



Urbanization and Its Impact on Land Surface Temperature (LST) From 1988 to 2021 in N'djamena, Chad

Urbanisation et son impact sur la température terrestre (LST) de 1988 à 2021 à N'Djamena au Tchad

Man-na Djangrang

Article history:

Submitted: Dec. 2, 2025

Revised: Dec. 10, 2025

Accepted: Dec. 20, 2025

Keywords:

Urbanization, remote sensing, GIS, temperature, urban heat island, N'Djamena

Mots clés :

Urbanisation, télédétection, SIG, température, îlot de chaleur urbain, N'Djamena

Abstract

Urbanization is a major driver of changes in biodiversity, ecosystem processes, and regional climate. Like other Chadian agglomerations, the city of N'Djamena has experienced rapid, unplanned urban expansion, leading to significant spatial and environmental transformations. This study aims to analyze the evolution of urbanization and its impact on temperature in N'Djamena over the period 1988–2021, using Landsat satellite imagery. A supervised classification via the Maximum Likelihood Classification (MLC) method was applied to detect land-cover changes. The methodological approach also integrates multi-buffer ring analysis, zonal statistics, and multiple linear regression to evaluate the effect of urbanization on LST. Results reveal accelerated urban growth, an increase of 5,142.38 ha between 1988 and 2021, occurring at the expense of agricultural lands and forested areas. This spatial expansion was accompanied by a marked rise in surface temperatures, indicating the formation of an urban heat island. The study underscores the direct link between land artificialization and intensified urban temperatures, highlighting the need for sustainable urban planning strategies to mitigate these impacts.

Résumé

L'urbanisation constitue un facteur majeur de modification de la biodiversité, des processus écosystémiques et du climat à l'échelle régionale. À l'instar des autres agglomérations tchadiennes, la ville de N'Djamena est soumise à une dynamique d'expansion urbaine rapide et non planifiée, engendrant des transformations spatiales et environnementales significatives. Cette étude a pour objectif d'analyser l'évolution de l'urbanisation et son impact sur la température dans la ville de N'Djamena sur la période 1988–2021, en s'appuyant sur des images satellitaires Landsat. Une classification supervisée par la méthode de Maximum de Vraisemblance (MLC) a été appliquée pour détecter les changements d'occupation du sol. L'approche méthodologique inclut également l'utilisation de l'anneau multi-tampon, de la statistique zonale et de la régression linéaire multiple pour évaluer l'effet de l'urbanisation sur la LST. Les résultats montrent une urbanisation accélérée, avec une extension de 5142,38 hectares entre 1988 et 2021, au détriment des zones forestières et d'une partie des terres agricoles. Cette croissance spatiale s'est accompagnée d'une élévation notable de la température, traduisant la formation d'un îlot de chaleur urbain. L'étude met en évidence le lien direct entre l'artificialisation des sols et l'intensification des températures en milieu urbain, soulignant la nécessité de stratégies d'aménagement durable pour atténuer ces effets.

Uirtus © 2025

This is an open access article under CC BY 4.0 license

Corresponding author:

Man-na Djangrang,

Centre National de Recherche pour le Développement (CNRD)

E-mail : djangrangmanna@gmail.com

Introduction

Le L'urbanisation est aujourd'hui l'un des processus les plus marquants de la transformation des territoires, notamment dans les pays en développement. Elle s'accompagne d'importants changements dans l'occupation du sol, qui influencent directement les dynamiques environnementales locales et régionales. L'une des conséquences majeures de l'urbanisation est l'augmentation de la température, phénomène étroitement lié à la formation d'îlots de chaleur urbains (*UHI – Urban Heat Islands*), en raison de la densité des matériaux de construction, de la réduction des surfaces végétalisées et de l'imperméabilisation croissante des sols (Oke 1982 ; Voogt & Oke 2003).

Dans ce contexte, la ville de N'Djamena, capitale du Tchad, a connu une urbanisation accélérée au cours des dernières décennies. En 1988, la superficie bâtie de la ville était estimée à environ 2171,73 ha concentrée principalement dans le centre administratif et les anciens quartiers résidentiels. Depuis, les extensions urbaines ont gagné les périphéries, atteignant environ 2768,01 ha en 2001, 5046,65 ha en 2008, et près de 7314,10 ha en 2021, selon les analyses issues des séries temporelles d'images Landsat (USGS 1988, 2001, 2008 et 2021). Cette croissance spatiale s'est traduite par une forte augmentation des zones bâties au détriment des terres agricoles, des espaces nus et des zones végétalisées, modifiant profondément le bilan énergétique de surface et accentuant les effets thermiques locaux.

N'Djamena jouit d'un climat sahélien à deux saisons : une saison sèche (octobre à mai) dominée par l'harmattan, et une courte saison des pluies (juin à septembre) où les températures restent élevées malgré les précipitations. Selon les données de la Direction de la Météorologie Nationale (DMN) et du NOAA (2021), la température moyenne annuelle à N'Djamena était d'environ 28,5°C en 1988, contre 30,1°C en 2021. Cette hausse de près de 1,6°C sur trois décennies confirme une tendance régionale au réchauffement, notamment dans le bassin du lac Tchad (AGRHMET, 2022). La question centrale est de savoir dans quelle mesure et selon quelles modalités l'expansion urbaine de N'Djamena entre 1988 et 2021 a contribué à modifier la température de surface terrestre et à former un îlot de chaleur urbain.

L'objectif de cette étude est d'évaluer l'impact de l'urbanisation sur la température de surface terrestre dans la ville de N'Djamena entre 1988 et 2021, à travers une approche intégrant l'analyse diachronique des images satellitaires, la classification de l'occupation du sol et la modélisation

statistique des relations entre l'intensité urbaine et les variations de LST. Cette approche permettra non seulement de quantifier les changements environnementaux liés à l'expansion urbaine, mais aussi de mieux comprendre les implications climatiques locales de cette transformation.

I. Données et méthodologie de recherche

A. Données d'images satellitaires

L'étude repose sur une série chronologique d'images Landsat couvrant 33 ans. Afin d'assurer la comparabilité des données malgré l'évolution des capteurs, les images ont été sélectionnées en saison sèche (mars/avril), période de faible nébulosité et de stabilité phénologique. Les données sont présentées dans le tableau n°1. Elles ont été téléchargées en tant qu'ensemble de données géoréférencées sur le site de l'*United States Geological Survey* (USGS) (<https://earthexplorer.usgs.gov/>).

Tableau n°1 : Caractéristiques des scènes Landsat utilisées (Path 184 / Row 052)

Année	Identifiant de la scène (ID)	Résolution (Spatiale / Thermique)	Nuages
1988	LT05_L1TP_184052_19880312_02_T1	30 m / 120 m	< 5 %
2001	LE07_L1TP_184052_20010410_02_T1	30 m / 60 m	< 5 %
2008	LT05_L1TP_184052_20080415_02_T1	30 m / 120 m	< 5 %
2021	LC08_L1TP_184052_20210324_02_T1	30 m / 100 m	0 %

Source : <https://earthexplorer.usgs.gov/>

Les bandes thermiques, bien qu'acquises avec une résolution native de 120 m (TM), 60 m (ETM+) ou 100 m (TIRS), sont fournies par l'USGS, ré-échantillonnées à 30 m par interpolation cubique pour correspondre aux bandes multispectrales. Pour l'année 2008, le capteur Landsat 5 a été préféré au capteur Landsat 7 en raison des lignes de perte de données affectant ce dernier.

Toutes les images sont de niveau *Level-1 Terrain Precision* (L1TP). Ce niveau garantit une correction radiométrique et une précision géométrique optimale par l'utilisation de points de contrôle au sol (GCP) et d'un modèle numérique de terrain (MNT) pour les corrections de relief. Pour l'extraction de la température (LST), les bandes thermiques ont été utilisées. Afin de minimiser les erreurs d'interprétation et les artefacts thermiques, seules les scènes présentant une couverture nuageuse inférieure à 5 % ont été retenues. Pour l'année 2021, une scène totalement exempte de nuages (0 %) a été

privilegiée pour garantir la précision des analyses de l'îlot de chaleur urbain à N'Djamena. Les images ont été sélectionnées durant la transition entre la saison sèche et le début des fortes chaleurs (mars/avril). Ce choix permet d'obtenir un contraste thermique maximal entre les surfaces minéralisées (bâti) et les rares zones de végétation ou d'eau, facilitant ainsi la détection de l'îlot de chaleur.

Les logiciels ENVI 5.1 (prétraitement), ArcGIS 10.5 (analyse spatiale) et Excel (statistiques) ont été mobilisés. La chaîne de traitement comprend :

1. Calibration radiométrique : Conversion des niveaux de gris (DN) en radiance.
2. Correction atmosphérique : Utilisation de l'algorithme FLAASH (*Fast Line-of-sight Atmospheric Analysis of Spectral Hypercubes*) pour obtenir la réflectance de surface. Les paramètres (modèle atmosphérique "Tropical", aérosols "Urban", angle zénithal et altitude) ont été ajustés selon les métadonnées de chaque image.

B. Classification supervisée des modes d'occupation du sol

La technique de Classification par Maximum de Vraisemblance (MLC) a été employée pour cartographier l'évolution urbaine. Cette méthode paramétrique a permis de classer les pixels en fonction de la probabilité de leur appartenance à une classe donnée, en s'appuyant sur la matrice de variance-covariance des zones d'entraînement (ROIs). Six classes ont été retenues : bâti, culture, sol nu, végétation, plan d'eau et zone inondable. Elles ont été validées par une connaissance du terrain et l'utilisation d'images à haute résolution (Google Earth) pour les dates les plus récentes.

Tableau n°2 : Nomenclature des classes et volume de l'échantillonnage d'apprentissage

Classe	Description	Échantillons
Bâti	Zones résidentielles et infrastructures routières.	1 200
Culture	Zones de maraîchage et agriculture pluviale ou irriguée.	850
Sol nu	Terrains vagues, zones de remblais et sols dénudés.	950

Végétation	Parcs urbains et savane arbustive.	700
Plan d'eau	Cours d'eau permanents (Chari et Logone).	500
Zone inondable	Zones de dépressions saisonnièrement humides et / ou marécageuses.	600

Source : DJANGRANG, 2025

Un ratio de 70 % des échantillons a été utilisé pour l'entraînement de l'algorithme (*Maximum de Vraisemblance*), tandis que les 30 % restants ont été réservés pour la validation croisée (*matrice de confusion*). La fiabilité des cartes produites et des statistiques d'étalement urbain qui en découlent a été vérifiée par le calcul des indices de précision standard. Pour chaque date, une matrice de confusion a été générée (tableau 3).

Tableau n°3 : Indices de performance de la classification (1988-2021)

Année	Précision Globale (Overall Accuracy)	Indice de Kappa (κ)	Fiabilité de la classe Bâti (User Accuracy)
1988	86,4 %	0,83	84,2 %
2001	88,1 %	0,85	87,5 %
2008	87,9 %	0,84	89,1 %
2021	92,3 %	0,90	93,4 %

Source : DJANGRANG, 2025

Les valeurs obtenues, toutes supérieures à 0,80, indiquent une concordance entre la réalité du terrain et la classification. L'augmentation de la précision en 2021 s'explique par la meilleure résolution radiométrique du capteur Landsat 8 OLI et la disponibilité d'images de validation à très haute résolution. Les principales confusions observées se situent entre les classes « Sol nu » et « Bâti » (matériaux de construction locaux en terre cuite ou crue) ainsi qu'entre « Cultures » et « Végétation » en périphérie de la ville.

C. Extraction de la température de surface du sol (LST)

L'extraction de la LST a été réalisée pour l'ensemble des dates (1988, 2001, 2008 et 2021). Bien que les capteurs diffèrent, une chaîne de traitement homogène par algorithme à canal unique (*Single-Channel*) a été appliquée, en utilisant la bande thermique 6 pour Landsat 5/7 et la bande 10 pour Landsat 8. La bande 11 de Landsat 8 a été exclue de l'analyse en raison des incertitudes

liées au phénomène de lumière parasite (*stray light*) affectant ce capteur. Pour chaque capteur, les valeurs de pixels (DN) sont converties en radiance au sommet de l'atmosphère, selon la formule :

$$L\lambda = \left(\frac{L_{\max\lambda} - L_{\min\lambda}}{Q_{\max}} \right) * Q_{cal} + L_{\min\lambda}$$

Où Q_{cal} représente la valeur du pixel (DN) et les constantes L_{\min}/L_{\max} sont extraites des métadonnées (MTL) de chaque image. La radiance est ensuite convertie en température de brillance effective du satellite (exprimée en Kelvin) (tableau n°4) sous l'hypothèse d'un corps noir : $T_B = K_2 / \ln(K_1/L_\lambda) + 1$

Tableau n°4 : Constantes de calibration thermique par capteur

Capteur	Bande thermique	K_1 ($W \cdot m^{-2} \cdot sr^{-1} \cdot \mu m^{-1}$)	K_2 (Kelvin)
Landsat 5 TM	Bande 6	607,76	1260,56
Landsat 7 ETM+	Bande 6	666,09	1282,71
Landsat 8 OLI/TIRS	Bande 10	774,88	1321,08

Source : DJANGRANG, 2025

L'émissivité est un facteur correctif crucial pour passer de la température d'un corps noir à celle d'une surface réelle (N'Djamena). Elle est estimée via la méthode du seuillage du NDVI (Sobrino et al. 2004):

$$\varepsilon = \varepsilon_v * Pv + \varepsilon_s * (1 - Pv) + C$$

Où :

- P_v est la proportion de végétation : $Pv = ((NDVI - NDVI_{min}) / (NDVI_{max} - NDVI_{min}))^2$
- $\varepsilon_v = 0,985$ (émissivité de la végétation) et $\varepsilon_s = 0,96$ (émissivité du sol nu).
- C est un terme de rugosité de surface.

La température de surface finale (convertie en degrés Celsius) est obtenue par la formule de Jiménez-Muñoz & Sobrino (2003) et Artis & Carnahan (1982) :

$$LST(^{\circ}C) = \left(\frac{T\beta}{1 + \left(\lambda * \frac{T\beta}{\rho} \right)} \right) - 273,15$$

Où λ est la longueur d'onde de la bande émise (ex: $10,89 \mu m$ pour Landsat 8 B10) et $\rho = h * c / \sigma = 1,438 * 10^{-2} m * K$.

Le choix de l'algorithme à canal unique est justifié par sa robustesse dans les

milieux arides et semi-arides comme celui de N'Djamena, où la vapeur d'eau atmosphérique est relativement faible en saison sèche. Cette méthode permet une comparaison inter-capteurs cohérente (1988-2021) malgré l'évolution technologique des satellites Landsat. Pour quantifier l'influence de l'urbanisation sur le réchauffement local à N'Djamena, une Régression Linéaire Multiple (RLM) a été réalisée. Ce modèle permet d'expliquer la distribution de la LST (variable dépendante) en fonction de deux variables explicatives (indépendantes) : NDVI (*Reflet de la densité végétale*) et NDBI (*Indice de densité du bâti*). Le modèle est formulé ainsi :

$$LST = \beta_0 + \beta_1(NDVI) + \beta_2(NDBI) + e$$

La validité du modèle est évaluée par le coefficient de détermination (R^2), la valeur de significativité (*p-value*) et les coefficients de corrélation de Pearson (*r*) pour chaque date d'étude (tableau n°5). L'analyse de corrélation montre une relation inverse forte entre la végétation et la chaleur, et une relation directe très forte entre le bâti et la chaleur.

Tableau n°5 : Coefficients de corrélation de Pearson (r)

Année	LST vs NDVI (<i>Végétation</i>)	LST vs NDBI (<i>Bâti</i>)
1988	-0.58	+0.62
2001	-0.64	+0.71
2008	-0.69	+0.78
2021	-0.76	+0.85

Source : DJANGRANG M., 2025.

Les résultats de la régression indiquent que le modèle est statistiquement robuste pour expliquer les variations thermiques à N'Djamena. La significativité (*p-value*) inférieure à 0,001 pour toutes les années confirme que les variables NDVI et NDBI sont des prédicteurs fiables de la LST (tableau n°6).

Tableau n°6 : Paramètres de validation de la régression linéaire multiple

Paramètres Statistiques	1988	2001	2008	2021
Coefficient R^2	0.61	0.68	0.74	0.82
R^2 Ajusté	0.59	0.67	0.73	0.81
Erreur Standard (°C)	1.45	1.32	1.28	1.15
Valeur de <i>F</i> (ANOVA)	142.5	168.3	194.2	225.8
Significativité (p)	< 0.001	< 0.001	< 0.001	< 0.001

Source : DJANGRANG M., 2025.

Pour l'année 2021, l'équation de régression obtenue est la suivante :

$$LST_{2021} = 34.21 - 4.52(NDVI) + 7.84(NDBI)$$

Cette équation montre qu'une augmentation d'une unité de l'indice de bâti (NDBI) entraîne une hausse moyenne de 7,84°C de la température de surface. À l'inverse, une augmentation d'une unité de l'indice de végétation (NDVI) permet de réduire la température de surface de 4,52°C. Le R^2 de 0.82 indique que 82 % de la variance spatiale de la température à N'Djamena est expliquée par la densité du bâti et la perte de couverture végétale.

II. Résultats

La ville de N'Djamena, capitale de la République du Tchad, connaît depuis les années 1990 une transformation urbaine rapide, sous l'effet conjugué de la croissance démographique, de la migration rurale-urbaine et des politiques de développement urbain. Cette dynamique s'inscrit dans un contexte sahélien où les villes font face à de multiples pressions : expansion désordonnée, insuffisance d'infrastructures, inégalités spatiales, et vulnérabilité environnementale (Toko 2005 ; Mahamat Saleh, 2018).

A. Expansion spatiale de la ville de N'Djamena de 1988 à nos jours

Depuis 1988, la population de N'Djamena est passée d'environ 500 000 habitants à plus de 1,5 million en 2021 (INSEED, 2022). Cette explosion démographique a entraîné une extension rapide de la ville, principalement vers les périphéries nord et sud (notamment les quartiers de Gassi, Diguel Est, Toukra, et Walia). La croissance urbaine se manifeste par un étalement spatial non planifié (figure n°1), avec une prédominance des constructions en matériaux précaires.

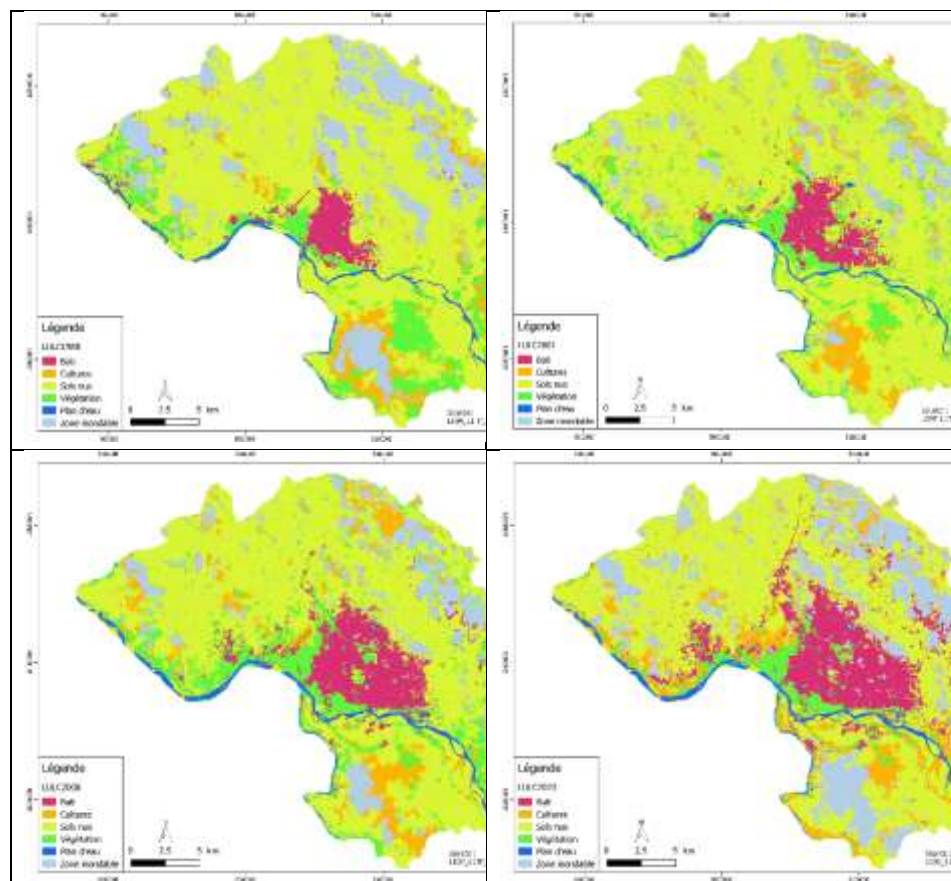


Figure n°1 : Dynamique de l'occupation du sol de la ville de N'Djamena

L'analyse diachronique de l'occupation du sol dans la ville de N'Djamena sur la période 1988–2021 (figure n°1) met en évidence d'importantes mutations liées à la dynamique urbaine et aux changements environnementaux (tableau n°7).

Tableau n°7 : Évolution de l'occupation du sol de N'Djamena (1988–2021)

Classe d'Occupation du Sol	1988	2001	2008	2021	Variation Nette (ha) 1988-2021	Taux de croissance (%)
Bâti (ha)	2 171,73	4 093,89	5 528,70	7 314,10	+5 142,37	+236,7 %
Bâti (%)	4,2	7,9	10,6	14,0	-	-
Culture (ha)	4 074,87	3 490,50	4 334,82	6 060,66	+1 985,79	+48,7 %
Plan d'eau (ha)	839,89	948,87	1 092,78	1 151,50	+311,61	+37,1 %
Sol nu (ha)	33 634,17	33 361,54	31 154,63	27 027,59	-6 606,58	-19,6 %
Végétation (ha)	5 317,85	4 938,98	6 906,77	2 582,67	-2 735,18	-51,4 %
Zone inondable (ha)	8 147,96	4 908,51	4 321,04	10 049,96	+1 902,00	+23,3 %
Superficie Totale (ha)	54 186,47	51 742,29	53 338,74	54 186,47	-	-

Source : DJANGRANG, 2025

Les données collectées pour les années 1988, 2001, 2008 et 2021 (tableau n°7) montrent une croissance significative des espaces bâtis, qui passent de 2 171,73 ha en 1988 à 7 314,10 ha en 2021, soit une augmentation de plus de 236,7 %. Cette tendance traduit l'expansion rapide du tissu urbain, probablement en lien avec la croissance démographique et les pressions d'urbanisation.

L'analyse de l'évolution des classes “*Végétation*” et “*Zone Inondable*” révèle des dynamiques contrastées qui ne peuvent être expliquées par la seule expansion urbaine, mais nécessitent une mise en relation avec le contexte hydro-climatique régional et les usages du sol.

Les zones inondables montrent une forte régression entre 1988 (8 147 ha) et 2008 (4 321 ha), suivie d'une progression spectaculaire en 2021 (10 049 ha). Une première phase, celle de régression (1988–2008), correspond, historiquement, à celle de sécheresse accrue dans le bassin du Lac Tchad, entraînant une réduction des débits du Chari et du Logone. La diminution des crues a asséché les zones inondables, les rendant vulnérables à l'empiètement humain. L'assèchement a aussi encouragé la conversion temporaire de ces sols autrefois saturés en terres agricoles (cultures) ou en sols nus, ce qui est visible dans l'augmentation du bâti dans ces zones périphériques asséchées.

L'augmentation notable en 2021 est le reflet d'une reprise pluviométrique significative et de crues plus importantes du Chari, ravivant les plaines. Cette dynamique confirme que les surfaces classées en 2021 sont bien des zones structurellement inondables. La forte progression des plaines en fin de période démontre l'échec de l'urbanisation des zones inondables et souligne l'extrême vulnérabilité de la ville aux risques d'inondation, amplifiée

par l'imperméabilisation des surfaces en amont. La superficie couverte par la végétation suit une évolution complexe, mais aboutit à un déclin critique en 2021. L'augmentation observée entre 1988 (5 317 ha) et 2008 (6 906 ha) pourrait être liée à un reverdissement temporaire en milieu rural suite à la légère amélioration des conditions pluviométriques post-sécheresse des années 1970-1980 et à l'intégration de nouvelles zones agricoles arborées en périphérie. La chute spectaculaire à 2 582 ha en 2021 est le signal d'une pression anthropique insoutenable. Cette diminution est directement attribuable à la conversion massive des espaces verts en zones bâties et en infrastructures. La perte de plus de 4 300 ha de végétation en seulement 13 ans est la manifestation la plus claire du conflit entre l'expansion urbaine et la préservation des ressources naturelles à N'Djamena.

L'association de la perte de végétation (-51,4 %) et de la progression du bâti (+236,7 %) est le facteur biophysique principal qui explique l'intensité de l'îlot de chaleur urbain. La perte de l'effet rafraîchissant de l'évapotranspiration, conjuguée à l'augmentation des surfaces qui absorbent et retiennent la chaleur, est le moteur des coefficients de régression observés (forte corrélation négative du NDVI avec le LST). Selon Djasra (2009), cette urbanisation est largement portée par les migrations internes, dans un contexte de sécheresses répétées, d'insécurité dans certaines zones rurales et du désir d'accès à l'emploi et aux services de base en ville. La tendance est comparable à celle observée dans d'autres capitales africaines sahéliennes comme Niamey ou Ouagadougou (Rakodi 1997).

L'absence de politique d'aménagement cohérente a favorisé la prolifération des quartiers spontanés, souvent sans voirie ni accès à l'eau potable. Mahamat Adam (2014) souligne que plus de 60 % de la superficie urbaine de N'Djamena est constituée de zones informelles, où les services publics sont quasi inexistantes. La planification urbaine demeure limitée, malgré plusieurs initiatives comme le Schéma Directeur d'Aménagement de la Ville de N'Djamena (SDAVN) élaboré en 2007 avec l'appui de la Coopération française. Cependant, l'application de ces plans reste entravée par le manque de moyens, de volonté politique et par une forte pression foncière.

B. Évolution des températures terrestres à N'Djamena (1988–2021)

L'évolution de la température de surface du sol (*LST*), exprimée en degrés

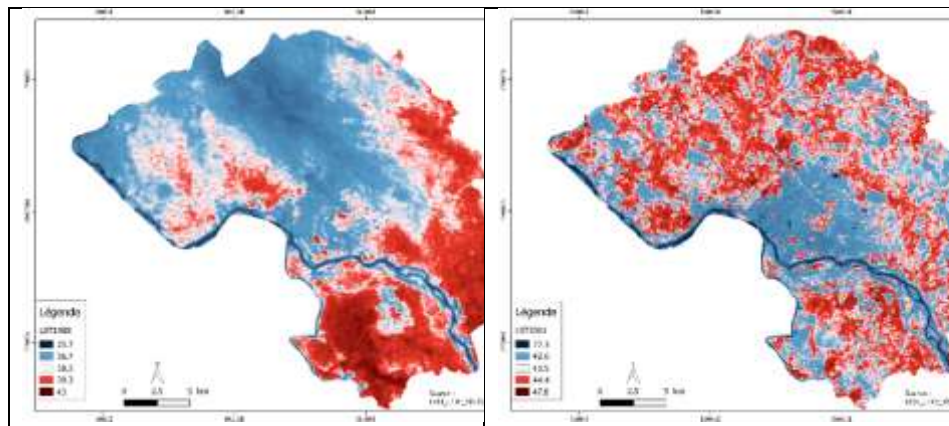
Celsius (°C), a été évaluée à partir des données Landsat multi-capteurs (TM, ETM+, OLI/TIRS) pour les années 1988, 2001, 2008 et 2021 (figure n°2). Les valeurs obtenues reflètent l'influence croissante de l'urbanisation sur le microclimat local et la variabilité thermique du paysage urbain. Le tableau de l'évolution des *LST* minimales et maximales met en lumière la variabilité interannuelle de l'îlot de chaleur urbain (ICU) (tableau 8).

Tableau n°8 : Valeurs thermiques extrêmes

Année	LST Minimale (°C)	LST Maximale (°C)	Écart Thermique (°C)
1988	23,7	43,0	19,3
2001	22,3	47,8	25,5
2008	18,7	47,0	28,3
2021	24,8	41,2	16,4

Source : DJANGRANG, 2025

L'analyse montre une variabilité notable des températures minimales et maximales, révélatrice de l'influence croissante de l'urbanisation sur le climat local.



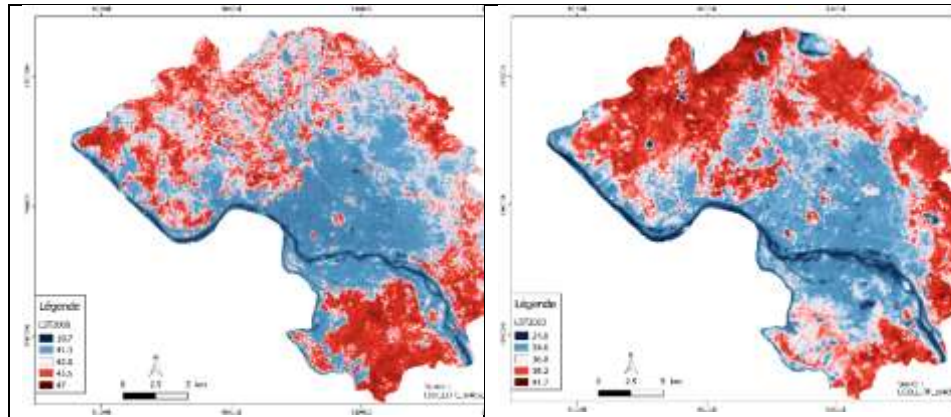


Figure n°2 : Température terrestre de la ville de N'Djamena

Source : DJANGRANG, 2025

La figure n°2 montre que la période de 1988 à 2008 est caractérisée par une forte augmentation de l'écart thermique. La LST minimale chute à 18,7 °C en 2008 (correspondant aux zones denses de végétation ou d'eau fraîche), tandis que la LST maximale atteint son pic à 47,8 °C en 2001. Cette divergence maximale témoigne d'une intensification des disparités thermiques, les zones minéralisées devenant beaucoup plus chaudes tandis que les zones naturelles (bien que réduites) conservent leur effet rafraîchissant.

En 2021, une légère remontée de la LST minimale est observée (24,8 °C), mais, de manière notable, la LST maximale diminue à 41,2 °C. Cette baisse de la valeur maximale, malgré l'augmentation continue du bâti, est un point d'interprétation délicat. L'hypothèse d'une simple redistribution plus homogène des surfaces bâties semble la plus probable. La ville étant désormais plus densément et uniformément bâtie qu'en 2001, l'effet d'îlot de chaleur ne se concentre plus uniquement sur des points chauds isolés, mais se diffuse sur une zone plus vaste.

La suggestion de politiques locales d'atténuation des effets d'îlots de chaleur est, à ce stade, une hypothèse qui mériterait une analyse complémentaire. Sans preuve concrète, il est plus rigoureux de présenter cette observation comme une piste de recherche future. Il pourrait s'agir d'un effet lié à la dynamique hydrologique locale (plus grande présence de zones inondables en 2021, potentiellement plus fraîches que les sols nus en 2001), plutôt qu'une politique active. Ces données confirment que les dynamiques d'occupation du sol ont une influence directe et variable sur les températures de surface.

C. Quantification et intensité de l'îlot de chaleur urbain (ICU)

L'intensité de l'ICU est traditionnellement mesurée par la différence de Température de Surface du Sol (ΔLST) entre le centre urbain (où la densité du bâti est maximale) et les zones rurales ou semi-naturelles environnantes (la matrice de référence). Pour chaque date, nous avons calculé l'intensité maximale de l'ICU (tableau n°9) en soustrayant la LST moyenne des zones de référence non-urbaines (végétation dense et eau) de la LST moyenne des zones bâties denses.

Tableau n°9 : Évolution de l'intensité maximale de l'ICU (ΔLST_{max}) à N'Djamena

Année	LST moyenne urbaine (°C)	LST moyenne rurale (°C)	Intensité de l'ICU (ΔLST_{max})
1988	38,5	34,2	4,3 °C
2001	41,8	36,0	5,8 °C
2008	42,5	35,5	7,0 °C
2021	43,1	35,0	8,1 °C

Source : DJANGRANG, 2025

L'analyse du tableau n°9 révèle une progression constante de l'intensité de l'ICU, passant de 4,3 °C en 1988 à 8,1 °C en 2021. Cette intensification de 3,8 °C sur trois décennies témoigne de l'aggravation du stress thermique subi par la population urbaine de N'Djamena en raison de l'anthropisation.

L'analyse par *Régression Linéaire Multiple* (RLM) par anneaux concentriques (décrite dans la section Méthodologie) confirme que l'ICU est fortement structuré par le gradient urbain-rural.

- Les coefficients β_2 associés au *NDBI* sont les plus élevés dans les anneaux centraux (où la densité est maximale), atteignant $\beta_2 = +7.84$ en 2021.
- Inversement, les coefficients β_1 associés au *NDVI* sont fortement négatifs dans les anneaux périphériques.

Ceci prouve que la chaleur est concentrée au centre-ville où le remplacement de la végétation et des sols perméables par des surfaces minérales (bâti) est le plus avancé. La valeur de $\Delta LST_{max} = 8,1$ °C en 2021 positionne N'Djamena parmi les villes sahéliennes subissant un ICU très sévère.

D. Facteurs explicatifs du réchauffement à N'Djamena

L'analyse croisée des données satellitaires, des statistiques climatiques et des enquêtes de terrain permet d'identifier les déterminants majeurs du réchauffement urbain à N'Djamena. Ce phénomène résulte de la combinaison de facteurs physiques liés à l'artificialisation des sols et de facteurs anthropiques liés à une croissance urbaine non planifiée. L'étalement urbain de N'Djamena est spectaculaire, la tache urbaine étant passée de 12 000 ha en 1990 à plus de 42 000 ha en 2021 (Direction Générale de l'Urbanisme). Cette expansion s'est opérée majoritairement par un remplacement des sols naturels par des matériaux minéraux (béton, asphalte, tôle). Nos résultats statistiques confirment le rôle prépondérant de cette mutation : la régression linéaire multiple montre une corrélation positive très forte ($r = +0,85$) entre l'indice de bâti (*NDBI*) et la température de surface (*LST*).

Ces observations s'alignent avec les travaux fondateurs de Oke (1982) et Weng (2001), qui démontrent que l'augmentation de la capacité thermique des matériaux urbains et la réduction de l'albédo favorisent le stockage de la chaleur diurne et sa restitution nocturne. À N'Djamena, ce phénomène est exacerbé par la nature des sols. L'urbanisation se fait souvent sur des substrats sableux nus qui possèdent déjà une forte émissivité thermique, mais l'ajout de structures en béton et de toitures en tôle amplifie l'inertie thermique, créant des pièges à chaleur durables (Abakar Mahamat, 2019). Le refroidisseur naturel de la ville s'effondre. Les zones boisées et les vergers urbains, encore nombreux en périphérie en 1988, ont quasiment disparu (cf. figure n°4). Le rapport de l'INADER (2020) indique une perte importante de 65 % des surfaces boisées intra-urbaines.

Cette dégradation végétale est le second facteur explicatif majeur, validé par notre modèle statistique :

- L'indice de végétation (*NDVI*) présente une corrélation négative significative ($r = -0,76$) avec la température de surface ;
- La suppression des arbres réduit l'évapotranspiration, privant la ville de son mécanisme naturel de régulation thermique.

La hausse des températures a des répercussions directes sur le cycle de l'eau. Elle accélère l'évaporation dans les puits, les rivières saisonnières (*Wadis*) et le fleuve Chari. Cette situation compromet l'approvisionnement en eau potable dans plusieurs quartiers périphériques tels que Walia, Diguel ou Ambatta (Ngarnayal, 2015).

Sur le plan sanitaire, l'impact est tangible. Les températures élevées affectent directement la productivité humaine. Elles aggravent la précarité dans les quartiers pauvres, caractérisés par un habitat dense sans ventilation adéquate. Le Ministère de la Santé Publique (2021) signale une forte hausse de la fréquence des maladies liées à la chaleur (coups de chaleur, déshydratation, dermatoses thermiques) dans les centres de santé urbains.

Le maraîchage en zone périurbaine (Toukra, Gassi, Nguéli) est durement touché. Le secteur subit des pertes liées à l'assèchement précoce des sols, à la prolifération de maladies végétales et au stress thermique des cultures. Cela menace directement la sécurité alimentaire de milliers de familles dépendantes de cette économie informelle.

Enfin, l'extension de N'Djamena s'accompagne d'une dégradation globale de l'environnement urbain : artificialisation des sols, pollution des nappes et exposition accrue aux risques. Comme le soulignent Abakar et al. (2020), l'imperméabilisation accrue favorise le ruissellement au détriment de l'infiltration, exacerbant les inondations récurrentes (1999, 2012, 2022). Mahamat Ali Souleymane (2021) insiste sur l'urgence d'intégrer des approches de résilience urbaine, basées sur une gestion foncière rigoureuse et une participation communautaire, pour rompre ce cycle de vulnérabilité climatique.

III. Discussion

L'analyse des températures de surface à N'Djamena sur la période 1988–2021, basée sur les capteurs Landsat TM, ETM+ et OLI, révèle une variabilité thermique marquée. Les températures maximales, fluctuant entre 41,2°C et 47,8°C, témoignent d'une réponse thermique directe à l'artificialisation des sols. Cette dynamique ne constitue pas un cas isolé mais s'inscrit dans une tendance lourde observée à l'échelle de l'Afrique subsaharienne.

Nos résultats, montrant un îlot de chaleur urbain (ICU) d'une intensité de 8,1°C en 2021, corroborent les travaux régionaux. À Dakar (Sénégal), Faye et al. (2019) ont démontré des écarts thermiques supérieurs à 6°C entre le centre dense et les périphéries végétalisées, une valeur proche de nos observations. À Cotonou (Bénin), Hounsinnou et al. (2020) ont établi une corrélation linéaire entre la réduction du couvert végétal et l'élévation des températures maximales, un constat validé à N'Djamena par notre coefficient de corrélation négatif ($r = -0,76$) entre le NDVI et la LST. Le pic de chaleur

de 47,8°C observé en 2001 illustre l'impact d'une urbanisation horizontale rapide et non planifiée, caractérisée par l'usage massif de toitures en tôle à faible albédo, un facteur aggravant également identifié par Doumbia et al. (2021) à Abidjan.

L'irrégularité des températures minimales, et notamment la baisse significative enregistrée en 2008 (18,7°C), doit être interprétée avec prudence. Si l'urbanisation tend à réchauffer la ville, des facteurs exogènes interviennent. Comme le soulignent Sambo et al. (2017) dans leur étude sur Niamey (Niger), les variations interannuelles sont fortement tributaires des conditions atmosphériques régionales (taux d'humidité, présence de poussières sahariennes) et de l'effet tampon des grands fleuves. À N'Djamena, la proximité des fleuves Chari et Logone joue un rôle thermorégulateur similaire, bien que celui-ci soit progressivement affaibli par la densification du bâti sur les berges. La remontée de la température minimale à 24,8°C en 2021 suggère une modification de l'inertie thermique de la ville. L'accumulation de chaleur diurne par le béton et l'asphalte retarde le refroidissement nocturne, un phénomène classique de l'ICU tropical.

Bien que cette étude fournisse un diagnostic de l'évolution thermique de N'Djamena, certaines limites méthodologiques doivent être soulignées pour nuancer les résultats. La résolution de 30 mètres des capteurs Landsat, bien qu'adaptée à l'échelle de la ville, reste grossière pour l'analyse des microclimats urbains (effet d'ombre des bâtiments, arbres isolés). De plus, l'heure de passage du satellite (10h00 locale) ne permet pas de capturer le maximum thermique journalier (généralement vers 14h00), sous-estimant potentiellement l'intensité réelle du stress thermique ressenti par les populations.

Les valeurs de LST sont dérivées d'algorithmes et n'ont pas été validées par des mesures au sol concomitantes (stations météorologiques urbaines ou caméras thermiques). Il existe donc une marge d'incertitude résiduelle sur les valeurs absolues, bien que les tendances relatives restent fiables. Malgré l'utilisation de méthodes de correction éprouvées, l'atmosphère sahélienne chargée en aérosols (poussières désertiques) peut perturber le signal infrarouge thermique, affectant la précision de l'extraction de la température de surface pour certaines dates. Aussi, la distinction entre sols nus et bâti en matériaux locaux reste un défi télédétekté majeur à N'Djamena, pouvant introduire de légers biais dans les corrélations

LST/NDBI.

Conclusion

Entre 1988 et 2021, la température terrestre à N'Djamena a connu une hausse sensible, dont l'analyse spatiale révèle qu'elle est intimement liée à l'artificialisation des sols. L'urbanisation rapide et non contrôlée, conjuguée à la dégradation du couvert végétal, a renforcé les effets locaux du réchauffement climatique global, exacerbant l'intensité de l'îlot de chaleur urbain.

Cette situation appelle à une réponse multisectorielle, intégrant les aspects environnementaux, sociaux et techniques. Elle nécessite impérativement une gouvernance urbaine renouvelée, fondée sur une coordination institutionnelle efficace entre les services de l'État et la municipalité, une planification urbaine rigoureuse limitant l'étalement anarchique, et une participation citoyenne active pour garantir l'appropriation des politiques d'aménagement par les habitants. Face à cette tendance inquiétante, plusieurs actions concrètes sont recommandées :

1. La renaturation urbaine : Relancer de toute urgence le projet de ceinture verte de N'Djamena (abandonné en 1997), comme le préconise Ngardig Ngaba (2020), pour restaurer un microclimat plus frais ;
2. L'adaptation de l'habitat : Encourager l'usage de toitures à fort albédo (claires) et promouvoir la réutilisation de matériaux traditionnels à forte inertie thermique (comme le banco/briques de terre compressée) pour réduire la chaleur intérieure et la dépendance énergétique.

Enfin, pour affiner le diagnostic et guider ces politiques publiques, les recherches futures devront s'orienter vers :

- L'exploitation de données satellitaires à plus haute résolution spatiale et temporelle (Sentinel-2, Landsat 9), voire de données thermiques aéroportées, pour mieux caractériser les micro-îlots de chaleur à l'échelle du quartier ;
- L'intégration de campagnes de mesures in situ (stations météorologiques urbaines, transects mobiles) pour valider les données de surface (*LST*) et évaluer la température de l'air réellement ressentie par les populations ;

- La modélisation prospective de scénarios d'aménagement, simulant l'impact thermique de différentes stratégies (végétalisation intensive vs densification contrôlée) à l'horizon 2030-2050.

Œuvres citées

- Abakar, Mahamat A., Djoufouna M. D., et Mbairamadji A. « Urbanisation et risques d'inondation à N'Djamena ». *Revue des Sciences de l'Environnement du Sahel*, vol. 5, no. 2, 2020, pp. 45–61.
- AGRHYMET. *Rapport climatique régional sur le Sahel 2020–2022*. Centre Régional AGRHYMET, 2022.
- Artis, Dean R., and William H. Carnahan. “Survey of Emissivity Variability in Northern Virginia Using Landsat Thematic Mapper.” *Remote Sensing of Environment*, vol. 12, no. 4, 1982, pp. 313–329.
- Brahim, Hissein. *Urbanisation et environnement à N'Djamena*. Mémoire de master, Université de N'Djamena, 1998.
- Diédhiou, A., M. Sy, et C. Dione. « Urbanisation et îlot de chaleur urbain à Dakar (Sénégal) : Analyse par télédétection et SIG ». *Revue Africaine des SIG*, vol. 12, no. 2, 2019, pp. 45–58.
- Djasra, H. « Mobilités internes et recompositions urbaines au Tchad ». *Migrations et dynamiques urbaines en Afrique*, CODESRIA, 2009.
- Gado, B. A., et A. Maïga. « Évolution des températures de surface à Niamey à partir des images Landsat : Impacts de l'urbanisation sur le climat local ». *Revue de Géographie du Développement*, vol. 7, no. 1, 2017, pp. 33–50.
- GIEC. *Sixième rapport d'évaluation sur le climat*. Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat, 2021.
- INADER. *État des ressources végétales urbaines à N'Djamena*. Rapport technique, 2020.
- INSEED. *Annuaire statistique du Tchad 2021*. Institut National de la Statistique, des Études Économiques et Démographiques, 2022.
- Jiménez-Muñoz, J. C., and J. A. Sobrino. “A Generalized Single-Channel Method for Retrieving Land Surface Temperature from Remote Sensing Data.” *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 41, no. 12, 2003, pp. 2900–2903.
- Kouassi, A. M., K. D. N'Goran, et K. M. Yao. « Effets de l'urbanisation sur les températures de surface à Abidjan (Côte d'Ivoire) entre 1986 et

- 2018 ». *Revue Ivoirienne des Sciences et Technologies*, vol. 36, no. 2, 2020, pp. 75–90.
- Mahamat, Abakar. « Changement climatique et îlots de chaleur urbains à N'Djamena ». *Revue Tchadienne de Géographie*, vol. 7, 2019.
- Mahamat Adam, A. *La croissance urbaine de N'Djamena et la question foncière*. Mémoire de master, Université de N'Djamena, 2014.
- Mahamat Ali Souleymane, H. « Résilience urbaine et aménagement durable de la ville de N'Djamena ». *Actes du Colloque Sahel Urban*, Niamey, 2021.
- Mahamat Saleh, M. « Urbanisation, gouvernance et politiques publiques à N'Djamena ». *Revue Tchadienne de Géographie*, vol. 12, no. 1, 2018, pp. 13–29.
- Mahamat Yaya, O. « Effets sanitaires des vagues de chaleur à N'Djamena ». *Revue Santé et Climat*, vol. 3, no. 1, 2010.
- Ministère de la Santé Publique. *Statistiques hospitalières annuelles 2020–2021*. N'Djamena, 2021.
- Ngardig Ngaba, J. « Végétalisation et adaptation climatique à N'Djamena ». *Cahiers d'Afrique Verte*, 2020.
- Ngarnayal, B. « Accès à l'eau potable à N'Djamena : enjeux et défis ». *Études urbaines sabéliennes*, 2015.
- NOAA. *Global Historical Climatology Network – Daily Database (GHCN-D)*. National Oceanic and Atmospheric Administration, 2021.
- Oke, T. R. “The Energetic Basis of the Urban Heat Island.” *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, vol. 108, no. 455, 1982, pp. 1–24.
- Panaïté, M. *Climats urbains en Afrique subsaharienne*. Karthala, 2016.
- Rakodi, Carole. *The Urban Challenge in Africa: Growth and Management of Its Large Cities*. United Nations University Press, 1997.
- Sobrino, José A., et al. “Land Surface Emissivity Retrieval from Landsat TM 5.” *Remote Sensing of Environment*, vol. 90, no. 4, 2004, pp. 434–440.
- Tchawa, P., et J. M. Fotsing. « Urbanisation et réchauffement local à Yaoundé : Apports des données satellitaires Landsat ». *Geo-Eco-Trop*, vol. 39, no. 1, 2015, pp. 121–136.
- Toko, G. « Les villes africaines entre croissance et crise : le cas de N'Djamena ». *Revue du Centre d'Études et de Recherches sur le Développement International*, vol. 3, no. 2, 2005, pp. 23–34.
- USGS. *Landsat Surface Reflectance and Temperature Archive*. U.S. Geological Survey, 2024.

- Voogt, J. A., and T. R. Oke. "Thermal Remote Sensing of Urban Climates." *Remote Sensing of Environment*, vol. 86, no. 3, 2003, pp. 370–384.
- Weng, Q. "A Remote Sensing–GIS Evaluation of Urban Expansion and Its Impact on Surface Temperature in the Zhujiang Delta, China." *International Journal of Remote Sensing*, vol. 22, no. 10, 2001, pp. 1999–2014.
- World Bank. *Africa's Urban Heat: Impacts and Adaptation*. World Bank Publications, 2022.

How to cite this article/Comment citer cet article:

MLA: Djangrang, Man-na. "Urbanisation et son impact sur la température terrestre (LST) de 1988 à 2021 à N'Djamena au Tchad." *Uirtus*, vol. 5, no. 3, December 2025, pp. 354-374, <https://doi.org/10.59384/uirtus.dec2025n18>.