

Dynamique microclimatique induite par les phases d’atterrissage et de décollage à l’aéroport international de Lubumbashi/Luano (RDC): Étude multi-scalaire couplant surface, atmosphère et opérations aéronautiques

[Microclimatic Dynamics Associated with Aircraft Landing and Take-Off (LTO) Phases at Lubumbashi/Luano International Airport, Democratic Republic of the Congo: Multi-scale Study Coupling Surface, Atmosphere, and Aeronautical Operations]

Billy DIABASENGA KUSUAMINA¹, NZUZI NZUZI André², and Sion DIABASENGA LUYINDULA³

¹École Doctorale De Télécommunication Et Télédétection Spatiale (Ets), Département de Géomatique et Géodésie, Université Pédagogique Nationale (UPN), Kinshasa, RD Congo

²Département de Physique et des Sciences Appliquées, Faculté des Sciences, Université Pédagogique Nationale (UPN), Kinshasa, RD Congo

³Section Aviation Civile, Institut Supérieur de Techniques Appliquées (ISTA, Kinshasa), RD Congo

Copyright © 2026 ISSR Journals. This is an open access article distributed under the **Creative Commons Attribution License**, which permits unrestricted use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

ABSTRACT: This study presents a comprehensive, explanatory, and methodologically grounded scientific analysis of the microclimatic dynamics at Lubumbashi International Airport (Luano). It demonstrates that the airport platform should be interpreted as a coupled thermo-operational system, in which mineral surfaces, residual vegetation, seasonality, wind, precipitation, and aeronautical operations interact to generate a structured thermal signal.

The analysis integrates hourly meteorological observations, Landsat and MODIS satellite products, ERA5 reanalysis variables, CHIRPS precipitation data, biophysical indicators such as the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI), and air traffic data. It further develops an airport–reference thermal contrast, a spatial LTO exposure index, and a framework based on spatial and temporal differencing.

The results converge toward four main conclusions: (1) the Luano airport area exhibits a well-defined airport-related thermal signature; (2) the relative decline in vegetation cover and increasing surface artificialization account for a major share of background warming; (3) LTO cycles act as localized and transient thermal amplifiers; and (4) these dynamics have direct implications for air density, take-off performance, low-level turbulence, and overall aviation safety.

KEYWORDS: airport microclimate, Luano, LTO cycles, land surface temperature, NDVI, surface artificialization, aviation safety, take-off performance.

RESUME: Cette étude propose un article scientifique complet, explicatif et méthodiquement argumenté sur la dynamique microclimatique de l’aéroport international de Lubumbashi/Luano. Elle montre que la plateforme doit être lue comme un système thermo-opérationnel couplé, dans lequel les surfaces minérales, la végétation résiduelle, la saisonnalité, le vent, la pluie et les opérations aéronautiques interagissent pour produire un signal thermique structuré.

L’analyse combine des observations météorologiques horaires, des produits Landsat et MODIS, des variables de réanalyse ERA5, des précipitations CHIRPS, des indices biophysiques tels que le NDVI ainsi que des données de trafic aérien. Elle formalise un contraste thermique d’emprise entre l’aéroport et des zones témoins, un indice spatial d’exposition aux LTO et une logique de différences spatiales et temporelles.

Les résultats convergent vers quatre conclusions: l'emprise de Luano présente une signature thermique aéroportuaire nette; la baisse relative du couvert végétal et l'artificialisation expliquent une part majeure du réchauffement de fond; les cycles LTO jouent le rôle d'amplificateurs locaux et transitoires; et ces dynamiques ont des implications concrètes pour la densité de l'air, la performance au décollage, la turbulence de basse couche et la sécurité aérienne.

MOTS-CLEFS: microclimat aéroportuaire, Luano, cycles LTO, température de surface, NDVI, artificialisation, sécurité aérienne, performance au décollage.

1 INTRODUCTION GENERALE

Les aéroports figurent parmi les espaces les plus fortement anthropisés des systèmes de transport modernes. Ils réunissent sur une emprise relativement limitée des surfaces minérales continues, des bâtiments techniques, des réseaux d'accès, des équipements énergétiques permanents et des événements mécaniques concentrés, notamment la mise en route, le roulage, l'alignement, la course au décollage, l'atterrissage et la décélération. Cette concentration de fonctions fait de la plateforme aéroportuaire un objet climatique local spécifique.¹

La littérature scientifique sur l'aviation a longtemps privilégié l'échelle globale: émissions de gaz à effet de serre, effets non-CO₂, forçage radiatif, contribution sectorielle au changement climatique. Cette approche est indispensable, mais elle ne suffit pas à expliquer ce qui se passe sur le terrain. À l'échelle de l'aérodrome, la question pertinente devient celle des interactions entre surface, atmosphère et opérations. Comment la piste, les taxiways, le tarmac, les surfaces bâties, la végétation résiduelle, la pluie, le vent et les cycles de trafic se combinent-ils pour produire un microclimat propre ?

L'aéroport international de Lubumbashi (code AITA: FBM; code OACI: FZQA) est situé à Luano, dans la ville de Lubumbashi, en République démocratique du Congo. Il est localisé aux coordonnées géographiques 11° 35' 29" S et 27° 31' 52" E, à une altitude d'environ 1 309 m (4 295 ft) au-dessus du niveau de la mer.²

Le cas de Lubumbashi/Luano présente un intérêt particulier du point de vue scientifique et opérationnel. En effet, la plateforme aéroportuaire s'inscrit dans un environnement tropical d'altitude, caractérisé par une saison sèche bien marquée et des contrastes significatifs entre zones urbaines et périurbaines. Cette configuration influence directement les conditions microclimatiques locales ainsi que les interactions entre les infrastructures aéroportuaires et l'atmosphère.

Les travaux conduits au laboratoire ont déjà mis en évidence une hausse diachronique de la température de surface, une structuration thermique du noyau aéroportuaire et une relation inverse entre couverture végétale et température de surface. En parallèle, l'analyse détaillée des opérations a fait apparaître l'intérêt d'une lecture par fenêtres actives et creuses, par périodes sèches et humides, et par zones de trajectoires.

Le présent article unifie ces acquis dans une seule étude de publication. Son ambition n'est pas de juxtaposer des résultats; elle est de construire une démonstration cohérente. Cette démonstration suit une progression claire: définir le cadre physique, expliquer la logique méthodologique, présenter les résultats, puis discuter leurs implications scientifiques et opérationnelles.

2 POSITIONNEMENT SCIENTIFIQUE ET HYPOTHESE DE TRAVAIL

La valeur ajoutée de cette étude est de ne pas réduire le problème à un seul angle. Une approche exclusivement diachronique risquerait de considérer l'aéroport comme une simple surface chaude. Une approche exclusivement horaire risquerait, à l'inverse, d'oublier que le terrain est déjà thermiquement structuré avant même le passage d'un aéronef. Il faut donc tenir ensemble le temps long de la transformation des surfaces et le temps court des opérations.

¹ L'OACI définit l'aérodrome comme une zone destinée à l'arrivée, au départ et aux mouvements en surface des aéronefs, incluant bâtiments, installations et équipements ; cette définition justifie ici une lecture intégrée des infrastructures, des opérations et de l'environnement local.

² International Civil Aviation Organization (ICAO), *Location Indicators (Doc 7910)*, latest edition.

L'hypothèse directrice est la suivante: à Luano, le réchauffement de fond résulte principalement de l'artificialisation et de la réduction relative du refroidissement par végétation, tandis que les cycles LTO introduisent des forçages locaux, brefs mais énergétiques, capables d'amplifier le signal dans certaines fenêtres climatiques et spatiales.

Cette hypothèse entraîne une conséquence méthodologique importante. Il ne suffit pas d'observer une hausse de température pendant une période de trafic pour conclure à un effet LTO. Il faut démontrer que cette hausse persiste après contrôle du vent, de la pluie, de la saison, du jour ou de la nuit, et de la nature des surfaces. Toute la méthode de l'article vise à satisfaire cette exigence.

3 CADRE THEORIQUE: DE LA SURFACE AU MICROCLIMAT AEROPORTUAIRE

Le point de départ est le bilan d'énergie de surface, qui peut être écrit sous la forme classique:

$$Rn = H + LE + G + Qf$$

Dans cette relation, Rn est le rayonnement net, H le flux de chaleur sensible, LE le flux latent, G le flux de chaleur stocké dans le sol ou les matériaux, et Qf la chaleur anthropique. Dans un aéroport, Qf ne renvoie pas seulement aux bâtiments; il inclut aussi la chaleur et le brassage liés aux moteurs, aux APU, aux véhicules de piste et aux séquences de roulage ou de décollage.³

La compréhension du terme LE est essentielle. Dans un milieu végétalisé, une part importante de l'énergie reçue est dissipée par évapotranspiration. Lorsque le couvert végétal diminue, le flux latent diminue lui aussi, et une plus grande part de l'énergie disponible se transforme en chaleur sensible ou s'accumule dans les matériaux. C'est pourquoi les surfaces minérales continues tendent à produire des températures de surface plus élevées.⁴

L'indice de végétation normalisé, NDVI, sert alors d'indicateur de contrôle biophysique:

$$NDVI = (NIR - Rouge) / (NIR + Rouge)$$

Les valeurs élevées du NDVI sont généralement associées à une végétation plus dense ou plus active; les valeurs faibles traduisent au contraire des sols nus, des surfaces bâties ou une végétation sparse. Dans la littérature, la relation inverse entre NDVI et LST est largement documentée: moins la végétation est présente, plus la température de surface tend à s'élever.⁵

L'aéroport doit donc être envisagé comme un système couplé surface-atmosphère-opérations. La surface produit une signature thermique de fond. L'atmosphère locale module la dispersion, la persistance ou l'atténuation de cette signature. Les opérations, enfin, introduisent des apports mécaniques et thermiques localisés, qui n'ont pas la même portée selon la phase, le type d'aéronef, le vent et l'état humide ou sec des surfaces.

4 LUANO COMME LABORATOIRE CLIMATIQUE AEROPORTUAIRE

Luano est particulièrement adapté à une étude de ce type pour plusieurs raisons. Premièrement, l'aéroport se trouve à une altitude qui augmente la sensibilité des performances aéronautiques à la température. Deuxièmement, l'emprise aéroportuaire est suffisamment nette pour être comparée à des zones témoins voisines de nature urbaine, périurbaine ou végétalisée. Troisièmement, la saison sèche locale fournit un cadre naturel où le signal thermique a plus de chances d'être observé.

La plateforme comprend une piste principale, des taxiways, des aires de trafic et des zones techniques qui constituent autant d'unités thermiques différenciées. Il serait méthodologiquement faible de parler de l'aéroport comme d'un bloc

³Dans une plateforme aéroportuaire, la chaleur anthropique regroupe non seulement les bâtiments et services au sol, mais aussi les moteurs, APU, véhicules de piste et phases de roulage ou de décollage, qui modifient localement le bilan d'énergie.

⁴Les travaux d'Oke et de Santamouris montrent que la réduction du flux latent et le stockage thermique des matériaux artificiels constituent deux mécanismes centraux des environnements plus chauds.

⁵La littérature de télédétection thermique, notamment Voogt et Oke ainsi que Weng, documente largement la relation inverse entre couverture végétale et température de surface.

homogène. La piste, le tarmac et les postes de stationnement n'ont ni les mêmes matériaux, ni la même fréquence d'exposition au trafic, ni la même interaction avec le vent ou la végétation périphérique.

Le laboratoire a ainsi retenu une approche combinant l'emprise globale, des sous-zones fonctionnelles et des profils de trajectoire. Ce choix répond à une réalité physique: l'effet attendu des opérations est anisotrope. Il se concentre davantage autour de la course au décollage, des points d'arrêt, des zones d'alignement, des aires de stationnement et des premiers kilomètres de montée initiale que dans les marges périphériques peu fréquentées.

5 DONNEES MOBILISEES: POURQUOI PLUSIEURS SOURCES SONT NECESSAIRES

Une étude microclimatique crédible ne peut pas reposer sur une seule famille de données. Les observations météorologiques horaires sont indispensables pour caractériser la température de l'air, le vent, la pression et la pluie au niveau du terrain. Elles servent avant tout à contrôler le climat de fond et la variabilité de court terme, conformément aux recommandations internationales de l'OMM.⁶

Les produits Landsat Collection 2 Level-2 servent à cartographier la température de surface et à discriminer les sous-zones de l'emprise aéroportuaire. Leur résolution spatiale est particulièrement utile pour distinguer la piste, les taxiways, les aprons, les terrains adjacents et les secteurs plus végétalisés. Les produits MODIS, quant à eux, apportent une fréquence temporelle plus élevée et sont donc utiles pour caractériser les rythmes saisonniers et interannuels.⁷

La réanalyse ERA5 fournit un contexte atmosphérique cohérent et continu. Elle n'est pas destinée à remplacer la micro-observation locale; elle aide à replacer cette micro-observation dans un champ régional plus large, surtout pour le vent, la stabilité et la variabilité synoptique.⁸

Les précipitations CHIRPS complètent utilement le dispositif, car elles permettent de lire la saisonnalité de la pluie avec une finesse spatiale pertinente pour distinguer les périodes propices et défavorables à l'observation des contrastes thermiques.⁹

Enfin, les données de trafic aérien rendent possible la segmentation temporelle. Grâce à elles, le laboratoire peut distinguer des heures actives et des heures creuses, identifier les séquences de départ et d'arrivée, et associer les sous-zones thermiques aux couloirs de trajectoire et aux moments du trafic.

6 METHODOLOGIE DETAILLEE, ÉTAPE PAR ÉTAPE

La première étape de la méthode consiste à définir les unités temporelles de comparaison. Chaque journée est découpée en heures, puis les heures sont classées en actives ou creuses selon la présence d'au moins un mouvement significatif. Cette étape peut sembler simple; elle est pourtant fondatrice, car toute l'analyse repose ensuite sur la comparaison entre ces classes.

La deuxième étape consiste à séparer jour et nuit. Le cycle diurne influe profondément sur le bilan d'énergie, la stabilité de la couche limite et la température de surface. Une comparaison valable doit donc opposer des situations comparables: un jour actif à un jour creux, une nuit active à une nuit creuse.

La troisième étape est la définition des unités spatiales. L'emprise aéroportuaire est distinguée des zones témoins, et l'emprise elle-même est subdivisée en unités fonctionnelles: piste, taxiways, tarmac, zones de stationnement, segments d'exposition sous trajectoire. Cette structuration permet de tester le caractère anisotrope du signal thermique.

La quatrième étape est la formulation d'un contraste thermique d'emprise:

⁶Le Guide de l'OMM sur les instruments et méthodes d'observation (WMO-No. 8) demeure la référence pour la qualité, la traçabilité et la comparabilité des observations météorologiques.

⁷Les produits Landsat Collection 2 Level-2 comprennent des produits de réflectance de surface et de température de surface ; les produits MODIS apportent en complément une fréquence temporelle utile pour les analyses saisonnières.

⁸ERA5 est la cinquième génération de réanalyse du CEPMMT/ECMWF et fournit des estimations horaires cohérentes de nombreuses variables atmosphériques à l'échelle globale.

⁹CHIRPS est un jeu de données pluviométriques quasi global combinant imagerie infrarouge, climatologie et observations in situ ; il est couramment utilisé pour l'analyse des tendances et de la saisonnalité des pluies.

$$\Delta LST = LST_AIR - LST_REF$$

où LST_AIR désigne la température de surface moyenne de l'emprise ou d'une sous-zone aéroportuaire, et LST_REF celle d'une zone témoin. Si ΔLST est élevé et stable dans le temps, il traduit une signature structurelle. S'il varie selon le trafic, la saison ou les phases, il peut aussi porter un signal opérationnel.

La cinquième étape est le contrôle biophysique. Le NDVI, l'albédo, les masques de qualité des scènes et l'état humide ou sec des surfaces sont utilisés pour empêcher une sur-attribution au trafic. Une surface très chaude peut l'être simplement parce qu'elle est minérale et sèche; il faut donc isoler ce qui reste une fois ce facteur pris en compte.

La sixième étape est l'analyse spatiale des trajectoires. Le laboratoire résume cette logique par un indice d'exposition aux LTO:

$$IELTO(x, y) = \sum (Traj_i \times Freq_i \times Phase_i)$$

Cet indice ne mesure pas directement la température; il hiérarchise l'exposition potentielle des zones. C'est un outil de priorisation, particulièrement utile pour distinguer les secteurs où l'on attend le plus d'effet du simple voisinage de l'aéroport.

La septième étape est l'introduction de la saisonnalité et du rapport signal/bruit. En normalisant la température, le rayonnement, le vent et la pluie, il devient possible de construire un indice de favorabilité climatique qui oriente l'analyse vers les périodes les plus propices à la détection du signal, principalement la saison sèche et les heures de fort rayonnement.

La huitième étape, enfin, est l'interprétation statistique. Le raisonnement peut être résumé par une différence de différences:

$$DID = (Y_AIR, \text{actif} - Y_AIR, \text{creux}) - (Y_REF, \text{actif} - Y_REF, \text{creux})$$

Cette structure exprime bien la philosophie générale du protocole: comparer le temps et l'espace simultanément pour isoler ce qui appartient à la dynamique aéroportuaire elle-même.

7 ORDRES DE GRANDEUR ÉNERGETIQUES DES LTO ET LOGIQUE PHYSIQUE DES PHASES

Pour comprendre pourquoi un mouvement d'aéronef peut, malgré sa brièveté, influencer le microclimat de proximité, il faut raisonner en ordres de grandeur. Une écriture simplifiée de l'énergie thermique dissipée par une phase est:

$$E_chaleur = m_fuel \times PCI \times \eta_heat$$

Le pouvoir calorifique inférieur du kérosène étant voisin de 43 MJ/kg, les phases fortement motorisées peuvent mobiliser des niveaux énergétiques élevés. La course au décollage est en général l'une des phases les plus contributives, en raison de la poussée maximale exercée très près du sol. La montée initiale, notamment pour les appareils lourds, reste fortement contributive sur les premiers nautiques. Le roulage, quant à lui, produit un apport moins intense à l'instant t, mais plus prolongé.

L'interprétation doit cependant rester prudente. Ces apports locaux ne signifient pas que les LTO dominent le bilan énergétique global de la plateforme. Le rayonnement solaire reste la source principale de l'énergie reçue par les surfaces. Les LTO agissent plutôt comme des amplificateurs locaux, capables de moduler un champ thermique déjà structuré par la minéralisation et la sécheresse.

8 RESULTATS: CE QUE MONTRE LE CAS LUANO

Le premier résultat majeur est l'existence d'une signature thermique aéroportuaire stable. Les analyses diachroniques disponibles montrent une hausse de la température de surface sur plusieurs décennies, de l'ordre de **+2,8 °C**, accompagnée d'une structuration spatiale nette des zones chaudes sur la piste, le tarmac et les secteurs les plus minéralisés. Cette hausse ne peut pas être réduite à une simple fluctuation accidentelle; elle traduit une transformation durable du système de surface.

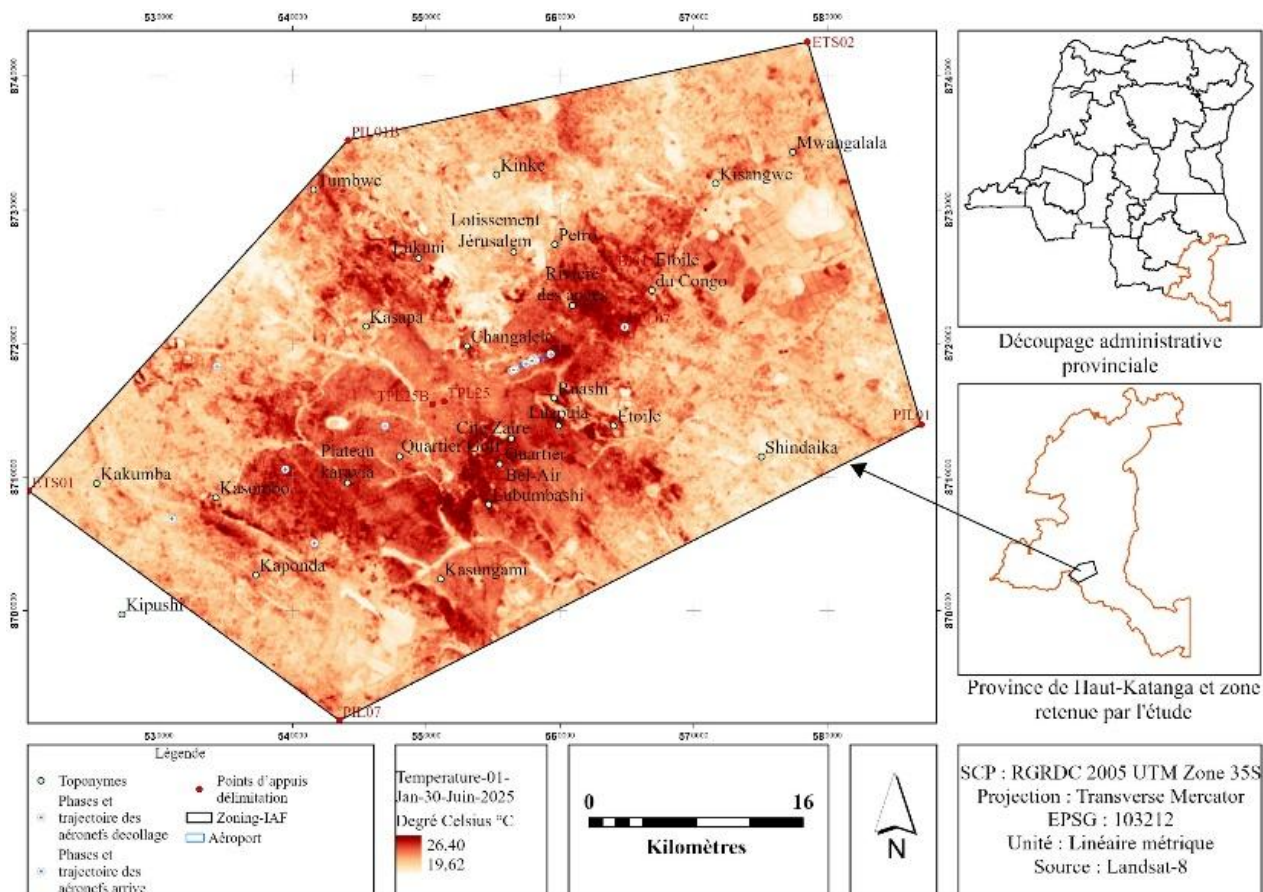


Fig. 1. Distribution spatiale de la température de surface (LST) dans la région de Lubumbashi, incluant l'aéroport de Luano (30 janvier 2025)

Source: Élaboration de l'auteur à partir des données NASA / USGS Landsat 8 (bandes infrarouges thermiques), traitées et analysées sous ArcGIS et IDRISI 15.0.

La distribution spatiale de la température de surface met en évidence un noyau thermique marqué au niveau des zones urbaines et aéroportuaires de Lubumbashi, caractérisé par des températures élevées associées aux surfaces imperméabilisées. Cette configuration confirme la coexistence d'un îlot de chaleur urbain et d'un îlot de chaleur aéroportuaire, résultant des modifications du bilan énergétique de surface.

Cette carte met en évidence la distribution spatiale des températures au niveau de l'emprise aéroportuaire et des zones environnantes, permettant d'identifier les contrastes thermiques liés à l'occupation du sol (surfaces minérales, zones végétalisées et espaces urbains). La distribution spatiale de la température de surface met en évidence une structure thermique marquée au niveau de la plateforme aéroportuaire de Luano, caractérisée par des températures élevées associées aux surfaces artificialisées. Cela confirme la présence d'un effet d'îlot de chaleur induit par l'aéroport, superposé à l'îlot de chaleur urbain plus étendu de la ville de Lubumbashi.

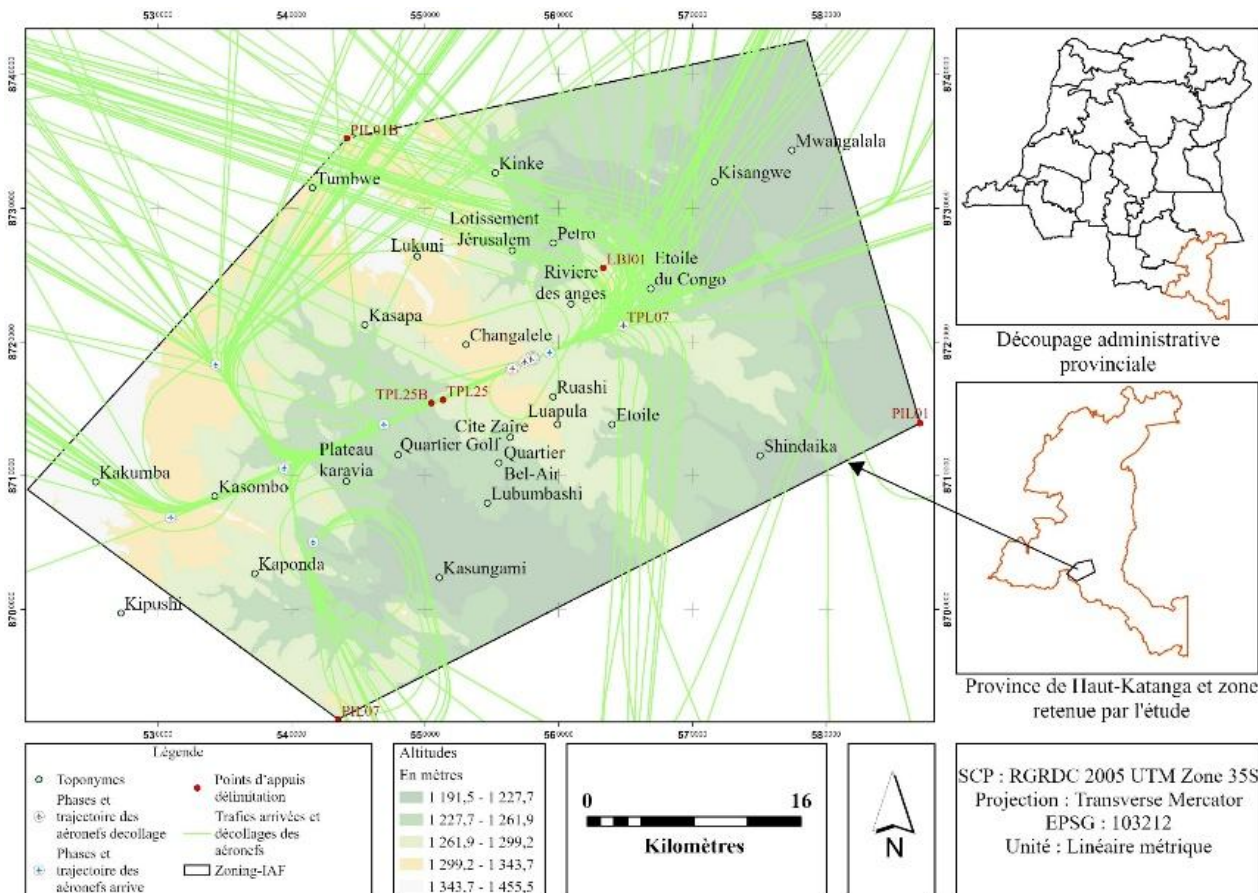


Fig. 2. Distribution spatiale des trajectoires des aéronefs (arrivées et départs) dans la région de Lubumbashi (FZQA) et leur relation avec le relief et les zones d'îlots de chaleur

Source: Élaboration de l'auteur à partir des données de trajectoires aériennes issues de la Régie des Voies Aériennes, complétées par Flightradar24 et FlightAware, croisées avec les données altimétriques NASA (SRTM), et traitées sous ArcGIS.

Cette organisation spatiale des trajectoires concorde avec les zones de températures élevées mises en évidence dans les cartes d'îlots de chaleur, indiquant une co-localisation entre les principaux couloirs de trafic aérien et les noyaux thermiques. Cette superposition suggère une interaction entre les dynamiques opérationnelles aéronautiques et les processus thermiques liés à l'artificialisation des surfaces et aux flux énergétiques surface-atmosphère.

Le deuxième résultat est l'importance du facteur biophysique. Les analyses du NDVI montrent que les secteurs faiblement végétalisés ou fortement artificialisés présentent les températures de surface les plus élevées. Autrement dit, le signal aéroportuaire est d'abord un signal de surface avant d'être un signal de trafic. Cela n'enlève rien à l'importance des opérations; cela explique le fond thermique sur lequel elles viennent s'inscrire.

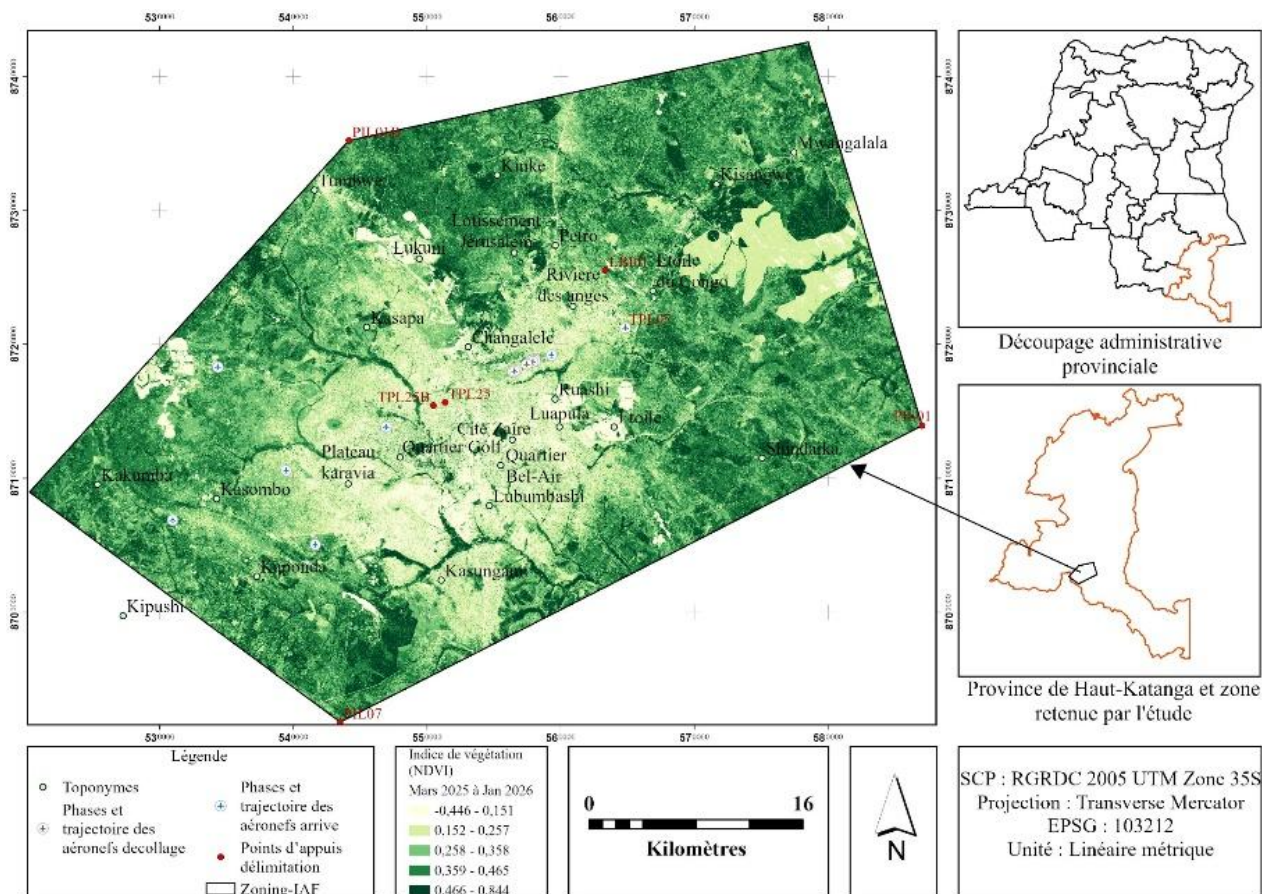


Fig. 3. Carte de l'indice de végétation normalisé (NDVI) de la région de Lubumbashi, incluant l'aéroport de Luano (mars 2025 – janvier 2026)

Source: Traitement et analyse réalisés par l'auteur à partir des données NASA Landsat, traitées sous ArcGIS et IDRISI 15.0.

La distribution spatiale du NDVI met en évidence un contraste marqué entre les surfaces végétalisées et les surfaces artificialisées. Les faibles valeurs de NDVI observées au niveau de la plateforme aéroportuaire de Luano correspondent à des zones caractérisées par une faible évapotranspiration et une dominance du flux de chaleur sensible. Cette configuration confirme le couplage étroit entre l'occupation du sol et la température de surface, renforçant ainsi l'effet d'îlot de chaleur induit par l'aéroport.

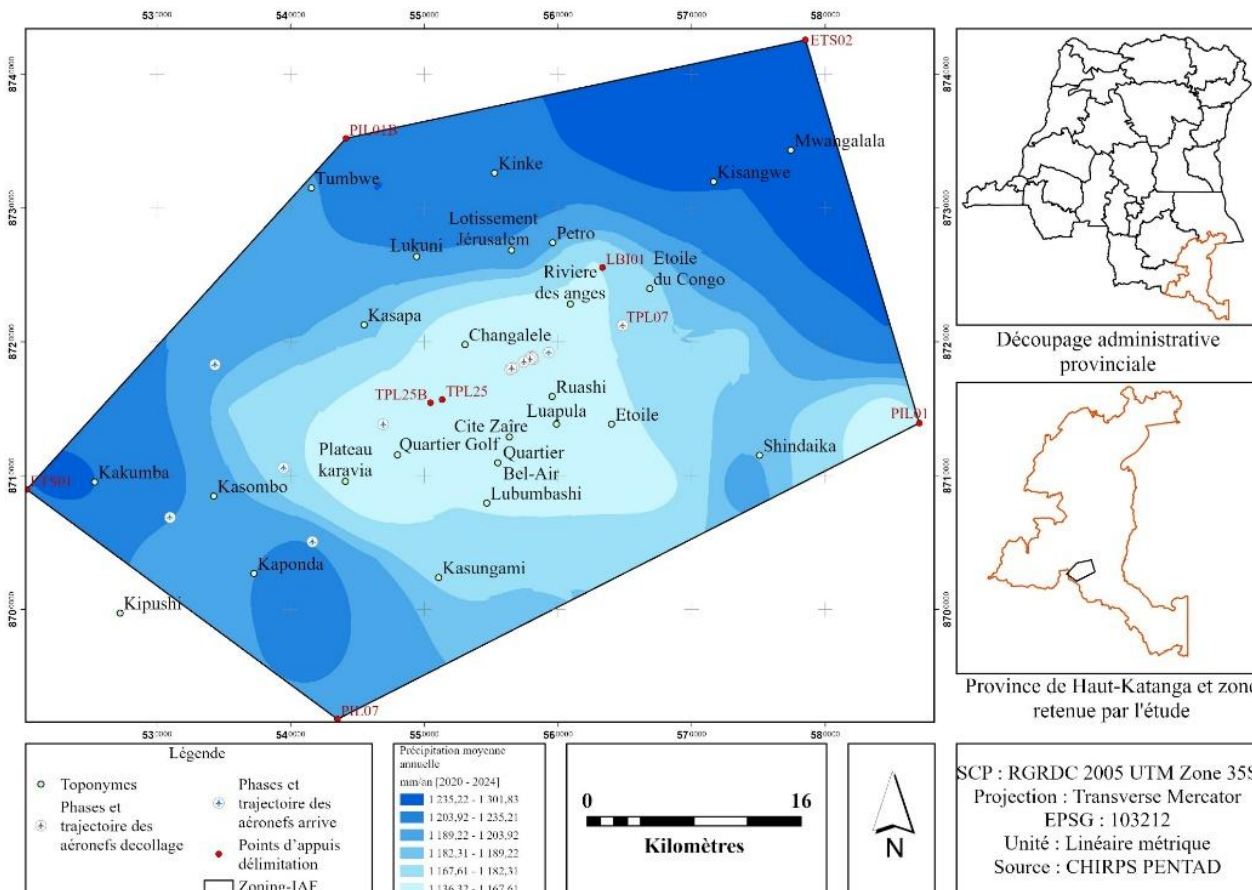


Fig. 4. Distribution spatiale des précipitations moyennes annuelles dans la région de Lubumbashi, incluant l’aéroport de Luano, et mise en évidence d’un gradient hydrométéorologique entre le centre urbain et les zones périphériques (période 2020–2024)

Source: Élaboration de l’auteur à partir des données de précipitations Climate Hazards Group CHIRPS PENTAD (2020–2024), agrégées annuellement et traitées sous Python et ArcGIS (projection UTM Zone 35S, WGS84).

Les précipitations apparaissent plus faibles au niveau de la plateforme aéroportuaire de Luano ainsi qu’au centre urbain de Lubumbashi, tandis qu’elles augmentent progressivement vers les zones périphériques. Cette distribution traduit l’influence de l’urbanisation et de l’artificialisation des surfaces, susceptibles de modifier les processus convectifs et les flux d’humidité à l’échelle locale.

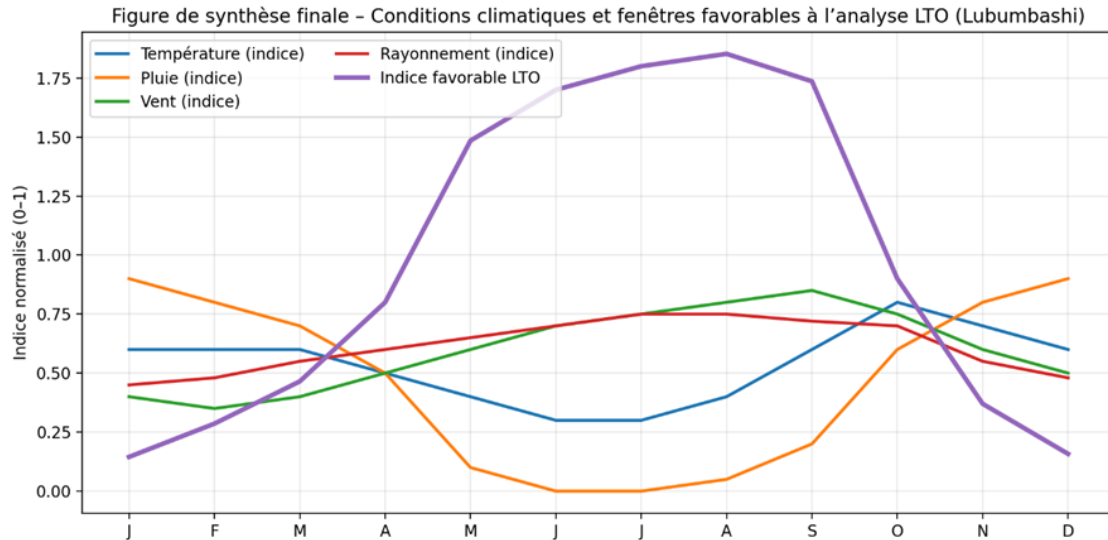


Fig. 6. Synthèse des conditions climatiques mensuelles et identification des fenêtres favorables aux opérations LTO à Lubumbashi (indices normalisés, 0–1)

Source: *Élaboration de l’auteur à partir des données climatiques (température, précipitations, vent et rayonnement) issues des bases NASA POWER et des séries climatiques régionales, traitées et normalisées sous Python.*

La distribution temporelle du trafic aérien à FZQA présente une structure bimodale, caractérisée par un pic principal en milieu de journée et un pic secondaire en fin d’après-midi, traduisant l’influence combinée des contraintes opérationnelles, des conditions climatiques et de l’organisation du réseau aérien régional.

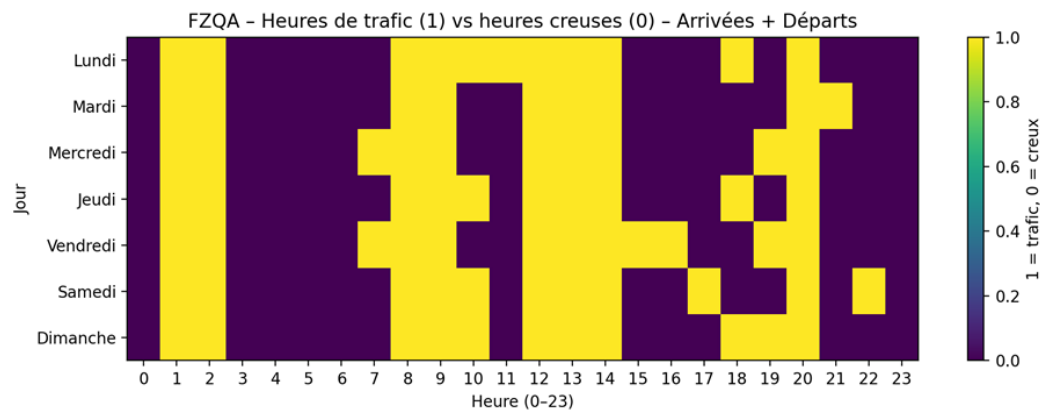


Fig. 7. Répartition horaire hebdomadaire du trafic aérien à l’aéroport de Lubumbashi/Luano (FZQA) : identification des heures actives (1) et des heures creuses (0) pour les arrivées et départs

Source: *Élaboration de l’auteur à partir des données opérationnelles de trafic aérien issues de la Régie des Voies Aériennes, complétées par les plateformes Flightradar24 et FlightAware, traitées et visualisées sous Python (Matplotlib) ¹¹.*

¹¹ Régie des Voies Aériennes (RVA), données opérationnelles de trafic aérien (non publiées), Direction de l’Exploitation ; Flightradar24 AB, “Flight Tracking Data,” consulté en ligne (<https://www.flightradar24.com/>) ; FlightAware LLC, “Flight Tracking and Data Services,” consulté

Le quatrième résultat concerne le vent. Lorsque le vent est fort, la dispersion tend à réduire la persistance locale des anomalies thermiques et mécaniques. Lorsque le vent est faible à modéré, le signal a davantage de chance de persister assez longtemps pour être observé. Le rôle du vent n’est donc pas accessoire; il est un modérateur essentiel.

La distribution spatiale des paramètres climatiques met en évidence une structuration régionale des conditions atmosphériques, marquée par une relative homogénéité au centre et au nord-est, contrastant avec des zones plus hétérogènes au sud-ouest. Cette différenciation reflète l’influence combinée du relief, des gradients thermiques et des dynamiques atmosphériques locales.

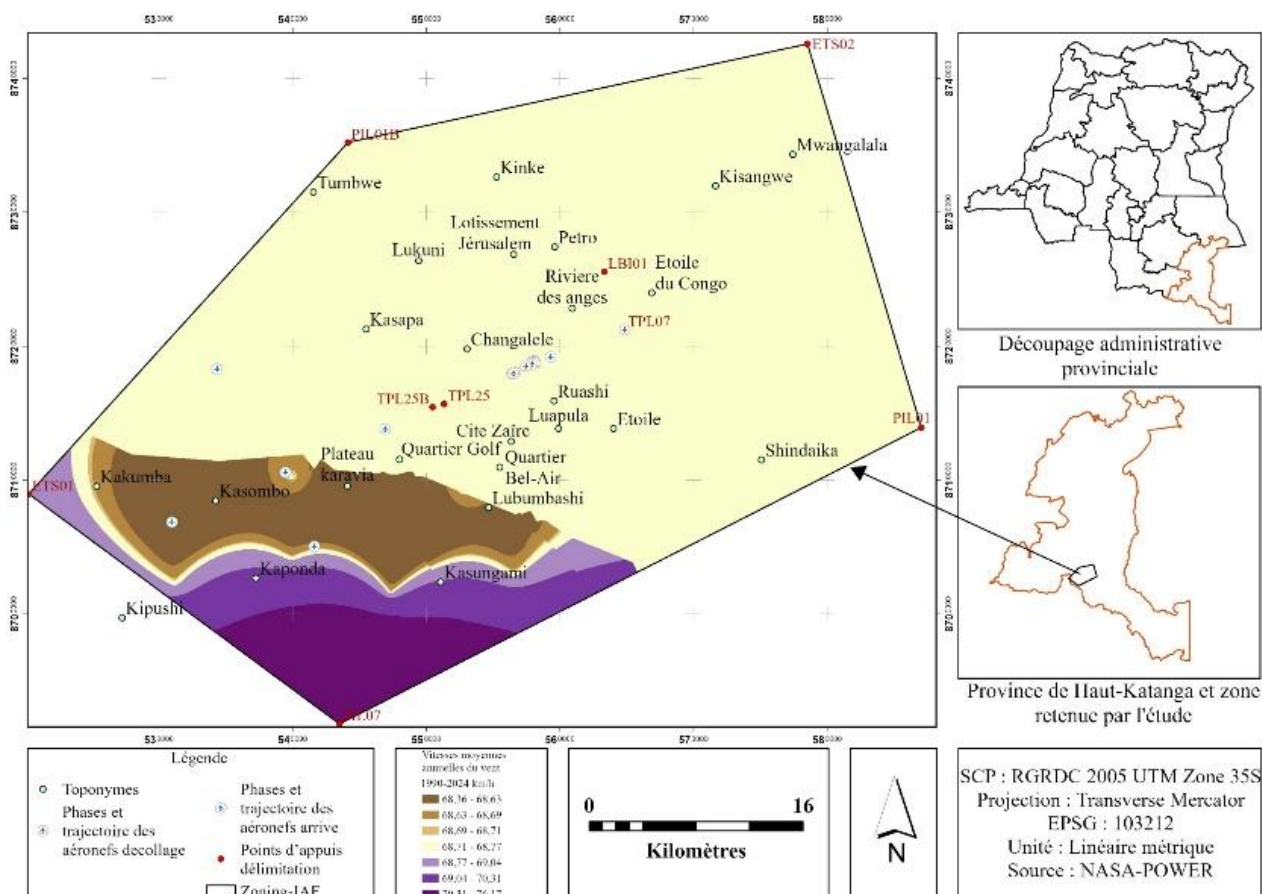


Fig. 8. Distribution spatiale des paramètres climatiques (température de l’air, précipitations, vent et rayonnement solaire) dans la région de Lubumbashi, incluant l’aéroport de Luano, et identification des zones différenciées influençant les conditions des opérations LTO

Source: Élaboration de l’auteur à partir des données climatiques NASA POWER (période 2020–2025), extraites à résolution spatiale régulière et agrégées mensuellement, puis traitées, interpolées et cartographiées sous ArcGIS (projection UTM Zone 35S, WGS84).

Le cinquième résultat est l’anisotropie. Les zones d’effet les plus probables se concentrent autour de la course au décollage, des points d’arrêt, de l’aire de trafic (apron) et des premiers segments de montée. Ce signal n’est ni radial ni homogène; il suit l’organisation fonctionnelle et les usages de l’espace aéroportuaire.

en ligne (<https://www.flightaware.com/>) ; Hunter, J. D., “Matplotlib: A 2D Graphics Environment,” *Computing in Science & Engineering* 9, no. 3 (2007): 90–95, <https://doi.org/10.1109/MCSE.2007.55>

Il est également mis en relief par les zones d'îlots de chaleur identifiées, ainsi que par les autres paramètres environnementaux analysés (température de surface, NDVI, albédo, vent et précipitations), qui confirment une structuration spatiale cohérente entre les activités aéronautiques, l'artificialisation des surfaces et les dynamiques énergétiques surface-atmosphère.

9 DISCUSSION ET ARGUMENTS D'INTERPRETATION

Le premier argument fort de l'étude est qu'elle évite de confondre la chaleur de l'aéroport avec celle du trafic. L'emprise de Luano est chaude parce qu'elle est minéralisée, peu végétalisée et fortement exposée au rayonnement. Mais, dans ce fond chaud, certaines zones et certaines fenêtres paraissent plus affectées lorsqu'un trafic significatif est présent. C'est cette superposition qui donne sens à l'idée d'amplification locale par les LTO.

Le deuxième argument est d'ordre méthodologique. Une étude microclimatique convaincante doit articuler plusieurs échelles, plusieurs variables et plusieurs sources. Le cas Luano montre précisément la fécondité d'un tel croisement: observations horaires pour le contexte atmosphérique, télédétection pour la structure de surface, réanalyse pour le contexte régional, pluie pour l'état hydrique et trafic pour la logique d'exposition.

Le troisième argument réside dans la prudence scientifique de l'attribution. L'article ne prétend pas que chaque hausse locale de température est due au passage d'un avion. Il affirme que, dans des contextes favorables, les opérations aéronautiques agissent comme des modulateurs crédibles d'un système déjà thermiquement structuré. Cette manière de conclure est plus solide qu'une attribution totale et sans nuance.

Les limites restent réelles. Les données de trafic peuvent être incomplètes; les produits de température de surface ne mesurent pas directement la température de l'air à quelques mètres du sol; les réanalyses sont trop grossières pour la très petite échelle; et les conversions énergétiques restent des ordres de grandeur. Mais ces limites n'invalident pas l'argument; elles fixent simplement le domaine d'interprétation.

10 IMPLICATIONS AERONAUTIQUES ET OPERATIONNELLES

L'intérêt pratique du travail apparaît clairement lorsqu'on relie température et densité de l'air. Dans une écriture simplifiée, la densité s'exprime par:

$$\rho = p / (R_d \times T_v)$$

À pression donnée, une hausse de température diminue donc la densité. Cette remarque est particulièrement importante à Luano en raison de l'altitude de l'aéroport.¹²

La portance peut être rappelée sous la forme:

$$L = 1/2 \times \rho \times V^2 \times S \times C_L$$

Si ρ diminue, la portance disponible à vitesse égale diminue aussi. Il peut en résulter une augmentation de la distance de décollage, une réduction de la performance de montée ou un resserrement des marges opérationnelles.¹³

Le microclimat aéroportuaire intéresse ainsi directement la sécurité et la planification de l'exploitation. Il ne s'agit pas de dire qu'un point chaud rend l'exploitation impossible; il s'agit de reconnaître qu'un terrain chaud, d'altitude, à surface fortement minéralisée et à trafic concentré peut créer des conditions plus exigeantes, surtout pendant les périodes les plus chaudes de la saison sèche.

Les effets de brassage et de turbulence doivent aussi être mentionnés. Les jets moteurs, le roulage à puissance significative et la convection au-dessus des surfaces très chaudes peuvent renforcer la turbulence de basse couche. Là encore, l'article ne

¹²La FAA rappelle que la density altitude correspond à l'altitude-pression corrigée des écarts de température à l'atmosphère standard ; lorsque la température augmente, la densité de l'air diminue et les performances se dégradent.

¹³Les documents FAA sur les principes du vol et la density altitude rappellent qu'une densité d'air plus faible réduit la portance, la poussée et la performance de montée, tout en augmentant généralement la distance de décollage.

prétend pas quantifier précisément chaque contribution; il établit un cadre de plausibilité physique qui mérite un prolongement instrumental.

11 PERSPECTIVES DE RECHERCHE ET RECOMMANDATIONS

La première perspective est instrumentale. Le laboratoire gagnerait à déployer davantage de capteurs fixes ou mobiles sur les sous-zones critiques: piste, points d'arrêt, apron, secteurs sous le vent dominant et zones témoins. Une densification de l'observation permettrait de mieux relier l'air proche du sol aux structures de température de surface.

La deuxième perspective est analytique. Des approches statistiques plus poussées, combinant type d'aéronef, phase, vent, saison et humidité de surface, pourraient affiner l'estimation du signal LTO. La logique de différence de différences posée ici constitue déjà une base méthodologique solide pour ce développement.

La troisième perspective est comparative. Luano peut devenir un site-pilote pour d'autres aéroports africains, en particulier ceux qui partagent certaines caractéristiques: altitude, saison sèche marquée, emprise minéralisée étendue ou croissance des surfaces artificialisées.

La quatrième perspective est managériale. Les résultats de l'étude peuvent alimenter une stratégie environnementale de plateforme: surveillance des zones chaudes récurrentes, réflexion sur les matériaux de surface, gestion compatible de la végétation, intégration du facteur microclimatique dans les analyses de sécurité et de performance.

12 CONCLUSION GENERALE

Cette étude montre que l'aéroport international de Lubumbashi/Luano doit être compris comme un système climatique local structuré. La minéralisation des surfaces, la dynamique de la végétation, la saisonnalité régionale, le vent et les opérations aéronautiques y interagissent en permanence. Les résultats disponibles confirment une hausse de la température de surface, une structuration thermique nette du noyau aéroportuaire et un rôle important du contrôle biophysique par le NDVI.

Les cycles LTO interviennent dans ce système comme des amplificateurs locaux et transitoires. Ils ne constituent pas la cause unique du réchauffement observé, mais ils modulent un fond thermique déjà marqué, surtout lorsque les surfaces sont sèches, le rayonnement fort, le vent modéré et l'exposition spatiale élevée.

Au plan scientifique, l'article propose un cadre explicatif, détaillé et reproductible. Au plan opérationnel, il rappelle que le microclimat de plateforme concerne directement la densité de l'air, la performance au décollage, la turbulence de basse couche, la gestion environnementale et, en définitive, la sécurité aérienne. Luano apparaît ainsi comme un laboratoire climatique aéroportuaire majeur pour la recherche appliquée en Afrique centrale.

REFERENCES

- [1] Oke, T. R. (1987). *Boundary layer climates* (2nd ed.). Routledge.
- [2] Stull, R. B. (1988). *An introduction to boundary layer meteorology*. Kluwer Academic Publishers.
- [3] Holton, J. R. (2004). *An introduction to dynamic meteorology* (4th ed.). Academic Press.
- [4] Wallace, J. M., & Hobbs, P. V. (2006). *Atmospheric science: An introductory survey* (2nd ed.). Academic Press.
- [5] Arnfield, A. J. (2003). Two decades of urban climate research: A review. *International Journal of Climatology*, 23 (1), 1–26. <https://doi.org/10.1002/joc.859>
- [6] Stewart, I. D., & Oke, T. R. (2012). Local climate zones for urban temperature studies. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 93 (12), 1879–1900. <https://doi.org/10.1175/BAMS-D-11-00019.1>.
- [7] Voogt, J. A., & Oke, T. R. (2003). Thermal remote sensing of urban climates. *Remote Sensing of Environment*, 86 (3), 370–384. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(03\)00079-8](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(03)00079-8).
- [8] Lee, D. S., et al. (2021). The contribution of global aviation to anthropogenic climate forcing. *Atmospheric Environment*, 244, 117834. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2020.117834>.
- [9] International Civil Aviation Organization (ICAO). (2022). *Environmental report*. <https://www.icao.int/environmental-protection/>.
- [10] International Civil Aviation Organization (ICAO). (2018). *Annex 16 – Environmental protection*.
- [11] Gough, W. A., & Leung, A. C. W. (2022). Do airports have their own climate? *Journal of Applied Meteorology and Climatology*.
- [12] Kara, Y., & Yavuz, M. (2025). Land surface temperature trends across urban infrastructures. *Urban Climate*.

- [13] Jensen, J. R. (2007). Remote sensing of the environment (2nd ed.). Pearson.
- [14] Liang, S. (2004). Quantitative remote sensing of land surfaces. Wiley.
- [15] Lillesand, T., Kiefer, R. W., & Chipman, J. (2015). Remote sensing and image interpretation (7th ed.). Wiley.
- [16] Tucker, C. J. (1979). Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment*, 8 (2), 127–150. [https://doi.org/10.1016/0034-4257\(79\)90013-0](https://doi.org/10.1016/0034-4257(79)90013-0).
- [17] NASA. (2024). Landsat 8–9 Collection 2 Level-2 Science Products. <https://landsat.gsfc.nasa.gov/>.
- [18] NASA. (2024). MODIS land surface temperature products. <https://modis.gsfc.nasa.gov/>.
- [19] ECMWF. (2023). ERA5 reanalysis dataset. <https://cds.climate.copernicus.eu/>
- [20] Funk, C., et al. (2015). The climate hazards infrared precipitation with stations (CHIRPS). *Scientific Data*, 2, 150066. <https://doi.org/10.1038/sdata.2015.66>.
- [21] NASA. (2024). NASA POWER data access viewer. <https://power.larc.nasa.gov/>.
- [22] World Meteorological Organization (WMO). (2018). Guide to meteorological instruments and methods of observation (WMO-No. 8). <https://public.wmo.int/>.
- [23] International Civil Aviation Organization (ICAO). (2013). Airport planning manual (Doc 9184).
- [24] International Civil Aviation Organization (ICAO). (2005). Aerodrome design manual (Doc 9157).
- [25] Flightradar24. (2025). Flight tracking data. <https://www.flightradar24.com/>.
- [26] FlightAware. (2025). Aviation data platform. <https://www.flightaware.com/>.
- [27] Régie des Voies Aériennes (RVA). (2025). Données opérationnelles de trafic aérien (non publiées).
- [28] Nzuzi, N., et al. (2023). Etude des échelles de l'îlot de chaleur et NDVI de l'aéroport de Luano, IJSR-23-020-17 art 2.