ESJ Humanities Peer-reviewed

Influence des paramètres géomorphologiques sur la distribution spatiale de la température de surface en milieu urbain tropical : cas de Brazzaville (2013-2022) (République du Congo)

M'Bouka Milandou Idriss Auguste Williams
Koumba Massoussa Gerginio
Laboratoire des Sciences Géographiques, Environnementales et Aménagement (LaSGEA), Université Denis Sassou-N'guesso, Congo

Doi:10.19044/esj.2026.v22n29p131

Submitted: 22 July 2026
Accepted: 08 September 2026
Published: 31 October 2026

Copyright 2026 Author(s)
Under Creative Commons CC-BY 4.0
OPEN ACCESS

Cite As:
M'Bouka Milandou, I.A.W., & Koumba Massoussa, G. (2026). *Influence des paramètres géomorphologiques sur la distribution spatiale de la température de surface en milieu urbain tropical : cas de Brazzaville (2013-2022) (République du Congo)*. European Scientific Journal, ESJ, 22 (29), 131. https://doi.org/10.19044/esj.2026.v22n29p131

Résumé

La croissance urbaine rapide des villes d'Afrique centrale s'accompagne d'une intensification des îlots de chaleur urbains, dont la compréhension nécessite d'identifier les déterminants biophysiques de la température de surface (LST). Si l'influence de l'occupation du sol sur la LST est bien documentée dans le monde, le rôle de la géomorphologie reste peu exploré, surtout dans les villes situées dans le bassin du Congo. Cette étude analyse l'influence de six paramètres géomorphologiques (altitude, pente, orientation, courbure, indice topographique d'humidité et distance au réseau hydrographique) sur la distribution spatiale de la LST à Brazzaville au Congo, à partir d'une approche diachronique couvrant les années 2013, 2018 et 2022. À partir de la Mission topographique radar de la navette spatiale (30 m) et des images Landsat 8 (n = 30 724 points), l'analyse combine corrélations de Pearson, régression linéaire multiple (RLM), test d'autocorrélation spatiale de Moran's I sur les résidus, et régression géographiquement pondérée (RGP). Les résultats montrent que toutes les variables sont significativement corrélées à la LST ($p < 0,001$). La pente présente la relation la plus dynamique puisque son effet rafraîchissant se renforce nettement entre 2013 et 2022 (coefficient

ISSN: 1857-7881 (Print)
e-ISSN 1857-7431 (Online)

OLS de -0,150 à -0,195, soit +30 %). Les modèles OLS globaux, bien que tous significatifs, n'expliquent qu'environ 19 % de la variance de la LST. La forte autocorrélation spatiale des résidus (Moran's I ≈ 0,83–0,87) révèle une non-stationnarité spatiale marquée, confirmée par la GWR qui améliore considérablement l'ajustement (R^2 ≈ 0,84–0,88) et met en évidence une inversion locale de l'effet de la pente selon le contexte topographique et d'urbanisation (coefficient oscillant entre -0,749 et +0,754). Ces résultats démontrent que la géomorphologie constitue un déterminant structurant et évolutif de la structure thermique urbaine, indépendamment de l'occupation du sol, et plaident pour son intégration dans les documents de planification urbaine et d'adaptation climatique à Brazzaville.

Mots-clés : Température de surface, Géomorphologie, GWR, Îlot de chaleur urbain, Brazzaville

Influence of Geomorphological Parameters on the Spatial Distribution of Land Surface Temperature in a Tropical Urban Area: The Case of Brazzaville (2013-2022) (Republic of Congo)

M'Bouka Milandou Idriss Auguste Williams
Koumba Massoussa Gerginio
Laboratory of Geographical, Environmental and Planning Sciences (LaSGEA), Denis Sassou-N'guesso University, Congo

Abstract

The rapid urban growth of cities in Central Africa is accompanied by an intensification of urban heat islands, and understanding this phenomenon requires identifying the biophysical determinants of land surface temperature (LST). While the influence of land cover on LST is well documented worldwide, the role of geomorphology remains largely unexplored, especially in cities located in the Congo Basin. This study analyzes the influence of six geomorphological parameters (elevation, slope, aspect, curvature, topographic humidity index, and distance to the river network) on the spatial distribution of LST in Brazzaville, Congo, using a diachronic approach covering the years 2013, 2018, and 2022. Using Shuttle Radar Topography Mission (30 m) data and Landsat 8 images (n = 30,724 points), the analysis combines Pearson correlations, multiple linear regression (OLS), Moran's I spatial autocorrelation test on the residuals, and geographically weighted regression (GWR). The results show that all variables are significantly correlated with

ISSN: 1857-7881 (Print)
e-ISSN 1857-7431 (Online)

LST ($p < 0.001$). Slope exhibits the most dynamic relationship, as its cooling effect increased markedly between 2013 and 2022 (OLS coefficient from -0.150 to -0.195, a 30% increase). The overall OLS models, although all significant, explain only about 19% of the variance in the LST. The strong spatial autocorrelation of the residuals (Moran's I ≈ 0.83–0.87) reveals marked spatial non-stationarity, confirmed by the GWR, which significantly improves the fit ($R^2 \approx 0.84–0.88$) and highlights a local reversal of the slope effect depending on the topographic and urbanization context (coefficient ranging from -0.749 to +0.754). These results demonstrate that geomorphology is a structuring and evolving determinant of the urban thermal structure, independent of land use, and support its integration into urban planning and climate adaptation documents in Brazzaville.

Keywords: Surface temperature, Geomorphology, GWR, Urban heat island, Brazzaville

1. Introduction

Les villes des régions tropicales connaissent depuis plusieurs décennies une croissance urbaine rapide, souvent peu maîtrisée, qui s'accompagne d'une transformation profonde des surfaces naturelles en surfaces imperméabilisées. Cette dynamique, combinée au changement climatique, contribue à l'intensification des îlots de chaleur urbains (ICU), caractérisés par une élévation des températures en milieu urbain (Oke, 1982). En Afrique centrale, cette problématique revêt une importance particulière pour les villes en forte croissance démographique, à l'image de Brazzaville, au Congo. La télédétection thermique, via les données satellitaires Landsat, constitue un outil de référence pour l'étude de la température de surface (LST). Si de nombreux travaux ont mis en évidence l'influence de l'occupation du sol, de la végétation et de la densité du bâti sur la LST (Yuan & Bauer, 2007 ; Guo et al., 2015), la dimension géomorphologique – c'est-à-dire l'influence du relief (altitude, pente, orientation, courbure, humidité topographique, proximité hydrographique) – demeure moins explorée. Pourtant, des études récentes démontrent son rôle significatif dans la structuration thermique urbaine, notamment à Abidjan (Mobio et al., 2017) et Addis-Abeba (Tassew et al., 2024). Au Congo, la recherche géomorphologique urbaine s'est développée autour de l'érosion hydrique et de la dégradation des infrastructures (M'Bouka Milandou, 2025), sans établir de lien avec la thermique urbaine. Sur le plan climatologique, les travaux de Samba-Kimbata (1978) et de Samba et Nganga (2014) ont posé les bases d'une climatologie locale, sans isoler la contribution propre du relief. Parallèlement, de récents travaux ont identifié les ICU à Brazzaville et Pointe-Noire (Souamy Le Grand, 2024 ; Maniaka et al., 2024 ; Malonga, 2025), et démontré l'influence des

ISSN: 1857-7881 (Print)
e-ISSN 1857-7431 (Online)

facteurs anthropiques (Souamy et al., 2022), mais sans jamais isoler la part du substrat géomorphologique. C'est dans ce contexte que s'inscrit la présente étude, qui prolonge l'analyse diachronique des ICU à Brazzaville entre 2013 et 2022. Ce travail propose d'isoler spécifiquement la contribution des paramètres géomorphologiques (altitude, pente, orientation, courbure, indice topographique d'humidité, distance au réseau hydrographique) sur la distribution spatiale de la LST, et d'examiner si cette influence évolue dans le temps sous l'effet de la densification urbaine.

2. Matériel et méthodes

2.1. Situation géographique de Brazzaville

Brazzaville, capitale de la République du Congo, se situe au sud du pays, sur la rive droite du fleuve Congo, au sud-ouest du Pool Malebo, en face de Kinshasa (République Démocratique du Congo). Elle s'étend entre les latitudes 4°10' et 4°20' Sud et les longitudes 15°10' et 15°20' Est, couvrant une superficie d'environ 314 km² selon le périmètre retenu pour cette étude. Sur le plan administratif, Brazzaville est subdivisée en 9 arrondissements et plusieurs quartiers, à savoir : Makélékélé, Bacongo, Poto-Poto, Moungali, Ouenzé, Talangaï, Mfilou, Madibou et Djiri. Les deux derniers ont été créés en 2011 pour encadrer l'expansion urbaine vers le nord et le sud de la ville. Cette organisation administrative constitue la trame territoriale dans laquelle s'inscrit la dynamique d'urbanisation analysée dans cette étude (Figure 1).

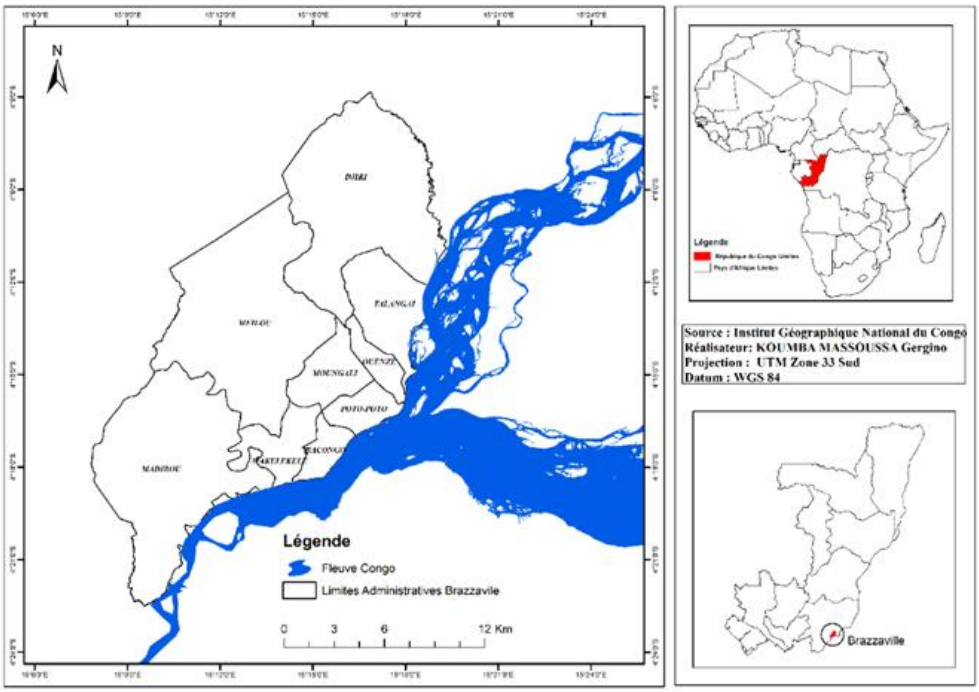


Figure 1: Situation géographique de la ville de Brazzaville

ISSN: 1857-7881 (Print)
e-ISSN 1857-7431 (Online)

2.2. Cadre physique et humain de la ville

Brazzaville bénéficie d'un climat tropical humide, caractérisé par des précipitations annuelles de 1100 à 1400 mm en saison des pluies et des températures moyennes oscillant entre 24°C et 37°C sur la période 2003–2023 (ANAC, 2024). Sur le plan géomorphologique, la ville s'étend sur deux ensembles topographiques aux pentes variant de 0 à plus de 15 % : (i) le plateau de Mbé (nord et ouest) : altitudes entre 400 et plus de 600 m, marqué par des collines douces, des vallées sèches ou drainées, et un ravinement dynamique lors des pluies ; (ii) le plateau des cataractes (nord-ouest et sud-est) : altitudes de 300 à 500 m, caractérisé par des cirques d'érosion (Glacière, Mpissa, périphérie sud) et une dynamique érosive plus insidieuse. Géologiquement, le site repose sur deux formations. La série des plateaux Bateké (Tertiaire) présente des sols sablonneux très vulnérables à l'érosion hydrique (Sitou, 2008 ; Ngatse et al., 2017). Le plateau des cataractes repose sur des formations schisto-gréseuses (Précambrien supérieur), dominées par les grès de l'Inkisi qui affleurent près du fleuve Congo et de la Djoué (Dadet, 1969 ; Boudzoumou, 1986). Ses sols varient entre argileux et sablo-argileux (Kombo-Kissangou et al., 2018). Le réseau hydrographique, structuré en bassins versants pérennes se jetant dans le fleuve Congo, est commandé par la Djiri et la Tsiémé au nord, la Madoukoutsiekele et la Mfoa au centre, ainsi que le Djoué, la Mfilou et la Loua au sud. La végétation résiduelle est un tapis graminéen clairsemé à strate arbustive dominée par *Hymenocardia acida* (Kinga Mounzeo, 1986). D'un point de vue démographique, Brazzaville connaît une croissance exponentielle. Sa population est passée d'environ 1,8 million d'habitants en 2013 à près de 2,55 millions en 2022 (INS-Congo, RGPH-5, 2023), soit une augmentation de 40 % en une décennie. Cette dynamique engendre une extension urbaine incontrôlée et une densification des quartiers anciens, s'effectuant au détriment du couvert forestier par l'occupation progressive des plateaux centraux, des versants et des bas-fonds.

2.3. Données collectées et traitées

Cette étude s'appuie sur deux sources de données géospatiales en libre accès, offrant une cohérence spatiale à la résolution nominale de 30 mètres :

- Le MNT SRTM (2000) : La version 3 (SRTM GL1) à 1 seconde d'arc de résolution (~30 m à l'équateur), distribuée par le LP DAAC de la NASA, a été utilisée (Farr *et al.*, 2007). Sa précision verticale absolue (< 16 m) convient à la dérivation de variables morphométriques urbaines. Ce modèle a été projeté en UTM Zone 33 Sud (EPSG:32733) pour s'harmoniser avec les autres couches.
- Les images Landsat 8 : Issues de la Collection 2 (niveau 2) de l'USGS et acquises via Google Earth Engine, elles servent à produire la série temporelle de la température de surface (LST). Seule la bande

ISSN: 1857-7881 (Print)
e-ISSN 1857-7431 (Online)

thermique 10 (10,6–11,2 µm) du capteur TIRS a été exploitée, la bande 11 présentant des anomalies résiduelles de rayonnement parasite (*stray light*). Une image par année a été sélectionnée en saison sèche (mai à septembre) afin de minimiser la couverture nuageuse et garantir la comparabilité interannuelle (Tableau 1).

Tableau 1 : Caractéristiques des images Landsat 8 sélectionnées.

Année	Date de l'image	Couverture nuageuse (%)	Capteur	Résolution	Utilisation
2013	28 juillet 2013	3,68	Landsat 8 OLI/TIRS	30 m	Calcul LST
2018	8 juin 2018	3,63	Landsat 8 OLI/TIRS	30 m	Calcul LST
2022	11 juin 2022	3,91	Landsat 8 OLI/TIRS	30 m	Calcul LST

Source : USGS, 2026

2.3.1. Prétraitement du MNT et dérivation des variables géomorphologiques

Pour neutraliser les effets de bord et les biais d'accumulation des flux en périphérie, une zone tampon (*buffer*) de 1 km a été appliquée au périmètre administratif de Brazzaville avant l'extraction, suivie d'un recadrage strict sur l'emprise d'étude de 318 km². Les traitements morphométriques ont été réalisés sous ArcGIS/ArcMap (Figure 2) pour calculer six variables explicatives :

- **Altitude (Alt) :** Gradient hypsométrique brut (m) extrait du MNT.
- **Pente (Pente) :** Inclinaison en degrés (°), indicatrice de la vitesse de drainage et de l'exposition au rayonnement solaire.
- **Orientation (Aspect) :** Azimut d'exposition des versants (0-360°), décomposé en sinus (Aspect_sin, Est-Ouest) et cosinus (Aspect_cos, Nord-Sud) pour intégration linéaire.
- **Courbure (Courb) :** Morphologie du profil topographique, distinguant les formes concaves (valeurs négatives) et convexes (valeurs positives).
- **Indice Topographique d'Humidité (TWI) :** Développé par Beven et Kirkby (1979) via le modèle TOPMODEL, il quantifie le potentiel de saturation des sols. Il est défini par :

$$TWI = ln\frac{\alpha}{tan(\beta)}$$

où α : surface contributive amont par unité de longueur de contour (potentiel d'accumulation des eaux) et β : angle de pente local (efficacité du drainage). Les valeurs élevées de TWI signalent des zones topographiquement propices à l'accumulation d'eau et à la fraîcheur relative.

- **Distance aux talwegs (DistTal) :** Calculée en mètres par proximité euclidienne depuis le réseau hydrographique dérivé du MNT (remplissage, direction et accumulation des flux). Cette variable

ISSN: 1857-7881 (Print)
e-ISSN 1857-7431 (Online)

quantifie la proximité de la surface étudiée par rapport aux corridors d'humidité et de régulation thermique potentielle.

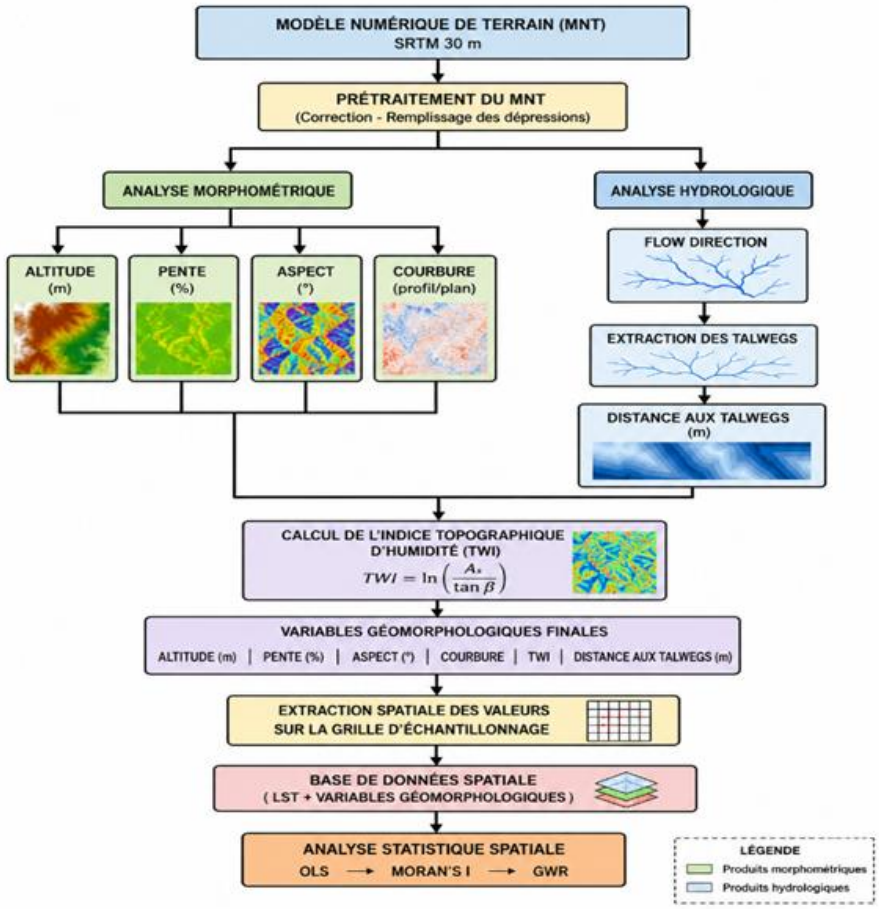


Figure 2 : Modèle d'extraction des variables géomorphologiques et hydrologiques à partir du MNT SRTM 30 m

2.3.2. Calcul de la température de surface (LST)

La LST a été calculée à partir de la bande thermique ST_B10 de Landsat 8 sous Google Earth Engine selon les étapes suivantes :

- **Masquage :** élimination des nuages, ombres et pixels saturés via la bande QA_PIXEL.
- **Correction radiométrique :** conversion des bandes optiques (SR_B4, SR_B5) en réflectance via les facteurs d'échelle de l'USGS.
- **Calcul du NDVI :**

$$NDVI = \frac{\rho NIR - \rho Red}{\rho NIR + \rho Red}$$

(avec ρNIR et ρRed les réflectances de surface dans le proche infrarouge et le rouge)

ISSN: 1857-7881 (Print)
e-ISSN 1857-7431 (Online)

- Estimation de la fraction de végétation (Proportion of Vegetation, Pv) :

$$\frac{NDVI - NDVImin}{NDVImax - NDVImin}^{2}$$

avec NDVImin = 0,2 et NDVImax = 0,5, valeurs seuils classiques correspondant respectivement
aux sols nus et à la végétation dense.

- Calcul de l'émissivité de surface (ε) :

$$\varepsilon = 0{,}004 \times Pv + 0{,}986$$

- Conversion en température de brillance (Brightness Temperature, BT) : la bande ST_B10 (en nombre numérique) a été convertie en température physique en kelvins par application du facteur d'échelle (×0,00341802 + 149,0) des produits Collection 2.
- Calcul de la LST par l'algorithme mono-fenêtre :

$$LST_K = \frac{BT}{1 + (\frac{\lambda \times BT}{\rho}) \times ln(\varepsilon)}$$

avec λ = 10,895 µm (longueur d'onde centrale de la bande 10) et ρ = 14388 µm·K (constante de Planck rapportée à la constante de Boltzmann). La LST en degrés Celsius a été obtenue par soustraction de 273,15 K.

La sélection d'une seule image par année, correspondant à l'image la moins nuageuse de la saison sèche, favorise l'analyse de la distribution spatiale relative de la LST et des relations avec la géomorphologie, plutôt que la comparaison directe des valeurs absolues entre années.

2.3.3. Échantillonnage spatial et extraction des données

Une grille régulière (*Fishnet*) à maille de 100 mètres a été générée sous ArcGIS, produisant 31 842 points. Les valeurs des neuf variables (six géomorphologiques et trois de LST) y ont été intégrées via la fonction *Extract Multi Values to Points*. Les coordonnées planaires (*POINT_X*, *POINT_Y*) ont été ajoutées pour l'analyse d'autocorrélation spatiale et la GWR. Lors du nettoyage des données, la variable *Aspect* a été décomposée en *Aspect_sin* et *Aspect_cos*. Après la conversion des LST en décimales et le remplacement des *NoData* par *NA*, les lignes incomplètes (nuages résiduels et plans d'eau exclus) ont été supprimées. Le jeu de données final conserve 30 724 points exploitables.

2.3.4. Traitements statistiques

- Statistiques descriptives et analyse des corrélations

ISSN: 1857-7881 (Print)
e-ISSN 1857-7431 (Online)

La moyenne, l'écart-type, le minimum et le maximum ont été calculées pour l'ensemble des variables. Les relations bivariées entre chaque paramètre géomorphologique et la LST ont été quantifiées par le coefficient de corrélation de Pearson (r), calculé pour les trois années séparément, permettant d'identifier les tendances diachroniques des relations.

- **Régression linéaire multiple (OLS)**

Un modèle de régression linéaire multiple (OLS (Ordinary Least Squares)) a été ajusté pour chacune des trois années d'étude, selon la formulation :

$$LST_t = \beta 0 + \beta 1 \cdot Alt + \beta 2 \cdot Pente + \beta 3 \cdot Aspect_sin + \beta 4 \cdot Aspect_cos + \beta 5 \cdot Courb + \beta 6 \cdot TWI + \beta 7 \cdot DistTal + \varepsilon$$

Ce modèle global fournit une estimation moyenne de l'influence de chaque variable géomorphologique sur la LST à l'échelle de l'ensemble de la zone d'étude, ainsi que le coefficient de détermination (R^2) associé. L'ensemble des analyses statistiques a été réalisé sous R (version 4.5.3) via les packages dplyr, readr et broom.

2.3.5. Test d'autocorrélation spatiale des résidus (Indice de Moran)

L'indépendance des résidus de l'OLS a été vérifiée par l'indice de Moran's I global pour chaque modèle annuel (Anselin, 1995). Ce test détecte l'autocorrélation spatiale des résidus, dont l'omission biaiserait les coefficients et la variance. La structure de voisinage a été définie par les 8 plus proches voisins (\(k=8\)) via le package spdep sous R, avec une matrice de pondération standardisée par ligne (style « W »). Un indice de Moran significativement positif confirme le regroupement spatial des résidus et justifie le recours à une modélisation spatiale locale.

3.5.4. Régression Géographiquement Pondérée (GWR)

Face à la forte autocorrélation spatiale des résidus OLS, une Régression Géographiquement Pondérée (GWR) a été appliquée (Fotheringham *et al.*, 2002). Contrairement à l'OLS global, la GWR estime des coefficients locaux non uniformes pour chaque point de régression (i). Elle repose sur le postulat que les entités proches partagent des propriétés plus similaires que les entités distantes.

$$LST_t(u_i, v_i) = \beta 0(u_i, v_i) + \sum_{k=1}^{7} \beta k(u_i, v_i) X_K + \varepsilon_i$$

où (u_i, v_i) représentent les coordonnées spatiales du point i.

ISSN: 1857-7881 (Print)
e-ISSN 1857-7431 (Online)

La pondération repose sur un noyau bisquare adaptatif, optimisé par l'AICc. Les largeurs de bande retenues sont de 77 voisins (2013), 74 voisins (2018) et 70 voisins (2022). Pour surmonter le coût computationnel de la GWR, un sous-échantillon aléatoire reproductible de 5 000 points (set.seed(123)) a été extrait des 30 724 initiaux (Lu et al., 2014). Les analyses ont été exécutées via le package GWmodel sous R. Enfin, les coefficients locaux ont été cartographiés avec ggplot2 en utilisant une palette divergente centrée sur zéro pour opposer les effets thermiques positifs et négatifs.

3. Résultats

3.1. Distribution spatiale de la LST à Brazzaville (2013, 2018, 2022)

Les statistiques descriptives de la LST révèlent des contrastes thermiques marqués à Brazzaville pour les trois dates d'étude (Tableau 2 et Figures 3A, 3B et 3C). En 2013, la LST moyenne s'établit à 36,85 °C, avec des valeurs extrêmes comprises entre 27,0 °C et 48,4 °C. En 2018, la moyenne descend à 33,37 °C (plage : 26,2–41,7 °C), différence attribuable en partie aux conditions atmosphériques propres à chaque date d'acquisition. En 2022, la LST retrouve un niveau proche de 2013, avec une moyenne de 36,78 °C et des valeurs maximales dépassant 49,7 °C, soit les plus élevées de la série.

Tableau 2 : Statistiques descriptives de la LST (°C) pour les trois dates d'étude (n = 30 724 points)

Variable	Minimum	Maximum	Moyenne
LST 2013	27,0	48,4	36,85
LST 2018	26,2	41,7	33,37
LST 2022	29,1	49,7	36,78

Source : Auteurs, 2026

Les trois cartes (Figures 3A, 3B et 3C) révèlent une organisation spatiale cohérente : les températures les plus élevées (> 42 °C) se concentrent sur les plateaux centraux et septentrionaux, correspondant aux zones de forte densité du bâti (Poto-Poto, Moungali, Ouenzé, Talangaï), tandis que les valeurs les plus faibles (< 30 °C) se localisent dans les vallées et bas-fonds, le long des talwegs et à proximité du fleuve Congo.

ISSN: 1857-7881 (Print)
e-ISSN 1857-7431 (Online)

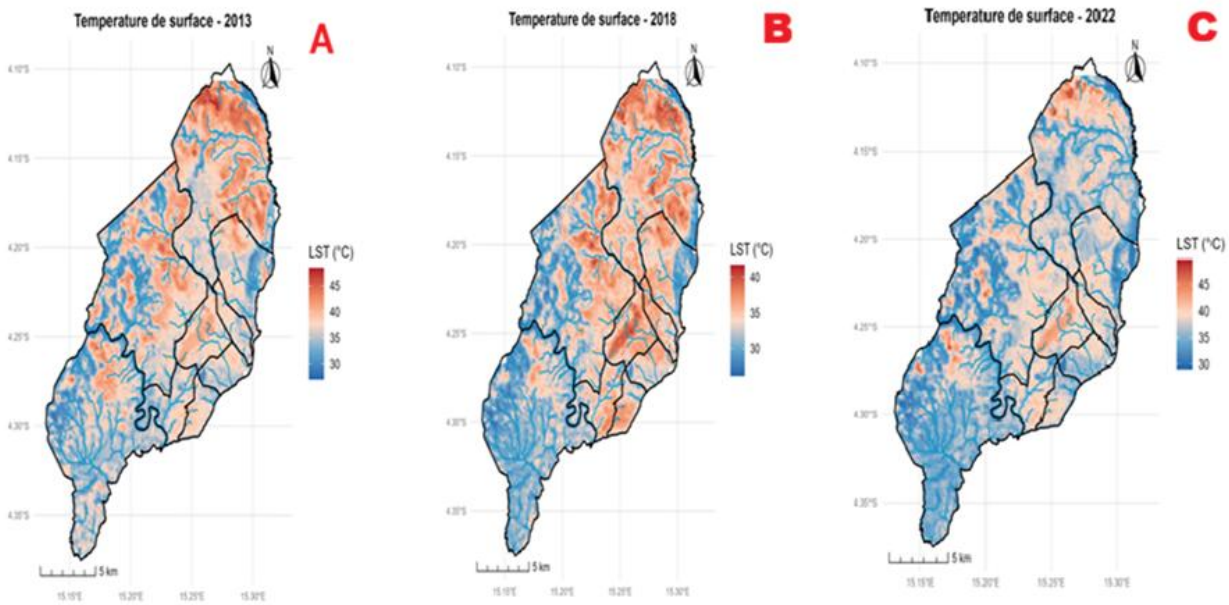


Figure 3A : Distribution spatiale de la température de surface (LST) à Brazzaville en 2013 (image Landsat 8 du 28 juillet 2013). Contour administratif en noir ; réseau hydrographique (talwegs) en bleu ; **Figure 3B :** Distribution spatiale de la LST à Brazzaville en 2018 (image Landsat 8 du 8 juin 2018) ; **Figure 3C :** Distribution spatiale de la LST à Brazzaville en 2022 (image Landsat 8 du 11 juin 2022).

3.2. Distribution spatiale des variables géomorphologiques

Les statistiques descriptives des six variables géomorphologiques issues du MNT SRTM sont présentées dans le Tableau 3 et les figures 4A, 4B, 4C et 4D. L'altitude varie entre 255 m et 529 m (moyenne : 333,7 m), la pente entre 0° et 34,2° (moyenne : 6,07°), le TWI entre 7,48 et 21,16 (moyenne : 10,83), et la distance aux talwegs entre 0 et 1 249 m (moyenne : 320,2 m).

Tableau 3 : Statistiques descriptives des variables géomorphologiques (n = 30 724 points)

Variable	Minimum	Maximum	Moyenne	Écart-type
Altitude (m)	255	529	333,7	51,9
Pente (°)	0	34,2	6,07	5,09
TWI	7,48	21,16	10,83	1,65
Distance aux talwegs (m)	0	1 249	320,2	223,5
Aspect	-1,00	357,93	171,75	89,30
Courbure	-2,617	2,298	0,004	0,317

Source : Auteurs, 2026

ISSN: 1857-7881 (Print)
e-ISSN 1857-7431 (Online)

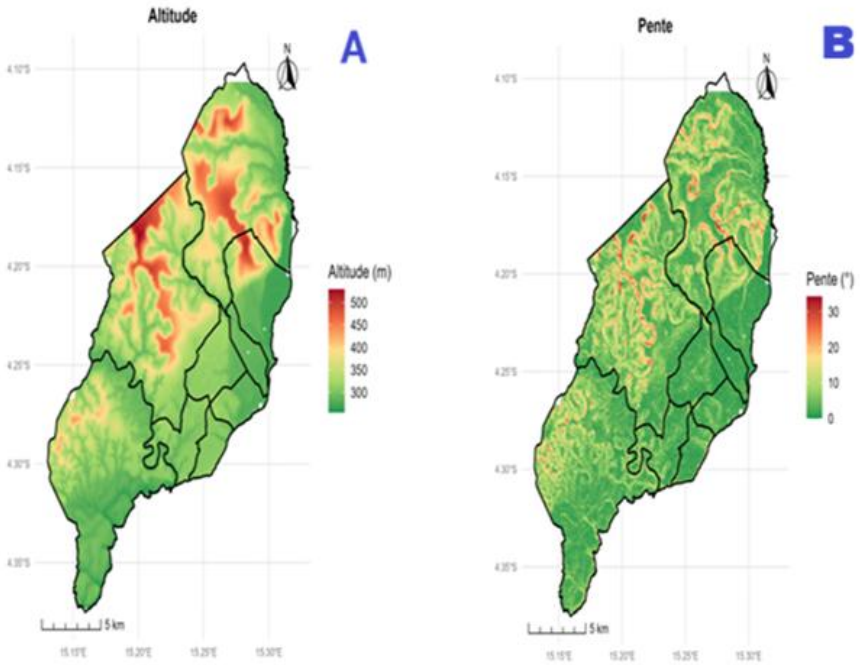


Figure 4A : Distribution spatiale de l'altitude (m) à Brazzaville, dérivée du MNT SRTM 30 m ; **Figure 4B :** Distribution spatiale de la pente (°) à Brazzaville

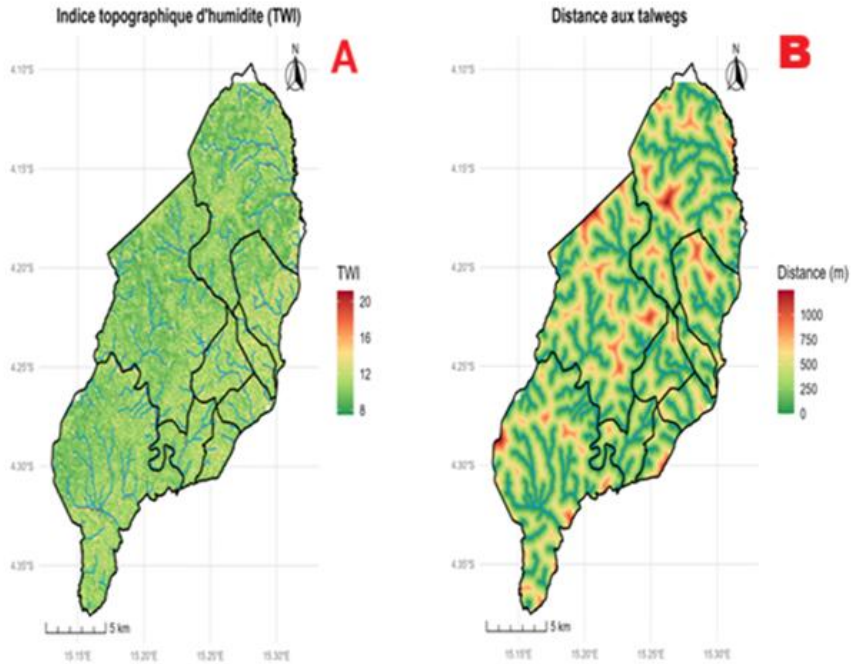


Figure 4C : Distribution spatiale de l'indice topographique d'humidité (TWI) à Brazzaville. Réseau hydrographique en bleu; **Figure 4D:** Distribution spatiale de la distance au réseau de talwegs (m) à Brazzaville

ISSN: 1857-7881 (Print)
e-ISSN 1857-7431 (Online)

Les figures 4(A, B, C et D) révèlent une structuration géomorphologique contrastée de Brazzaville : les secteurs de plateaux, globalement plus élevés et à pentes faibles à modérées, dominent surtout le nord, le nord-ouest et une partie du centre-ouest, tandis que les ruptures de pente, les vallées et les bas-fonds s'organisent le long du réseau de talwegs. Ces zones basses présentent des valeurs élevées de TWI, traduisant un forte capacité d'accumulation hydrique, alors que les interfluves et les secteurs éloignés des talwegs apparaissent relativement moins humides.

3.3. Relations statistiques entre la LST et les variables géomorphologiques

3.3.1. Analyse des corrélations de Pearson

Le tableau 4 et les (Figures 5, 6, 7, 8, 9 et 10) présente les coefficients de corrélation de Pearson entre chaque variable géomorphologique et la LST pour les trois années d'étude.

Tableau 4 : Coefficients de corrélation de Pearson (r) entre les variables géomorphologiques et la LST (tous significatifs à $p < 0,001$).

Variable	LST 2013	LST 2018	LST 2022	Tendance
Altitude	+0,332	+0,291	+0,256	Légère baisse
Pente	−0,044	−0,130	−0,181	Renforcement net
Distance aux talwegs	+0,249	+0,221	+0,241	Stable
TWI	−0,097	−0,027	−0,033	Faible, variable
Aspect	-0,114	-0,112	-0,102	Stable
Courbure	0,056	0,048	0,061	Stable

Source : Auteurs, 2026

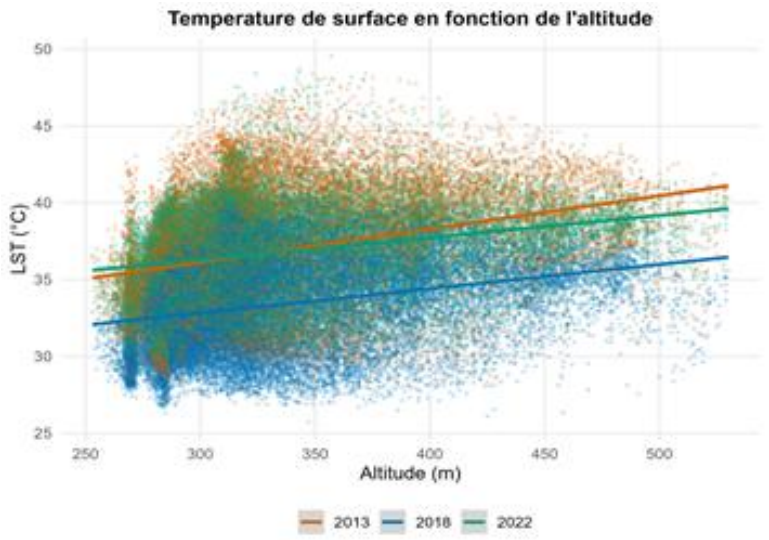


Figure 5: Relations entre l'altitude et la LST pour 2013, 2018 et 2022 (n = 30 724 points)

ISSN: 1857-7881 (Print)
e-ISSN 1857-7431 (Online)

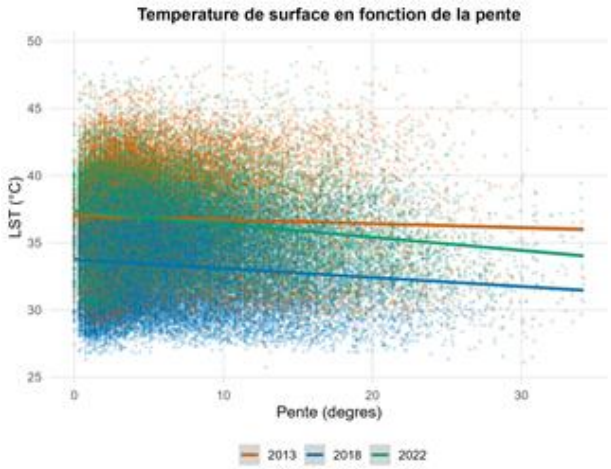


Figure 6: Relations entre la pente et la LST pour les trois dates d'étude

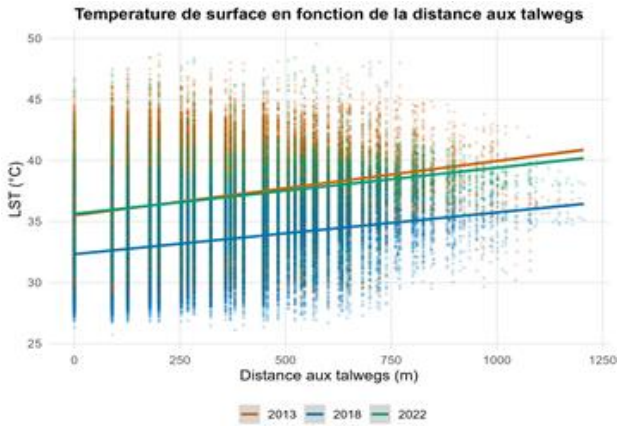


Figure 7: Relations entre la distance aux talwegs et la LST pour les trois dates d'étude

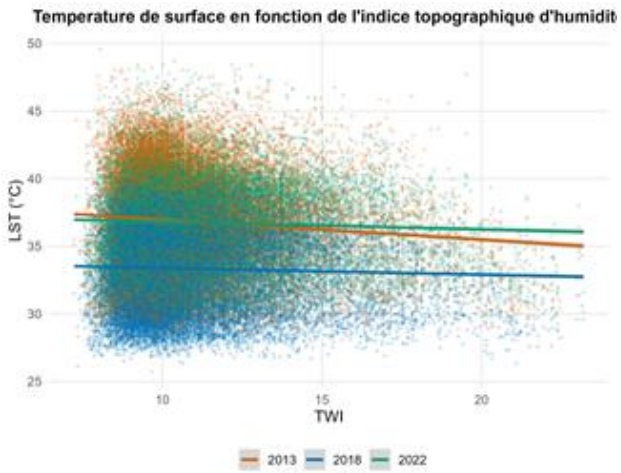


Figure 8: Relations entre le TWI et la LST pour les trois dates d'étude

ISSN: 1857-7881 (Print)
e-ISSN 1857-7431 (Online)

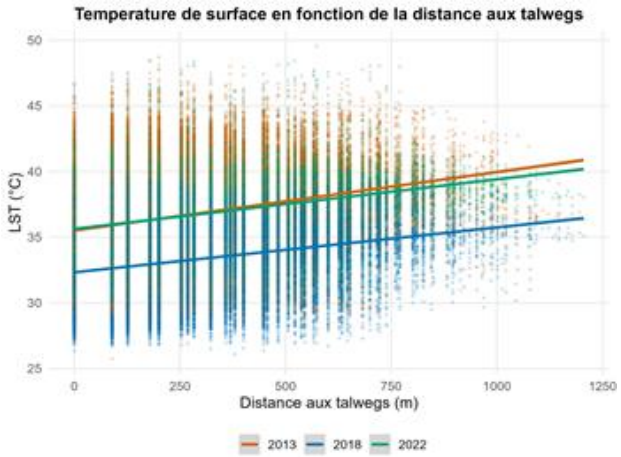


Figure 9: Relations entre la courbure et la LST pour les trois dates d'étude

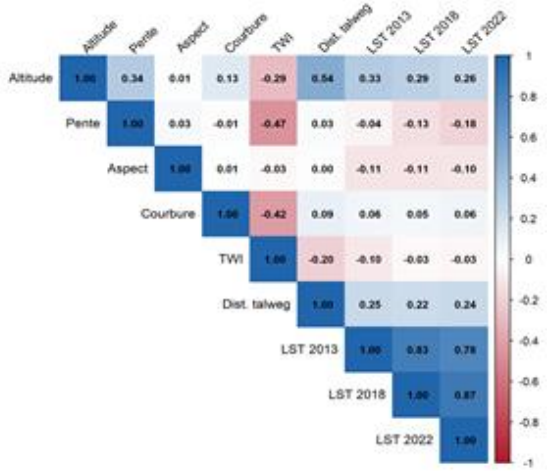


Figure 10: Matrice de corrélation de Pearson entre les variables géomorphologiques et la LST (2013, 2018, 2022), n = 30 724 points

L'analyse montre que la température de surface (LST) est principalement influencée par l'altitude et la distance aux talwegs, qui présentent des corrélations positives modérées. Ainsi, les plateaux élevés et urbanisés, tout comme les zones éloignées du réseau hydrographique, s'avèrent systématiquement plus chauds. À l'inverse, la pente exerce un effet rafraîchissant (corrélation négative) qui s'accentue au fil du temps. Le TWI (humidité topographique) affiche également une relation négative, mais celle-ci s'affaiblit fortement, suggérant un assèchement ou une anthropisation progressive des bas-fonds (drainage, urbanisation). Enfin, l'orientation des versants (*Aspect*) et la courbure du relief ont un impact stable mais négligeable, confirmant que la géométrie locale du terrain ne contrôle pas la

ISSN: 1857-7881 (Print)
e-ISSN 1857-7431 (Online)

LST. L'évolution temporelle entre 2013, 2018 et 2022 révèle ainsi un renforcement du rôle de la pente couplé à une diminution de l'effet de l'altitude. Toutefois, la modestie globale de ces coefficients indique que les seuls paramètres géomorphologiques restent insuffisants pour expliquer la totalité de la distribution spatiale de la LST.

3.4. Résultats de la régression OLS

Les modèles de régression linéaire multiple OLS ajustés pour les trois années d'étude produisent des coefficients tous statistiquement significatifs au seuil $p < 0,001$ (Tableau 5). Les coefficients de détermination sont comparables entre les années : $R^2 = 0,189$ en 2013, $R^2 = 0,180$ en 2018 et $R^2 = 0,189$ en 2022.

Tableau 5 : Coefficients de régression OLS pour les trois années d'étude (tous significatifs à $p < 0,001$)

Variable	2013	2018	2022
Altitude	+0,0227	+0,0189	+0,0168
Pente	−0,1497	−0,1592	−0,1949
Aspect_sin	+0,5418	+0,4390	+0,4328
Aspect_cos	+0,8678	+0,6011	+0,6211
Courbure	−0,3701	−0,2325	−0,2465
TWI	−0,2040	−0,1045	−0,1728
Distance aux talwegs	+0,0008	+0,0004	+0,0009
R^2	0,189	0,180	0,189

Source : Auteurs, 2026

Le coefficient de régression OLS de la pente connaît l'évolution la plus marquée : sa valeur absolue augmente d'environ 30 % entre 2013 ($\beta = -0,150$) et 2022 ($\beta = -0,195$), indiquant un renforcement progressif de l'effet rafraîchissant des versants sur la LST. Cette tendance est également observée dans les coefficients de corrélation simple de Pearson, où r passe de -0,044 à -0,181 sur la même période. Ces R^2 globalement modestes (0,180 à 0,189) reflètent la limite inhérente d'un modèle global appliqué à des données spatialement autocorrélées, comme le confirme le test de Moran's I sur les résidus ($I \approx 0,83–0,87$, $p < 0,001$).

3.4.1. Autocorrélation spatiale des résidus — Test de Moran's I

Le test de Moran's I global appliqué aux résidus des trois modèles OLS révèle une autocorrélation spatiale très forte et hautement significative (Tableau 6).

Tableau 6 : Résultats du test de Moran's I sur les résidus OLS (k = 8 plus proches voisins, style "W")

Année	Moran's I	Z(écart-type)	P-valeur
2013	0,846	297,82	$< 2,2 \times 10^{-16}$
2018	0,874	307,51	$< 2,2 \times 10^{-16}$
2022	0,832	292,95	$< 2,2 \times 10^{-16}$

Source : Auteurs, 2026

ISSN: 1857-7881 (Print)
e-ISSN 1857-7431 (Online)

Des valeurs de Moran's I comprises entre 0,832 et 0,874 selon les années ($p < 2{,}2 \times 10^{-16}$ pour les 3 modèles) indiquent que les résidus du modèle OLS forment des agrégats spatiaux très prononcés. Ce résultat invalide l'hypothèse d'indépendance des résidus sous-jacente à l'OLS et justifie formellement le recours à la GWR.

3.5. Résultats de la régression GWR

3.5.1. Amélioration du pouvoir explicatif

L'application de la GWR sur un sous-échantillon de 5 000 points (kernel bisquare adaptatif, bw = 70 à 77 voisins selon l'année) produit une amélioration spectaculaire du pouvoir explicatif par rapport à l'OLS calculé sur le même échantillon (Tableau 7).

Tableau 7 : Comparaison des R^2 OLS et GWR pour les trois années d'étude.

Année	R^2 OLS	R^2 GWR	Gain	Bandwidth GWR (voisins)
2013	0,220	0,836	+0,616	77
2018	0,205	0,879	+0,675	74
2022	0,206	0,835	+0,629	70

Source : Auteurs, 2026

Ce gain de R^2 confirme que les relations entre les paramètres géomorphologiques et la LST sont fortement non-stationnaires dans l'espace. Il convient néanmoins de noter que ce R^2 GWR élevé reflète en partie la grande flexibilité locale du modèle (nombre effectif de paramètres estimés entre 1 539 et 1 667 selon l'année, soit environ 31 à 33 % des 5 000 points de l'échantillon) et ne constitue pas un pouvoir prédictif universel comparable à un R^2 global.

3.5.2. Hétérogénéité spatiale des coefficients locaux

L'intérêt principal de la GWR réside dans la cartographie des coefficients locaux, qui révèle la variabilité spatiale de l'influence de chaque paramètre géomorphologique sur la LST (Tableau 8).

Tableau 8 : Plage des coefficients locaux GWR pour la pente, année 2013 (n = 5 000 points)

Variable	Minimum local	Maximum local	1er quartile	Médiane	3e quartile
Pente	−0,749	+ 0,754	−0,227	−0,122	0,014

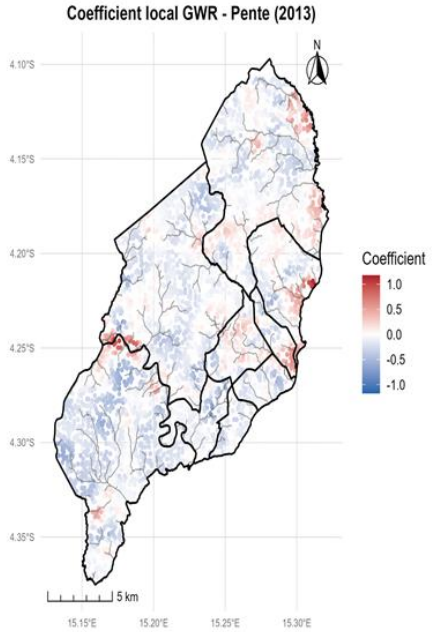
Source : Auteurs, 2026

Les cartes des coefficients locaux GWR révèlent une forte hétérogénéité spatiale de l'influence du relief sur la LST(figures 11, 12, 13, 14, 15, 16, 17).. La pente présente une variabilité marquée (coefficients entre −0,749 et +0,754 en 2013), mais son effet rafraîchissant domine largement (médiane = −0,122), surtout au sud-ouest et centre-sud grâce à la ventilation topographique. Des inversions positives apparaissent toutefois localement à l'est. Pour le TWI, les coefficients négatifs se concentrent dans les fonds de vallée, confirmant l'apport rafraîchissant de l'humidité, tandis que les rares

ISSN: 1857-7881 (Print)
e-ISSN 1857-7431 (Online)

valeurs positives indiquent que l'anthropisation surpasse localement cet effet. La distance aux talwegs affiche des coefficients positifs sur les plateaux et interfluves centraux : l'éloignement du réseau hydrographique augmente la LST, prouvant que les talwegs agissent comme des couloirs de fraîcheur. Enfin, l'altitude et la courbure montrent des impacts plus fragmentés.

Figure 11: Coefficients locaux GWR de la variable Pente sur la LST en 2013



Palette divergente : bleu = effet rafraîchissant, rouge = effet réchauffant, blanc = effet neutre

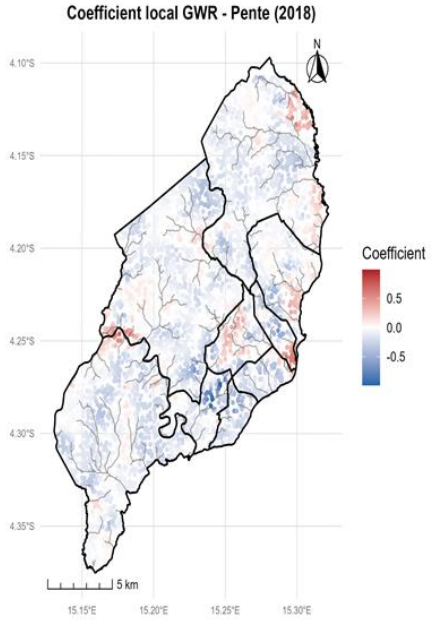


Figure 12: Coefficients locaux GWR de la variable Pente sur la LST en 2018

ISSN: 1857-7881 (Print)
e-ISSN 1857-7431 (Online)

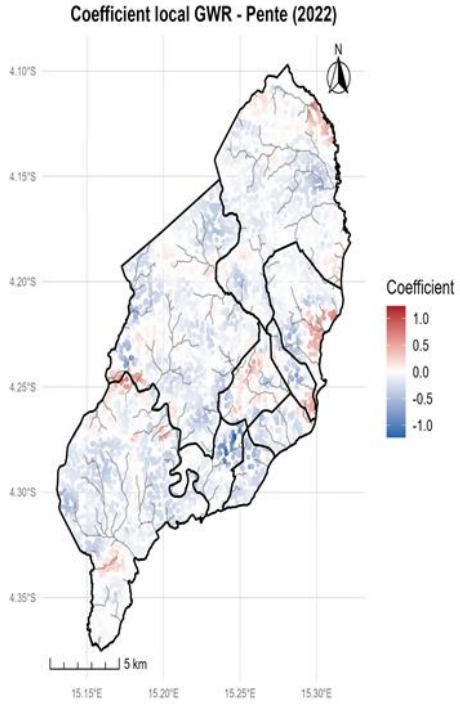


Figure 13: Coefficients locaux GWR de la variable Pente sur la LST en 2022

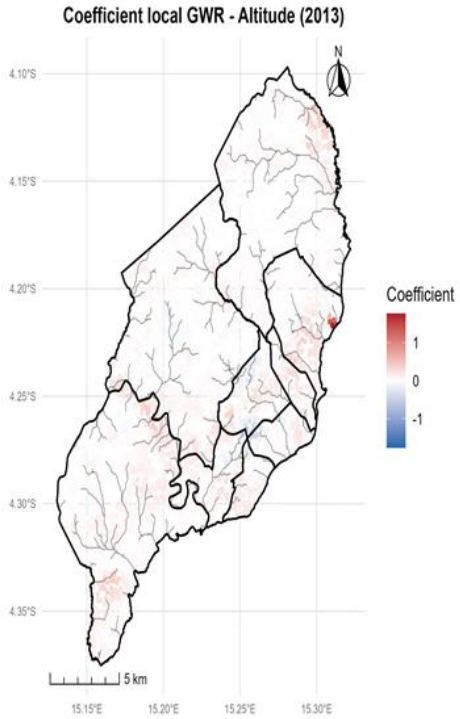


Figure 14: Coefficients locaux GWR de la Distance aux talwegs sur la LST en 2013

ISSN: 1857-7881 (Print)
e-ISSN 1857-7431 (Online)

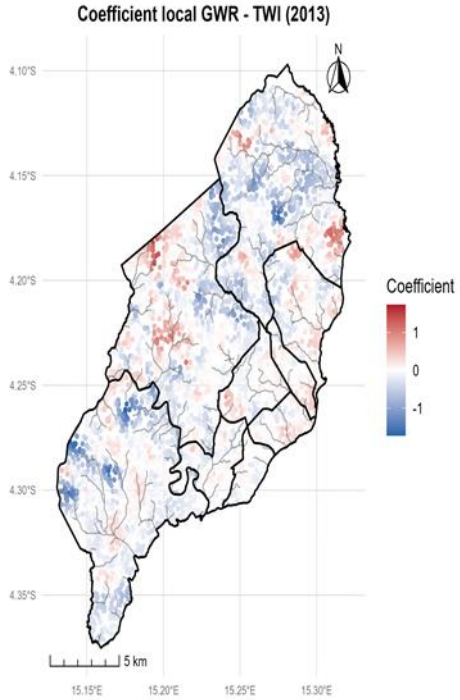


Figure 15: Coefficients locaux GWR du TWI sur la LST en 2013

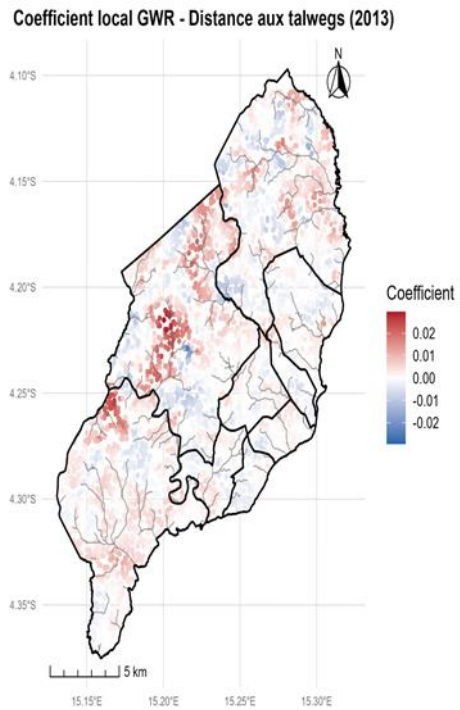


Figure 16: Coefficients locaux GWR de la Distance aux talwegs sur la LST en 2013

ISSN: 1857-7881 (Print)
e-ISSN 1857-7431 (Online)

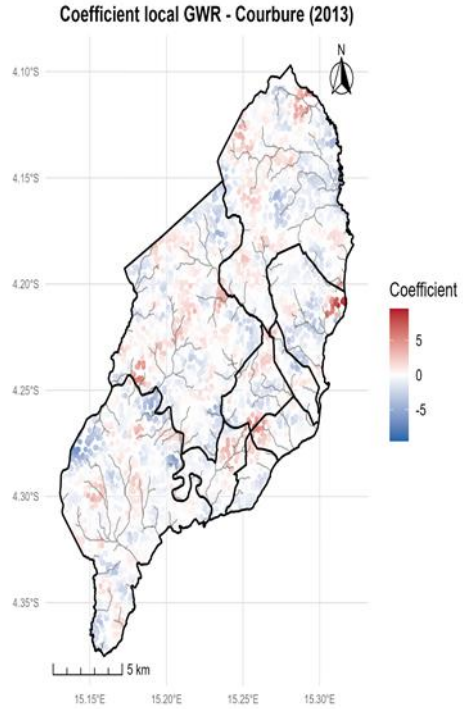


Figure 17: Coefficients locaux GWR de la Courbure sur la LST en 2013

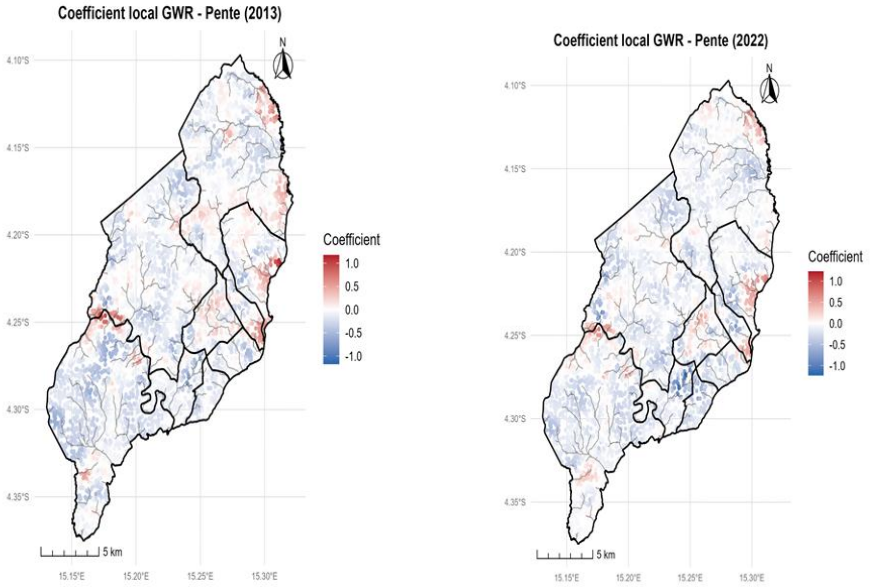


Figure 18 : Évolution des coefficients locaux GWR de la Pente entre 2013 (gauche) et 2022 (droite)

ISSN: 1857-7881 (Print)
e-ISSN 1857-7431 (Online)

3.6. Évolution diachronique de l'influence géomorphologique (2013–2022)

La comparaison des coefficients GWR entre 2013 et 2022 met en évidence plusieurs tendances diachroniques significatives. La plus marquée concerne la pente : le renforcement de son coefficient OLS global se traduit spatialement par une extension des zones à coefficients GWR négatifs entre 2013 et 2022 (Figure 18), suggérant que l'effet rafraîchissant des versants est de plus en plus perceptible à mesure que les plateaux plats, thermiquement plus chauds, se densifient.

4.Discussion

4.1. Interprétation des relations dominantes : pente, distance aux talwegs et altitude

Les résultats de cette étude confirment l'hypothèse selon laquelle, les paramètres géomorphologiques exercent une influence statistiquement significative sur la distribution spatiale de la LST à Brazzaville pour les trois années d'étude. Parmi les six variables testées, la pente, la distance aux talwegs et l'altitude se distinguent comme les déterminants géomorphologiques les plus structurants de la LST. La relation négative entre la pente et la LST croissante sur la période (de $r = -0{,}044$ en 2013 à $r = -0{,}181$ en 2022, coefficient OLS passant de $-0{,}150$ à $-0{,}195$) indique que les versants escarpés présentent systématiquement des températures de surface inférieures à celles des zones planes. Ce résultat s'explique par plusieurs mécanismes physiques complémentaires. D'une part, les versants favorisent le drainage gravitaire des eaux de ruissellement, limitant la rétention d'humidité en surface et réduisant l'énergie disponible pour le réchauffement radiatif direct. D'autre part, et surtout dans le contexte brazzavillois, les versants constituent des espaces historiquement moins urbanisés en raison de leur contrainte morphologique : leur faible taux d'imperméabilisation maintient une capacité d'évapotranspiration supérieure à celle des plateaux densément bâtis. Cette interprétation rejoint les conclusions de Mobio et al. (2017) sur Abidjan, qui ont montré que les zones de bas-fonds et de versants moins anthropisés présentent des températures de surface significativement inférieures à celles des plateaux urbanisés de la métropole ivoirienne. Ces travaux soulignent que les paramètres topographiques sont capables d'expliquer de manière indépendante une part significative de la variance de la LST dans les zones à relief complexe, ce que nos résultats confirment pour Brazzaville. La relation positive et stable entre la distance aux talwegs et la LST ($r \approx +0{,}22$ à $+0{,}25$ sur les trois années) traduit le rôle de corridors de régulation thermique joué par le réseau hydrographique urbain. Le TWI, en combinant la surface contributive amont et la pente locale, modélise les zones d'accumulation potentielle de l'eau et d'humidité du sol, et les vallées de talwegs constituent

ISSN: 1857-7881 (Print)
e-ISSN 1857-7431 (Online)

précisément ces zones à fort TWI où l'évaporation et l'évapotranspiration maintiennent des températures de surface plus basses. Plus un point est éloigné de ces axes humides, plus il est exposé à des processus de réchauffement radiatif non atténués par l'humidité. La relation positive entre l'altitude et la LST contre-intuitive par rapport au gradient thermique atmosphérique vertical classique s'explique par la coïncidence structurelle entre les zones topographiquement élevées (plateaux) et les zones de forte densité du bâti à Brazzaville. Les arrondissements de Poto-Poto, Moungali, Ouenzé et Talangaï, qui occupent les plateaux à plus de 320 m d'altitude, concentrent l'essentiel des surfaces imperméabilisées de la ville et produisent les LST les plus élevées. Ce phénomène illustre bien la médiation de l'urbanisation dans la relation géomorphologie-LST : l'altitude n'agit pas directement sur la LST par un effet thermodynamique atmosphérique, mais indirectement en conditionnant la localisation préférentielle de l'urbanisation dense.

4.2. Apport de la GWR : hétérogénéité spatiale de l'influence géomorphologique

L'un des apports majeurs de cette étude réside dans la démonstration de la non-stationnarité spatiale des relations entre géomorphologie et LST à Brazzaville. Le passage de l'OLS global ($R^2 \approx 0{,}19$) à la GWR locale ($R^2 \approx 0{,}84$–$0{,}88$) constitue un bond considérable en termes de pouvoir explicatif, qui ne saurait s'expliquer par la seule flexibilité mathématique du modèle. Contrairement au modèle OLS, qui suppose la stationnarité spatiale et des relations uniformes sur l'ensemble de la zone d'étude, la GWR est particulièrement efficace pour traiter la non-stationnarité et la dépendance spatiale (Fotheringham, Brunsdon & Charlton, 2002). La variation marquée des coefficients locaux de la pente (de −0,749 à +0,754 en 2013) est particulièrement révélatrice. Elle signifie que l'effet d'un versant sur la LST n'est pas un invariant géomorphologique mais dépend du contexte local d'urbanisation : un versant situé dans un secteur peu densifié, encore partiellement végétalisé, exercera un effet rafraîchissant prononcé, tandis qu'un versant de même inclinaison mais localisé dans un quartier d'auto-construction dense (comme dans certains secteurs est et nord-est de Brazzaville) pourra au contraire enregistrer des LST élevées. Cette hétérogénéité spatiale est également documentée pour le TWI : son effet rafraîchissant est maximal dans les vallées de la Tsiémé, de la Mfoa et du Djoué, et s'amenuise progressivement vers les interfluves, confirmant que le gradient d'humidité topographique structure bien la distribution thermique du territoire mais de manière spatialement variable selon le degré de perturbation anthropique des bas-fonds. Cette convergence entre des villes d'Afrique de l'Ouest côtière (Sekondi-Takoradi, Ghana) et Brazzaville en Afrique centrale

ISSN: 1857-7881 (Print)
e-ISSN 1857-7431 (Online)

équatoriale suggère que la non-stationnarité spatiale des déterminants de la LST constitue une propriété générale des espaces urbains africains en croissance rapide, indépendamment des contextes géomorphologiques locaux.

4.3. Confrontation avec la littérature

Les R^2 OLS obtenus dans cette étude (≈ 0,19) sont modestes comparés à ceux rapportés dans des études intégrant simultanément des variables d'occupation du sol (NDVI, NDBI, densité du bâti), qui atteignent généralement 0,40 à 0,65. Cette différence est attendue et ne constitue pas une faiblesse de notre approche : notre étude isole volontairement les seuls paramètres géomorphologiques, sans introduire de variables d'occupation du sol, ce qui permet d'estimer la part d'explication propre au relief, indépendamment de la couverture du sol. L'étude menée à Addis-Abeba par Tassew et al. (2024) a comparé l'efficacité de la régression spatiale et de la GWR pour modéliser l'association entre la LST et ses facteurs explicatifs, incluant l'élévation. Les résultats ont confirmé la supériorité de la GWR sur l'OLS en termes d'ajustement spatial et d'autocorrélation des résidus, résultat que nous reproduisons pour Brazzaville avec une amélioration encore plus marquée du R^2 (de 0,18–0,19 en OLS à 0,84–0,88 en GWR), ce qui s'explique par la topographie particulièrement contrastée de Brazzaville comparée au plateau relativement homogène d'Addis-Abeba. La forte autocorrélation spatiale des résidus OLS (Moran's I ≈ 0,83–0,87) confirme que les processus thermiques urbains présentent une organisation spatiale à plusieurs échelles imbriquées, que le modèle global ne peut capturer. À Brazzaville, c'est la combinaison entre la morphologie des plateaux urbanisés et les vallées de talwegs qui génère cette structure spatiale des résidus. Par rapport à l'étude de Souamy et al. (2022) sur Pointe-Noire, notre travail apporte une complémentarité notable : là où cette étude pionnière au Congo a démontré l'influence des facteurs anthropiques (occupation du sol, densité du bâti) sur la LST d'une ville côtière congolaise au relief quasi-plat, notre étude démontre que, dans une ville à topographie contrastée comme Brazzaville, les facteurs géomorphologiques constituent un déterminant structurant autonome de la distribution thermique, irréductible à la seule occupation du sol.

4.4. Lien avec le contexte d'urbanisation de Brazzaville

L'évolution diachronique des coefficients entre 2013 et 2022 notamment le renforcement de l'effet de la pente (−30 % sur le coefficient OLS) doit être interprétée à la lumière de la dynamique d'urbanisation brazzavilloise sur cette période. La croissance démographique rapide de la ville (~40 % en moins d'une décennie) s'est traduite par une densification préférentielle des plateaux centraux déjà urbanisés et par une extension périphérique sur les versants et les bas-fonds, en particulier dans les

ISSN: 1857-7881 (Print)
e-ISSN 1857-7431 (Online)

arrondissements de Madibou et Djiri. Ce processus a pour effet d'amplifier le contraste thermique entre les plateaux densément imperméabilisés (LST élevée) et les versants encore partiellement naturels (LST plus basse), renforçant mécaniquement la corrélation négative entre pente et LST. Il convient cependant d'interpréter avec précaution ces évolutions temporelles de coefficients : la géomorphologie conditionne en partie où l'on construit, et les pentes abruptes ont historiquement été moins urbanisées non par choix climatique mais par contrainte foncière et risque érosif (M'Bouka Milandou & Sitou, 2017, 2018). Il en résulte une confusion partielle entre l'effet direct de la pente sur la LST (via les processus radiatifs et hydrologiques) et l'effet indirect de la pente sur la LST (via le type d'occupation du sol qu'elle détermine). Démêler ces deux effets nécessiterait l'introduction d'une variable d'occupation du sol dans le modèle, ce qui constitue une perspective directe de prolongement de ce travail.

4.5. Limites méthodologiques

Saisonnalité et comparabilité inter-annuelle. Les trois images retenues correspondent toutes à la grande saison sèche (juin-juillet), mais avec des décalages calendaires mineurs (28 juillet 2013, 8 juin 2018, 11 juin 2022). Ces décalages peuvent introduire des biais sur les valeurs absolues de LST entre années. L'analyse des tendances diachroniques doit donc privilégier les structures spatiales relatives et les évolutions de coefficients plutôt que les comparaisons de valeurs absolues de LST entre années.

Résolution spatiale du MNT. La résolution du MNT SRTM (30 m) limite la détection des micro-variations topographiques à une échelle inférieure à la parcelle (talwegs secondaires, micro-creux, terrasses). L'utilisation d'un MNT LiDAR à haute résolution (1–2 m), encore indisponible pour Brazzaville, permettrait de capturer ces variations infra-métriques.

Sous-échantillonnage GWR. La GWR a été appliquée sur un sous-échantillon de 5 000 points set.seed = 123) sur les 30 724 disponibles. Le R^2 GWR élevé (0,84–0,88) reflète par ailleurs en partie la grande flexibilité locale du modèle (nombre effectif de paramètres estimés ≈ 1 539 et 1 667 selon l'année, soit environ 31 à 33 % des 5 000 points de l'échantillon.

Absence de variables d'occupation du sol. Le choix d'isoler les seuls paramètres géomorphologiques constitue l'originalité méthodologique de cette étude, mais il implique que la part de variance expliquée (R^2 OLS ≈ 0,19) ne représente qu'une fraction de l'explication totale de la LST.

Zones d'eau. Les surfaces d'eau permanentes (fleuve Congo, zones humides) ont été structurellement exclues de l'analyse en raison de l'impossibilité de calculer la LST par la méthode NDVI-émissivité sur ces surfaces. Cette exclusion mineure (~5 % de la superficie totale) ne compromet pas la représentativité spatiale des résultats.

ISSN: 1857-7881 (Print)
e-ISSN 1857-7431 (Online)

Conclusion

Cette étude a analysé l'influence des paramètres géomorphologiques sur la température de surface (LST) à Brazzaville entre 2013 et 2022. En combinant les données SRTM, Landsat 8 et le modèle GWR, les résultats montrent que le relief détermine structurellement un cinquième de la variance spatiale de la LST ($R^2 \approx 0{,}19$ en modèle OLS global), indépendamment de l'occupation du sol. La pente, la distance aux talwegs et l'altitude s'imposent comme les déterminants dominants. L'approche GWR révèle que cette influence est spatialement hétérogène et s'intensifie avec le temps, traduisant un contraste thermique accru entre les versants préservés et les plateaux densifiés. Ces conclusions appellent à préserver les corridors de fraîcheur topographiques dans la planification urbaine. Enfin, la suite logique de ce travail sera d'intégrer des variables anthropiques (NDVI, NDBI) pour isoler précisément la part du relief de celle de l'urbanisation.

Conflit d'intérêts : Les auteurs n'ont signalé aucun conflit d'intérêts.

Disponibilité des données : Toutes les données sont incluses dans le contenu de l'article.

Déclaration de financement : Les auteurs n'ont obtenu aucun financement pour cette recherche.

References:

1. Anselin, L., 1995. Local indicators of spatial association – LISA. Geographical Analysis, 27(2), pp. 93–115.
2. Beven, K. J. & Kirkby, M. J., 1979. A physically-based variable contributing area model of basin hydrology. Hydrological Sciences Bulletin, 24(1), pp. 43–69.
3. Boudzoumou F. (1986) - The West-Congolian chain and its foreland in Congo : Relation with Mayombien; sedimentology of late Proterozoic age sequences. Thesis, University of Law, Economics and Sciences of AIX-Marseille, Faculty of Sciences and Technics of St-Jérôme, 220 p.
4. Dadet P. (1969) - Explanatory note of the geological map of Republic of Congo-Brazzaville at 1/50000 (zone between the parallels 2nd and 5th of the South). BRGM thesis, Orléans, 103 p.
5. Farr, T. G. et al., 2007- The Shuttle Radar Topography Mission. Reviews of Geophysics, 45, RG2004.
6. Fotheringham, A. S., Brunsdon, C. & Charlton, M., 2002. Geographically Weighted Regression: The Analysis of Spatially Varying Relationships. Wiley, Chichester.

ISSN: 1857-7881 (Print)
e-ISSN 1857-7431 (Online)

7. Guo, G. et al., 2015. Impacts of urban biophysical composition on land surface temperature in urban heat island clusters. Landscape and Urban Planning, 135, pp. 1–10.
8. Hu, L. & Brunsell, N. A., 2018. A new perspective to assess the urban heat island through remotely sensed quantitative indicators: a case study in New York City. Journal of Applied Meteorology and Climatology, 52(5), pp. 1099–1116.
9. Institut National de la Statistique (INS-Congo), 2023. Cinquième Recensement Général de la Population et de l'Habitation (RGPH-5). République du Congo, Brazzaville.
10. Kinga-Mounzeo (1986) - Transport particulaire actuel du fleuve Congo et de quelques affluents; enregistrement quaternaire. Thèse de Doctorat de géologie, Univ de Strasbourg, 246 p.
11. Kombo-Kissangou, R. J., Sitou, L. & M'Bouka Milandou, I., 2018. Dynamique de l'érosion hydrique dans les quartiers Mansimou et Mayanga au sud de Brazzaville (Congo) : analyse de la perméabilité et de la texture des sols, cubage et cartographie des ravinements. Revue Marocaine de Géomorphologie, N°2, pp. 36–54.
12. Louembe, D. & Tchicaya, J. A., 1993. Les problèmes de dégradation des sites urbains par l'érosion hydrique au Sud-Congo. PNAE-Congo Brazzaville, 115 p.
13. Lu, B., Harris, P., Charlton, M. & Brunsdon, C., 2014. The GWmodel R package: further topics for exploring spatial heterogeneity using geographically weighted models. Geo-spatial Information Science, 17(2), pp. 85–101.
14. M'bouka Milandou I.A.W., 2025, Dynamique du bassin versant de la *Loua* au sud-ouest de Brazzaville de 2001 à 2023 : quantification des changements de l'occupation du sol et risques géomorphologiques (République du Congo), Revue Belge, Volume 12 : Numéro 134, ISSN: 2593-9920, www.doi.org/10.5281/zenodo.18435445; pp.1-28
15. M'Bouka Milandou, I. A. W. & Sitou, L., 2017. Degradation of Loumou Track through Ruts in Brazzaville Western Periphery: Forms Characterization, Traffic and Rainfall Aggressiveness Analysis (Republic of Congo). International Journal of Basic Sciences & Applied Research, Vol. 6(4), pp. 291–302.
16. M'Bouka Milandou, I. A. W., 2019. Étude de la dégradation des routes en terre, par l'érosion hydrique, en milieu rural : cas de la Sous-préfecture de Goma tsé-tsé (sud du Congo). Thèse de doctorat, Université Marien Ngouabi, Brazzaville, Congo.
17. Malonga G. N., 2025, Télédétection et étude de l'occupation du sol et ses impacts environnementaux à Madibou (Brazzaville, République du Congo), Mémoire de Master en Technologie de l'Information

ISSN: 1857-7881 (Print)
e-ISSN 1857-7431 (Online)

Géospatiale et Télédétection, Université DENIS SASSOU-N'GUESSO, Brazzaville, Congo, 89 p.
18. Maniaka F.W., Ibiassi Mahoungou G., Itoua T.R., Dziengue F.M., 2024, Apport d'une image satellite landsat 7 dans l'identification des îlots de chaleur urbain et leurs causes à Brazzaville (République du Congo), Revue Géovision- Revue du Laboratoire de Démographie et des Dynamiques Spatiales, Volume 1 N° 11, pp.525-540
19. Massouangui-Kifouala, M., 2022. Réchauffement climatique et ambiance biothermique à Brazzaville (République du Congo). Revue Internationale du Chercheur, Volume 3, Numéro 4, pp. 323–341.
20. Mayima, B. A., Ditengo, C. & Goma Boumba, H. B., 2018. Croissance spatiale et phénomènes morpho-climatiques dans la ville de Brazzaville au Congo. Regardsuds, numéro spécial.
21. Mayima, B. A., M'Bouka Milandou, I. A. W. & Sitou, L., 2019. Occupation des sols et dégradation environnementale par l'érosion hydrique dans la commune urbaine de Kintélé (République du Congo) : Diagnostic et proposition de solutions de lutte. Revue Marocaine de Géomorphologie, N°3, pp. 93–111.
22. Mobio, A. B., Dré, K. F., Kouamé, A. K. D., Djagoua, M. E. V. & Affian, K., 2017. Contribution de la télédétection à l'étude de la distribution spatiale de la température en fonction du relief et du mode d'occupation du sol : cas de la ville d'Abidjan (Côte d'Ivoire). Journal of Engineering Science and Invention, Volume 6, Issue 12, pp. 48–55.
23. Ngatse, R., Sitou, L. & M'Bouka Milandou, I., 2017. L'érosion hydrique dans le bassin versant de la Djiri au nord de Brazzaville (République du Congo) : analyse et quantification. Revue Marocaine de Géomorphologie, N°1 (2016–2017), Rabat, Maroc, pp. 95–112.
24. Nzila, J. D. D., Watha-Ndoudy, N., Kaya-Mabiala, D., Mboungou-Nsompi, P., Louembe, D., Kimpouni, V. & Samba-Kimbata, M. J., 2020. Current Dynamics of Hydric Erosion in the Kingouari, Mfilou and Djoué Watersheds in the Southwestern Part of Brazzaville City (Congo). Earth Sciences, Vol. 9, No. 5, pp. 201–209.
25. Oke, T. R., 1982. The energetic basis of the urban heat island. Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society, 108(455), pp. 1–24.
26. Peng, S. et al., 2012. Surface urban heat island across 419 global big cities. Environmental Science & Technology, 46(2), pp. 696–703.
27. Samba, G. & Nganga, D., 2014. Minimum and Maximum Temperature Trends in Congo-Brazzaville: 1932–2010. Atmospheric and Climate Sciences, 4, pp. 404–430.
28. Samba, G., 2019. Le climat du Congo-Brazzaville. Éditions L'Harmattan, Paris.

ISSN: 1857-7881 (Print)
e-ISSN 1857-7431 (Online)

29. Samba-Kimbata, M. J., 1978. Le climat du Bas-Congo. Thèse de doctorat de 3e cycle, Université de Bourgogne, Dijon, 280 p.
30. Sitou, L. & Mayima, B. A., 2013. Érosion hydrique en milieu urbain : cas du plateau de Makélékélé au sud de Brazzaville, Congo. Annales de l'Université de Ngaoundéré, Cahier de l'IGRAC, 6(9), pp. 119–135.
31. Souamy, L. E. J., Ibiassi Mahoungou, G. & Maniaka, F. W., 2022. Analyse de l'influence des facteurs anthropiques sur les températures de surface de Pointe-Noire (République du Congo). Revue Espace Géographique et Société Marocaine, mars 2022.
32. Souamy, L.E.J., 2024, La sur-urbanisation de la ville de Dolisie au Congo Brazzaville de 1988 à 2022 et son influence sur la spatialisation de l'îlot de chaleur urbain (ICU), Revue Géovision - Revue du Laboratoire de Démographie et des Dynamiques Spatiales, Volume 1, Issue 11, pp.188-196
33. Souamy-Legrand, J. E., Mayima, B. A., Sitou, L. & Kombo-Kissangou, R. J., 2025. Apport de télédétection pour l'étude de l'évolution et la variation du couvert végétal dans la ville de Brazzaville depuis 1979 jusqu'à 2019. Revue d'Analyse des Vulnérabilités Socio-Environnementales, Numéro 5, Avril 2025, pp. 287–302.
34. Tassew, A. et al., 2024. Exploring urban land surface temperature using spatial modelling techniques: a case study of Addis Ababa city, Ethiopia. Scientific Reports, 14, Article 6042.
35. Toli, G. & Samba, G., s.d. Aperçu sur le climat urbain de Brazzaville entre la fin du XXe siècle et le début du XXIe siècle. Centre de Recherches et d'Études sur l'Environnement (CREE), École Normale Supérieure, Université Marien Ngouabi, Brazzaville, République du Congo.
36. United Nations, 2022. World Urbanization Prospects: The 2022 Revision. UN DESA, New York.
37. Yuan, F. & Bauer, M. E., 2007. Comparison of impervious surface area and normalized difference vegetation index as indicators of surface urban heat island effects in Landsat imagery. Remote Sensing of Environment, 106(3), pp. 375–386.
38. Zhou, D. et al., 2025. Disentangling urban heat island signals from natural topographic effects in rapidly urbanizing regions. Nature Cities, 2, pp. 112–124.