	0	8	86	96		
	Totale	48	26	66	104	244		
2023	Végétation	32	0	1	0	33	0,919 (91,9%)	0,887
	Eau	1	13	0	0	14		
	Bâti	1	0	38	2	41		
	Sol nu	0	0	6	43	49		
	Totale	34	13	45	45	137		

III.3) Cartographie de la température de la surface terrestre (LST) de la ville de Dakar

La carte ci-dessous (figure 8) indique l'évolution de la température de 1986 à 2023. Sur toutes les cartes, le ton rougeâtre vif met en évidence les températures plus élevées et le ton bleuté les LST faibles. Un changement de température a été observé sur les quatre années, en 1986 la température de moyenne de la surface terrestre été de 32,23°C qui est un peu similaire avec celle de 2000 qui tourne autour de 32,20°C ; et les température moyenne de la surface terrestre de 2013 et 2023 sont respectivement de 36,98°C et 37,69°C.

Le changement temporel de la température de surface terrestre a changé avec le changement rapide de l'utilisation des terres/de la couverture terrestre. A partir de 2000, on voit que la température maximale est concentrée autour des zones industrielles et des zones d'habitation.

Le climat local est influencé par l'évolution du modèle OS. Le taux d'augmentation de la surface imperméable entraîne un changement du LST. En 1986 la superficie couverte par les bâtis était de 32,18 Km² et cette valeur a presque doublé en 2023 et passe de 63,853 Km² rendant ainsi les surfaces de la ville de Dakar imperméable entraînant la variation progressive de la température de la surface terrestre. La figure 9 montre la variation de la température au cours des années. On voit que les températures minimales et maximales augmentent au fil des années. La température moyenne suit

aussi cette logique. On note aussi une diminution de l'écart entre les températures extrêmes qui pourrait être attribué au changement de l'utilisation et de l'occupation au cours des années.

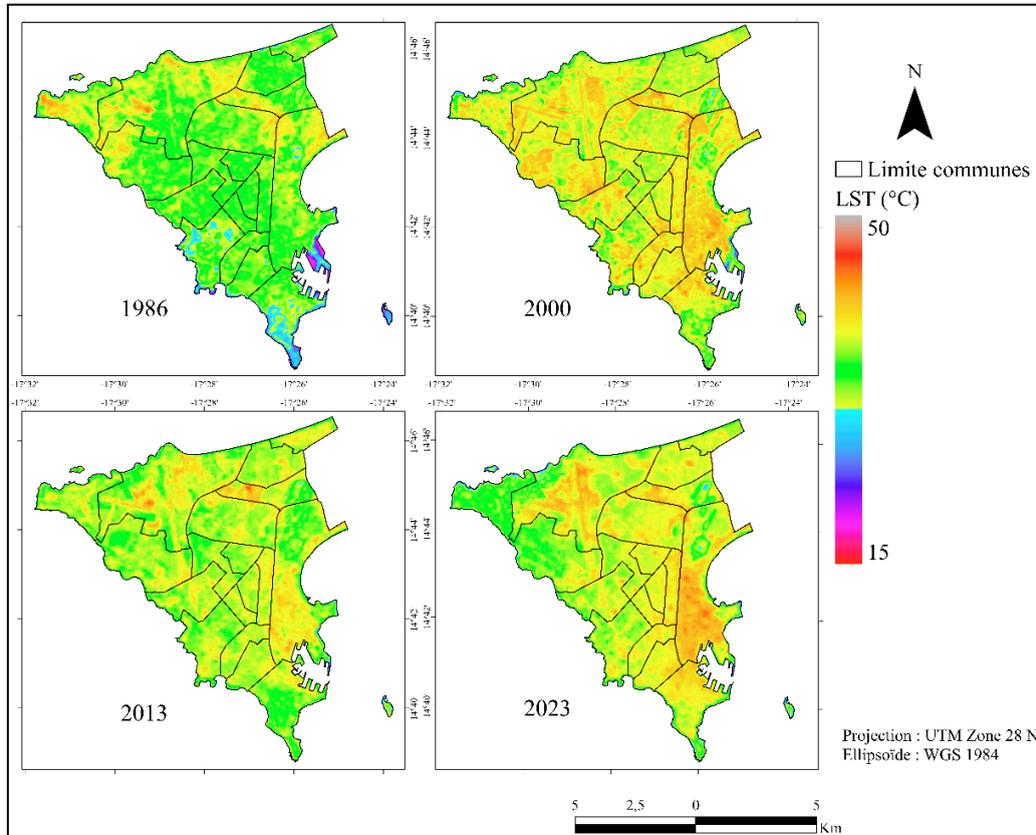


Figure 7 : Carte de la distribution de LST de 1986 à 2023

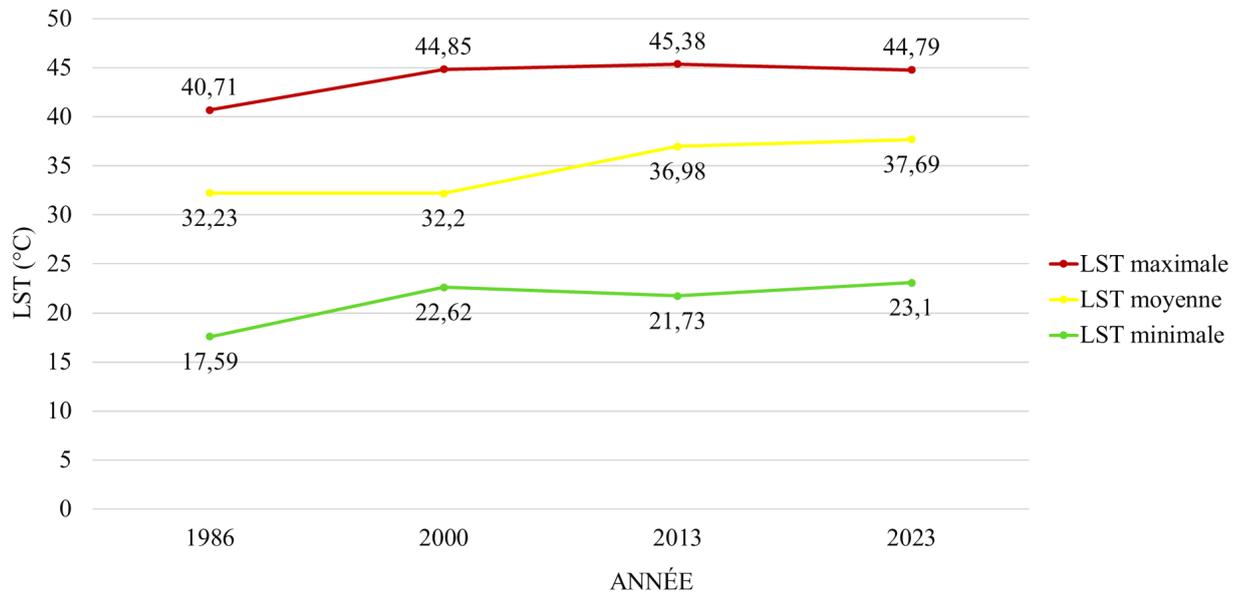


Figure 8 : Variation des valeurs moyennes, maximales et minimale de la LST en fonction des années

III.4) L'analyse de l'îlot de chaleur urbain (UHI)

L'analyse de la figure nous permet de voir la variation d'îlot de chaleur entre les différentes années. On observe une tendance générale de l'UHI au fil des années (figure 10). Les zones les plus rouges caractérisent les températures les plus élevées dans les zones urbanisées par rapport aux zones environnantes. Les UHI se concentrent dans les espaces centraux de la ville et dans le domaine industriel de la ville (commune n°10 Hann Bel Air). Ce sont les espaces les plus urbanisés dans la ville et qui couvrent presque la totalité des activités industrielles et des infrastructures routières. La figure nous montre la variation de l'UHI pour différentes catégories de surface au cours des années.

La figure 11 présente l'évolution de l'îlot de chaleur urbain au fil des années. On voit que les espaces naturels comme la végétation et l'eau présentent les valeurs les plus faibles de l'UHI caractérisant ainsi leur rôle de tampon en limitant l'évolution de la température. Tandis qu'au niveau des zones bâties, on observe une augmentation progressive de la température. Et c'est le même cas pour les sols nus (figure 11).

Les zones bâties concentrent de plus en plus de chaleur. Cette tendance s'explique par l'urbanisation rapide, l'imperméabilité des sols, la diminution des zones de l'espace végétale et les zones humides.

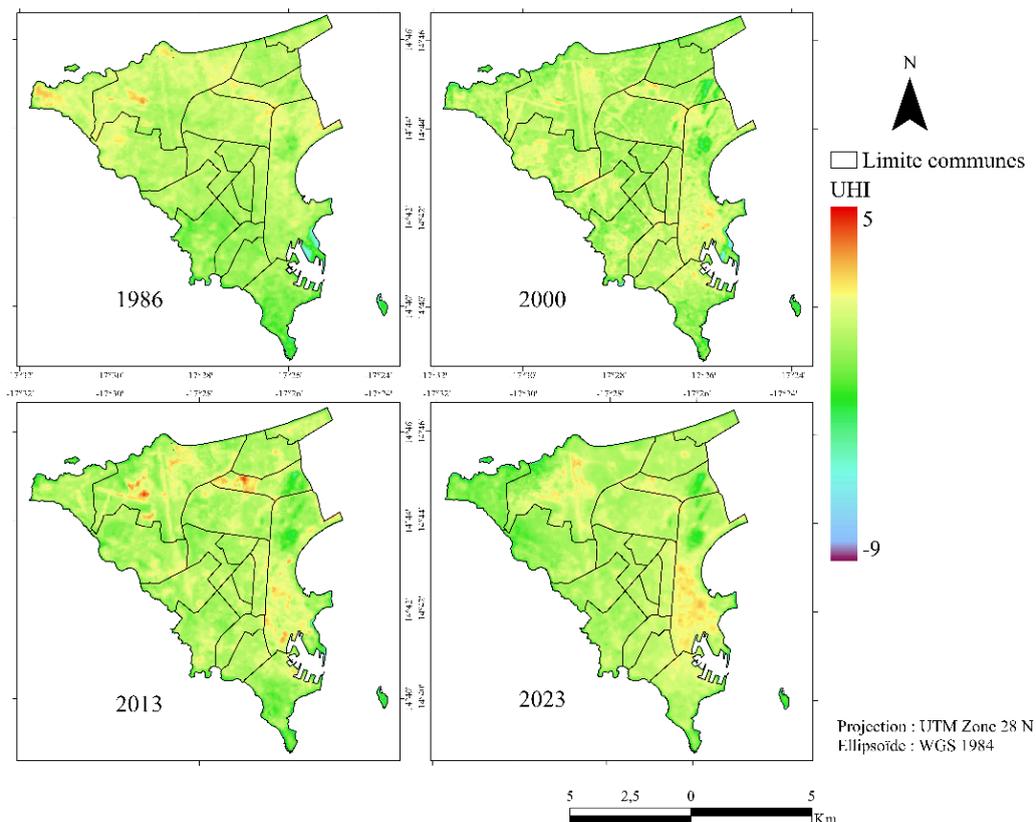


Figure 9 : Carte de la distribution d'UHI au fil des années

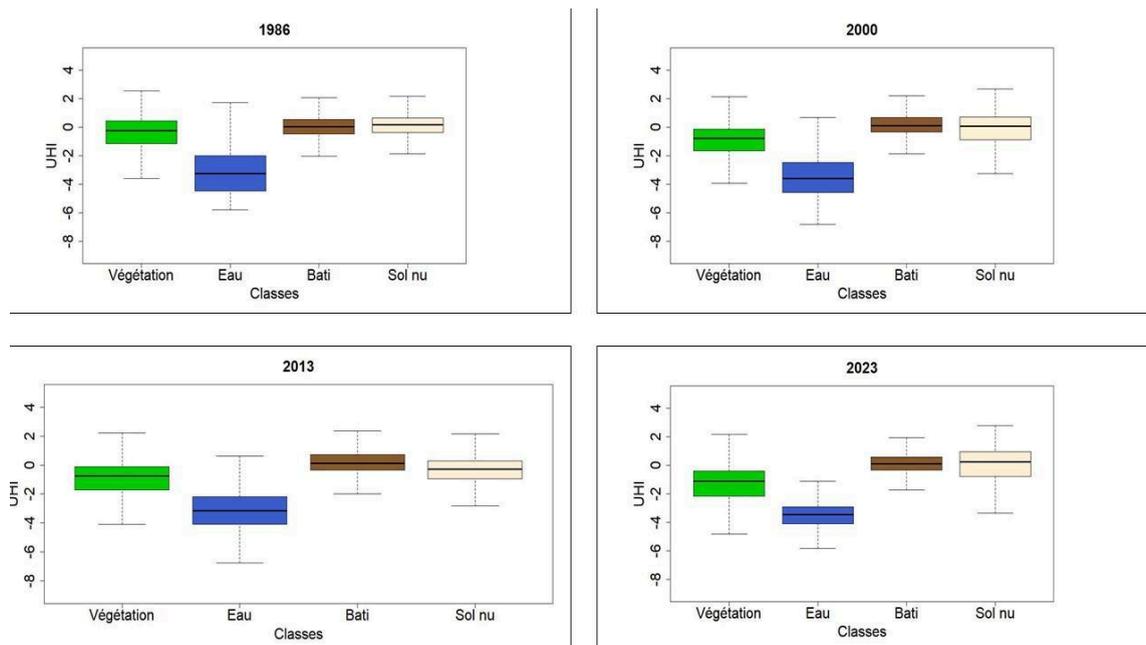


Figure 10 : Variation des valeurs de UHI entre les différentes classes d'occupation du sol

III.5) L'indice de variation du champ thermique urbain (UTFVI)

La valeur UTFVI a également été mesurée pour élucider l'influence des îlots de chaleur urbains (UHI) sur l'environnement urbain à Dakar. C'est un qui a été utilisé dans cette étude pour fournir une analyse quantitative de l'influence de l'UHI sur la dégradation écologique. En termes d'indice d'évaluation écologique (Tableau 5). La figure montre l'analyse menée sur l'UTFVI au fil des années.

Selon la valeur de l'UTFVI, nous avons constaté que de mauvaises conditions écologiques étaient présentes sur le côté Nord-Est de la carte en 1986, presque sur toute l'étendu en 2000 et une grande partie sur le Sud-Est en 2013 et 2023 (fig.11). Le changement d'emplacement de l'UHI au fil des années peut être dû aux changements de OS. Selon l'échelle de la valeur de l'UTFVI (Tableau 5), un UHI fort a été trouvé sur le côté ouest de la zone d'étude en 2013 et 2023 qui correspond à la zone industrielle de la ville de Dakar (fig.11).

Tableau 5 : Schéma de l'échelle de l'indice de variance du champ thermique urbain (UTFVI). (Source (Bubun, Siba, L'Archiviste, Rana, & Mukul, 2024))

Valeur UTFVI	Phénomène UHI	Indice d'évaluation écologique
<0,000	Aucun	Excellent
0,000–0,005	Faible	Bien
0,005–0,010	Milieu	Normale
0,010–0,015	Fort	Mauvais

0,015–0,020	Plus fort	Pire
>0,020	Le plus fort	Pire

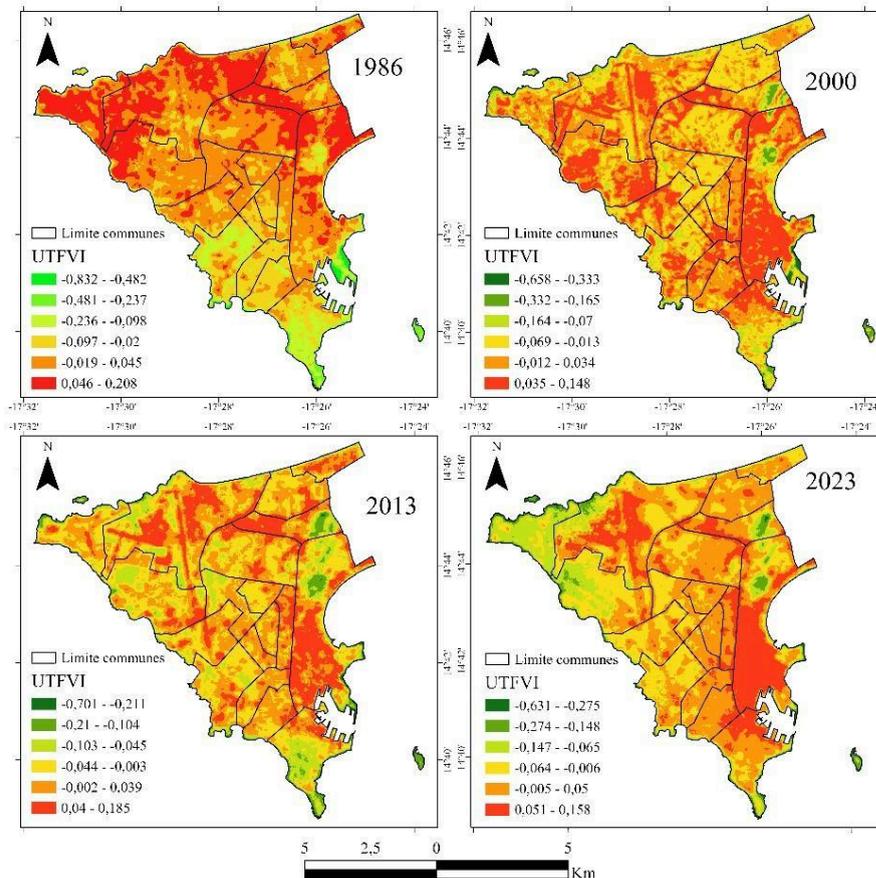


Figure 11: Carte de distribution spatiale de l'UTFVI au cours des années

III.6) Résultats d'analyse statistique

Comme énuméré dans la section de la méthodologie, une analyse statistique a été effectuée pour voir les différentes relations entre la LST et les classes d'occupation et d'utilisation du sol (OS) et entre la LST et les indices spectrales.

III.6.1) Variation de la LST dans les différentes classes d'occupation du sol

La figure 13 montre la variation de la LST dans les différentes classes sous forme d'un boxplot. Elle nous permet de voir l'évolution de la température de la surface terrestre pour différentes classes de sol.

On voit que les classes végétation et sol nu présentent toujours les températures moyennes les plus faibles au cours des années. Contrairement aux classes Bâti et sol nu qui semble varier ensemble de façon progressive et présente toujours les températures maximales. La végétation et l'eau maintiennent la température à faible valeur en jouant un rôle de régulation.

La figure 13 montre une légère variation de la température entre les classes végétation, bâtis, et sol cela laisse à dire le rôle de régulateur que joue la végétation sur la température semble être atténué par l'urbanisation importante et l'effet d'îlot de chaleur urbain.

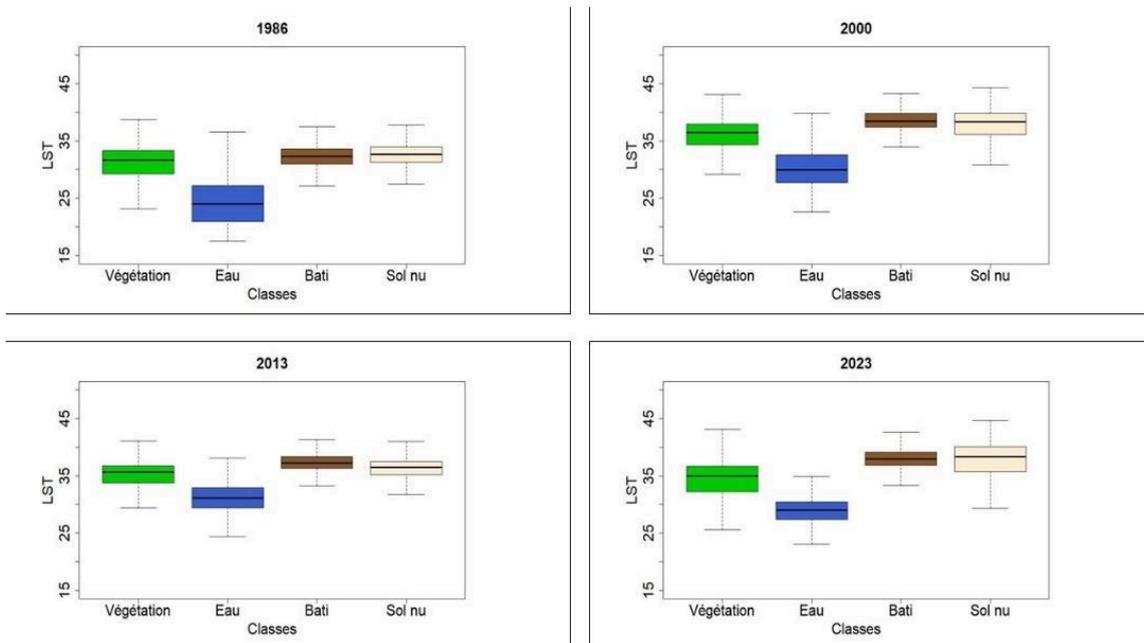


Figure 12 : Variation des valeurs de LST entre les différentes classes d'occupation du sol

III.6.2) Variation de la LST dans les terres végétalisées

Pour analyser la variation de la LST dans les zones végétalisées, des cartes NDVI de 1986 à 2023 ont été réalisées (figure 14). La figure représente la répartition spatiale de la NDVI. On voit que la NDVI n'a pas une grande influence sur la zone.

Une faible variation est constatée entre 1986 et 2000 et une petite augmentation en 2013 avant de connaître une diminution en 2023.

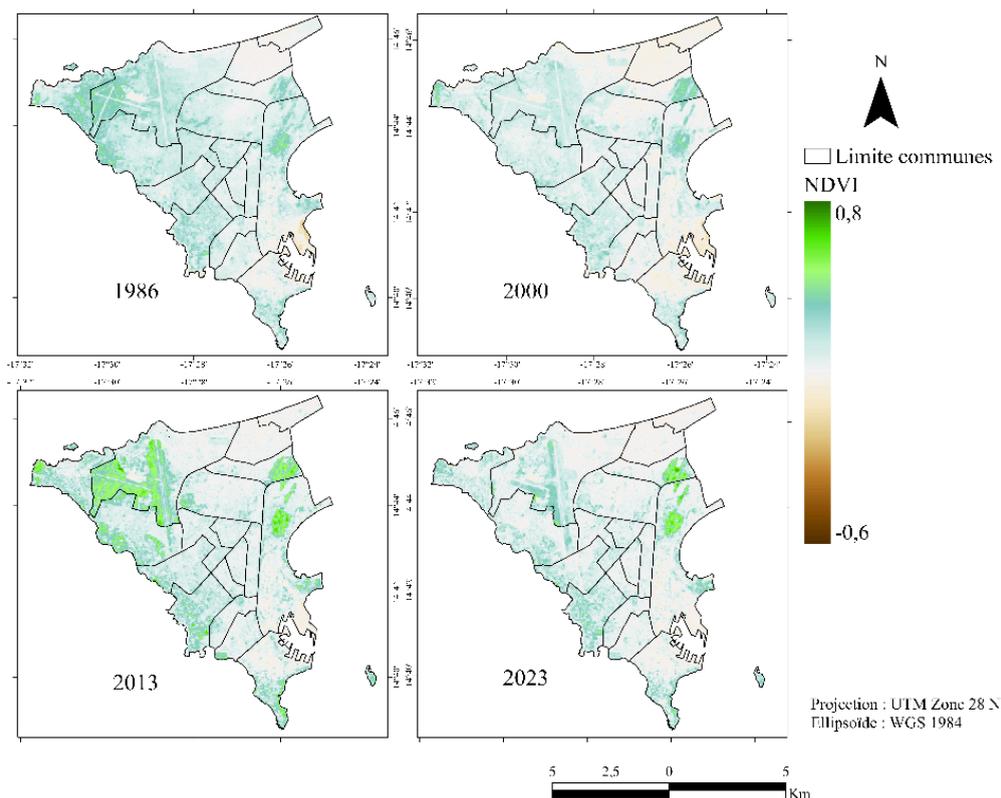


Figure 13 : Cartes des NDVI pour les années 1986, 2000, 2013 et 2023

Comme documenté dans la littérature, les zones où la LST est élevée s'avèrent être les zones avec une faible végétation. Une relation négative entre la LST et la NDVI doit être observée après une analyse de corrélation et de régression ce qui n'est pas le cas sur la figure. Ce qui peut être due à la faible quantité de végétation dans la zone d'étude qui influence peu sur la température, ou l'effet de la végétation sur l'atmosphère est négligeable compte tenu de l'environnement de la ville de Dakar (figure 15).

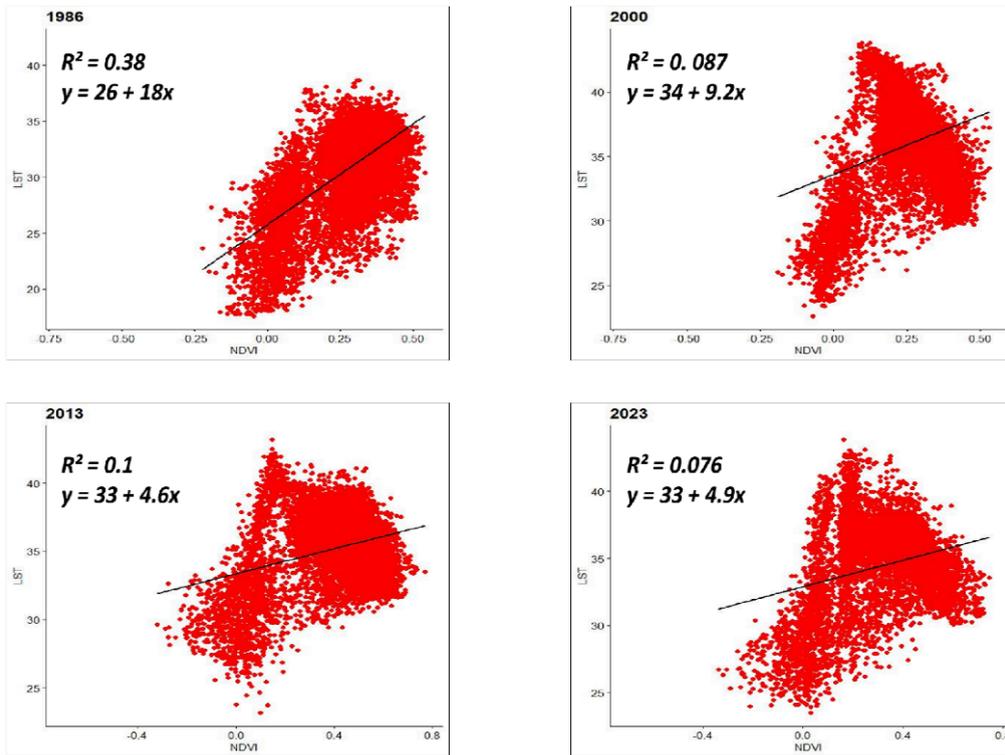


Figure 14 : Corrélation entre les LST et les NDVI des années 1986, 2000, 2013 et 2023

III.6.3) Variation de la LST dans les terres humides

Pour analyser les changements dans l'indice hydrique, des cartes NDWI de 1986 à 2023 ont été préparées (figure 16). Sur la figure on avait constaté que la superficie couverte par l'eau était trop faible au fil des années, et sur la figure on voit une valeur de NDWI assez faible sur les quatre années.

Comme pour la NDVI, les zones les plus humides doivent présenter une faible température et vice versa. Donc une relation négative existe entre la LST et la NDWI comme l'illustre la figure 17. Les valeurs de R^2 sont respectivement de 0,47, 0,47, 0,27 et 0,17 pour les années 1984, 2000, 2013 et 2023.

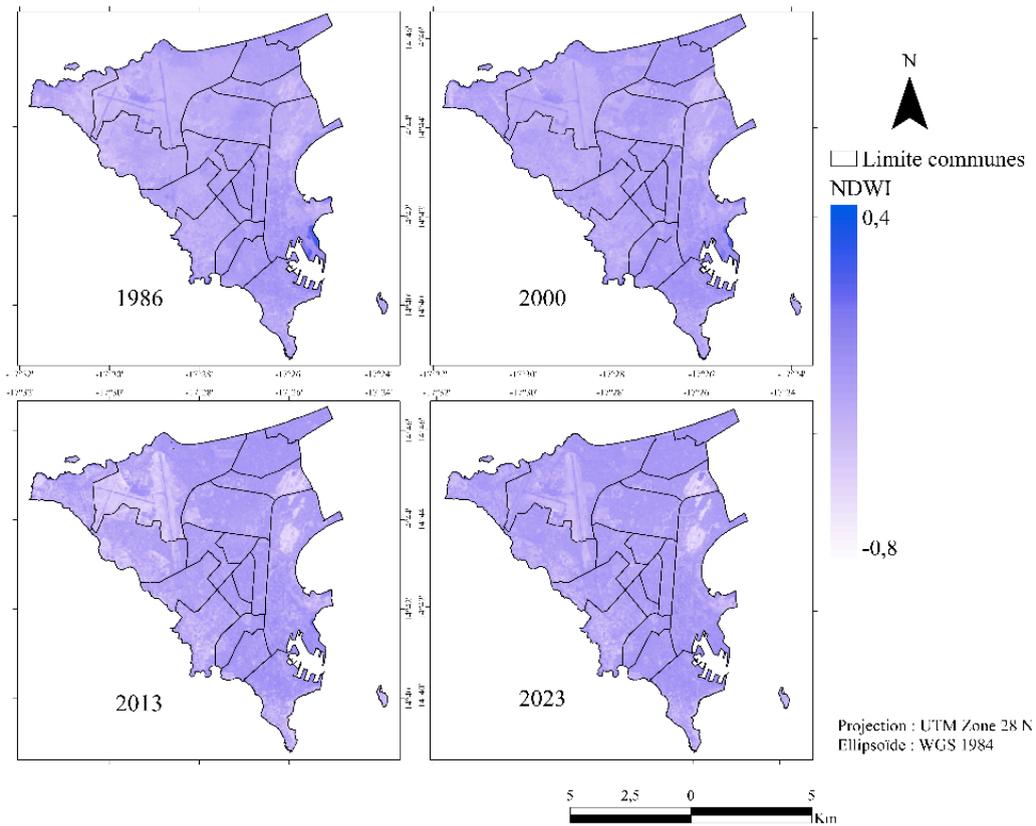


Figure 15 : Cartes des NDWI pour les années 1986, 2000, 2013 et 2023

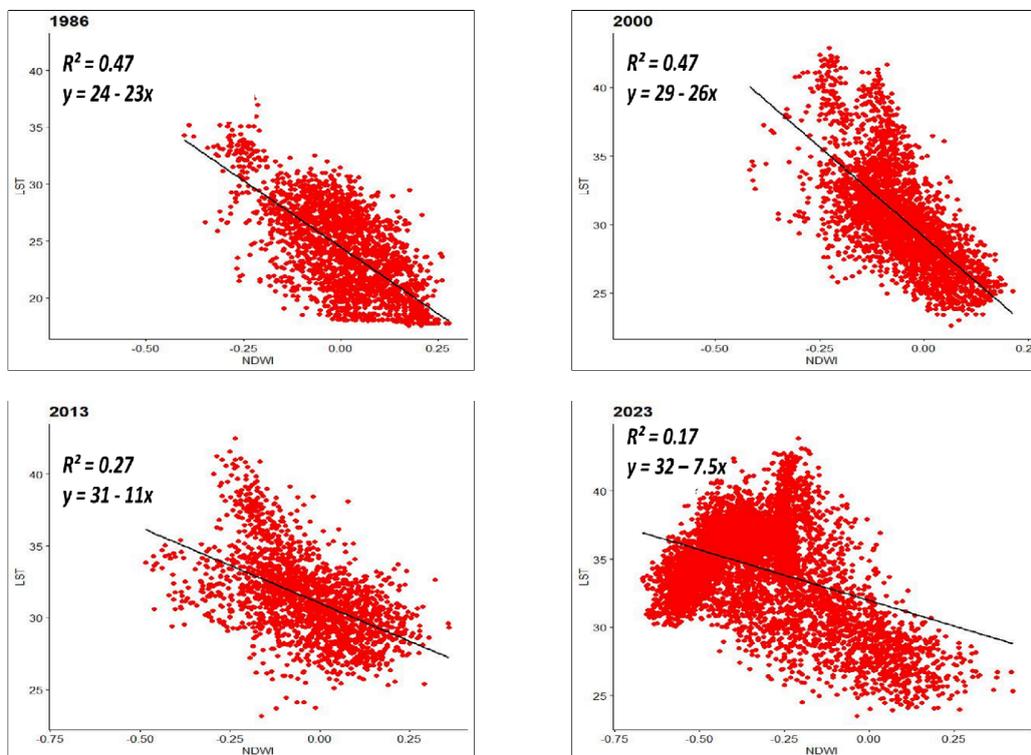


Figure 16 : Corrélation entre les LST et les NDWI des années 1986, 2000, 2013 et 2023

III.6.4) Variation de la LST dans les zones bâties

Pour examiner les changements dans les zones bâties, des cartes NDBI de 1986 à 2023 ont été préparées. D'après l'analyse, la densité de bâti est beaucoup plus importante à partir de 2000. Comme le montre la figure 18 on voit qu'il y a une augmentation significative des zones bâties entre de 1986 et 2023. D'après l'analyse de la régression (fig.19) et de corrélation, nous pouvons dire qu'il existe une relation positive entre la LST et le NDBI même si ça parait faible d'après les coefficients de régression R^2 (0,0059 pour 1986, 0,1 pour 2000, 0,061 pour 2013 et 0,066 pour 2023).

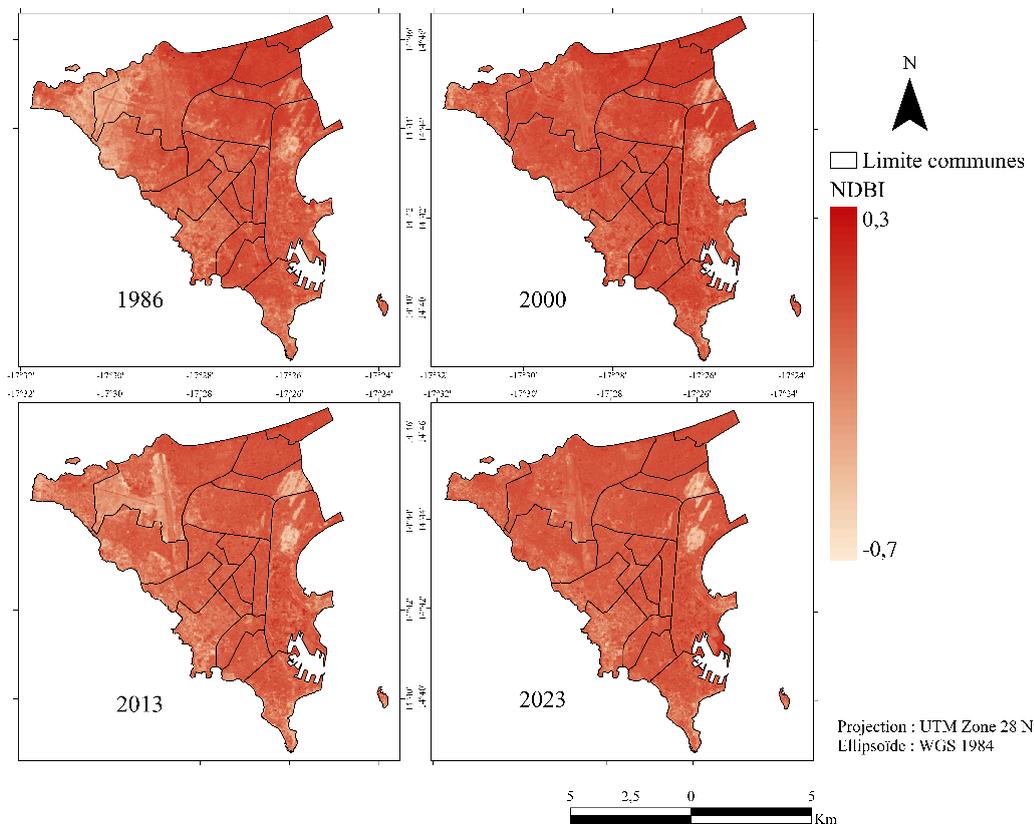


Figure 17 : Cartes des NDBI pour les années 1986, 2000, 2013 et 2023

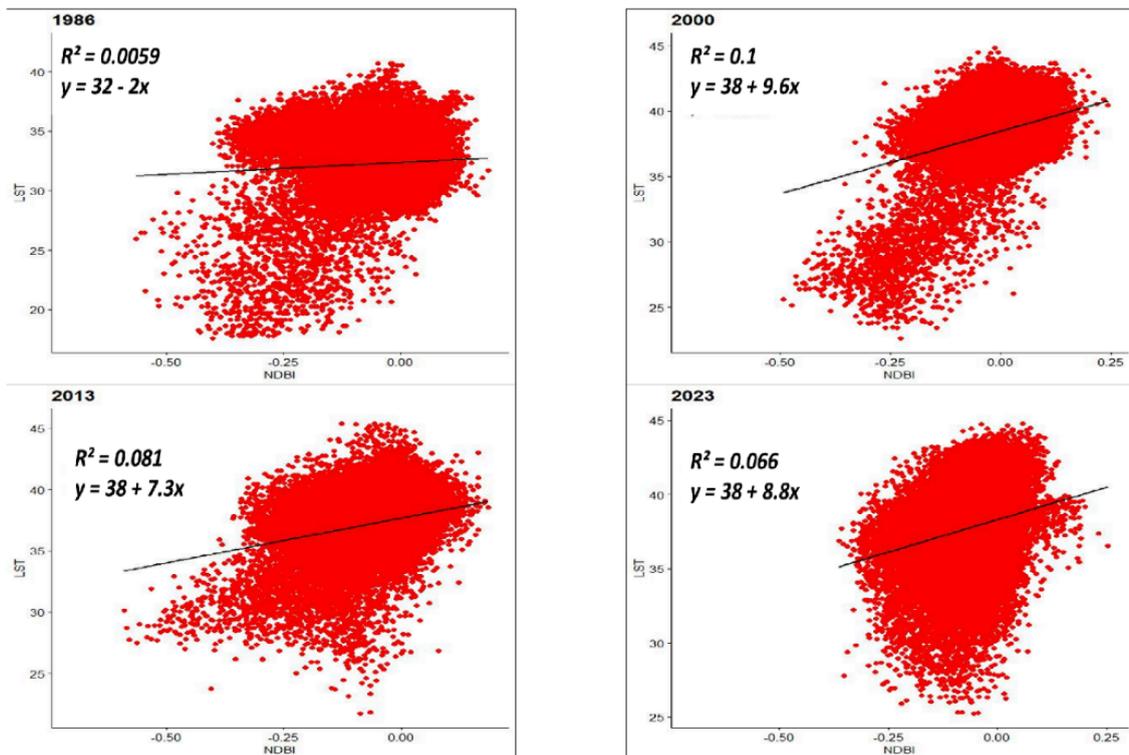


Figure 18 : Corrélation entre les LST et les NDBI des années 1986, 2000, 2013 et 2023

IV) Discussion

IV.1) Croissance rapide de l'urbanisation et changement thermique à Dakar

Le Sénégal connaît une urbanisation galopante qui génère une occupation des sols anarchique. La ville de Dakar est particulièrement concernée. L'augmentation a été très grande entre 1986 et 2023. A partir de 2000, la ville a connu un boom de la construction, tels que l'expansion du port autonome de Dakar, la construction de nouvelles infrastructures routière principalement dans la partie sud-est de la zone d'étude.

L'étude de l'expansion urbaine fournit des informations cruciales sur les fluctuations de température dans la ville. En 1986, une bonne partie de la zone, notamment dans le centre de la ville et le côté nord-est, n'était pas encore construite. Ce qui fait que la température n'était pas aussi élevée même avec une faible quantité d'eau et de couverture végétale qui jouaient un rôle de régulateur. A l'inverse des années 2000, 2013 et 2023 la température était trop élevée due à l'urbanisation très rapide.

Les résultats de cette étude ont montré que les températures moyennes des zones urbaines et les sols nus étaient quasiment similaires. Cependant cela peut être expliqué par le fait que l'humidité des sols nus est trop faible au niveau de la zone d'étude. Contrairement aux résultats obtenus par d'autres chercheurs, les résultats de cette étude ont révélé une corrélation positive entre la LST et le NDVI,

probablement due à la faible densité de végétation dans cette zone et à une résolution spatiale insuffisante pour distinguer les différents types de couvert végétal.

Ces résultats soulignent l'impact du développement urbain sur les conditions thermiques locales, soulignant ainsi la nécessité de pratiques de gestion urbaine intégrées et durables. Il est essentiel d'adopter des approches durables dans la planification urbaine pour minimiser les effets négatifs sur le climat de la ville. Cela implique de promouvoir une architecture respectueuse de l'environnement, de développer des espaces verts, de construire des lacs artificiels et de mettre en œuvre des politiques urbaines qui visent à équilibrer la croissance avec la conservation des ressources naturelles. La gestion urbaine durable est cruciale pour préserver la qualité de vie des habitants tout en maintenant le caractère unique de la ville de Dakar.

IV.2) Influence limitée de la végétation sur la LST

La relation positive entre le NDVI et la LST montre que la couverture végétale est trop faible dans la ville. Ce résultat suggère que la végétation, bien qu'elle soit présente, n'exerce qu'une influence limitée sur la température de surface. Cette faible influence pourrait être due à une densité végétale réduite, à un stress hydrique important ou à d'autres facteurs environnementaux qui limitent l'efficacité de la végétation en tant qu'écran thermique.

IV.3) Faire progresser la recherche sur la LST et le OS

Les approches conventionnelles visant à évaluer les effets des modifications de l'utilisation des sols sur la température de surface impliquent généralement la compilation manuelle de données provenant de diverses sources, notamment de stations météorologiques, d'évaluations sur le terrain et d'informations satellitaires. Ces méthodes peuvent être laborieuses et nécessiter un investissement substantiel en temps et en efforts. Des enquêtes de terrain devront être menées, établir des stations météorologiques et accumuler des données sur des périodes déterminées afin de déterminer l'impact des changements d'utilisation des sols sur la température de surface. Cependant, le développement de la plateforme GEE a eu une grande importance dans ce domaine, apportant des avantages notables dans l'exploration des modifications de l'utilisation des sols et de leurs effets sur la température de surface.

V) Conclusion

Cette étude a évalué l'impact des changements OS sur LST dans la ville de Dakar, de 1986 à 2023, en tirant parti de la puissance de GEE. En utilisant une approche de classification combinée avec les indices spectraux, nous avons obtenu des résultats atteignant ainsi l'objectif que nous avons fixé sur l'étude diachronique de l'occupation du sol de 1986 à 2023. L'analyse a porté sur quatre classes à savoir les zones végétalisées, zones bâties, les sols nus et les zones d'eau, ce qui montre une croissance urbaine importante et une diminution correspondante des surfaces végétales et humides.

Cette étude a également exploré la relation entre la température de la surface terrestre et les différentes classes d'occupation et d'utilisation du sol. Ce qui montre une variation de la température de la surface

terrestre des classes au fil des années (végétation : 31,67°C en 1986 ; 31,37°C en 2000 ; 31,88°C en 2013 et 30,87°C en 2023), (eau : 24,02°C en 1986 ; 24,91°C en 2000 ; 25,65°C en 2013 et 27,39°C en 2023), (bâti : 32,32°C en 1986 ; 32,52°C en 2000 ; 32,48°C en 2013 et 32,50°C en 2023), (sol nu : 33,64°C en 1986 ; 32,58°C en 2000 ; 32,38°C en 2013 et 32,92°C en 2023).

Les résultats de l'analyse de corrélation entre le LST et les indices spatiaux comme le NDVI, le NDWI et le NDBI n'ont pas montré une relation étroite, ce qui devrait prouver clairement comment l'urbanisation affecte l'environnement thermique et le plan d'eau, la couverture végétale et l'urbanisation au fil du temps. L'étude montre une relation faiblement positive entre le LST et le NDBI ($r^2 = 0,005$ en 1986 ; 0,10 en 2000 ; 0,081 en 2013 et 0,066 en 2023), une relation positive entre LST et NDVI ($r^2 = 0,38$ en 1986 ; 0,087 en 2000 ; 0,1 en 2013 et 0,076 en 2023) et une relation négative entre la LST et le NDWI ($r^2 = 0,47$ en 1986 et en 2000 ; 0,27 en 2013 ; et 0,17 en 2023). De plus, par analyse statistique, nous avons également constaté que dans les zones bâties, l'effet d'îlot de chaleur est bien plus important que dans les autres zones.

Enfin, les techniques de télédétection et la nouvelle plateforme GEE ont radicalement changé la façon dont nous accédons aux données géographiques et les utilisons. La vaste bibliothèque de géodonnées, les algorithmes avancés et les capacités de *cloud computing* de GEE, y compris le modèle de classification, permettent une analyse des données plus facile, plus rapide et plus accessible, ce qui nous permet de faire une analyse diachronique de l'occupation du sol et de la température de surface de la terre dans la ville de Dakar au cours des 40 dernières années. Les résultats présentés ici pourraient servir de base théorique à la planification urbaine et à la prise de décision pour une meilleure gestion future des terres afin d'éviter une utilisation excessive. Pour promouvoir le confort thermique à Dakar, des exercices de plantation d'arbres sont quelques-unes des recommandations formulées.

VI) Bibliographie

- (s.d.). Récupéré sur Climats et voyages: <https://www.climatsetvoyages.com/climat/senegal/dakar>
- Anandababu, Purushothaman, & Babu, D. S. (s.d.). Estimation of Land Surface Temperature using LANDSAT 8 Data. *IJARIT*, 117-185.
- Bubun, M., Siba, S. S., L'Archiviste, S., Rana, L., & Mukul, M. (2024). Dynamique spatio-temporelle des changements d'utilisation et de couverture des terres (UTL) et son impact sur la température de la surface terrestre : une étude de cas dans la nouvelle ville de Kolkata, dans l'est de l'Inde. *ScienceDirect*, 2-20.
- Gajani, A. M. (2024). Schémas spatiaux des îlots de chaleur urbains et des espaces verts Effets de refroidissement dans le microclimat urbain de Karatchje. *Urban Climate*.
- google earth engine. (s.d.). Récupéré sur ee.Classifier.smileGradientTreeBoost: <https://developers.google.com/earth-engine/apidocs/ee-classifier-smilegradienttreeboost>
- Google Earth Engine. (s.d.). Récupéré sur Ee.Classifier.SmileGradientTreeBoost.: <https://developers.google.com/earth-engine/apidocs/ee-classifier-smilegradienttreeboost>
- Jianga, J., & Tiana, G. (2023). Analyse de l'impact des changements dans l'utilisation et la couverture des sols sur la température de la surface terrestre à l'aide de la télédétection. *International Society for Environmental Information Sciences*, 571-575.
- M. E. Awuh, P. O. Japhets, M. C. Officha, A. O. Okolie, & I. C. Enete. (2019). Analyse de corrélation de la relation entre l'utilisation du sol et la couverture du sol/la température de surface du sol dans la municipalité d'Abuja, FCT, Nigeria. *Journal of Geographic Information System*, 44-55.
- Mirza, W., & Sajjad, M. (2022). Exploitation de l'informatique en nuage et des approches de modélisation spatiale pour les disparités de température à la surface du sol en réponse au changement de couverture terrestre : Données du Pakistan. *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, 2-19.
- Mwangi, P. W., Faith, N. K., & Peter, K. K. (2018). Analyse de la relation entre la température de la surface terrestre et les indices de végétation et de construction à Upper-Hill, Nairobi. *Journal of Geoscience and Environment Protection*, 1-16.
- Mwangi, P. W., Karanja, F. N., & Kamau, P. K. (2018). Analyse de la relation entre la température de la surface du sol et les indices de végétation et de bâti à Upper-Hill, Nairobi. *Journal of Geoscience and Environment Protection*, 1-16.
- Niladri, D., Prolay, M., Subhasish, S., & Ranajit, G. (2021). Évaluation de la variation de l'utilisation/couverture du sol et de son impact sur la température de la surface terrestre de la subdivision d'Asansol. *The Egyptian Journal of Remote Sensing and Space Sciences*, 2-18.
- Pal, S., & Ziaul, S. (2017). Détection des changements d'utilisation et de couverture du sol et de la température de la surface du sol dans le centre urbain d'English Bazar. *ScienceDirect*, 125-145.
- Ullah, S., Fan, B., & Liu, D. (2019). Modélisation de l'évaluation de l'impact et des risques de l'urbanisation sur l'îlot de chaleur urbain et le niveau de confort thermique de la ville de Pékin, Chine (2005-2020). *Sustainability*, 2-18.