

Analyse Spatio-Temporelle de quelques paramètres climatiques de 1980 à 2021 dans le Triangle Ville de Bukavu-Partie Nord du Territoire de Kabare-PNKB au Sud Kivu en RDC

Muhaya Ntamusimwa Valery¹, Kabasele Yenga-Yenga Albert²,

Minga Milolo Stéphane³, Katcho Karume Célestin⁴,

Tambala Kongbo Théophile⁵, Kipanga Uredi Roger⁶,

Ecole De Télécommunication Et De Télédétection Spatiale (ETS), Université Pédagogique Nationale (UPN) Et Institut Géographique Du Congo (IGC), Kinshasa, RD. Congo

Département De Physique Et Sciences Appliquées, Laboratoire De Télédétection Spatiale, Université Pédagogique Nationale (UPN), Kinshasa, RD. Congo

Université Evangélique En Afrique (UEA), Bukavu, RD. Congo

Centre De Recherche En Sciences Naturelles (CRSN-Lwiro), Lwiro, RD. Congo

Institut Géographique Du Congo (IGC), Station De Bukavu, Bukavu, RD. Congo

Résumé

Contexte : Une croissance démographique rapide se fait observer dans la ville de Bukavu. Cette démographie a des implications sérieuses sur l'occupation anarchique du sol, exacerbant ainsi les problèmes fonciers dans la ville de Bukavu. La proximité de la ville, dont le besoin en ressources énergétiques et alimentaires augmente d'une part, dans la partie Nord du Le milieu urbain est à l'origine de processus radiatifs, thermiques, dynamiques et hydriques qui modifient le climat de la ville. La couche superficielle du sol, avec la présence plus ou moins importante de surfaces végétales ou d'eau, les activités humaines qui induisent des rejets de chaleur et de polluants, et la structure urbaine, avec des matériaux de construction et une certaine morphologie du cadre bâti, sont les principaux facteurs de cette modification.

La ville de Bukavu et la partie nord du territoire de Kabare sont des grandes agglomérations qui se situent entre le Lac Kivu une partie du Parc National de Kahuzi-Biega (PNKB). La présence de ces deux entités pourrait être à l'origine de la modification du climat et de la perturbation de la flore et faune du PNKB.

Les résultats montrent qu'il y a une évolution naturelle du climat dans le triangle Bukavu-Kabare-PNKB pendant les 41 ans. Les moyennes de températures maximales et minimales ont montré quelques différences entre celle de Bukavu et Kabare de l'ordre de 1.08°C et 0.4°C respectivement. Les PNKB est resté très humide même pendant la saison sèche. Kabare s'est avéré plus chaud que Bukavu. Un seul modèle de régression valide avec les coefficients stables et fiable est retenu dans ce travail.

Ce travail a permis de montrer que les activités humaines dans la ville de Bukavu et le territoire de Kabare n'ont pas eu des impacts notables sur le climat d'une manière générale depuis plus de 41 ans. Le PNKB n'a pas aussi été très impacté de manière significative par ces deux entités.

Matériels et Méthodes

Ce travail vise à analyser l'évolution des paramètres climatiques (Températures maximales et minimales, les précipitations, les températures du sol et les évapotranspirations) sur une période de 1980 à 2021 ; à comparer et à trouver les corrélations entre ces paramètres pour la planification urbaine durable. Les diagrammes ombrothermiques, les analyses des anomalies climatiques et les analyses de variances par SPSS ont été utilisées pour observer les changements et les relations entre ces paramètres.

Résultats : Sur 41 ans, soit de 1980 à 2021, la population de la ville de Bukavu et celle du Territoire de Kabare est passée respectivement de 159.332 habitants à 1.00.461 et de 145.901 habitants à 510.110 habitants. Les précipitations annuelles fortes sont enregistrées dans le PNKB et faibles à Kabare. Les anomalies de température ont atteint les pics de +1.68 et 1.61 en 2008 et en 2019 respectivement. Il fait chaud à Kabare qu'à Bukavu : le gap de températures enregistré sur la période est de 1°C environ.

Conclusion : Cinq modèles ANOVA de bonne signification (p -value < 0.000) sont produits : trois (3) concernent la ville de Bukavu, un (1) le PNKB et le dernier (1) Kabare. En effet, la population de Kabare influe positivement sur celle de Bukavu où la température maximum en subit une influence négative.

La température maximum de Kabare subit une influence positive de celle de PNKB dont le couvert végétal souffre de la pression de la population de Kabare.

Mots clés : *paramètres climatiques, aménagement urbain, changement climatique, anomalies climatiques*

Date of Submission: 01-05-2025

Date of Acceptance: 10-05-2025

I. Introduction

Avec la croissance de l'urbanisation à l'échelle mondiale, son caractère inévitable ainsi que son influence sur le changement climatique justifie la nécessité de la ville durable et fait qu'elle est devenue aux centres des priorités du XXI^{ème} siècle. (PUCA, 2007). La transition urbaine africaine est aussi inédite par le contexte des enjeux climatiques et écologiques et oblige à trouver des solutions originales en termes de gouvernance, de modèle d'aménagement et de financement. (Brigitte Bariol et al, 2020).

Le changement climatique est devenu l'une des menaces environnementales les plus dévastatrices. Son impact sur la dégradation des terres cultivées devrait compromettre la sécurité alimentaire des ménages et la production intérieure brute de nombreux pays en développement (Rasul, 2021 ; Fan et Rue, 2020 ; Harvey et al., 2018).

En République démocratique du Congo (RDC), les réseaux météorologiques et les enregistrements d'observations à travers la RDC sont rares, ce qui pose un défi aux projections des précipitations futures et des températures (Banque mondiale, 2021).

Souvent présentées comme des lieux où se concentrent la majorité des émissions de gaz à effet de serre, les villes sont également en partie à l'origine de modifications climatiques mondiales. Ce changement climatique devrait, selon toutes vraisemblances, accroître la fréquence des événements extrêmes tels que les vagues de chaleur selon le groupe d'experts intergouvernemental sur l'évolution du climat (GIEC). Le climat urbain a pour effet principal de limiter la baisse des températures durant la nuit, diminution qui, lors des vagues de chaleur, devient vitale pour permettre aux organismes humains une récupération des fortes chaleurs du jour. A cela s'ajoute l'influence éventuelle des changements climatiques globaux sur l'intensité de l'îlot de chaleur dont nous ne mesurons pas encore toute l'importance (Roaf et al., 2005. Best et Betts, 2004. Rosenzweig et al., 2005).

Les villes sont fortement touchées par le changement climatique en raison des impacts sanitaires, environnementaux, sociaux et économiques qui en découlent (GIEC, 2014 ; GIEC, 2023 ; Kromp-Kolb et al., 2014). Elles sont plus vulnérables aux phénomènes météorologiques extrêmes tels que les vagues de chaleur, les fortes précipitations, les tempêtes et les ouragans que les régions moins densément peuplées (Rawlins et al., 2015 ; Schütt et al., 2022 ; Labedens et al., 2018).

Les zones urbaines peuvent connaître des températures plus élevées que les zones rurales environnantes en raison de l'effet d'îlot de chaleur urbain (ICU) (Oke, 1967). Cet effet est principalement dû à la concentration de bâtiments, de routes et d'autres surfaces absorbant la chaleur, ce qui entraîne une augmentation des températures (Lemonsu et al., 2015). L'augmentation des températures mondiales due au changement climatique exacerbe cet effet, rendant les villes encore plus chaudes. Les températures plus élevées et les vagues de chaleur plus fréquentes attendues (Ulpiani et al., 2024) peuvent entraîner des maladies liées à la chaleur et exacerber les problèmes de qualité de l'air, en particulier dans les zones urbaines densément peuplées (Tomlinson et al., 2011). De tels changements ont des répercussions sur la santé, entraînant des dommages aux infrastructures et affectant la répartition économique (Heavyside et al., 2017 ; Martinich et Crimmins, 2019).

Les phénomènes météorologiques extrêmes et les fluctuations de température peuvent endommager des infrastructures essentielles telles que les routes, les ponts, les systèmes de transport public et les bâtiments (Markolf et al., 2019).

Les changements dans les signaux climatiques peuvent également conduire à une intensité accrue des épisodes de fortes précipitations qui peuvent entraîner des inondations plus fréquentes et plus graves dans les zones urbaines, ce qui peut par conséquent entraîner des glissements de terrain, des dommages aux infrastructures, des pannes d'électricité et des perturbations dans les systèmes de transport et de communication (par exemple, Stoffel et al., 2014 ; Altvater et al., 2011). Le changement climatique peut modifier les régimes de précipitations et d'évapotranspiration, entraînant des sécheresses et des pénuries d'eau dans certaines régions, comme c'est le cas en Europe centrale (Haslinger et al., 2023). Enfin et surtout, l'urbanisation et le changement climatique peuvent entraîner la destruction d'habitats et des changements dans les écosystèmes, ce qui se traduit par une perte de biodiversité et de services écosystémiques à l'intérieur et autour des villes (Brunner et Cozens, 2013 ; Verbeeck et al., 2011).

Ces dernières années, de nombreuses analyses climatiques urbaines ont été menées dans le monde entier dans le but de fournir des recommandations de planification pour le développement spatial et d'accroître la résilience climatique (Ren et al., 2012, Ngamsiriudom et Tanaka, 2023, Xu et al., 2020, Guerra et al., 2023, Zhang et al., 2024).

Dans le contexte des impacts du changement climatique, les risques résultent des interactions dynamiques entre les dangers liés au climat et l'exposition et la vulnérabilité du système humain ou écologique affecté à ces dangers. Le concept de risque tel qu'il est décrit dans les rapports du GIEC fournit un cadre utile aux décideurs pour faire face aux effets négatifs du changement climatique (GIEC, 2014).

L'urbanisation croissante et le changement climatique ont un impact direct sur la qualité de vie en milieu urbain. L'aménagement urbain doit intégrer une analyse approfondie des paramètres climatiques pour garantir des villes durables et résilientes. Toutefois, l'intégration efficace des données climatiques dans les processus d'urbanisme reste un défi majeur, notamment en raison de la variabilité des conditions climatiques locales, des phénomènes extrêmes (comme les vagues de chaleur ou les inondations), ainsi que des interactions complexes entre les éléments naturels et les infrastructures humaines (Xu et al., 2020, Guerra et al., 2023, Zhang et al., 2024).

Les paramètres climatiques essentiels à prendre en compte incluent la température, l'humidité, les précipitations, les vents, et l'ensoleillement. L'impact de ces paramètres sur la conception des espaces urbains doit être envisagé dans une optique de durabilité, de confort thermique et de gestion des risques liés au climat.

Le climat est un système dynamique et non linéaire, où les paramètres (température, précipitations, vent, etc.) interagissent de manière complexe. Cette interdépendance rend difficile l'isolement des effets d'un seul paramètre (Reghezza, 2023 ; Aggeri et Cartel, 2017). La variabilité naturelle du climat, influencée par des facteurs comme les cycles solaires ou les éruptions volcaniques, complique la distinction entre les changements naturels et ceux induits par l'homme ((Reghezza, 2023 ; Aggeri et Cartel, 2017). Les données climatiques historiques sont souvent incomplètes ou inexistantes, en particulier dans les régions peu instrumentées comme certaines zones d'Afrique ou d'Asie (Larif, et al., 2015, Lafond et Deboin, 2015). Les données provenant de différentes sources (stations météorologiques, satellites, modèles) présentent des résolutions spatiales et temporelles variées, ce qui peut entraîner des incohérences dans les analyses (Dahan et Guillemot, 2006, Reghezza, 2023).

Température maximale est la température la plus élevée enregistrée au cours d'une journée, généralement mesurée pendant l'après-midi lorsque le soleil est à son zénith. La température minimale est la température la plus basse enregistrée sur une journée, souvent observée tôt le matin, juste avant le lever du soleil (Guernouti et al., 2022 ; Gibelin et al., 2014). Ces températures permettent de caractériser les régimes climatiques locaux et de détecter des anomalies (par exemple, des vagues de chaleur ou des périodes de froid intense) (Borrossi, 2021 ; Fressoz et Locher, 2015). Les températures minimales sont cruciales pour prévenir les gelées, tandis que les températures maximales influencent l'évapotranspiration et la croissance des plantes (Malet et al., 2017). Les températures extrêmes (maximales élevées ou minimales très basses) peuvent avoir des impacts directs sur la santé, notamment en augmentant les risques de maladies cardiovasculaires ou respiratoires (Fressoz et Locher, 2015). Les températures maximales influencent la demande en électricité pour la climatisation, tandis que les températures minimales affectent le chauffage (Richard et al., 2014). Les vallées et les zones montagneuses peuvent connaître des écarts importants entre les températures maximales et minimales en raison de l'effet de drainage de l'air froid (Richard et al., 2014). Les zones urbaines, en raison de l'effet d'îlot de chaleur, ont souvent des températures minimales plus élevées que les zones rurales (Borrossi, 2021). Les températures maximales et minimales sont des paramètres fondamentaux pour comprendre et analyser les conditions météorologiques et climatiques. Leur suivi est essentiel pour anticiper les impacts sur l'environnement, l'agriculture et la société, en particulier dans un contexte de changement climatique.

Les précipitations annuelles représentent la quantité totale de pluie, neige, grêle ou autres formes d'eau qui tombent sur une zone donnée au cours d'une année. Elles sont un élément essentiel du cycle de l'eau et jouent un rôle crucial dans les écosystèmes, l'agriculture, la gestion des ressources en eau et la prévention des risques naturels comme les inondations ou les sécheresses (Adler et Gu, 2024). Les précipitations annuelles varient considérablement d'une région à l'autre en fonction de facteurs géographiques et climatiques. Les régions équatoriales (comme l'Amazonie ou l'Afrique centrale) reçoivent souvent plus de 2 000 mm de précipitations par an en raison de l'humidité élevée et des fortes pluies tropicales. Les régions proches de l'équateur reçoivent généralement plus de précipitations en raison de la forte évaporation et de la convection atmosphérique (Adler et Gu, 2024). Les montagnes peuvent provoquer des précipitations orographiques, où l'air humide s'élève et se refroidit, entraînant des pluies abondantes sur les versants au vent (Guo et al., 2020). Les précipitations sont essentielles pour l'irrigation des cultures et la production alimentaire. Une insuffisance ou un excès de pluie peut entraîner des sécheresses ou des inondations, affectant les rendements agricoles. Les précipitations déterminent les types de végétation et d'habitats dans une région (Guo et al., 2020 ; Zhang et Zhao, 2022). Leur variabilité et leur évolution sous l'effet du changement climatique ont des implications majeures pour l'environnement, l'agriculture et les sociétés humaines. Une gestion durable des ressources en eau et une adaptation aux changements climatiques sont essentielles pour faire face à ces défis.

La température du sol est un paramètre important en météorologie, en climatologie, en agriculture et en écologie (Cao et al., 2020, Westermann et al., 2016). Elle influence directement les processus biologiques,

chimiques et physiques dans le sol, ainsi que les interactions entre le sol et l'atmosphère. La température du sol correspond à la chaleur présente dans les couches superficielles ou profondes du sol. Elle varie en fonction de la profondeur, de l'heure de la journée, de la saison et des conditions météorologiques (Cao et al., 2020 ; Westermann et al., 2016). La quantité d'énergie solaire reçue par la surface du sol est le principal facteur influençant sa température. Les sols sombres absorbent plus de chaleur que les sols clairs (Westermann et al., 2020). La végétation peut modérer la température du sol en fournissant de l'ombre et en réduisant l'évaporation (Westermann et al., 2020). Les sols humides ont une capacité thermique plus élevée, ce qui signifie qu'ils se réchauffent et se refroidissent plus lentement que les sols secs (Westermann et al., 2016 ; Stewart et Oke, 2012). La température du sol diminue généralement avec la profondeur (Hu et Feng, 2003 ; Isard et al., 2007). Les variations quotidiennes affectent principalement les couches superficielles (jusqu'à 50 cm), tandis que les variations saisonnières peuvent influencer des couches plus profondes (jusqu'à 10 mètres ou plus). Les nuages, le vent et les précipitations peuvent moduler la température du sol en affectant le bilan énergétique à la surface. La température du sol suit les cycles saisonniers, avec des températures plus élevées en été et plus basses en hiver (Hu et Feng, 2003 ; Isard et al., 2007). Les couches profondes du sol réagissent avec un décalage par rapport aux variations de surface. Les tendances à long terme, comme le réchauffement climatique, peuvent influencer la température du sol sur des échelles de temps plus longues (Onwuka et Mang, 2018 ; Irmak, 2016). La température du sol atteint son maximum en milieu d'après-midi et son minimum juste avant le lever du soleil. La température du sol affecte la germination des graines, la croissance des plantes et l'activité microbienne (Onwuka et Mang, 2018). La température du sol joue un rôle dans les échanges d'énergie entre la surface terrestre et l'atmosphère, influençant ainsi les conditions météorologiques locales et régionales. La température du sol à grande profondeur est utilisée pour la production d'énergie géothermique (Cao et al., 2020, Westermann et al., 2016). La température du sol est prise en compte dans la conception des fondations des bâtiments et des infrastructures pour éviter les dommages causés par le gel ou la chaleur excessive. La température du sol est un paramètre clé qui influence de nombreux processus naturels et activités humaines. Son suivi et son analyse sont essentiels pour comprendre les impacts du changement climatique et adapter les pratiques agricoles, écologiques et industrielles (Cao et al., 2020, Westermann et al., 2016).

L'évapotranspiration est un processus clé du cycle de l'eau qui combine l'évaporation de l'eau du sol et des surfaces d'eau (comme les lacs et les rivières) et la transpiration des plantes. Elle joue un rôle essentiel dans les écosystèmes, l'agriculture et la gestion des ressources en eau. Processus par lequel l'eau passe de l'état liquide à l'état gazeux (vapeur d'eau) à partir de surfaces libres (sol, eau) ou de surfaces végétales humides (Morlon et Itier, 2017). Elle représente la quantité totale d'eau transférée de la surface terrestre à l'atmosphère. L'énergie solaire est le principal moteur de l'évapotranspiration. Plus l'ensoleillement est intense, plus l'évapotranspiration est élevée (Katerji et Rana, 2011). Des températures plus élevées augmentent l'évaporation et la transpiration. Le vent favorise l'évapotranspiration en renouvelant l'air autour des surfaces et en emportant la vapeur d'eau (Morlon et Itier, 2017). Les plantes ont des taux de transpiration différents en fonction de leur espèce, de leur stade de croissance et de leur santé. L'évapotranspiration est plus faible dans un air humide, car la vapeur d'eau a déjà saturé l'atmosphère (Elbeltagi et al., 2024). L'évapotranspiration est un élément clé du cycle hydrologique, contribuant à la formation des nuages et des précipitations. Les satellites fournissent des données sur l'évapotranspiration à grande échelle en mesurant les propriétés de surface (température, humidité, végétation). Le réchauffement climatique augmente généralement l'évapotranspiration en raison de températures plus élevées et de modifications des régimes de précipitations. Cela peut entraîner une augmentation des besoins en eau pour l'agriculture et une réduction des ressources en eau disponibles, exacerbant les sécheresses dans certaines régions (Morlon et Itier, 2017 ; Elbeltagi et al., 2024 ; Katerji et Rana, 2011). Dans les régions humides, une augmentation de l'évapotranspiration peut intensifier le cycle de l'eau, entraînant des précipitations plus abondantes mais aussi des risques d'inondations. L'évapotranspiration est très élevée en raison de la forte humidité et de la densité de la végétation.

L'évapotranspiration est un processus fondamental du cycle de l'eau, influencé par des facteurs climatiques, hydrologiques et biologiques. Son suivi et son estimation sont essentiels pour une gestion durable des ressources en eau, en particulier dans un contexte de changement climatique et de pression croissante sur les écosystèmes et l'agriculture (Guo, 2024 ; Guo et al., 2023).

Le présent article, se concentre sur l'analyse des paramètres climatiques de la ville de Bukavu, du terroir de Kabare et du Parc National de Kahuzi-Biega (PNKB) pour évaluer et caractériser le changement climatique survenu depuis 1980 à 2021. Il vise à fournir une vision globale des manifestations et des impacts du changement climatique.

II. Milieu, Matériels Et Méthodes

Cette étude porte sur dix-neuf érosions vives de la ville de Kananga en République Démocratique du Congo. Leurs caractéristiques intrinsèques sont suivies de janvier 2004 à décembre 2023 et les données

climatiques de janvier 2000 à décembre 2023. La masse de terre érodée est évaluée par la méthode des volumes finis et son évolution soumise aux aléas de changements climatiques.

Milieu d'étude

Situation géographique et administrative

Situation physique

Créé officiellement le 12/01/1923, le territoire de Kabare est aujourd'hui une entité administrative décentralisée et l'un de huit territoires constituant la province du Sud Kivu (figure 1). Le territoire de Kabare compte 17 groupements répartis en deux chefferies (Kabare et Nindja). Il recouvre une superficie de 1960km² et 535.114 habitants soit 288 habitants par Km². Il est limité:

- Au nord par le territoire de Kalehe,
- Au sud, le territoire de Walungu par les bords de la rivière Kazinzi (Sud-ouest) et la rivière LUBIMBE (Sud-est),
- A l'Est par la ville de Bukavu, le lac Kivu,
- A l'Ouest par le territoire de Shabunda (la rivière Lugulu)

Il est composé de deux collectivités : La collectivité de Kabare et la collectivité de Ninja (prononcé Nindja). La collectivité de Kabare est subdivisée en 14 groupements que sont Cirunga (ou Chirunga), Bugobe, Kagabi, Bushumba, Bushwira, Irhambi-Katana, Mudaka, Bugorhe, Miti, Luhihi, Mudusa, Lugendo, Mumosho et Ishungu (figure 1). C'est un territoire montagneux, qui s'étend des environs de la ville de Bukavu au sud, aux rives occidentales du Lac Kivu au nord, il se prolonge vers le sud-ouest par la chefferie de Nindja.

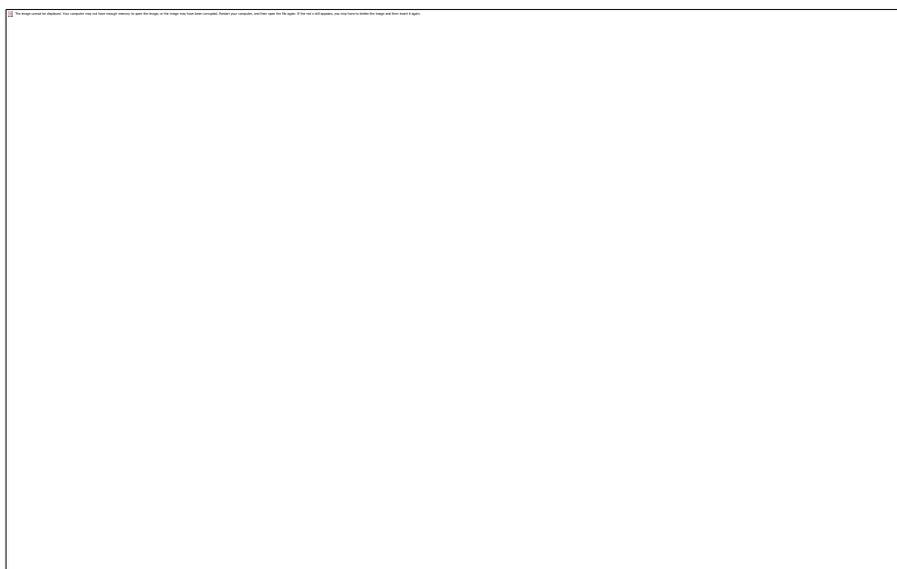


Figure 1. Carte administrative de la partie Nord du territoire de Kabare

Cette partie de la RDC se situe dans la branche occidentale du Rift est-africain. Elle est formée des reliefs précambriens orientés sud-nord de la chaîne de Mitumba culminant à plus de 3000 m (Figure 1). Ces reliefs incisés par des rivières aux vallées profondes sont rajeunis sans cesse par le rifting divergent qui agit depuis le Tertiaire (Chorowicz, 2005 ; Delvaux & Barth, 2010).

La lithologie est formée de roches métamorphiques (granites, gneiss, micaschistes) au niveau des reliefs précambriens, de roches volcaniques et de coulées de lave au sud et au nord du lac Kivu et de dépôts calcaires d'origine lacustre qui tapissent le fond des vallées principales au bord du lac (Lutumba, 1991). Le climat est pluvieux (1500 mm) et tempéré par l'altitude (20°C en moyenne annuelle) avec une saison sèche de juin à août (Données 2003-2013 de la Station météorologique de Lwiro).

Du lac Kivu à la lisière du parc de Kahuzi-Biega (Figure 1), la forêt naturelle a laissé place à des cultures, des zones de pâturage et des centres ruraux le long des routes principales. La conquête de nouvelles terres arables et l'approvisionnement en ressources ligneuses poussent les populations riveraines du parc à détruire de plus en plus la forêt dont il ne subsiste que quelques reliques (Brown & Kasisi, 2009 ; Mokoso *et al.*, 2012 ; Mudinga *et al.*, 2013).

La région est une des zones les plus densément peuplée de la RDC avec une densité > 200 habitants/km² (Bishakabalya & Alingilya, 2014 ; Civava *et al.*, 2013). Le peuplement est constitué de groupes ethniques bantous et des pygmées vivant à la lisière du parc. Les activités économiques sont surtout basées sur

l'agriculture vivrière et commerciale, des fermes de bovins et des petits ruminants. La pêche et la navigation sont développées sur le lac Kivu. L'exploitation artisanale des ressources minières comme l'or, la cassitérite et le coltan est en pleine expansion.

L'axe routier de la Nationale 2 Bukavu-Goma permet l'évacuation des produits agricoles vers les villes précitées et l'approvisionnement des centres ruraux importants. La beauté du paysage est favorable au tourisme qui se remet peu à peu des affres de la guerre ; les gorilles de montagnes restent l'une des grandes attractions du parc de Kahuzi-Biega.

Matériels et Données

Matériels

Les matériels suivants ont été utilisés dans cette étude : un décamètre, une équerre, un rapporteur, un niveau d'eau de maçon, deux GPS : l'un de marque Garmin GPS map 62 et l'autre de marque Garmin etrex 10.

Données

Les données utilisées dans cette étude sont issues d'images Landsat (résolution 30 m x 30 m), prises pendant les Le satellite NOAA de la NASA nous a permis, à travers son routeur GIOVANNI des Merra 2 et GLDAS sur le site [http //giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/](http://giovanni.gsfc.nasa.gov/giovanni/) dans le web-based NASA Giovanni, d'obtenir toutes les données de paramètres climatiques utilisés dans ce travail, échelonnées sur l'échelle du temps de 1980 à 2020, soit 40 ans, avec une résolution temporelle journalière et une résolution spatiale de 0.25° équivalente à 27.8x27.8km² ou 0,5 x 0,625°, soit 55,5 x 69.375 km². Trois centroides ont été choisis dans la ville de Bukavu (28.8569E, 2.5078S de 01/01/1980 au 31/12/2021), de la partie nord du territoire de Kabare (28.7198E, 2.4690S de 01/01/1980 au 31/12/2021) et le PNKB (28.7243E, 2.3541S de 01/01/1980 au 31/12/2021).

Ci-dessous sont représentés les variables à télécharger, chacune avec ses résolutions temporelle et spatiale (tableau 1)

Tableau 1. Les variables, sources, résolution spatio-temporelle

Variables	Unités	Sources/plateforme	Format	Résolution temporelle	Résolution spatiale
Evapotranspiration	Kg m ⁻² s ⁻¹	GLDAS/NOAA	CSV	Mensuelle	0.25°
Température du sol	K	GLDAS/NOAA	CSV	Journalière	0.25°
Température de l'air proche de la surface	K	GLDAS/NOAA	CSV	Journalière	0.25°
Température maximale de l'air	K	MERRA-2Reanalysis	CSV	Journalière	0.5°x0.625°
Température minimale de l'air	K	MERRA-2Reanalysis	CSV	Journalière	0.5°x0.625°
Ozone totale	Dobsons	MERRA-2	CSV	Mensuelle	0.5°x0.625°
Précipitation	mm/h	TRMM	CSV	Journalière	0.25°
Albédo de surface dans le proche IR	%	MERRA-2Model	CSV	Journalière	0.5x0.625°

Méthodes

Analyse et traitement des paramètres climatiques

L'analyse et traitement des paramètres climatiques sont effectués à partir des données téléchargées en format .csv, ces données ont été préparées sur Excel avant d'être importées dans SPSS. Ces données ont été bien formatées, sans valeurs manquantes ou erreurs. Les différentes analyses faites avec ces données sont détaillées ci-après :

- Analyse des graphiques ombrothermiques : ce sont des diagrammes climatiques qui superpose les précipitations mensuelles (P) et les températures moyennes mensuelles (T) sur une même échelle. L'échelle utilisée est généralement P = 2T. Ces graphiques sont particulièrement utiles pour identifier les périodes de sécheresse, définies par des mois où les précipitations en bâtonnets sont inférieures à la courbe des températures.
- Analyse des graphiques des anomalies climatiques : les anomalies climatiques mesurent l'écart entre une variable climatique observée (température, précipitations, etc.) et une moyenne de référence calculée sur une période de base. Elles sont utilisées pour identifier les tendances à long terme (comme le réchauffement climatique) ou des événements extrêmes. L'anomalie climatique est donnée par la relation :

$$\text{Anomalie} = X_{\text{observé}} - X_{\text{moyen}}$$

Avec X_{observé} valeur mesurée et X_{moyen} moyenne climatique sur une période de référence.

- Détermination des indices de précipitation : Les indices de précipitation sont des outils clés pour quantifier, comparer et interpréter les variations spatio-temporelles des précipitations dans une étude climatique. L'indice de précipitation standardisé (SPI) est obtenu à partir de la relation : $SPI = (X_i - X_m)/\sigma$
Où X_i est la précipitation réelle pour la période donnée, X_m est la moyenne des précipitation et σ est l'écart-type.

L'interprétation des indices de précipitation se fait de la manière suivante :

- o Si SPI est proche de 0, les précipitations sont normales
- o Si SPI est positif et supérieur à 1, cela indique un excès de de précipitation (humidité)
- o Si SPI est négatif et inférieur à -1, alors il y a un déficit de précipitation (sécheresse).
- Analyse de corrélation : utilisée pour mesurer les relations entre différentes variables climatiques, elle permet de déterminer si les deux variables sont liées (positivement, négativement ou pas du tout). Le coefficient de corrélation de Pearson est donné par la formule ci-après : $r = \frac{\sum(x_i - \bar{x})(y_i - \bar{y})}{\sqrt{\sum(x_i - \bar{x})^2 \sum(y_i - \bar{y})^2}}$

Avec r le coefficient de Pearson compris entre -1 et 1 ; x_i et y_i sont respectivement les valeurs des variables x et y ; \bar{x} et \bar{y} sont respectivement les valeurs moyennes des variables x et y.

L'interprétation des coefficients de corrélation, d'après Mukaka (2012), se fait de la manière suivante :

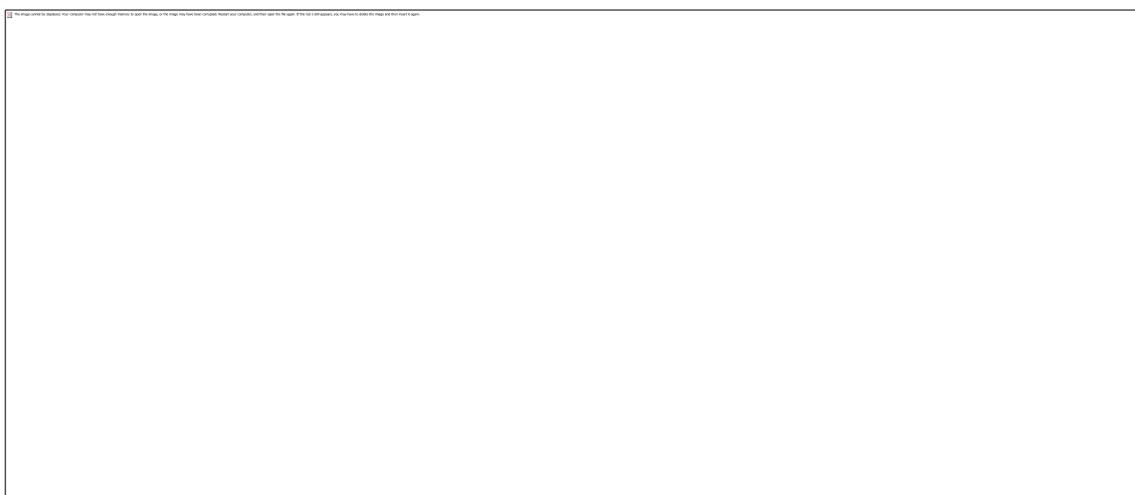
- o Si $0.7 \leq r \leq 1$: corrélation positive forte ou $-1 \leq r \leq -0.7$: corrélation négative forte
- o Si $0.4 \leq r < 0.7$: corrélation modérée ou $-0.7 < r \leq -0.4$: corrélation modérée
- o Si $0 \leq r < 0.4$: corrélation faible ou $-0.4 < r < 0$: corrélation faible
- Tests de significativité pour déterminer si les résultats observés sont statistiquement significatifs.

Pour la modélisation des paramètres climatiques avec SPSS, l'analyse de régression multiple a été utilisée : Cette méthode permet d'explorer les relations entre une variable dépendante et une ou plusieurs variables indépendantes.

III. Résultats

Les paramètres retenus pour les analyses sont la température maximale, la température minimum, les précipitations annuelles, la température du sol, l'évapotranspiration annuelle. Les valeurs d'albédos et d'ozone n'ont pas été prises en compte pour la simple raison que la résolution des données couvrait toute la zone d'étude, de telle sorte que dans les trois entités, il y avait les mêmes valeurs.

Les graphiques ci-dessous représentent les graphiques ombrothermiques des Bukavu, Miti-Murhesa, Kavumu et le PNKB (figure 2). Les courbes représentent les températures moyennes mensuelles de la période entre 1980 à 2021 et les histogrammes concernent les précipitations mensuelles pour la même période.



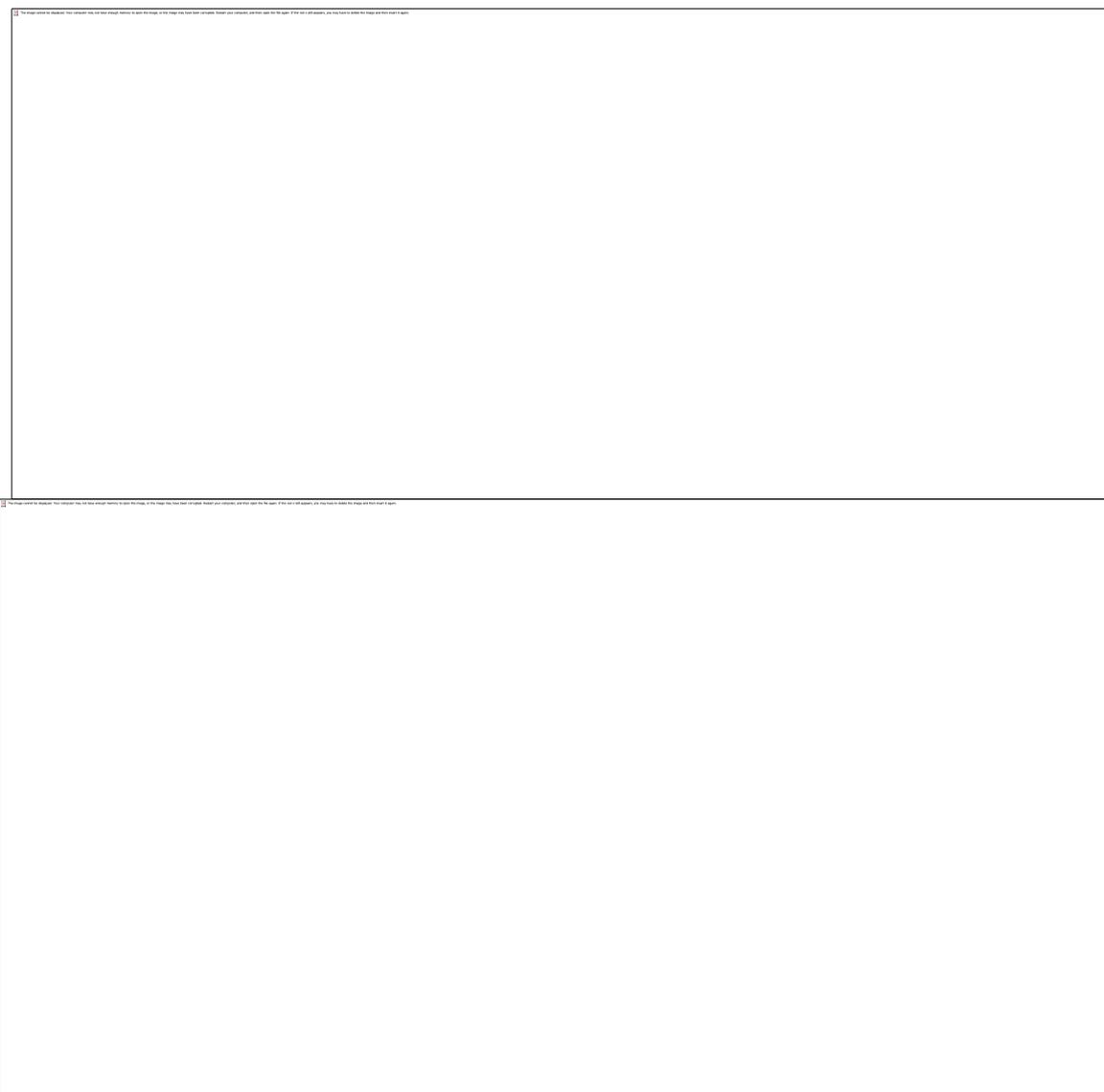


Figure 2. Les graphiques Ombrothermiques du PNKB (A), de Kavumu (B), de MITI-MURHESA (C) et de la ville de Bukavu (D)

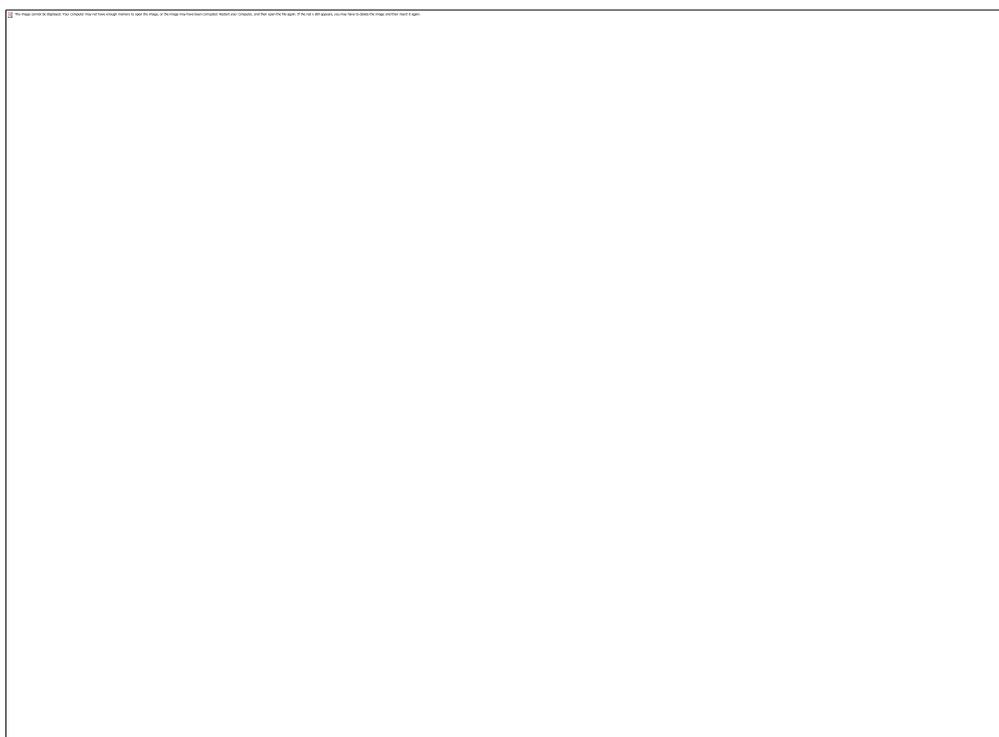
Il est présenté dans le graphique A, les précipitations aux mois de Juin, Juillet et Août sont très faibles par rapport aux autres mois de l'année. Ces mois sont définis comme mois de la saison sèche d'après le climat de la région. Cependant, la courbe de températures reste en bas des barres les plus courts. Cela montre bien que ces mois constituent la saison sèche, mais la quantité de pluies dans cette période est importante et de ce fait ces mois restent humides. Dans la figure B, il y a presque la même configuration que dans la figure A.

Cependant, ici, les mois de Juin et Août sont humides par rapport au mois de Juillet, bien qu'étant partie de la saison sèche. Sur les graphiques C et D, les courbes de la température sont au-dessus des barres de l'histogramme aux mois de Juin, Juillet et Août. Ces mois représentent bel et bien la période de la saison sèche et ils sont secs. Globalement, la saison sèche a lieu entre Juin et Août dans le PNKB, mais ces mois sont humides. A Bukavu et Murhesa, la saison sèche a lieu à la même période et ces mois reste secs (Maki et Dewitte, 2014 ; Kajibwami, 2015 ; Buzera et al., 2017). A Kavumu, c'est la période de la saison sèche avec les mois de Juin et Août humides (Eluo et al., 2024)

Les graphiques des anomalies climatiques (figure 3), outils essentiels pour comprendre les variations de paramètres climatique, sont présentés dans la suite. Les paramètres considérés pour ces graphiques sont : les températures moyennes annuelles ($T_{Anomalie}$) avec comme température moyenne de référence, la température moyenne de toute la période de l'étude (40ans) ; les températures maximales annuelles ($T_{max_anomalie}$) avec comme température de référence, la température maximale moyenne pour la période de 40 ans ; les températures minimales annuelles ($T_{min_Anomalie}$) avec comme température de référence, la température minimale moyenne sur une période de 40 ans ; les précipitations totales annuelles

(PPT_Anomalie) ; les températures moyennes annuelles du sol (Tsol_anomalie) avec comme référence la température moyenne sur la période de 40 ans ; les anomalies des évapotranspirations (ETP_Anomalie) pour la même période.

Les graphiques présentent les courbes des anomalies de la ville de Bukavu, de Kabare et du PNKB. Chaque courbe d'anomalie est nommée en utilisant les initiales B pour Bukavu, K pour Kabare et PN pour PNKB. Les courbes des anomalies de ces trois entités ont été mis ensembles pour chaque paramètre pour faciliter les comparaisons.



De cette figure, les anomalies négatives et positives s'alternent sur des températures maximales dans les trois entités. Il y a superposition des courbes d'anomalies des températures maximales sur toute la période d'étude. Il s'est observé une période de refroidissement de 1980 jusqu'en 1994 puis en 1999 (Fries, 2022). Puis s'en est suivi une période de réchauffement entre 2000 à 2013 (Romano et al., 2000 ; Liu et al., 2017 ; Cox et al., 2013), après il y a une alternance de refroidissement et réchauffement.

Les courbes des anomalies de températures minimales sont restées très basse jusqu'en 2000 puis une hausse entre 2000 et 2018, avec à la fin le même comportement que les courbes des températures maximales. De ces deux graphiques, il y a lieu de constater une évolution normale des températures maximales et minimales. Les courbes d'anomalies des températures du sol affichent une évolution contraire par rapport aux températures de surface jusqu'en 2018, un réchauffement au début et en 2000 s'observe une phase de refroidissement (Cao et al., 2020, Westermann et al., 2016).

L'année 2000 apparaît être une année particulière où s'observe un changement de période de refroidissement de réchauffement. Les courbes d'anomalie de précipitation alternent entre augmentation et diminution jusqu'en 2000. En 2001 et 2011, il y apparaît une augmentation importante de précipitation et une faible diminution est visible jusqu'en 2020. Les courbes d'anomalie des évapotranspirations évoluent aussi avec la même tendance entre les trois entités, sauf la courbe de PNKB qui ne varie pas beaucoup autour de la moyenne.

Peuvent résulter d'une augmentation de la température, d'une végétation plus dense (verdissement), ou de précipitations accrues. Cela peut entraîner une augmentation de la demande en eau pour les cultures et une réduction des ressources en eau disponibles. Les anomalies négatives peuvent être associées à des périodes de sécheresse, à une réduction de la couverture végétale, ou à des températures plus basses. Cela peut limiter la production agricole et affecter les écosystèmes. Les fluctuations observées sur toutes les courbes d'anomalie montrent des variations naturelles du climat.

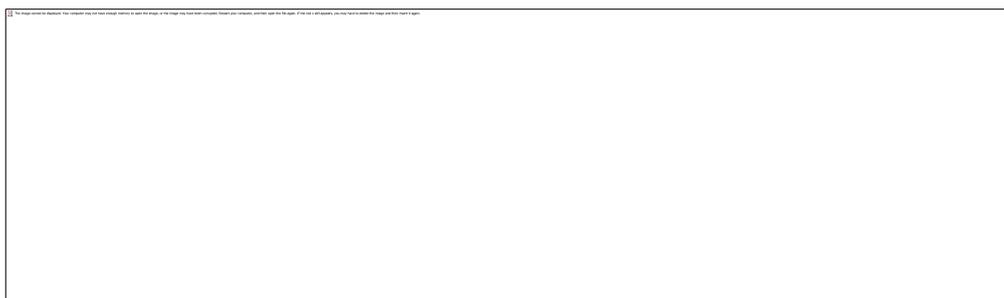


Figure 4. Graphique des anomalies de l'humidité relative et de la vitesse de vent pour la période de 1980 à 2021.

Comme dans les graphiques précédents, les anomalies de l'humidité relative affichent une tendance oscillatoire selon les années. Il y a cependant, certaines années qui montrent des périodes des anomalies négatives (entre 1993 à 1995) très accentuées. Ces années marquent une période de faible humidité relative par rapport à la normale, cela indique des conditions de climat plus sèches que d'habitude. Pendant la période de 2007 à 2016, une forte tendance vers les valeurs positives des anomalies de l'humidité relative qui indiquent des conditions climatiques plus humides. Il s'est aussi observé des phénomènes similaires mais dans le sens contraire pour les anomalies de vitesse de vent.

Tests de normalité

Les analyses statistiques sur paramètres climatiques ont été faites pour vérifier les corrélations entre les paramètres d'une même entité, entre les entités et les populations. Les paramètres du couvert végétal ont été aussi ajoutés dans ces analyses, notamment les NDVIs du PNKB (NDVI_PN) et NDVIs des zones de santé (NDVI_ZS).

Les tests de normalité ont précédé ces analyses afin de définir les variables paramétriques et non paramétriques. Pour vérifier la normalité, les résultats des tests de Kolmogorov-Smirnov et Shapiro-Wilk sont présentés au tableau 2. Les tests de corrélations paramétriques et non paramétriques sont appliqués pour vérifier s'il existe des associations linéaires significatives entre ces paramètres (tableau 3 et 4).

Tableau 2. Tests de normalité

	Tests of Normality					
	Kolmogorov-Smirnov ^a			Shapiro-Wilk		
	Statistic	df	Sig.	Statistic	df	Sig.
Année	.066	41	.200*	.956	41	.115
B_Pop	.167	41	.006	.859	41	.000
K_Pop	.096	41	.200*	.938	41	.027
B_Tmax [°C]	.092	41	.200*	.949	41	.066
K_Tmax [°C]	.100	41	.200*	.950	41	.069
PN_Tmax [°C]	.097	41	.200*	.949	41	.066
B_Tmin [°C]	.109	41	.200*	.951	41	.076
K_Tmin [°C]	.108	41	.200*	.953	41	.091
PN_Tmin [°C]	.109	41	.200*	.951	41	.078
B_Tsol (2m) [°C]	.157	41	.013	.913	41	.004
K_Tsol (2m) [°C]	.157	41	.012	.922	41	.008
PN_Tsol (2m) [°C]	.147	41	.027	.935	41	.022
B_PPmm [mm]	.112	41	.200*	.900	41	.002
K_PPmm [mm]	.118	41	.158	.892	41	.001
PN_PPmm [mm]	.129	41	.083	.914	41	.005
B_ETP [mm]	.069	41	.200*	.990	41	.967
K_ETP [mm]	.099	41	.200*	.972	41	.401
PN_ETP [mm]	.063	41	.200*	.979	41	.621
NDVi-PN	.107	41	.200*	.973	41	.415
NDVI-ZS	.099	41	.200*	.980	41	.668

*. This is a lower bound of the true significance.
a. Lilliefors Significance Correction

De ces tests de normalité, il s'observe que les températures maximales, les températures minimales, évapotranspirations, NDVI-PN et NDVI-ZS ont des p value supérieures au seuil de significativité ($p > 0.05$) d'après les deux tests. Ces paramètres ont des distributions normales.

Les températures de sol ont des valeurs de P inférieures au seuil de significativité ($p < 0.05$) pour les deux tests, elles ne sont pas distribuées normalement. Cependant, les précipitations, le nombre de population de Kabare et Bukavu donnent des valeurs de p différentes par rapport aux deux tests. Vu la taille de l'échantillon

(n<50), le test de Shapiro-Wilk est pris en compte, donc les variables ne présentent pas des distributions normales.

Ces tableaux montrent des fortes corrélations positives entre l'évolution des populations de Bukavu et de Kabare par rapport au temps avec $0,7 < r < 1$. Il existe alors une association linéaire significative entre ces paramètres et l'évolution des années. Les températures maximales, minimales de Bukavu, de Kabare et de PNKB, les températures de sol de Bukavu et Kabare ont des corrélations modérées positives avec les l'évolution des années. Les précipitations, les évapotranspirations et les températures de sol sont faiblement corrélés par rapport années, les précipitations et il existe une association linéaire significative entre ces paramètres ($p < 0.05$).

Il existe des fortes corrélations entre les évapotranspirations de Bukavu et Kabare avec des associations linéaires significatives ($p < 0.05$). Il existe aussi une association linéaire significative entre les valeurs évapotranspirations de PNKB et celles de Kabare avec une valeur de corrélations $r = 0.66$. Les températures minimales montrent aussi des corrélations modérées entre l'évolution de la population de Bukavu et Kabare ($0.568 \leq r \leq 0.660$), elles présentent aussi de fortes corrélations avec les températures maximales des trois entités. NDVI_PN et NDVI_ZS ont des corrélations fortes négatives ($-1 < r < -0.7$) avec l'évolution des années, des populations de Bukavu et Kabare, il existe une association linéaire significative entre les NDVIs, les populations et les années.

Ils sont en corrélations modérées négatives ($-0.7 < r < -0.4$) avec les températures maximales et minimales, les températures du sol de Bukavu et de Kabare. Mais des faibles corrélations ($-0.4 < r < 0$) avec les températures du sol du PNKB, les précipitations et les évapotranspirations. Il existe une associations linéaire significative entre NDVI_PN et NDVI_ZS, car leurs corrélations sont fortes et positives ($0.7 < r < 1$).

Les analyses de régressions linéaires ont permis de retenir les modèles suivants représentés dans les tableaux. Les autres modèles ont été rejetés soit à cause de la colinéarité ou soit une très faible signification des coefficients.

Model Summary									
Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate	Change Statistics				
					R Square Change	F Change	df1	df2	Sig. F Change
1	.993 ^a	.987	.985	33844.0843	.987	526.362	5	36	.000
a. Predictors: (Constant), PN_Tmin [°C], K_Pop, K_Tmax [°C], PN_Tmax [°C], K_Tmin [°C]									

Coefficients ^a								
Model	Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.	Collinearity Statistics		
	B	Std. Error				Beta	Tolerance	VIF
1	(Constant)	-1078879.548	1192002.812		-.905	.371		
	K_Pop	2.683	.067	1.060	40.302	.000	.542	1.846
	K_Tmax [°C]	1261639.303	399948.376	3.047	3.155	.003	.000	2489.076
	PN_Tmax [°C]	-1351050.566	400482.754	-3.360	-3.374	.002	.000	2646.324
	K_Tmin [°C]	-1585549.668	462534.928	-3.576	-3.428	.002	.000	2903.906
	PN_Tmin [°C]	1608895.177	464984.442	3.712	3.460	.001	.000	3070.660
a. Dependent Variable: B_Pop								

$$B_Pop = -1078879.548 + 2.683K_Pop + 1261639.303K_Tmax - 1351050.566PN_Tmax - 1585549.668K_Tmin + 1608895PN_Tmin$$

Ce modèle explique 98.7% de la variance B_Pop et est globalement significatif ($p < 0.05$). Avec R^2 proche 1, cela montre un bon ajustement du modèle. Les coefficients des variables K_Pop, K_Tmax, PN_Tmin sont positifs et indiquent une relation positive avec le B_Pop et PN_Tmax et la constant indique une relation inverse. Ces coefficients sont statistiquement significatif au seuil de 5%, sauf la constant qui n'est pas significative. Mais il y a forte colinéarité entre les variables K_Tmax, PN_Tmax, K_Tmin et PN_Tmin et la variable dépendante B_Pop, ce qui peut conduire à une mauvaise interprétation de ce modèle. Seule la variable K_Pop influence significativement B_Pop.

Model Summary ^b										
Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate	Change Statistics					Durbin-Watson
					R Square Change	F Change	df1	df2	Sig. F Change	
1	.851	.724	.701	.3623136	.724	32.326	3	37	.000	1.710
a. Predictors: (Constant), NDVi-PN, B_Pop, K_Pop										
b. Dependent Variable: B_Tmax [°C]										

Coefficients ^a								
Model	Unstandardized Coefficients			Standardized Coefficients	t	Sig.	Collinearity Statistics	
	B	Std. Error	Beta	Tolerance			VIF	
1	(Constant)	23.283	1.033		22.549	.000		
	NDVI-PN	-2.823	1.217	-.297	-2.320	.026	.455	2.196
	K_Pop	1.975E-005	.000	3.081	7.082	.000	.039	25.365
	B_Pop	-7.034E-006	.000	-2.781	-6.650	.000	.043	23.437

a. Dependent Variable: B_Tmax [°C]

$$B_Tmax = 23.283 - 2.823NDVI_PN + 0.00001975K_Pop - 0.0000017034B_Pop$$

Ce modèle explique 72.4% de la variance de B_Tmax et il est globalement significatif (p<0.05). Avec R² = 0.721, cela montre un bon ajustement du modèle. Les coefficients des variables K_Pop, est positif et indique une relation positive avec le B_Tmax, NDVI_PN et B_Pop sont négatifs et indiquent une relation inverse avec B_Pop. Ces coefficients sont statistiquement significatifs au seuil de 5%. Mais il y a forte colinéarité entre les variables K_Pop, B_Pop et la variable dépendante B_Tmax, ce qui peut conduire à une mauvaise interprétation de ce modèle. Seule la variable NDVI_PN influence significativement B_Tmax.

Model Summary ^b										
Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate	Change Statistics					Durbin-Watson
					R Square Change	F Change	df1	df2	Sig. F Change	
1	1.000 ^a	1.000	1.000	.0122538	1.000	53116.731	2	39	.000	1.350

a. Predictors: (Constant), PN_Tmin [°C], K_Tmin [°C]

b. Dependent Variable: B_Tmin [°C]

Coefficients ^a								
Model	Unstandardized Coefficients			Standardized Coefficients	t	Sig.	Collinearity Statistics	
	B	Std. Error	Beta	Tolerance			VIF	
1	(Constant)	1.901	.215		8.836	.000		
	PN_Tmin [°C]	.666	.056	.673	11.909	.000	.003	339.194
	K_Tmin [°C]	.332	.057	.327	5.794	.000	.003	339.194

a. Dependent Variable: B_Tmin [°C]

$$B_Tmin = 1.901 + 0.666PN_Tmin + 0.332K_Tmin$$

Ce modèle explique à 100% la variance de B_Tmin et il est globalement significatif (p<0.05). Avec R² = 1, cela montre un bon ajustement du modèle. Les coefficients des variables PN_Tmin et K_Tmin sont positifs et indiquent une relation positive avec le B_Tmin. Ces coefficients sont statistiquement significatifs au seuil de 5%. Mais il y a forte colinéarité entre les variables PN_Tmin et K_Tmin et la variable dépendante B_Tmin, ce qui peut conduire à une mauvaise interprétation de ce modèle. Ces variables influencent significativement B_Tmin.

Model Summary ^b										
Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate	Change Statistics					Durbin-Watson
					R Square Change	F Change	df1	df2	Sig. F Change	
1	1.000 ^a	1.000	1.000	.0127250	1.000	27508.805	4	37	.000	2.534

a. Predictors: (Constant), PN_Tmin [°C], PN_Tmax [°C], K_Tmin [°C], B_Tmax [°C]

b. Dependent Variable: K_Tmax [°C]

Coefficients ^a								
Model	Unstandardized Coefficients			Standardized Coefficients	t	Sig.	Collinearity Statistics	
	B	Std. Error	Beta	Tolerance			VIF	
1	(Constant)	.877	.577		1.519	.137		
	K_Tmin [°C]	.928	.080	.867	11.640	.000	.002	610.702
	PN_Tmin [°C]	-.932	.080	-.891	-11.683	.000	.002	639.615
	B_Tmax [°C]	.393	.133	.400	2.959	.005	.000	2006.782
	PN_Tmax [°C]	.611	.132	.629	4.626	.000	.000	2034.994

a. Dependent Variable: K_Tmax [°C]

$$K_Tmax = 0.877 + 0.928K_Tmin - 0.932PN_Tmin + 0.393B_Tmax + 0.611PN_Tmax$$

Ce modèle explique à 100% la variance de K_Tmax et il est globalement significatif (p<0.05). Avec R² = 1, cela montre un bon ajustement du modèle. Les coefficients des variables K_Tmin, B_Tmax et PN_Tmax sont positives et indiquent une relation positive avec le K_Tmax ; PN_Tmin est négative et indique une relation inverse avec K_Tmax. Ces coefficients sont statistiquement significatifs au seuil de 5%, la constante qui n'est pas significative. Mais il y a forte colinéarité entre toutes les variables K_Tmin, PN_Tmin, B_Tmax, PN_Tmax

et la variable dépendante K_Tmax, ce qui peut conduire à une mauvaise interprétation de ce modèle. Malgré la signification de coefficients, ils n'influencent pas significativement K_Tmax.

Model Summary ^b										
Model	R	R Square	Adjusted R Square	Std. Error of the Estimate	Change Statistics					Durbin-Watson
					R Square Change	F Change	df1	df2	Sig. F Change	
1	.866 ^a	.751	.737	.0357380	.751	57.181	2	38	.000	1.986

a. Predictors: (Constant), K_Pop, NDVI-ZS
b. Dependent Variable: NDVI-PN

Coefficients ^a								
Model		Unstandardized Coefficients		Standardized Coefficients	t	Sig.	Collinearity Statistics	
		B	Std. Error	Beta			Tolerance	VIF
1	(Constant)	.333	.082		4.050	.000		
	NDVI-ZS	.600	.107	.657	5.634	.000	.483	2.072
	K_Pop	-1.778E-007	.000	-.264	-2.262	.030	.483	2.072

a. Dependent Variable: NDVI-PN

$$NDVI_PN = 0.333 + 0.600NDVI_ZS - 0.0000001778K_Pop$$

Ce modèle explique à 75.1 % la variance de NDVI_PN et il est globalement significatif (p<0.05). Avec R² = 0.751, cela montre un bon ajustement du modèle. Le coefficient de variable NDVI_ZS, est positif et indique une relation positive avec le NDVI_PN ; K_Pop est négatif et indique une relation inverse avec NDVI_PN. Ces coefficients sont statistiquement significatifs au seuil de 5%. Mais il y a très faible multicollinéarité entre toutes les variables NDVI_ZS, K_Pop et la variable dépendante NDVI_PN, ce qui peut conduire à une bonne stabilité, fiabilité des coefficients et interprétation acceptable de ce modèle (James et al., 2013 ; Montgomery et al., 2012 ; Hair et al., 2019). Il est donc possible de prédire les NDVI_PN à partir des NDVI_ZS et la population de Kabare.

IV. Discussion

Sur 41 ans, soit de 1980 à 2021, la population de la ville de Bukavu et celle du Territoire de Kabare est passée respectivement de 159.332 habitants à 1.00.461 et de 145.901habitants à 510.110habitants.

Les précipitations annuelles fortes sont enregistrées dans le PNKB et faibles à Kabare.

Les anomalies de température ont atteint les pics de +1.68 et 1.61 en 2008 et en 2019 respectivement. Il fait chaud à Kabare qu'à Bukavu : le gap de températures enregistré sur la période est de 1°C environ. Cinq modèles ANOVA de bonne signification (p-value < 0.000) sont produits : trois (3) concernent la ville de Bukavu, un (1) le PNKB et le dernier (1) Kabare. En effet, la population de Kabare influe positivement sur celle de Bukavu où la température maximum en subit une influence négative.

La température maximum de Kabare subit une influence positive de celle de PNKB dont le couvert végétal souffre de la pression de la population de Kabare.

V. Conclusion

Les villes modifient ainsi localement les paramètres climatiques et il est constaté qu'elles induisent une augmentation des températures, une diminution de la vitesse du vent, ou encore une modification de la pluviométrie. Ces modifications ont des conséquences sur la consommation énergétique des bâtiments et l'efficacité de la climatisation naturelle, la pollution atmosphérique, le confort en extérieur, la santé ou encore la faune et la flore. L'îlot de chaleur a pour effet de limiter la baisse des températures durant la nuit. Lors des vagues de chaleur, cette diminution devient vitale pour permettre aux organismes humains une récupération des fortes chaleurs du jour et son absence peut être mortelle.

Du fait de ces conséquences sanitaires, les collectivités territoriales ont intérêt à mieux appréhender et à mieux intégrer les modifications climatiques locales induites par la ville.

Cen'est cependant pas suffisant pour générer des initiatives avec des actions réfléchies et ayant des influences réelles sur le climat urbain. Pour cela, les élus et les aménageurs ont besoin de connaître de façon aussi précise que possible les impacts climatiques de leur(s) choix d'aménagement mais également de savoir quels sont actuellement les moyens à leur disposition pour leur prise en compte.

Nous nous sommes donc intéressés aux deux aspects suivants qui constituent le cœur de la problématique de ce travail : 1) l'évolution des paramètres climatiques dans la ville de Bukavu, la partie nord du territoire de Kabare et le Parc National de Kahuzi-Biega pour observer le changement 2) la comparaison de ces paramètres selon les entités pour observer les différences qui puissent exister entre ces dernières.

Pour le premier point, les graphiques ombrothermiques avec les données des températures maximales et minimales et les précipitations pour la période de 1980 à 2021 et les analyses des anomalies climatiques des températures maximales et minimales, les températures du sol, les précipitations et évapotranspirations de ces

trois entités. Ces graphiques ont permis de visualiser les périodes où il y a eu changement et les amplitudes de ces variations.

Pour le second point, les tableaux de corrélations entre les différents paramètres selon les entités, les analyses des variances et des régressions linéaires. Ces analyses ont permis d'observer les corrélations existantes, les différences ou non entre les paramètres et les entités.

Il a été constaté que les fluctuations des températures maximales et minimales de l'air ont été visibles durant certaines périodes. Ces variations de périodes de réchauffement et de refroidissement ne s'étaient pas manifestées de manière permanente sur une longue période. Pendant toute la durée d'étude, ces paramètres ont évolué de manière naturelle. Les précipitations ont aussi fluctué entre augmentation et diminution des quantités de pluies, ces fluctuations n'ont pas montré une tendance d'une augmentation ou diminution permanente sur des longues périodes. Il s'est observé une différence entre les moyennes des températures maximales et minimales, les précipitations et les températures du sol entre la ville de Bukavu et Kabare. Sauf, les évapotranspirations n'ont pas montré des différences significatives entre Bukavu et Kabare. Mais, Kabare a montré des températures supérieures à celles de Bukavu. Il n'a pas été observé la présence des îlots de chaleur créés par la ville de Bukavu.

Ces analyses ont montré qu'il n'y a pas eu une forte perturbation climatique créée par les activités humaines dues à la présence de la ville de Bukavu et sa forte urbanisation et démographie proche du PNKB. Cette étude n'a pas aussi montré une corrélation forte entre la pluviosité et le couvert végétal dans le PNKB. Mais, il a été observé une forte corrélation entre l'évolution de la population de Bukavu et Kabare et les indices NDVI. Le PNKB est resté plus froid et humide par rapport à Bukavu et Kabare. Il est possible qu'il y ait un apport extérieur sur la stabilisation du climat dans la ville de Bukavu et le territoire de Kabare.

Références

- [1] Aboagye, P.D., Sharifi, A., 2024. Urban Climate Adaptation And Mitigation Action Plans: A Critical Review, *Renew. Sustain. Energy Rev.* 189, 113886 <https://doi.org/10.1016/j.rser.2023.113886>.
- [2] Adler, R. F., & Gu, G. (2024). Global Precipitation For The Year 2023 And How It Relates To Longer Term Variations And Trends. *Atmosphere*, 15(5), 535.
- [3] Aggeri, F., & Cartel, M. (2017). Le Changement Climatique Et Les Entreprises : Enjeux, Espaces D'action, Régulations Internationales. *Entreprises Et Histoire*, (1), 6-20.
- [4] Altwater, S., Van De Sandt, K., Marinova, N., De Block, D., Klostermann, J., Swart, R., Bouwma, I., McCallum, S., Dworak, T., Osberghaus, D., 2011. Assessment Of The Most Significant Threats To The EU Posed By The Changing Climate In The Short, Medium And Long Term—Task 1 Report. *Ecologic*, Berlin
- [5] Atir, N. 2023. Essai De Définition Du Changement Climatique Par Les Paramètres Météorologiques Et Les Indices Climatiques (Doctoral Dissertation, UNIVERSITE KASDI MERBAH OUARGLA). <https://dspace.univ-ouargla.dz/jspui/bitstream/123456789/34683/1/ATIR.Pdf>
- [6] Balasha, A., Katungo, K., Murhula, B., Masheka, L., Weremubi, S., Mulume, D., Mulema, V., Amatcho, A., Bitagirwa, A., Lugendo, R., Selenge, B., Bahati, K., Kibazi, P., Isambeco, J., Laurent, K., Tshomba, J., Nkulu, J., 2022. Perceptions Of Congolese Students About Climate Change And Their Recommended Actions For Raising Climate Change Awareness In The Community. Preprints, 2022110301. <https://doi.org/10.20944/preprints202211.0301.v1>
- [7] Bates, B.C., Kundzewicz, Z.W., Wu, S., Palutikof, J.P., Eds., 2008. Climate Change And Water. Technical Paper Of The Intergovernmental Panel On Climate Change, IPCC Secretariat, Geneva, 210 Pp
- [8] Baumüller, J., 2015. A Summary Of Key Methodologies. In: Ng, E., Ren, C. (Eds.), *The Urban Climatic Map For Sustainable Urban Planning*. Routledge, London And New York, Pp. 35–44
- [9] Bele, M., Sonwa, T.A., 2014. Local Communities Vulnerability To Climate Change And Adaptation Strategies In Bukavu In DR Congo. *J. Environ. Dev.* 23 (3), 331–357. <https://doi.org/10.1177/1070496514536395>.
- [10] Best, Martin. Betts, Richard. The Impact Of Climate Change On Our Cities. *The Impact Of Climate Change On Our Cities [En Ligne]*. 2004 [Réf. Du 10 Octobre 2006]. Disponible Sur : http://ams.confex.com/ams/84Annual/Techprogram/Paper_74035.htm
- [11] Bonan, Gordon. *Ecological Climatology – Concepts And Applications*. Cambridge University Press, 2002, 678 P.
- [12] Borrossi, R. (2021). Transformations De Phases Et Comportement Mécanique À Haute Température D'un Alliage De Zirconium (M5Framatome): Effets De L'historique De Température (Doctoral Dissertation, Université Paris Sciences Et Lettres).
- [13] Bossel, Hartmut. Indicators For Sustainable Development: Theory, Method, Applications. A Report To The Balaton Group. Winnipeg (Canada): International Institute For Sustainable Development, 1999, 125 P.
- [14] Bossio, C., Labb' E, D., Ford, J., 2021. Urban Dwellers' Adaptive Capacity As A Socio-Psychological Process: Insights From Lima, Peru. *Climate Risk Manage.* 34, 100352 <https://doi.org/10.1016/j.crm.2021.100352>.
- [15] Brunner, J., Cozens, P., 2013. Where Have All The Trees Gone? Urban Consolidation And The Demise Of Urban Vegetation: A Case Study From Western Australia. *Planning Practice Res.* 28 (2), 231–255
- [16] Cao, B., S. Gruber, D. Zheng, Et X. Li, 2020: « The ERA5-Land Soil Temperature Bias In Permafrost Regions. *The Cryosphere* », 14(8), 2581-2595, [Doi.Org/10.5194/tc-14-2581-2020](https://doi.org/10.5194/tc-14-2581-2020).
- [17] Chausse, J., Kembola, T., Ngonde R., 2012. L'agriculture : Pierre Angulaire De L'économie De La RDC. In: Herderschee, J., D.Mukoko Samba, M., Tshimenga T. (Edit). *Résilience D'un Géant Africain : Accélérer La Croissance Et Promouvoir L'Emploi En RDC, II : Etudes Sectorielles*. Medias Paul, Kinshasa 97p.
- [18] Cox, P. M., Pearson, D., Booth, B. B., Friedlingstein, P., Huntingford, C., Jones, C. D., & Luke, C. M. (2013). Sensitivity Of Tropical Carbon To Climate Change Constrained By Carbon Dioxide Variability. *Nature*, 494(7437), 341-344.
- [19] Dahan Dalmedico, A., & Guillemot, H. (2006). *Changement Climatique : Dynamiques Scientifiques, Expertise, Enjeux Géopolitiques*. Sociologie Du Travail, 48(3), 412-432.
- [20] Dalgo, J., Lemonsu, A., Masson, V., 2019. Between Progress And Obstacles In Urban Climate Interdisciplinary Studies And Knowledge Transfer To Society. *Ann. N. Y. Acad. Sci.* 1436 (1), 5–18. <https://doi.org/10.1111/Nyas.13986>.

- [21] Demuzere, M.; Kittner, J.; Martilli, A.; Mills, G.; Moede, C.; Stewart, I.D.; Van Vliet, J. & Bechtel, B. (2022) 'Global Map Of Local Climate Zones (1.0.0)' [Data Set]. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.6364594>.
- [22] Djedjig, R., Bozonnet, E., Belarbi, R., 2015. Experimental Study Of The Urban Microclimate Mitigation Potential Of Green Roofs And Green Walls In Street Canyons. *Int. J. Low Carbon Technol* 10 (1), 34–44. <https://doi.org/10.1093/ijlct/Ctt019>.
- [23] Donsop- Nguezet, P.M., Ainembabazi, J., Alene, A., Abdulaye, T., Feleke, S., Nziguheba Et Al., 2020. Are Farmers Using Cropping System Intensification Technologies Experiencing Poverty Reduction In The Great Lakes Region Of Africa? *Food Energy Sec.* 9(3). 10.1002/Fes3.205.
- [24] Elbeltagi, A., Katipoğlu, O. M., Kartal, V., Danandeh Mehr, A., Berhail, S., & Elsadek, E. A. (2024). Advanced Reference Crop Evapotranspiration Prediction: A Novel Framework Combining Neural Nets, Bee Optimization Algorithm, And Mode Decomposition. *Applied Water Science*, 14(12), 256.
- [25] Eluo, D., Parmentier, H., Rey, L., & Cubizolle, H. (2024, June). Services Écosystémiques Et Changement Climatique : Cas De La Forêt Tourbeuse De LOKOLAMA Dans Le Bassin Du Congo (RDC). In " Climat Et Changements Environnementaux : Mesures, Enjeux, Transitions". 37ème Colloque Annuel De L'Association Internationale Pour Le Climat, Paris, Du 19 Au 21 Juin 2024.
- [26] Escourrou, G. La Spécificité Du Climat De L'agglomération Parisienne. *Revue De Géographie De Lyon*, Vol.65, N°2, 1990, P. 85 À 89.
- [27] Estoque, R.C., Ishtiaque, A., Parajuli, J., Et Al., 2023. Has The IPCC's Revised Vulnerability Concept Been Well Adopted? *Ambio* 52, 376–389 [Doi:10.1007](https://doi.org/10.1007).
- [28] Fan, S., Rue, C., 2020. The Role Of Smallholder Farms In A Changing World. In: Gomez Y Paloma, S., Riesgo, L., Louhichi, K. (Eds) *The Role Of Smallholder Farms In Food And Nutrition Security*. Springer, Cham. 10.1007/978-3-030-42148-9_2.
- [29] Fazaa, A., Dunn, C., Whittingham, J., 2021. Pollution Threatens Water Quality In The Central Marshes Of Southern Iraq. *Baghdad Sci. J.* 18(4) Supplement: 1501-1513 DOI: [https://dx.doi.org/10.21123/bsj.2021.18.4\(Suppl.\).1501](https://dx.doi.org/10.21123/bsj.2021.18.4(Suppl.).1501)
- [30] Fressoz, J. B., & Locher, F. (2015). L'agir Humain Sur Le Climat Et La Naissance De La Climatologie Historique, Xvii E-Xviii E Siècles. *Revue D'histoire Moderne Et Contemporaine*, (1), 48-78.
- [31] Fries, M. H. (2022). IPCC Vs. NIPCC : L'interprétation Des Données Climatiques, Entre Légitimation Et Manipulation. *Éclats. Revue Des Doctorantes Et Doctorants De L'École Doctorale* 592 LECLA.
- [32] Gibelin, A. L., Dubuisson, B., Corre, L., Deaux, N., Jourdain, S., Laval, L., ... & Tamburini, A. (2014). Évolution De La Température En France Depuis Les Années 1950-Constitution D'un Nouveau Jeu De Séries Homogénéisées De Référence. *La Météorologie*, 2014(87), 45-53.
- [33] Givoni, B. L'Homme, l'Architecture Et Le Climat. Paris : Editions Du Moniteur, 1978, 460 P.
- [34] Givoni, B. *Climate Considerations In Building An Urban Design*. John Wiley & Sons, 1998, 480 P.
- [35] Guerra, P.S., Trigo, O.P., Espinosa, P.S., Felipe Thomas Cabrera, F.T., Meseguer-Ruiz, O., 2023. Climate-Sensitive Planning. Opportunities Through The Study Of Lczs In Chile. *Building And Environment* 242. <https://doi.org/10.1016/j.buildenv.2023.110444>.
- [36] Guernouti, S., Rodler, A., Bernard, J., Musy, M., Morille, B., & Gros, A. 2022. Influence Du Changement Climatique Sur Le Comportement Du Bâtiment Dans Son Environnement Urbain: Quel Fichier Météo Futur Utiliser?.
- [37] Guo, D., Olesen, J. E., Manevski, K., Pullens, J. W., Li, A., & Liu, E. (2023). Change Trend And Attribution Analysis Of Reference Evapotranspiration Under Climate Change In The Northern China. *Agronomy*, 13(12), 3036.
- [38] Guo, M. Attribution Analysis Of Trends In Reference Crop Evapotranspiration In China. *Attribution Analysis Of Trends In Reference Crop Evapotranspiration In China*.
- [39] Guo, B., Zhang, J., Meng, X., Xu, T., & Song, Y. (2020). Long-Term Spatio-Temporal Precipitation Variations In China With Precipitation Surface Interpolated By ANUSPLIN. *Scientific Reports*, 10(1), 81.
- [40] Hair, J. F., Black, W. C., Babin, B. J., & Anderson, R. E. (2019). *Multivariate Data Analysis*. Cengage Learning.
- [41] Harvey, C.A., Saborio-Rodríguez, M., Martínez-Rodríguez, M.R., Et Al., 2018. Climate Change Impacts And Adaptation Among Smallholder Farmers In Central America. *Agric. And Food Secur* 7, 57. <https://doi.org/10.1186/s40066-018-0209-x>.
- [42] Haslinger, K., Sch'Onner, W., Abermann, J., Laaha, G., Andre, K., Olefs, M., Koch, R., 2023. Apparent Contradiction In The Projected Climatic Water Balance For Austria: Wetter Conditions On Average Versus Higher Probability Of Meteorological Droughts. *Nat. Hazards Earth Syst. Sci.* 23, 2749–2768. <https://doi.org/10.5194/nhess-23-2749-2023>.
- [43] He, Y., Thies, S., Paolo, A., Rentschler, J., 2021. Flood Impacts On Urban Transit And Accessibility -A Case Study Of Kinshasa. *Transport. Res. Part D* 96 (2021) 102889 [Contents. 10.1016/j.trd.2021.102889](https://doi.org/10.1016/j.trd.2021.102889).
- [44] Heaviside, C., Macintyre, H., Vardoulakis, S., 2017. (2017) 'The Urban Heat Island: Implications For Health In A Changing Environment'. *Curr. Environ. Health Rep.* 4, 296–305.
- [45] Hizhang, A., & Zhao, X. (2022). Changes Of Precipitation Pattern In China: 1961–2010. *Theoretical And Applied Climatology*, 148(3), 1005-1019.
- [46] Hu, Q., & Feng, S. (2003). A Daily Soil Temperature Dataset And Soil Temperature Climatology Of The Contiguous United States. *Journal Of Applied Meteorology And Climatology*, 42(8), 1139-1156.
- [47] IPCC, 2012. In: Field, C.B., Barros, V., Stocker, T.F., Qin, D., Dokken, D.J., Ebi, K.L., Mastrandrea, M.D., Mach, K.J., Plattner, G.-K., Allen, S.K., Tignor, M., Midgley, P. M. (Eds.), *Managing The Risks Of Extreme Events And Disasters To Advance Climate Change Adaptation. A Special Report Of Working Groups I And II Of The Intergovernmental Panel On Climate Change*. Cambridge And New York: Cambridge University Press. Available At: <https://www.ipcc.ch/report/managing-the-risks-of-extreme-events-and-disasters-to-advance-climate-change-adaptation/>. Accessed: 23 October 2023.
- [48] IPCC, 2014. In: Pachauri, R.K., Meyer, L.A. (Eds.), *Climate Change 2014: Synthesis Report. Contribution Of Working Groups I, II And III To The Fifth Assessment Report Of The Intergovernmental Panel On Climate Change*. IPCC, Geneva, Switzerland, P. 151. Core Writing Team.
- [49] IPCC, 2023. In: Lee, H., Romero, J. (Eds.), *Climate Change 2023: Synthesis Report. Contribution Of Working Groups I, II And III To The Sixth Assessment Report Of The Intergovernmental Panel On Climate Change*. IPCC, Geneva, Switzerland, P. 184. <https://doi.org/10.59327/ipcc/ar6-9789291691647>. Core Writing Team.
- [50] Irmak, S. (2016). Impacts Of Extreme Heat Stress And Increased Soil Temperature On Plant Growth And Development. *UNL Extension Water Resources*.
- [51] Isard, S. A., Schaeztl, R. J., & Andresen, J. A. (2007). Soils Cool As Climate Warms In The Great Lakes Region: 1951–2000. *Annals Of The Association Of American Geographers*, 97(3), 467-476.
- [52] James, G., Witten, D., Hastie, T., & Tibshirani, R. (2013). *An Introduction To Statistical Learning*. Springer.
- [53] Jauregui, Ernesto. Romales, Ernesto. Urban Effects On Convective Precipitation In Mexico City. *Atmospheric Environment*, Vol.30, N°20, 1996, P. 3383-3389.

- [54] Katerji, N., & Rana, G. (2011). Crop Reference Evapotranspiration: A Discussion Of The Concept, Analysis Of The Process And Validation. *Water Resources Management*, 25(6), 1581-1600.
- [55] Labedens, S., Scartezzini, J., Mauree, D., 2018. Modeling The Effects Of Future Urban Planning Scenarios On The Urban Heat Island In A Complex Region. *Urban Clim.* 1–41 <https://doi.org/10.31223/OSF.IO%2FC8MZB>.
- [56] Lafond, M. D., & Deboin, M. C. (2015). Changement Climatique : Analyse Des Publications 2013-2014 Du Cirad.
- [57] Landsberg, Helmut. The Meteorologically Utopian City. *Bulletin American Meteorological Society*, Vol.54, N°2, 1973, P86-89.
- [58] Lemonsu, A., Viguié, V., Daniel, M., Masson, V., 2015. Vulnerability To Heat Waves: Impact Of Urban Expansion Scenarios On Urban Heat Island And Heat Stress In Paris (France). *Urban Clim.* 14, 586–605.
- [59] Larif, Majdouline & Aziz, Chaouch & Elmidaou, Azzedine. (2015). Contribution De L'analyse En Composantes Principales (ACP) À L'évaluation Des Principaux Problèmes Environnementaux Et L'impact Du Changement Climatique.
- [60] Liu, J., Bowman, K. W., Schimel, D. S., Parazoo, N. C., Jiang, Z., Lee, M., ... & Eldering, A. (2017). Contrasting Carbon Cycle Responses Of The Tropical Continents To The 2015–2016 El Niño. *Science*, 358(6360), Eaam5690.
- [61] Malet, E., Astrade, L., Gauchon, C., & Jaillet, S. (2017). Introduction-Monitorer Les Milieux Naturels, Entre Ambitions Et Contraintes, Une Affaire De Compromis. *Collection EDYTEM. Cahiers De Géographie*, 19(1), 9-17.
- [62] Martinich, J., Crimmins, A., 2019. Climate Damages And Adaptation Potential Across Diverse Sectors Of The United States. *Nat. Clim. Chang.* 9, 397–404. <https://doi.org/10.1038/S41558-019-0444-6>.
- [63] Markolf, S., Hoehne, C., Fraser, A., Chester, M., Underwood, S., 2019. Transportation Resilience To Climate Change And Extreme Weather Events – Beyond Risk And Robustness. *Transp. Policy* 74, 174–186. <https://doi.org/10.1016/j.tranpol.2018.11.003>.
- [64] Masson-Delmotte, V. P., Zhai, P., Pirani, S. L., Connors, C., Péan, S., Berger, N., ... & Scheel Monteiro, P. M. (2021). *Ipcc, 2021: Summary For Policymakers. In: Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution Of Working Group I To The Sixth Assessment Report Of The Intergovernmental Panel On Climate Change.*
- [65] Montgomery, D. C., Peck, E. A., & Vining, G. G. (2012). *Introduction To Linear Regression Analysis.* Wiley.
- [66] Morlon, P., & Itier, B. (2017). Évaporation, Transpiration Végétale, Évapotranspiration : Les Mots.
- [67] Ngamsiriudom, T., Tanaka, T., 2023. Making An Urban Environmental Climate Map Of The Bangkok Metropolitan Region, Thailand: Analysis Of Air Temperature, Wind Distributions, And Spatial Environmental Factors. *World Dev. Sustain.* 3 <https://doi.org/10.1016/J.Wds.2023.100105>.
- [68] Oke, T.R., 1967. City Size And The Urban Heat Island. *Atmos. Environ.* 7 (8), 769–779. ISSN 0004-6981. [https://doi.org/10.1016/0004-6981\(73\)90140-6](https://doi.org/10.1016/0004-6981(73)90140-6), 1973.
- [69] Oke, T.R., 2006. Initial Guidance To Obtain Representative Meteorological Observations At Urban Sites. In: *World Meteorological Organization, Instruments And Observing Methods (Report No.)* 81.
- [70] Onwuka, B., & Mang, B. J. A. P. A. R. (2018). Effects Of Soil Temperature On Some Soil Properties And Plant Growth. *Adv. Plants Agric. Res.* 8(1), 34-37.
- [71] Organisation Des Nations Unis (ONU). [Réf. Du 20 Octobre 2008] : <http://www.un.org/french/portail/architecture/urbanisme> Et Environnement En Midi-Pyrénées. [Réf. Du 14 Octobre 2008] : <http://www.caue-mp.fr/>
- [72] Rachdi, B., H. Fougrach, , M. Hakdaoui, , M. Hsam, , & W. Badri, . (2011). Apport De La Télédétection Et Des SIG Pour L'évaluation Des Mares Temporaires Dans La Province De Benslimane (Maroc). *Kastamonu University Journal Of Forestry Faculty*, 11(2), 165-174.
- [73] Rasul, G., 2021. Twin Challenges Of COVID-19 Pandemic And Climate Change For Agriculture And Food Security In South Asia. *Environ. Challenges.* 2, 100027 <https://doi.org/10.1016/J.Envc.2021.100027>
- [74] Rawlins, B.G., Harris, J., Price, S., Bartlett, M., 2015. A Review Of Climate Change Impacts On Urban Soil Functions With Examples And Policy Insights From England, UK. *Soil Use Manage.* 31, 46–61. <https://doi.org/10.1111/Sum.12079>.
- [75] Reinwald, F., Thiel, S., Kainz, A., & Hahn, C. (2024). Components Of Urban Climate Analyses For The Development Of Planning Recommendation Maps. *Urban Climate*, 57, 102090.
- [76] Reghezza-Zitt, M. (2023). Sociétés Humaines Et Territoires Dans Un Climat Qui Change. *Du Réchauffement Climatique Global Aux Politiques Climatiques. Géocoïnfluences.*
- [77] Ren, C., Spit, T., Lenzholzer, S., Yim, H.L.S., Heusinkveld, B., Van Hove, B., Chen, L., Kupski, S., Burghardt, R., Katzschner, L., 2012. Urban Climate Map System For Dutch Spatial Planning. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.* 18, 207–221. <https://doi.org/10.1016/J.Jag.2012.01.026>.
- [78] Richard, Y., Castel, T., Bois, B., Cuccia, C., Marteau, R., Rossi, A., ... & Toussaint, H. (2014). Évolution Des Températures Observées En Bourgogne (1961-2011). *Bourgogne Nature*, (19), 110-117.
- [79] Richard, Y., Emery, J., Dudek, J., Pergaud, J., Chateau-Smith, C., Zito, S., Vairet, T., Castel, T., Th Evenin, T., Pohl, B., 2018. How Relevant Are Local Climate Zones And Urban Climate Zones For Urban Climate Research? Dijon (France) As A Case Study. *Urban Clim.* 26, 258–274. <https://doi.org/10.1016/J.Uclim.2018.10.002>
- [80] ROAF, Sue. Crichton, David. NICOL, Fergus. *Adapting Buildings And Cities For Climate Change, A 21st Century Survival Guide.* Elsevier, 2005, 363 P.
- [81] Romano, J. C., Bensoussan, N., Younes, W. A., & Arlhac, D. (2000). Anomalie Thermique Dans Les Eaux Du Golfe De Marseille Durant L'été 1999. Une Explication Partielle De La Mortalité D'invertébrés Fixés ? *Comptes Rendus De L'Académie Des Sciences-Series III-Sciences De La Vie*, 323(4), 415-427.
- [82] Rosenzweig, Cynthia. Solecki, William D. Parshall, Lily. Et Al. *Characterizing The Urban Heat Island In Current And Future Climates In New-Jersey.* *Environmental Hazards*, 2005, N°6, P. 51-62.
- [83] SACRE. Christian. *Le Confort Dans Les Espaces Extérieurs : Analyse Microclimatique.* Nantes : Centre Scientifique Et Technique Du Bâtiment, Division Climatologie, 1983, 138 P.
- [84] Santamouris, M. Adnot, J. Alvarez, S. Et Al. *Cooling The Cities – Rafraichir Les Villes.* Paris : Ecole Des Mines De Paris-Les Presses, 2004, 263 P.
- [85] Sarrat, C. Lemonsu, A. Masson, V. Guedalia, D. *Impact Of Urban Heat Island On Regional Atmospheric Pollution.* *Atmospheric Environment*, Vol.40, 2006, P. 1743-1758.
- [86] Schütt, A., Becker, J.N., Gr'Ongr'Oft, A., Schaaf-Titel, S., Eschenbach, A., 2022. Soil Water Stress At Young Urban Street-Tree Sites In Response To Meteorology And Site Parameters. *Urban Forestry Urban Greening* 75, 127692. <https://doi.org/10.1016/J.Ufug.2022.127692>
- [87] Sheela, A.M., Sarun, S., Justus, J., Vineetha, P., Sheeja, R., 2015. Assessment Of Changes Of Vector Borne Diseases With Wetland Characteristics Using Multivariate Analysis. *Environ. Geochem. Health* 37 (2), 391–410. <https://doi.org/10.1007/S10653-014-9655-Y>.
- [88] Shepherd, J. Marshall. PIERCE, Harold. NEGRI, Andrew J. *Rainfall Modification By Major Urban Areas: Observations From Spaceborne Rain Radar On The TRMM Satellite.* *Journal Of Applied Meteorology*, Vol.41, N°7, 2002, P.689-701.

- [89] Steemers, Koen. Human Comfort And Urban Form. In: 6th International Conference On Urban Climate, Göteborg, Suède, 12-16 Juin 2006a.
- [90] Stewart, I. D., & Oke, T. R. (2012). Local Climate Zones For Urban Temperature Studies. *Bulletin Of The American Meteorological Society*, 93(12), 1879-1900.
- [91] Stoffel, M., Tiranti, D., Huggel, C., 2014. (2014) 'Climate Change Impacts On Mass Movements—Case Studies From The European Alps'. *Sci. Total Environ.* 493, 1255–1266.
- [92] Sukopp, Herbert. Human-Caused Impact On Preserved Vegetation. *Landscape And Urban Planning*, Vol.68, 2004, P. 347-355
- [93] Tomlinson, C.J., Chapman, L., Thornes, J.E., Baker, C.J., 2011. Including The Urban Heat Island In Spatial Heat Health Risk Assessment Strategies: A Case Study For Birmingham, UK. *Int. J. Health Geogr.* 10, 42
- [94] Ulpiani, G., Treville, A., Bertoldi, P., Vettors, N., Barbosa, P., Feyen, L., Naumann, G., Santamouris, M., 2024. Are Cities Taking Action Against Urban Overheating? Insights From Over 7,500 Local Climate Actions. *One Earth*.
<https://doi.org/10.1016/j.oneear.2024.04.010>.
- [95] Verbeeck, K., Van Orshoven, J., Hermy, M., 2011. Measuring Extent, Location And Change Of Imperviousness In Urban Domestic Gardens In Collective Housing Projects. *Landscape Urban Planning* 100 (1–2), 57–66. ISSN 0169–2046.
<https://doi.org/10.1016/j.landurbplan.2010.09.007>
- [96] Westermann, S., M. Langer, J. Boike, M. Heikenfeld, M. Peter, B. Eitzelmüller, Et G. Krinner, 2016: « Simulating The Thermal Regime And Thaw Processes Of Ice-Rich Permafrost Ground With The Land-Surface Model Cryogrid 3. *Geoscientific Model Development* », 9(2), 523-546, [Doi.Org/10.5194/Gmd-9-523-2016](https://doi.org/10.5194/gmd-9-523-2016).
- [97] Westermann, S., A. Bartsch, Et T. Strozzi, 2020: « Permafrost - Algorithm Theoretical Basis Document. European Space Agency Contract Report », 1–30, Extrait De <https://climate.esa.int/en/projects/permafrost/key-documents/>.
- [98] World Bank, 2021. Climate Risk Profile: Congo, Democratic Republic (2021)
<https://climateknowledgeportal.worldbank.org/DRC>.
- [99] World Bank, 2018. Democratic Republic Of Congo Urbanization Review: Productive And Inclusive Cities For An Emerging Democratic Republic Of Congo (2018) 68p. DOI: 10.1596/978-1-4648-1203.
- [100] Xu, D., Zhou, D., Wang, Y., Meng, X., Chen, W., Yang, Y., 2020. Temporal And Spatial Variations Of Urban Climate And Derivation Of An Urban Climate Map For Xi'an, China. *Sustain. Cities Soc.* 52, 101850
<https://doi.org/10.1016/j.scs.2019.101850>, 2020.
- [101] Yegbemey, R., Yabi, J., Aïhounon, B., Paraïso, A., 2014. Mod' Elisation Simultan' Ee De La Perception Et De L'adaptation Au Changement Climatique : Cas Des Producteurs De Maïs Du Nord B´ Enin (Afrique De l'Ouest). *Cahiers Agricultures* 23, 177–187.
- [102] Zhang, H., Bai, J., Zhao, J., Guo, F., Zhu, P., Dong, J., Cai, J., 2024. Application And Future Of Local Climate Zone System In Urban Climate Assessment And Planning—Bibliometrics And Meta-Analysis. *Cities* 150, 104999.
<https://doi.org/10.1016/j.cities.2024.104999>.
- [103] Zhang, A., & Zhao, X. (2022). Changes Of Precipitation Pattern In China: 1961–2010. *Theoretical And Applied Climatology*, 148(3), 1005-1019.