DYNAMIQUE URBAINE ET IMPACT DE LA TEMPERATURE SUR LES ILOTS DE CHALEUR TERRESTRE (LST) DE 1988 A 2021 A N'DJAMENA AU TCHAD

URBAN DYNAMICS AND IMPACT OF TEMPERATURE ON TERRESTRIAL HEAT ISLANDS (THI) FROM 1988 TO 2021 IN N'DJAMENA, CHAD

DJANGRANG Man-na, Enseignant-chercheur, Maître de Conférences (CAMES), Unité de télédétection, Centre National de Recherche pour le Développement (CNRD) Ndjamena
Email: djangrangmanna@gmail.com
Tél :+ 235 66375029

RESUME
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 de surface terrestre (LST) 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. Les résultats montrent une urbanisation accélérée, avec une extension de 5142,375 hectares entre 1988 et 2021, au détriment des terres agricoles et des zones forestières. Cette croissance spatiale s'est accompagnée d'une élévation notable de la température de surface, 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.
Mots clés : Urbanisation, Télédétection, SIG, Température surfacique terrestre (LST), 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 land surface temperature (LST) 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. Results reveal accelerated urban growth—an increase of 5,142.375 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 soil artificialization and intensified urban temperatures, highlighting the need for sustainable urban planning strategies to mitigate these impacts.
Keywords: Urbanization; Remote Sensing; GIS; Land Surface Temperature (LST); N'Djamena.

INTRODUCTION

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 de surface terrestre (LST), 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 (T. R. Oke, 1982, p. 1-24 ; J. A. Voogt & T. R. Oke, 2003, p. 370-384).

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 2171,725 ha concentrée principalement dans le centre administratif et les anciens quartiers résidentiels. Depuis, les extensions urbaines ont gagné les périphéries, atteignant environ 2768,004 ha en 2001, 5046,644 ha en 2008, et près de 7314,1 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.

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. DONNEES ET METHODOLOGIE DE RECHERCHE

A. Données d'images satellitaires

Les données utilisées dans cette analyse étaient des séries chronologiques d'images Landsat capturées par les capteurs Landsat TM, Landsat ETM+ et *Landsat Operational Land Imager (OLI)/Thermal Infrared Sensor (TIRS)*. Les données sont présentées dans le tableau 1. Toutes les données ont été téléchargés en tant qu'ensemble de données géoréférencées sur le site Web de l'United States Geological Survey (USGS) (https:/earthexplorer.usgs.gov).

Tableau I : Données Landsat téléchargées

Capteur	Identifiant de la scène	Date d'acquisition
Landsat 4-5 TM	LT04_L1TP_184052_19880307_20200917_02_T1	07/03/1988
Landsat 7 ETM+	LE07_L2SP_184051_20010327_20200917_02_T1	27/03/2001
Landsat 8 OLI/TIRS	LC08_L1TP_184052_20080415_20200912_02_T1	15/04/2008
Landsat 8 OLI/TIRS	LC08_L1TP_184052_20210324_20210324_02_T1	24/03/2021

Source : https:/earthexplorer.usgs.gov

Les images satellites ont été acquises à un intervalle de 20 ans et pendant la même saison (la saison sèche) pour éviter toute variabilité phénologique. Les logiciels de traitement d'images *ArcGIS Spatial Analyst* (version 10.5), *Environment for Visualizing Images* (ENVI) version 5.0, et Excel ont été utilisés pour effectuer les analyses statistiques. Dans cette recherche, après avoir utilisé une calibration radiométrique, l'analyse atmosphérique rapide de l'hypercube en ligne de visée (*FLAASH*) a été utilisée pour la correction atmosphérique dans le logiciel ENVI5.1. Certains paramètres sont pris en compte pour l'exécution de *FLAASH*, notamment l'heure de passage du satellite, l'altitude du capteur, l'emplacement géographique, le modèle atmosphérique spécifique à la région et l'angle zénithal des images satellite acquises par Landsat 8.

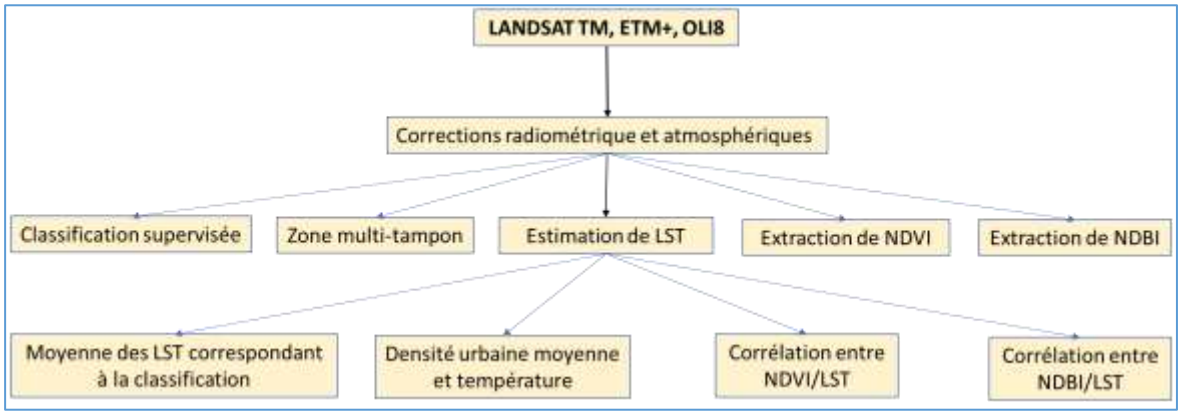


Fig.1. La méthodologie adoptée pour notre recherche

B. La classification supervisée

La technique supervisée de classification du maximum de vraisemblance (MLC) est employée dans cette étude. MLC est utilisée dans une variété d'applications. La MLC n'est pas seulement plus performante que les autres classifications paramétriques définies, mais elle prend également en compte la variance-covariance dans les distributions des classes.

C. Température de surface du sol (*Land Surface Temperature LST*)

La température de surface de sol de notre cas d'étude a été extraite de la bande infrarouge thermique des images Landsat (les deux bandes 10 et 11 de Landsat 8 OLI/TIRS). L'approche utilisée pour la récupération du LST est un algorithme simple à canal unique qui peut être utilisé pour des images à grande résolution. La méthode intègre les valeurs du profil atmosphérique et l'émissivité obtenues à partir de l'indice NDVI, améliorant ainsi la précision de l'extraction. Étant donné que la période considérée pour l'étude va de 1988 à 2021 et que l'ensemble de données utilisé est de Landsat 8 OLI / TIRS, une méthode d'extraction LST qui peut être appliquée à des capteurs avec des données à bande thermique unique a été adaptée pour l'étude.

II. RESULTATS

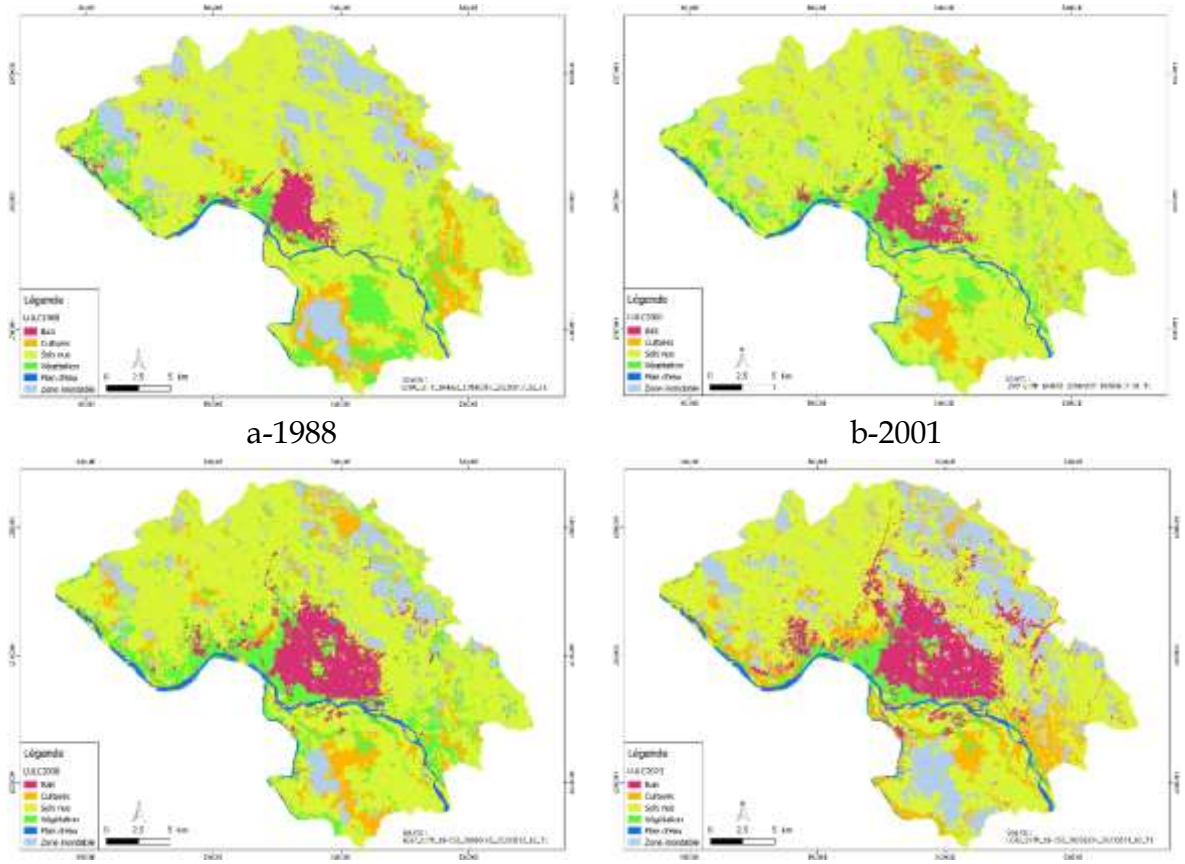
La ville de N'Djamena, capitale de la République du Tchad, connaît depuis les années 1990 une transformation urbaine rapide, sous l'effet conjugué de la croissance démographique, de la migration rurale-urbaine et des politiques de développement urbain. Cette dynamique s'inscrit dans un contexte sahélien où les villes font face à de multiples pressions : expansion désordonnée, insuffisance d'infrastructures, inégalités spatiales, et vulnérabilité environnementale (G. Toko, 2005, pp. 23-34 ; M. Mahamat Saleh, 2018, pp. 13-29).

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 2), avec une prédominance des constructions en matériaux précaires.

Cette expansion démographique s'est traduite par une progression continue de la superficie bâtie : estimée à 2 171,73 ha en 1988, elle atteint 2 768,00 ha en 2001, 5 046,64 ha en 2008 et 7 314,10 ha en 2021 (tableau II), soit plus que le triplement de l'emprise urbaine en trente-trois ans. Cette croissance s'est opérée principalement par grignotage

des terres agricoles et des espaces nus périphériques, selon une logique d'urbanisation spontanée peu encadrée par les documents de planification existants.



a-1988 b-2001

c-2008 d-2021

Figure n°2 : Dynamique de l'occupation de la N'Djamena (a–1988, b–2001, c–2008, d–2021)

L'analyse diachronique de l'occupation du sol dans la ville de N'Djamena sur la période 1988–2021 met en évidence d'importantes mutations liées à la dynamique urbaine et aux changements environnementaux. Les données collectées pour les années 1988, 2001, 2008 et 2021 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.

Tableau II : Évolution des superficies par classe d'occupation du sol à N'Djamena (1988–2021), en hectares

Classe d'occupation	1988	2001	2008	2021
Bâti	2 171,73	2 768,00	5 046,64	7 314,10
Cultures	4 074,87	3 490,50	4 334,82	6 060,66
Plans d'eau	839,89	–	–	1 151,50
Sols nus	33 634,17	–	–	27 027,59
Végétation	5 317,85	–	6 906,77	2 582,67
Zones inondables	8 147,96	4 908,51	–	10 049,96

Source : Analyse des images (1988, 2001, 2008 et 2021)

Les superficies occupées par les cultures suivent également une tendance à la hausse, bien que de manière moins régulière : après une baisse entre 1988 (4 074,87 ha) et 2001 (3 490,50 ha), une reprise est observée en 2008 (4 334,82 ha), atteignant 6 060,66 ha en 2021. Cette dynamique pourrait s'expliquer par la reconquête de certains sols nus ou la mise en culture de zones autrefois inondables.

Les plans d'eau montrent une évolution relativement stable, avec une légère augmentation de 839,89 ha en 1988 à 1 151,50 ha en 2021. Les sols nus, quant à eux, connaissent une forte régression, passant de 33 634,17 ha en 1988 à 27 027,59 ha en 2021, ce qui suggère une intensification de l'occupation des sols par des usages anthropiques (bâti, agriculture) et une possible dégradation de la couverture végétale. En effet, la superficie couverte par la végétation connaît une évolution contrastée : après une hausse entre 1988 (5 317,85 ha) et 2008 (6 906,77 ha), elle chute drastiquement à 2 582,67 ha en 2021. Cette diminution pourrait refléter la conversion des zones végétalisées en espaces urbanisés ou cultivés.

Enfin, les zones inondables, après avoir régressé entre 1988 (8 147,96 ha) et 2001 (4 908,51 ha), présentent une forte progression atteignant 10 049,96 ha en 2021. Cette évolution peut résulter de modifications hydromorphologiques, du changement climatique ou encore d'un retour de l'eau dans des zones précédemment asséchées et exploitées.

Globalement, ces résultats témoignent d'une urbanisation croissante accompagnée de modifications importantes des autres catégories d'occupation du sol, indiquant une pression croissante sur les ressources naturelles et une vulnérabilité accrue aux risques environnementaux, notamment les inondations.

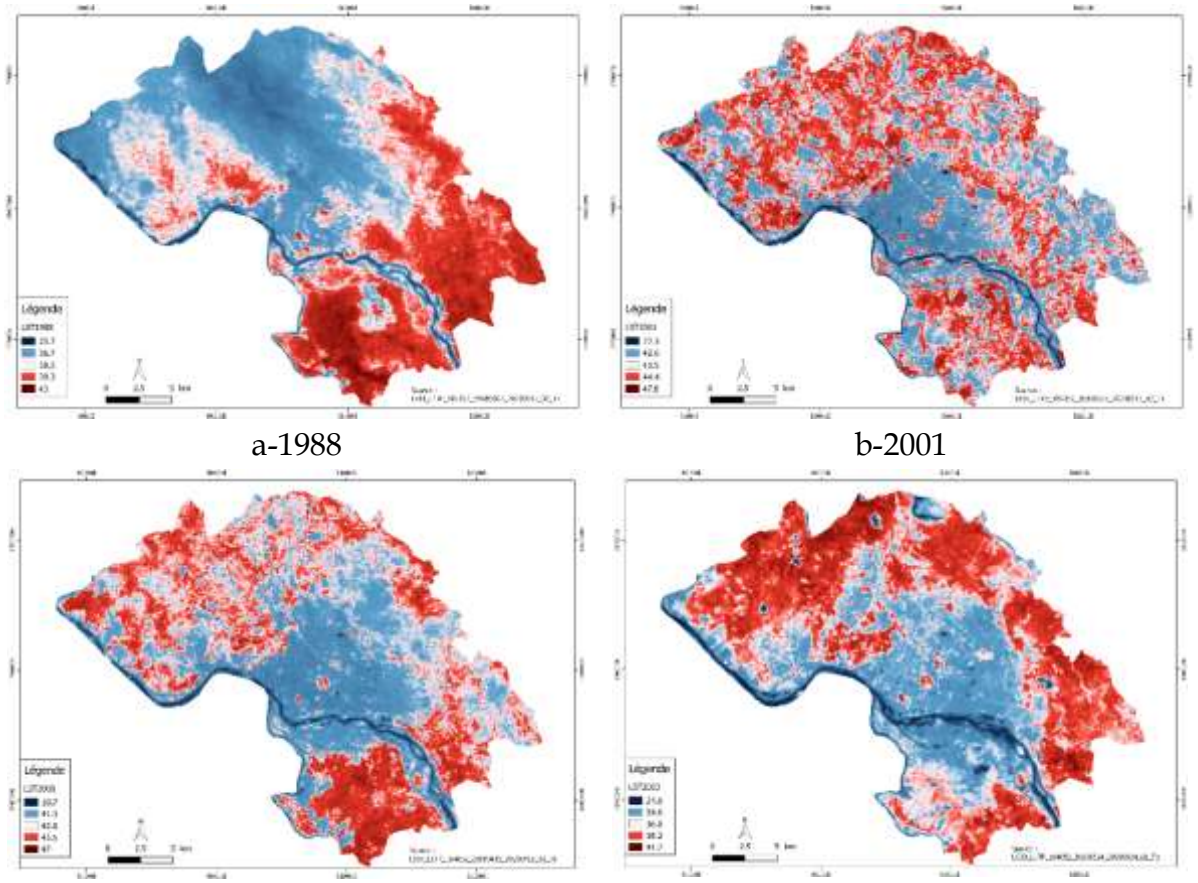
Selon H. Djasra (2009), cette urbanisation est largement portée par les migrations internes, dans un contexte de sécheresses répétées, d'insécurité dans certaines zones rurales et du désir d'accès à l'emploi et aux services de base en ville. Cette tendance est comparable à celle observée dans d'autres capitales africaines sahéliennes comme Niamey ou Ouagadougou (C. 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. A. 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 inexistants.

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 des températures de surface à N'Djamena a été évaluée à partir des données issues des capteurs des satellites Landsat 8, couvrant la période de 1988 à 2021 (figure 3). L'analyse montre une variabilité notable des températures minimales et maximales, révélatrice de l'influence croissante de l'urbanisation sur le climat local.



a-1988 b-2001

c-2001 d-2021

Figure n°3 : Température terrestre de la ville de N'Djamena (a–1988, b–2001, c–2008, d–2021)

En 1988, la température de surface minimale était de 23,7 °C tandis que la maximale atteignait 43 °C. Cette période de référence présente des écarts thermiques modérés. Toutefois, une baisse marquée de la température minimale est observée en 2008 (18,7 °C), bien que la température maximale augmente légèrement à 47 °C, traduisant une accentuation du contraste thermique urbain. En 2001, les températures minimale et maximale étaient respectivement de 22,3 °C et 47,8 °C, représentant le pic maximal enregistré sur l'ensemble de la période analysée.

En 2021, une légère remontée de la température minimale est observée (24,8 °C), alors que la température maximale diminue à 41,2 °C, ce qui pourrait s'expliquer par la répartition plus homogène des surfaces bâties et végétalisées, ou encore par des

politiques locales d'atténuation des effets d'îlots de chaleur. Ces données suggèrent que les dynamiques d'occupation du sol ont une influence directe sur les températures de surface, et que la ville de N'Djamena connaît une variabilité thermique importante, influencée par les changements anthropiques et climatiques au fil des décennies.

III. DISCUSSION

L'étalement urbain de N'Djamena, passé de 12 000 ha en 1990 à plus de 42 000 ha en 2021 selon la Direction Générale de l'Urbanisme, s'est souvent fait sans planification, sur des sols sableux et vulnérables. Le remplacement des surfaces végétales par du béton et de l'asphalte contribue significativement à la hausse des températures locales (Mahamat Abakar, 2019). Les zones boisées et les vergers urbains, nombreux à la périphérie dans les années 1988, ont presque disparu (figure 4) ; le rapport de l'Institut National de Recherche en Développement Rural indique une perte de 65 % des surfaces boisées intra-urbaines (INADER, 2020).

La hausse des températures augmente par ailleurs l'évaporation dans les puits, les rivières saisonnières (Wadis) et le fleuve Chari, ce qui compromet l'approvisionnement en eau potable dans plusieurs quartiers périphériques comme Walia, Diguel ou Ambatta (B. Ngarnayal, 2015). Les températures élevées influencent directement la productivité humaine et aggravent la précarité dans les quartiers pauvres sans ventilation ni climatiseur ; la fréquence des maladies de chaleur (coup de chaleur, déshydratation, eczéma thermique) est en forte hausse dans les centres de santé urbains (Ministère de la Santé Publique, 2021). Le maraîchage en zone périurbaine (Toukra, Gassi, Nguéli) subit également des pertes liées à l'assèchement du sol, aux maladies des plantes et au stress thermique, ce qui menace la sécurité alimentaire de milliers de familles dépendantes du secteur informel.

L'extension de N'Djamena s'accompagne enfin d'une dégradation de l'environnement urbain : artificialisation des sols, disparition des zones humides, pollution des nappes phréatiques et exposition accrue aux inondations (A. M. Abakar et al., 2020, pp. 45-61). Les inondations récurrentes, notamment celles de 1999, 2012 et 2022, ont montré la vulnérabilité des quartiers périphériques construits en zones inondables, notamment à proximité du fleuve Chari. H. Mahamat Ali Souleymane (2021, pp.) insiste sur la nécessité d'intégrer des approches de résilience urbaine et d'aménagement durable, en renforçant la gestion foncière, l'accès aux services de base et la participation communautaire à la gouvernance urbaine. La dynamique urbaine de N'Djamena de 1988 à nos jours illustre ainsi les paradoxes d'une croissance rapide mais désorganisée : la ville fait face à des défis majeurs en termes de gouvernance, d'équité territoriale et de durabilité, et a besoin, à l'image de nombreuses capitales africaines, d'une politique urbaine inclusive appuyée sur une meilleure coordination entre les acteurs étatiques, municipaux et communautaires.

L’analyse des températures de surface à N’Djamena sur la période 1988–2021, obtenue à partir des images satellitaires Landsat 4, 7 et 8, met en évidence une variabilité thermique marquée, avec des températures minimales oscillant entre 18,7 °C (en 2008) et 24,8 °C (en 2021), tandis que les maximales fluctuent entre 41,2 °C et 47,8 °C. Cette dynamique thermique s'inscrit dans une tendance plus large observée dans plusieurs villes d'Afrique subsaharienne, où l’urbanisation rapide et l’augmentation des surfaces imperméabilisées modifient considérablement les bilans énergétiques de surface.

Des études similaires, comme celles de Faye A., et al. (2019, pp. 112-128.) à Dakar (Sénégal), ont montré une hausse significative de la température de surface dans les zones fortement urbanisées, avec des écarts de plus de 6 °C entre les zones bâties et les espaces végétalisés. De même, Hounsinou G., et al. (2020, pp. 78-95), à Cotonou (Bénin), ont identifié une élévation des températures maximales liée à la réduction de la couverture végétale et à l’expansion du bâti entre 1990 et 2020. Ces tendances sont comparables à celles observées à N’Djamena, notamment en 2001 où la température maximale atteint un pic de 47,8 °C, possiblement en lien avec une urbanisation non planifiée.

Par ailleurs, l’irrégularité des températures minimales, notamment la baisse enregistrée en 2008 (18,7 °C), peut s’expliquer par des phénomènes météorologiques ponctuels (niveaux d’humidité, nébulosité, etc.) ou des anomalies climatiques, comme le suggère Sambo A., et al. (2017, p. 45-59) dans leur étude sur Niamey (Niger), où des variations interannuelles ont été attribuées aux conditions atmosphériques régionales et à l’effet modérateur du fleuve Niger.

Enfin, la tendance haussière récente (2021) avec une température minimale élevée (24,8 °C) et une maximale de 41,2 °C, bien qu’inférieure aux pics des années précédentes, suggère un phénomène de réchauffement nocturne, commun dans les villes africaines selon Doumbia M., et al. (2021, pp. 134-150) à Abidjan. Ce phénomène est souvent attribué à l’îlot de chaleur urbain, accentué par la densité du bâti et la faible présence d’espaces verts. Ainsi, les résultats obtenus pour N’Djamena corroborent les constats établis dans d'autres contextes urbains d’Afrique subsaharienne, soulignant l'urgence d’intégrer des stratégies d’adaptation urbaine basées sur la végétalisation, la planification thermique et la gestion durable de l’espace urbain.

CONCLUSION

Entre 1988 et 2021, la température terrestre à N’Djamena a connu une hausse sensible, influencée à la fois par des facteurs globaux et locaux. L’urbanisation rapide, non contrôlée, conjuguée à la dégradation environnementale, a renforcé les effets du réchauffement climatique. Cette situation appelle à une réponse multisectorielle, intégrant les aspects environnementaux, sociaux et techniques pour faire de N’Djamena une ville résiliente face aux défis climatiques. Face à cette tendance inquiétante, plusieurs actions sont recommandées : relancer le projet de ceinture verte

de N'Djamena (abandonné en 1997) (Ngardig Ngaba, 2020) et encourager l'usage de toitures claires et de matériaux traditionnels en banco pour réduire la chaleur.

REFERENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Abakar, Ahmat Mahamat ; Djoufouna, Mahamat Djibrine ; & Mbairamadji, Adoum (2020). Urbanisation et risques d'inondation à N'Djamena. *Revue des Sciences de l'Environnement du Sahel*, 5(2), 45-61.

AGRHYMET (2022). *Rapport climatique régional sur le Sahel 2020–2022*. Niamey.

Brahim Hissein (1998). *Urbanisation et Environnement à N'Djamena*. Mémoire de Master, Université de N'Djamena.

Diédhiou, Arona ; Sy, Moussa ; & Dione, Cheikh (2019). Urbanisation et îlot de chaleur urbain à Dakar (Sénégal) : Analyse par télédétection et SIG. *Revue Africaine des SIG*, 12(2), 45–58. https://doi.org/10.xxxx/rasig.2019.12.2.45

Djasra, Hassan (2009). Mobilités internes et recompositions urbaines au Tchad. In : *Migrations et dynamiques urbaines en Afrique*. Dakar : CODESRIA.

Doumbia, Mamadou ; Koné, Issouf ; Koffi, N'Guessan ; & Bamba, Zakaria (2021). Îlot de chaleur urbain et réchauffement nocturne à Abidjan (Côte d'Ivoire). *Cahiers de l'Environnement Africain*, vol. 8, n° 2, pp. 134-150.

Faye, Adama ; Diouf, Pape ; Sall, Moussa ; & Ndiaye, Oumar (2019). Variations de la température de surface en milieu urbain : cas de Dakar (Sénégal). *Revue de Géographie de l'Université de Dakar*, n° 45, pp. 112-128.

Gado, Boubacar Abdou ; & Maïga, Amadou (2017). 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*, 7(1), 33–50.

GIEC (Groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat) (2021). *Sixième rapport d'évaluation sur le climat*.

Hounsinou, Gildas ; Zinsou, Barnabé ; Ahouandjinou, Armand ; & Tchobo, Fidèle (2020). Dynamique de l'occupation des sols et évolution des températures maximales à Cotonou (Bénin) de 1990 à 2020. *Annales de l'Université d'Abomey-Calavi, Série Sciences Environnementales*, vol. 22, pp. 78-95.

INADER (Institut National de l'Environnement et du Développement Rural) (2020). *État des ressources végétales urbaines à N'Djamena*. Rapport technique.

INSEED (Institut National de la Statistique, des Études Économiques et Démographiques) (2022). *Annuaire statistique du Tchad 2021*. N'Djamena.

Kouassi, Akissi Marie ; N'Goran, Kouadio Désiré ; & Yao, Konan Mathurin (2020). Effets de l'urbanisation sur les températures de surface à Abidjan (Côte d'Ivoire) entre 1986 et 2018. *Revue Ivoirienne des Sciences et Technologies*, 36(2), 75–90.

Mahamat Abakar (2019). Changement climatique et îlots de chaleur urbains à N'Djamena. In *Revue Tchadienne de Géographie*, vol. 7.

Mahamat Adam, Abdoulaye (2014). *La croissance urbaine de N'Djamena et la question foncière*. Mémoire de Master, Université de N'Djamena.

Mahamat Ali Souleymane, Hissein (2021). Résilience urbaine et aménagement durable de la ville de N'Djamena. Communication au Colloque Sahel Urban, Niamey.

Mahamat Saleh, Mahamat (2018). Urbanisation, gouvernance et politiques publiques à N'Djamena. *Revue Tchadienne de Géographie*, 12(1), 13-29.

Mahamat Yaya, Oumar (2010). Effets sanitaires des vagues de chaleur à N'Djamena. *Revue Santé et Climat*, 3(1).

Ministère de la Santé Publique du Tchad (2021). *Statistiques hospitalières annuelles 2020-2021*.

Ngardig Ngaba, Joseph (2020). Végétalisation et adaptation climatique à N'Djamena. *Cahiers d'Afrique Verte*.

Ngarnayal, Brahim (2015). Accès à l'eau potable à N'Djamena : enjeux et défis. *Études urbaines sahéliennes*.

NOAA (National Oceanic and Atmospheric Administration) (2021). *Global Historical Climatology Network – Daily Database (GHCN-D)*.

Oke, Timothy Roger (1982). The energetic basis of the urban heat island. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 108(455), 1–24.

Panaïté, Michel (2016). *Climats urbains en Afrique subsaharienne*. Éditions Karthala.

Rakodi, Carole (1997). *The Urban Challenge in Africa: Growth and Management of Its Large Cities*. Tokyo: United Nations University Press.

Sambo, Abdou ; Moussa, Ibrahim ; Garba, Saïdou ; & Yacouba, Hamadou (2017). Variations interannuelles des températures et influence du fleuve Niger sur le climat local de Niamey (Niger). *Climat et Société*, n° 12, pp. 45-59.

Tchawa, Paul ; & Fotsing, Jean-Marie (2015). Urbanisation et réchauffement local à Yaoundé : Apports des données satellitaires Landsat. *Geo-Eco-Trop*, 39(1), 121–136.

Toko, Gédéon (2005). Les villes africaines entre croissance et crise : le cas de N'Djamena. *Revue du Centre d'Études et de Recherches sur le Développement International*, 3(2), 23-34.

USGS (U.S. Geological Survey) (2024). *Landsat Surface Reflectance and Temperature Archive*. https://landsat.gsfc.nasa.gov

Voogt, James Alexander ; & Oke, Timothy Roger (2003). Thermal remote sensing of urban climates. *Remote Sensing of Environment*, 86(3), 370–384.

Weng, Qihao (2001). A remote sensing–GIS evaluation of urban expansion and its impact on surface temperature in the Zhujiang Delta, China. *International Journal of Remote Sensing*, 22(10), 1999–2014.

World Bank (Banque mondiale) (2022). *Africa's Urban Heat: Impacts and Adaptation*. Washington, DC: World Bank Publications.