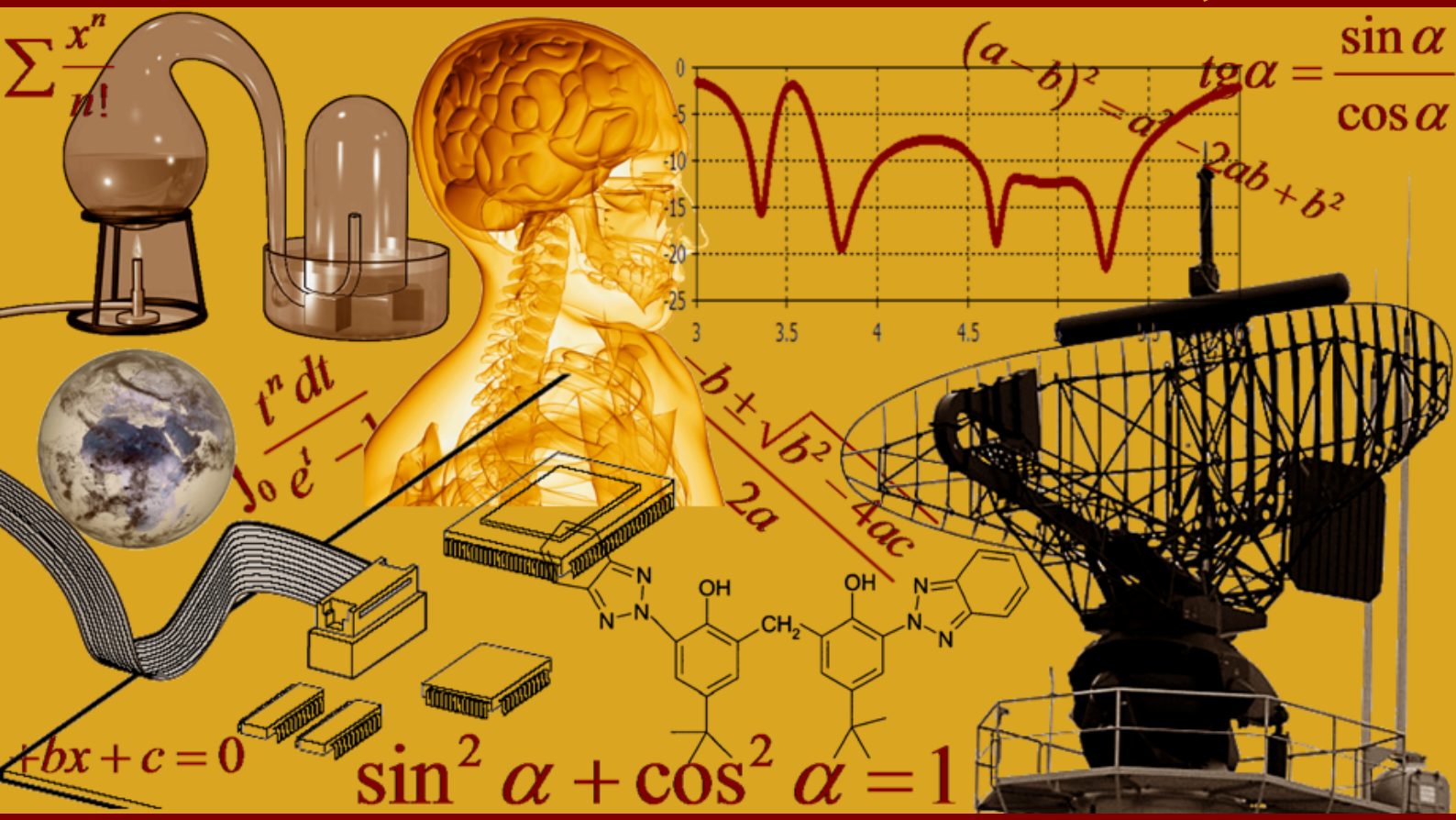
ISSN: 2336-0046 Impact Factor: 7.093

INTERNATIONAL JOURNAL OF INNOVATION AND SCIENTIFIC RESEARCH

Vol. 85 N. 1 June 2026



International Peer Reviewed Monthly Journal

Innovative Space of Scientific Research Journals
http://www.issr-journals.org/

International Journal of Innovation and Scientific Reseach

International Journal of Innovation and Scientific Research (ISSN: 2336-0046) is an open access, specialized, peer-reviewed, and interdisciplinary journal that focuses on research, development and application within the fields of innovation, engineering, science and technology. Published four times per year in English, French, Spanish and Arabic, it tries to give its contribution for enhancement of research studies.

All research articles, review articles, short communications and technical notes are sent for blind peer review, with a very fast and without delay review procedure (within approximately two weeks of submission) thanks to the joint efforts of Editorial Board and Advisory Board. The acceptance rate of the journal is 75%.

Contributions must be original, not previously or simultaneously published elsewhere. Accepted papers are available freely with online full-text content upon receiving the final versions, and will be indexed at major academic databases.

Editorial Advisory Board

K. Messaoudi, Hochschule für Bankwirtschaft, Germany
Sundar Balasubramanian, Medical University of South Carolina, USA
Ujwal Patil, University of New Orleans, USA
Sankaranarayanan Seetharaman, National University of Singapore, Singapore
Rehan Jamil, Yunnan Normal University, China
Avdhoot Walunj, National Institute of Technology Karnataka, India
Fairouz Benahmed, University of Connecticut Health Center, USA
Achmad Choerudin, ST.,SE.,MM., Academy Technology of Adhi Unggul Bhirawa, Indonesia
Mohammad Ali Shariati, Islamic Azad University, Science and Research Branch, Iran
Md Ramim Tanver Rahman, Jiangnan University, China
Rasha Khalil Al-Saad, Veterinary Medicine College, Iraq
Malika Maataoui, Mohammed V University, Morocco
Neil L. Egloso, Palompon Institute of Technology, Philippines
Sanjay Sharma, Roorkee Engineering & Management Technology Institute, India
Ahmed Nabile Emam, National Research Center (NRC), Egypt
Md. Arif Hossain Jewel, Rural Development Academy, Bangladesh
N. Thangadurai, Jayalakshmi Institute of Technology, India
Anupam Kumar, Ashoka Institute of Technology & Management, India
Goutam Banerjee, Visva-Bharati University, India
Santosh Kumar Mishra, S. N. D. T. Women's University, India
Urmila Shrawankar, G H Raisoni College of Engineering, India

Table of Contents

Efectividad de la Zeolita natural, para durezas en aguas subterráneas, en el cantón Milagro del Guayas 1-8

Mario Marquez, Karina Subia, Diego Ramirez, and Juan Triviño

GNSS Radio Frequency Interference in the Eastern Kinshasa FIR: Safety Impacts, Regulatory Gaps, and a Resilience Framework for Civil Aviation in the Democratic Republic of the Congo 9-14

Billy DIABASENGA KUSUAMINA and Sion DIABASENGA LUYINDULA

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 15-29

Billy DIABASENGA KUSUAMINA, NZUZI NZUZI André, and Sion DIABASENGA LUYINDULA

Analyse spatio-temporelle de l'occupation des terres dans la zone centrale de l'habitat de la girafe au Niger (Afrique de l'Ouest) 30-41

Roumanatou Maman Moutari Danjouma, ABOUBACAR ADAMOU Kolafane, Mourtala YOUNFA ABDOU, ABDOULAYE ABDOU Siradji, DJIBO IDE Abdoul Rachid, BOURAHIMA KIMBA Saharatou, INOUSSA Maman Maârouhi, and Boubé Morou

Etude du régime alimentaire du babouin de Guinée (Papio papio, Desmarest 1820) par rapport aux stades phénologiques de la flore du secteur de Simenti, Parc National du Niokolo Koba 42-57

Mallé GUEYE, Aïssatou SARR, Moustapha SY, Assane DIOUF, and Ibrahima GUEYE

Étude de la variabilité spatiale et analytique de la concentration en uranium résiduel dans les hydroxydes de cobalt d'exportation: Application pour la radioprotection à Kolwezi 58-70

Kayembe Kitenge Sylva, Faila Lutina Inès, Nawezi Kasongo Raymond, Malala Kitenge Pascal, Mpiana Kasela Olivier, Mutomb Kapend Habacuc, and Katubilwa Katele Christian

Évaluation du risque radiologique environnemental associé aux rejets solides industriels contenant des radionucléides naturels (NORMs): Application de l'approche graduée au cas de la carrière de l'UCK 71-75

Kayembe Kitenge Sylva, Faila Lutina Inès, Mpiana Kasela Olivier, Mutomb Kapend Habacuc, Katubilwa Katele Christian, and Malala Kitenge Pascal

International Journal of Innovation and Scientific Research
ISSN 2336-0046 Vol. 85 No. 1 Jun. 2026, pp. 1-8
© 2026 Innovative Space of Scientific Research Journals
http://www.ijisr.issr-journals.org/

Efectividad de la Zeolita natural, para durezas en aguas subterráneas, en el cantón Milagro del Guayas

[Effectiveness of natural zeolite for hardness in groundwater in the Milagro canton of Guayas]

Mario Marquez[1], Karina Subia[1], Diego Ramirez[1], and Juan Triviño[2]

[1]Carrera de Ingeniería Civil, Universidad de Guayaquil, Guayaquil, Guayas, Ecuador

[2]Carrera de Odontología, Universidad de Guayaquil, Guayaquil, Guayas, Ecuador

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: Zeolite is an abundant porous mineral found on the Earth's surface in Ecuador due to volcanic activity in the soil. Natural mordenite (Z.A.) can be used as an adsorption agent in wastewater and groundwater containing hardness, composed of dissolved salts that increase conductivity as well as total dissolved solids (TDS). This study demonstrates its effectiveness in improving water quality for general use and potentially for consumption in groundwater from a facility located in the Milagro Canton, Guayas Province.

Three unfiltered well-water samples from the facility and five samples filtered through a previously constructed aquarium-type filter were analyzed. The samples were tested for pH, conductivity, hardness, fecal coliforms, and initial TDS levels for comparison purposes.

The results showed that the unfiltered samples had hardness levels of 340 mg/L, 355 mg/L, and 360 mg/L, respectively, with a maximum conductivity of 780 µS/cm. In contrast, the filtered samples exhibited a significant reduction, reaching a maximum hardness of 240 mg/L and a conductivity of 653 µS/cm, representing an average efficiency of 29%.

KEYWORDS: Zeolite (Z.A.) efficiency, groundwater use efficiency.

RESUMEN: La zeolita es un mineral poroso abundante que se encuentra en la superficie terrestre ecuatoriana debido a la actividad volcánica en los suelos. La mordenita natural (Z.A) puede ser utilizada como un agente de adsorción en aguas residuales y aguas subterráneas que contienen dureza, compuestas de sales disueltas que aumentan la conductividad, así como los sólidos disueltos totales (TDS). Este estudio demuestra su eficacia en la mejora de la calidad del agua para uso general y posiblemente para consumo en aguas subterráneas de una instalación en el cantón Milagros de la provincia del Guayas. Se analizaron tres muestras sin filtrar de pozos en la instalación y cinco filtradas con un filtro de pecera previamente construido. Las muestras se analizaron para pH, conductividad, dureza, coliformes fecales y niveles previos de TDS para su comparación. Los resultados mostraron que las muestras sin filtrar tenían niveles de dureza de 340 mg/L, 355 mg/L y 360 mg/L, con una conductividad máxima de 780 µS/cm, respectivamente; Mientras que las muestras filtradas mostraron una reducción significativa hasta una dureza máxima de 240 mg/L, con una conductividad de 653 µS/cm, representando una eficiencia promedio del 29%.

PALABRAS-CLAVE: eficiencia de (Z.A), eficiencia de uso de aguas subterráneas.

Corresponding Author: Mario Marquez

1 INTRODUCCIÓN

La dureza del agua subterránea es un desafío persistente en muchas regiones del mundo, afectando tanto a la calidad del agua como a su aplicabilidad en usos domésticos e industriales. De acuerdo con (**Ceron et al. 2021).** La dureza es causada principalmente por la presencia de minerales disueltos, específicamente por compuestos e iones de calcio y magnesio, que generan contaminación, pueden originar incrustaciones en tuberías y equipos, reduciendo su eficiencia y aumentando los costos de mantenimiento. La utilización de zeolitas, minerales con alta capacidad de intercambio iónico, se ha destacado como una solución efectiva y sostenible para la remoción de dureza en el agua subterránea; la cual, además, reacciona con los detergentes comunes y limpiadores domésticos, afectando su eficacia (**Pérez, 2022).** En Ecuador, el cantón Milagro ubicado en la provincia del Guayas y caracterizado por una actividad agrícola intensa, 95% del área total, enfrenta desafíos significativos relacionados con la gestión del agua subterránea como su

mayor fuente del recurso hídrico; porque pese a la humedad por ser región costa adentro, el cantón se caracteriza por tener un corto pero intenso periodo de lluvias y una larga sequía, con la característica de abundante (STD), en el suelo por la irrigación en los campos**.** (**Gallo & Vázquez, 2021).**

Además, la comunidad puede beneficiarse de una tecnología accesible que no solo mejora la calidad del agua, sino que también promueve prácticas sostenibles en la gestión de recursos hídricos, a pesar de que dicha acción de uso conlleva lo que se denomina en la actualidad como un *Antropoceno* por parte de la sociedad**.** *(***Rodríguez, 2022).** con la necesidad descubierta de que las fuentes subterráneas se caracterizan por su dureza; a pesar de no existir a buena distancia actividades mineras, que pueden producir filtraciones de metales pasados en la roca, como el hierro, plomo, mercurio y cadmio, entre otros, para lo cual se requieren filtraciones con productos preparados sintéticamente (**Méndez & López, 2021).**

Las zeolitas son minerales naturales, aluminosilicatos con una estructura cristalina porosa que les permite actuar como intercambiador de iones de calcio y magnesio en el agua, por iones de sodio, reduciendo así la dureza de manera efectiva, las zeolitas nativas o comerciales como la mordenita natural (Z.A), cuentan con propiedades idóneas para ser utilizadas en el tratamiento de agua residual doméstica **(Ramírez &Triviño, 2024).** Siempre y cuando exista la educación y capacitación en su uso, para garantizar el éxito de esta intervención, involucrando a los actores locales en el proceso de toma de decisiones y gestión del agua. **(Pérez et al. 2020);** además, su capacidad de adsorción, intercambio iónico y catálisis las convierte en herramientas valiosas para abordar diversos problemas de calidad del agua y otros generados por esta condición del líquido a distribuir, como obstrucciones en las tuberías e incluso en electrodomésticos, por depósitos de los llamados sarros. Donde se requiere de un diseño adecuado que considere el caudal a filtrar, la concentración de iones, y la interacción con otros componentes del agua subterránea (**Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2011).**

Diversos estudios demuestran la aplicación de diferentes zeolitas, tanto a nivel internacional como regional en sierra y costa suramericana, en Ecuador se menciona a Ruiz et al. (2020) en un proyecto de potabilización de agua subterránea para un conjunto de asentamiento indígena en la sierra, y bajo los parámetros nacionales *(***Pino *et al. 2021).*** Similar en el trabajo de **(Araiza & Zanella, 2024).** en la parroquia Salache de la provincia Cotopaxi, donde se descubrió que los comuneros consumían agua de fuentes subterráneas con índices de dureza elevados; los resultados demostraron que el agua potabilizada a través de un lecho filtrante de zeolita era apta. En contraste, las zeolitas son materiales de bajo costo y su aplicación no requiere tecnologías complejas, como los llamados *Ablandadores industriales,* lo que las hace accesibles para comunidades con recursos limitados, porque se deben considerar aspectos económicos y sociales, incluyendo la capacitación del personal local para la operación y mantenimiento del sistema, actualmente bajo el método de ablandador de agua con carbono activado; ver figura 1, siguiente.



Fig. 1. Sistema actual en el urbanismo, denominado "Ablandador del agua", con resinas

El estudio se encuentra ubicado en el Cantón Milagro de la Provincia del Guayas en las coordenadas: 658995.49m E; 9762494.70m S; ver figura 2. Urbanización particular "El Palacio", con acceso al agua, pormedio de succión subterránea a pozos de 80 metros del año 2023.



Fig. 2. Ubicación del estudio por mapa de sitio

La ciudad y su rio del mismo nombre, se asienta sobre la zona oriental de la llamada depresión del Guayas, que se ha rellenado paulatinamente con sedimentos desde el Holoceno, aportados por algunos volcanes y por la erosión de la cordillera; con depósitos de alta salinidad superficial. **(Gallo & Vázquez, 2021**). El presente estudio tiene como objetivo evaluar la eficacia de la zeolita tipo mordenita natural, que se comercializa en sacos de 30 kilos; nombre químico de: Clinoptilolita heulandita mordenita, (Z.A), en la remoción de dureza del agua subterránea en un recinto específico en el campo de la costa ecuatoriana.

2 METODOLOGÍA

Las zeolitas han sido utilizadas durante décadas en el tratamiento de aguas debido a sus propiedades únicas que las hacen eficaces en la remoción de contaminantes, **(Ramírez &Triviño, 2024).** como modificar la propiedad de dureza del agua por intercambio de iones, especialmente calcio y magnesio, actuando como un tamiz molecular capaz de atrapar iones metálicos y liberar iones de sodio en el agua mediante un intercambio iónico, reversible. Por otra parte, en la catálisis heterogénea el catalizador y los reactivos están en fases diferentes **(Lopez et al. 2020),** como, por ejemplo, la zeolita. Características de las zeolitas: Este mineral cuya densidad especifica está por debajo de 2 grs/cm3, pueden absorber moléculas y sus iones por la disposición de la porosidad en su superficie y la estabilidad química y térmica que mantienen su estructura, e incluso pueden recuperarla para procesos continuos, mediante lavados térmicos como valor de catalizador reusable crucial, Cada tipo de zeolita tiene propiedades únicas que las hacen adecuadas para diferentes aplicaciones, según (**De la Vega et al. 2018**), depende de factores como la estructura cristalina deseada, la capacidad de adsorción, la catálisis en la condición específicas, y el PH final deseado; entre las más reconocidas y disponibles están

Zeolita A: Para intercambio iónico con iones de calcio y magnesio, así como la deshidratación en líquidos y gases, por su estructura cristalina de celdas unitarias cúbicas. Producto nacional, común y comercializada en sacos de 30 kilogramos en nuestro país; ver figura 3 siguiente



Fig. 3. Zeolita natural, (Z.A) como producto nacional

Función de absorción: Las zeolitas poseen una red tridimensional de canales y cavidades uniformemente distribuidos llamados cuboctaedros (**Rodríguez, 2022*).***

Procesar el agua: La dureza del agua es por concentración disuelta de (STD), medidos en mg/L; según la Organización Mundial de la Salud (OMS), el agua potable debe tener una dureza hasta 300 mg/L de carbonato cálcico, aunque el umbral de tolerancia puede variar según la normativa de cada país, siendo la normativa del (**Pino et al. 2021).** de hasta 329 mg/L como agua semidura y hasta los 550 mg/L, como muy dura; es decir, hasta 300 mg/L, es el tope para un agua potable y que poco acumula sedimentos en tuberías y electro domésticos.

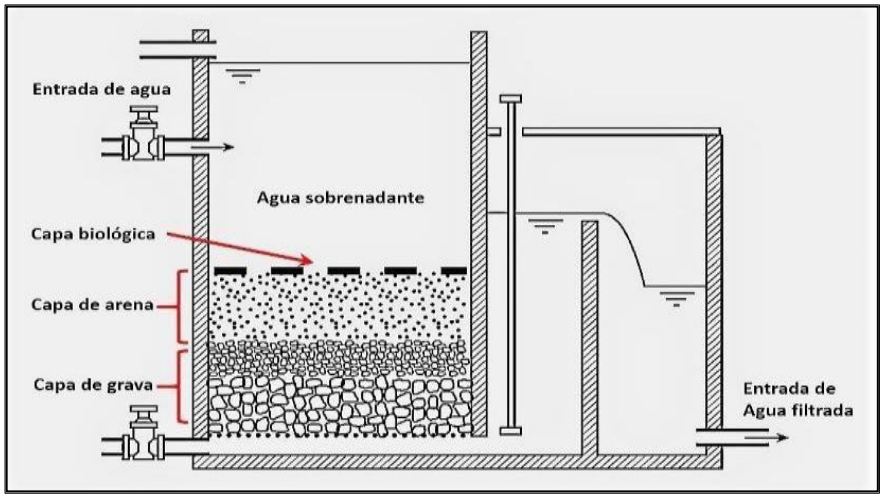


Fig. 4. Esquema clásico de filtración de agua por gravedad en elementos depuradores

Filtración: El agua se hace pasar a través de un medio poroso: Como arenas, gravas, y carbón activado; este último es efectivo contra la dureza, además, de disminuir los compuestos orgánicos y la presencia de cloros; a continuación, en la figura 4, un esquema clásico de una filtración llamada lenta, donde el compuesto o capa denominada “arena”, corresponde al elemento filtrante contra durezas.

Sedimentación: Proceso a tiempo por acción gravitacional, donde se pueden agregar acelerantes para coagulación de los (STD). Las aguas subterráneas son aquellas que se encuentran almacenadas debajo de la superficie terrestre en acuíferos y formaciones geológicas porosas y permeables (**Ceron et al. 2021).** Aguas provenientes de la infiltración y/o percolación de las precipitaciones y otros cuerpos de agua superficiales a través del suelo por años, en las rocas subyacentes; donde el parámetro *Dureza* se suele asociar por lo común a las sales de calcio y de magnesio disueltas en el agua, aunque también puede existir otros sólidos como el sodio y potasio característico de la región.

Las zeolitas pueden usarse como tamices moleculares para la separación selectiva de moléculas minerales o (STD), según su tamaño, tipología y polaridad, así como en el tratamiento de aguas para la remoción de algunos otros contaminantes como iones varios y organismos biológicos (**Ramírez &Triviño, 2024).** Donde su uso debe ser probado en efectividad y tipología de los (STD), a mejorar.

Materiales y equipos*:* Una vez obtenidas todas las muestras a diferentes horarios, en los tres pozos del urbanismo, y conservadas a 5°, se le aplicaron sustancias de ácido etilendiaminotetraacético, (EDTA), como reactivo para iones de magnesio y calcio junto al indicador Eriocromo T; en términos de carbonatos de calcio como mg/l. Los resultados se comparan con los obtenidos con un Espectrofotómetro digital, para iones específicos y colorimetrías; además de un equipo de electrodos para medir: Conductividad, PH y sólidos disueltos en las muestras. Ver figura 5 de este equipo.

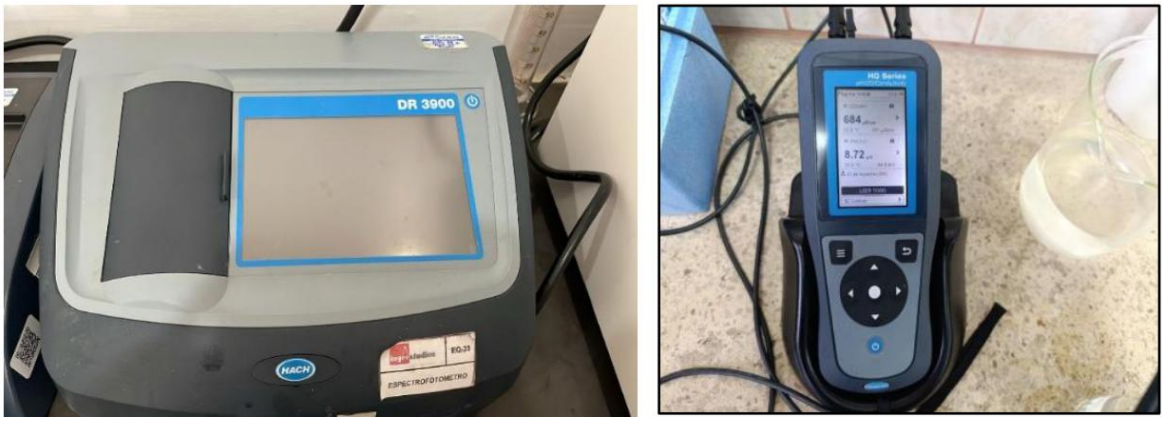


Fig. 5. Espectrofotómetro digital y equipos de electrodos

Método: Es un estudio experimental, donde se llevarán a cabo ensayos controlados para medir la eficacia de la (Z.A), bajo diversas condiciones de caudal, contaminante especifico de las muestras, diseño preliminar del contenedor o filtro, y su mantenimiento para reciclados. Los resultados proporcionan datos que pueden conducir a una estandarización del proceso, para un pozo subterráneo en un recinto de tierras húmedas en la costa ecuatoriana.

Población, y Muestreo: La urbanización Palacio ubicada en el primer kilómetro y medio de la vía Milagro– Naranjito, con un total de 185 unidades habitacionales, (aproximadamente 1000 habitantes), en donde se registran tres pozos subterráneos que suministran el vital líquido para usos en el hogar y muy poco para consumo humano; porque las familias por lo general compran el agua en botellones para esta vital función. Los pozos tienen profundidades de 80, 81, y 78 metros respectivamente, con fechas de creación entre finales del 2022 y 2023, en la construcción del urbanismo.

Se toman muestras suficientes de las tres fuentes subterráneas a diferentes horarios, (cada 24 horas durante tres semanas y se compilan refrigeradas para evitar cambios ambientales en tres contenedores respectivos), además de describir la naturaleza de la fuente en el tipo de terreno profundidad y sitio particular; de donde se miden los niveles de contaminantes descritos en tabulación con las normas de uso y consumo del agua de nuestro país.

Procedimiento: Un cálculo determinístico en correlación de todas las variables involucradas seria lo correcto; sin embargo, de momento el trabajo sin abandonar esa posibilidad a futuro se centra en descubrir la efectividad de la (Z.A), de pozo particular, así como el diseño del sistema requerido para cada toma de la urbanización Palacio Real en la población de Milagros; la intensión se dirige a fundamentar la construcción de estos filtros para su utilidad in situ.

El diseño de 0,16 m2 y medio metro de alto, consta de cinco capas de elementos funcionales en la filtración total, separados por un acrílico con orificios de 4 milímetros de diámetros en 6 filas por igual número de columnas; a continuación, el esquema y el modelo construido, figura 6.



Fig. 6. Esquema del filtro y construcción artesanal del mismo

Utilizando una solución de ácido etilendiaminotetraacético como reactivo para determinar la concentración de iones calcio y magnesio, usando seguidamente un espectrofotómetro digital, se realizarán análisis por triplicado tomando los valores picos en las muestras previas debidamente mezcladas y se comparan con las obtenidas luego del filtrado con la zeolita (Z.A). Los resultados se interpretan en porcentajes como efectividad.

3 RESULTADOS

En estos pozos particulares del recinto, y por su formación geológica de suelos sedimentarios y rocas ricos en calizas y otros minerales, los valores en sus aguas subterráneas pueden oscilar entre 350 y 650 mg/L de sales de calcio y (STD); además, la agricultura presente y cercana al recinto del urbanismo, así como algunas actividades industriales aumentan los estos, por la filtración profunda conductiva de las fuertes lluvias de la zona. Sin embargo, no hay presencia de actividades mineras cercanas.

Muestras en los pozos: Iniciando con las muestras de los tres pozos en una acumulación de hasta dos semanas en un mismo envase refrigerado y suficientemente mezclado, a temperatura ambiente se obtuvo lo siguiente como diagnóstico de partida. **(Instituto Ecuatoriano de Normalización, 2011).**

PH: 7,7 – 7,63 – 7,80. El agua tiene un PH equilibrado y acto para el consumo humano, y sin problemas para corrosión en su desplazamiento.

Conductividad: 780 – 769 – 772 µS/cm. La conductividad es elevada para los estándares permitidos, lo que indica una alta presencia de metales con iones disueltos.

Dureza: 340 – 360 - 355 mg/L. En efecto la dureza la clasifica como agua dura y muy dura, no solo no acta para su consumo como vital líquido, sino que estos minerales se depositan en superficies pudiendo ser un problema de obstrucción y contaminación cuando el agua se use para la limpieza en general, por su capacidad de disolver los detergentes afectando su eficacia.

Coliformes fecales: Cero totales. Por lo que en este estudio no se hará seguimiento de este resultado después de la filtración; es decir, los pozos del urbanismo no muestran contaminación biológica.

STD: 491,4 – 487,5 – 490 mg/L: Este parámetro es alto, pero en niveles aceptables, quizás por lo novel de los pozos y sus tuberías de plásticos según la norma vigente, lo que indica que, para esta agua subterránea en particular, el factor importante a disminuir es su dureza por sales minerales disueltas.

Color: El color de las muestras es traslucido, por lo que nos será relevante mencionarlo.

Luego el caudal usado sobre el diseño de filtración fue de 0,11 L/s. Por periodos de una hora y pausas de 30 minutos, en vista que el producto filtrado se recopila a razón menor en promedio desde 0,065 L/s. Hasta 0,025 L/s (Entre 4 y 2,5 litros por minuto, en vista que el filtro diseñado es demostrativo y disminuye su filtración por saturación del medio filtrante). Se concluye que el agua de estos pozos en este urbanismo puede ser tratada con filtros de hasta 1,5 m3, y almacenada en tanques que cubren la demanda del líquido vital.

Resultados de la filtración: Se hicieron cinco filtraciones en tiempos diferentes, las dos primeras con los mismos componentes de la caja de filtro y las tres siguientes cambiando la zeolita, se obtienen los siguientes resultados.

PH: 8,8 – 8,9 y 8,7 – 8,9 – 8,9: El PH aumenta hacia la alcalinidad porque la zeolita intercambia iones, a la medida que se activa; estos valores son altos siendo una afección en el sabor del agua, más no en su potabilidad.

Conductividad: 623 – 653 y 684 – 704 – 698 µS/cm. La reducción en la conductividad sugiere que el proceso de filtrado con zeolita ha sido efectivo en la eliminación de algunos iones disueltos y sales minerales en el agua; sin embargo, sigue siendo elevada precisamente por el intercambio de iones, disminución estimada en un 9%.

Dureza: 221 – 204 y 238 - 244 - 233 mg/L. La dureza muestra una notable reducción después de la filtración, indicando que la zeolita ha sido efectiva en la eliminación de iones de calcio y magnesio, para una efectividad cerca del 30%.

STD: 392, – 411,4 y 397,8 – 393,2 – 391,9 mg/L: Observándose en una buena reducción de los sólidos totales disueltos, por lo que la filtración elimino una cantidad significativa de minerales y sales; hasta un 16% de efectividad, para la (Z.A).

Resumen de los resultados: La disminución en la dureza del agua es particularmente relevante, ya que puede ayudar a prevenir problemas asociados con la acumulación de incrustaciones en sistemas de tuberías y electrodomésticos, así como mejorar la eficacia de los detergentes. Donde la aceptabilidad por parte de la población del grado de dureza del agua y su PH, puede variar considerablemente de una comunidad a otra. A continuación, la tabla 1, con el resumen de las tres muestras antes, y las cinco muestras después

Tabla 1. Resumen tabular de las muestras antes y después de la filtración

Índices	**Antes en letras, y después de la filtración, con (Z.A), en números**							
	Muestra A	**Muestra B**	**Muestra C**	***Muestra 1***	***Muestra 2***	***Muestra 3***	***Muestra 4***	***Muestra 5***
PH	7,70	7,63	7,80	*8,70*	*8,90*	*8,80*	*8,90*	*8,90*
Conductividad µS/cm	780	769	762	*623*	*704*	*698*	*684*	*653*
Dureza mg/L.	340	360	355	*221*	*204*	*238*	*244*	*233*
STD mg/L.	491,4	487,5	490	*392*	*411,4*	*397,8*	*393,2*	*391,9*

Los resultados del estudio muestran que la aplicación de zeolita como material de filtrado ha tenido un impacto positivo en la calidad del agua subterránea de este recinto particular, del cantón Milagro. La reducción significativa en la dureza, la conductividad y los sólidos totales disueltos, junto con un leve aumento del PH; sugieren recomendación de su utilidad.

4 CONCLUSIONES

Impacto en el pH del Agua: El filtrado con zeolita ha provocado un aumento en el pH del agua, resultando en valores alcalinos (8,72 a 8,93). Este cambio puede estar relacionado con la capacidad de la zeolita para intercambiar iones, lo que afecta el equilibrio del pH. Aunque el aumento del pH se mantiene dentro de los límites aceptables para agua potable, es necesario monitorear este parámetro para asegurar que no afecte negativamente la calidad del agua o el funcionamiento de los sistemas que utilizan esta agua.

Se recomienda continuar con el uso de la (Z.A), en sistemas de tratamiento de agua subterránea, especialmente en áreas donde la dureza del agua es un problema significativo. Además, se sugiere realizar monitoreos periódicos para asegurar que el material de filtrado siga siendo eficaz a lo largo del tiempo y para ajustar el proceso según sea necesario para mantener la calidad del agua a niveles suficientes óptimos. Es importante diseñar una especie de mapeo de zonas: Cantón, tipología del agua subterránea y tratamiento vigente; con la finalidad de manejar información precisa a la hora de probar nuevos sistemas de tratamiento y/o productos.

El análisis detallado de las muestras de agua subterránea del pozo en la urbanización Palacio Real demuestra que el tratamiento con zeolita es altamente eficaz en la reducción de la dureza del agua. Los resultados muestran una reducción significativa en la dureza, sobre los 100 mg/L, para una eficacia del 30%. La conductividad en niveles aceptables, y los sólidos

totales disueltos, sobre los 90 mg/L, (eficacia del 20%). Mientras que el pH y la claridad del agua se mantienen dentro de rangos aceptables, según la normativa vigente nacional y mundial.

REFERENCIAS

[1] Araiza, D., y Zanella, R. (2024). El fascinante mundo de los catalizadores heterogéneos: Descubriendo los sitios activos, el lugar donde suceden las reacciones. *Revista Materiales Avanzados, 1* (40), 103-109. https://revista.iim.unam.mx/index.php/materialesa_avanzados/article/view/38.

[2] Cerón, L., Sarria, J., Torres, J., y Soto-Paz, J. (2021). Agua subterránea: tendencias y desarrollo científico. *Información Tecnológica, 32* (1), 47-56. https://doi: 10.4067/S0718-07642021000100047.

[3] Mancilla, O., Anzaldo, B., Guevara, R., Hernández, O., Palomera, C., Figueroa, Y., y Mendoza, I. (2021). Calidad del agua subterránea para uso agrícola en Zacoalco de Torres y Autlán de Navarro, México. *Terra Latinoamericana, 39* (1). https://doi.org/10.28940/terra.v39i0.745

[4] De La Vega, D., González, C., Escalante, C., Gallego, J., Salamanca, M., y Manrique, L. (2018). Uso de zeolite Faujasita para adsorción de iones en aguas residuales municipales. *Tecnología y ciencias del agua, 9* (4), 184-208. doi: 10.24850/j-tyca-2018-04-08.

[5] Gallo, A., y Vázquez, G. (2021). Uso de zeolitas para el control de fuentes no puntuales de contaminación del agua: revisión. *Ingeniería del Agua, 25* (4), 241-255. doi: 10.4995/ia.2021.15897.

[6] Instituto Ecuatoriano de Normalización, (2011). INEN 1108. https:/ /spartaninter.com/wp -content/ uploads/ 2023/ 07/ INE N -1108 -agu a -potable.pd f.

[7] López, C., Castillo, J., Riofrio, L., García, L., Jaramillo, X., y García, A. (2020). Zeolitización de arcillas rojas de Ecuador y aplicación en la adsorción de CO2. Ingeniería, investigación y tecnología, 21 (4), 1-10. doi: 10.22201/fi.25940732e.2020.21.4.030

[8] Méndez, N., y López, G. (2021). Zeolitas nativas en el tratamiento de agua residual doméstica. *Revista Iberoamericana de las Ciencias Biológicas y Agropecuarias*, 10 (19), 1-38. doi: 10.23913/ciba.v10i19.106

[9] Pérez, A. (2019). Riesgo de sodicidad en los suelos de cantón milagro, Guayas-Ecuador en época de estiaje. *Revista Politécnica, 42* (2), 15–22. https://doi.org/10.33333/rp.vol42n2.899

[10] Pino, M., Vásconez, F., Pazmiño, M., Y Andrade, P. (2021). Efectividad de los lechos filtrantes en la reducción de sulfatos y carbonato de calcio en el agua de consumo humano. *Perfiles, 26* (1), 83-89. doi: 10.47187/perf.v1i26.139

[11] Ramírez D., Triviño, J. (2024). *Remoción de la dureza en agua subterránea de un recinto aplicando zeolita*. Tesis de grado. Universidad de Guayaquil.

[12] Rodríguez, M. (2022). Cinética y Mecanismos de Adsorción de Plomo (II) Usando Zeolita Gis-Nap Obtenida a Partir de Residuos de Ladrillo. *Revista Politécnica, 50* (2), 63–70. https://doi.org/10.33333/rp.vol50n2.07.

International Journal of Innovation and Scientific Research
ISSN 2336-0046 Vol. 85 No. 1 Jun. 2026, pp. 9-14
© 2026 Innovative Space of Scientific Research Journals
http://www.ijisr.issr-journals.org/

GNSS Radio Frequency Interference in the Eastern Kinshasa FIR: Safety Impacts, Regulatory Gaps, and a Resilience Framework for Civil Aviation in the Democratic Republic of the Congo

Billy DIABASENGA KUSUAMINA[1] and Sion DIABASENGA LUYINDULA[2]

[1]École de Télédétection Spatiale (ETS), Université Pédagogique Nationale (UPN), Kinshasa, RD Congo

[2]Section 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: Global Navigation Satellite System (GNSS) radio frequency interference (RFI) has become a growing operational threat to civil aviation, especially in and around conflict-affected regions. This article develops a publication-ready case study of the Democratic Republic of the Congo (DRC), focusing on repeated GNSS jamming and spoofing events reported in the eastern portion of the Kinshasa Flight Information Region (FIR) between May 2024 and January 2025. The study is based on a structured documentary analysis of the DRC national presentation delivered during the ACAO/ICAO Radio Navigation Workshop in Rabat in February 2025, complemented by current ICAO, ITU, EASA, and IATA guidance and policy documents. The findings show that the affected areas - notably Goma, Butembo, Beni, and Lubero - experienced recurrent signal loss from the surface up to at least FL210, affecting multiple aircraft categories, including transport aircraft, regional aircraft, unmanned aircraft, United Nations flights, and military flights. Operational effects included re-routing, visual continuations, temporary suspension of GNSS-based instrument flight procedures and drone operations, elevated operator risk assessments under safety management systems, and rising economic and passenger-service burdens. The article argues that the DRC case is significant because it illustrates the asymmetry between rapidly increasing dependence on satellite-based CNS and the limited enforceability of civil aviation rules when military or extraterritorial interference is involved. It proposes a resilience framework built on five pillars: threat monitoring, risk assessment, contingency navigation, civil-military coordination, and harmonized reporting. The article concludes that States exposed to conflict-proximate interference should preserve a minimum operational network of conventional navigation aids, standardize GNSS RFI NOTAM practices, integrate spectrum regulators into aviation safety governance, and strengthen regional escalation mechanisms through ICAO and ITU.

KEYWORDS: GNSS; radio frequency interference; jamming; spoofing; air navigation safety; Kinshasa FIR; Democratic Republic of the Congo; CNS resilience.

1 INTRODUCTION

GNSS has become deeply embedded in modern civil aviation. It supports area navigation, performance-based navigation, surveillance, time synchronization, aircraft situational awareness, and an increasing number of airport and unmanned aircraft operations. ICAO has warned that GNSS jamming and possible spoofing have intensified in areas surrounding conflict zones and that the resulting degradation can adversely affect air traffic management (ATM) and air traffic control (ATC) operations. ICAO's mitigation approach, embedded in the GNSS Manual, is based on a continuous cycle of threat monitoring, risk assessment, and deployment of mitigation measures. This issue is no longer theoretical: operational agencies and international regulators are now treating GNSS RFI as a systemic resilience problem rather than an isolated technical anomaly.

The international concern has sharpened further since 2024. EASA has reported that jamming and spoofing events have increased in severity, intensity, and sophistication, especially near conflict zones. In 2025, ITU, ICAO, and IMO jointly warned that harmful interference in the form of jamming and spoofing is increasing and called on Member States to protect the radio

Corresponding Author: Billy DIABASENGA KUSUAMINA

navigation satellite service, reinforce resilience, retain conventional navigation infrastructure for contingency support, and improve cross-sector coordination. EASA and IATA also stated in 2025 that GPS signal loss events increased by 220% between 2021 and 2024 according to IATA data. Together, these developments confirm that GNSS RFI is a global operational hazard with direct local consequences for States whose airspace lies close to insecurity or military activity.

The DRC provides an important case study because the eastern part of the Kinshasa FIR has recently experienced repeated GNSS interference events affecting flight operations in and around Goma and adjacent sectors. The national presentation submitted by the DRC to the ACAO/ICAO Radio Navigation Workshop framed the issue as an operational safety challenge linked to military activity outside national borders and highlighted the difficulty of protecting civil aviation when interference originates beyond the effective reach of the affected ANSP. The presentation recorded incidents from May 2024 through January 2025, the affected aircraft types, flight levels, operational consequences, mitigation measures already implemented, and the challenges encountered by the DRC authorities. These elements make the DRC case suitable for an analytically grounded case study that can inform international discussions on aviation resilience in Africa and other exposed regions.

This article has three objectives. First, it documents the pattern and operational consequences of GNSS RFI incidents reported in the eastern Kinshasa FIR. Second, it analyses the case through contemporary international regulatory and safety guidance. Third, it proposes a practical resilience framework for States and ANSPs facing recurrent GNSS disruption in conflict-proximate airspace.

2 MATERIALS AND METHODS

The study uses qualitative documentary analysis. The primary case source is the DRC presentation entitled 'GNSS RFI Experienced in the Democratic Republic of the Congo and its Impact on Safety of Civil Air Navigation, ' presented at the ACAO/ICAO Radio Navigation Workshop held in Rabat, Morocco, 24-26 February 2025. The presentation provides the chronology of incidents, affected areas, aircraft categories, altitude bands, identified consequences, and mitigation steps already taken. To strengthen interpretation, the article cross-references this case material with current primary or quasi-primary sources: ICAO working papers and conference outputs on GNSS interference, the Convention on International Civil Aviation, ITU statements on harmful interference, EASA safety information, and IATA/EASA mitigation communications. The analysis is therefore interpretive rather than statistical. It does not claim access to raw flight data recorder files, radar tracks, or confidential operator safety reports. Instead, it aims to convert an operational presentation into a structured scientific article suitable for academic and policy readership.

3 REGULATORY AND CONCEPTUAL FRAMEWORK

The legal and institutional framework relevant to the DRC case is multi-layered. At national level, radiofrequency spectrum management is framed by DRC Law No. 20/017 of 25 November 2020 on telecommunications and information and communication technologies, while ARPTC acts as the national telecommunications regulator. The DRC presentation also notes the existence of an ARPTC-CAA memorandum of understanding for coordination. At international level, the ITU Radio Regulations require stations to be established and operated so as not to cause harmful interference and recognize that safety-related radionavigation services require special protection. ICAO Annex 10 and the GNSS Manual provide the aviation-specific framework for preserving operational continuity and mitigating interference. However, the DRC case also highlights an institutional limitation: under Article 3 of the Chicago Convention, the Convention applies only to civil aircraft, while military, customs, and police aircraft are deemed to be State aircraft. This does not remove the obligation to have due regard for civil aviation safety, but it complicates the enforceability of purely civil mechanisms when defense-related emitters are involved. The result is a governance gap between spectrum protection norms and operational enforcement in conflict-linked environments.

4 RESULTS: PATTERN OF GNSS RFI IN THE EASTERN KINSHASA FIR

According to the DRC presentation, the first detection of GNSS RFI in the country was reported through an official release dated 29 May 2024 by the Head of the Aviation Safety Department of MONUSCO. The presentation states that the event involved GPS jamming detected by a crew at 12,500 feet, on heading 330°, at 26 NM from Goma airport, and that many cases of GPS spoofing were later observed. Following investigation by ARPTC, the source of the interference was reportedly determined to be outside DRC national borders and linked to military activity. This is a crucial feature of the case because it

transforms the problem from a purely domestic spectrum-management issue into a transboundary air navigation resilience issue.

The initial phase of reported incidents covered May to July 2024. The affected areas included Goma, Butembo, Beni, and Lubero. Aircraft types mentioned in the presentation include B737, ATR72, unmanned aircraft, Do228, F50, and B762, including United Nations and military flights. Signal loss was observed mainly between FL65 and FL180. Operationally, the presentation reports effects on navigation and landings, including re-routings, with several incidents occurring early in the morning. After a relative break in August, jamming resumed in December 2024 and continued into January 2025. On 22 December 2024, signal losses were reported en route about 75 NM from Goma and inside the Goma control zone, affecting aircraft such as a B767, Let410, AT72, and D228, with some crews continuing visually. On 26 December 2024, additional aircraft were affected in the Goma TMA at different altitudes. On 27 December 2024, two aircraft lost signal in Beni at FL170 and FL190, while another aircraft was affected near IPULI at FL180 and between BKV and ZIRUD at FL210. On 3 January 2025, jamming was reported on the ground in Goma, and on 4 January 2025 multiple aircraft were reportedly affected from the surface up to FL160, including spoofing cases. The reported vertical extent from the ground to FL210 indicates that the phenomenon was not limited to a narrow altitude layer and had the potential to affect both arrival/departure and en-route phases.

The operational consequences described by the DRC are consistent with international safety warnings on GNSS disruption. The presentation reports increased safety risk in the affected area, temporary suspension of GNSS-based instrument flight procedures and drone operations, lost aircraft in the airspace, cancelled, delayed or deviated flights, and situations in which some flights shifted from IFR to VFR. Additional impacts included extra expenses for operators and disruption for passengers. From a systems perspective, these effects can be grouped into four categories. First, there are direct navigation impacts: degraded position awareness, loss of lateral guidance integrity, reduced confidence in avionics outputs, and greater ATC workload. Second, there are procedural impacts: cancellation of GNSS-dependent procedures, increased use of visual continuation or reversionary techniques, and operational restrictions on UAV activity. Third, there are capacity impacts: re-routings, spacing penalties, and reduced predictability of arrivals and departures. Fourth, there are socio-economic impacts: costs of delays, diversions, fuel burn, crew disruption, passenger dissatisfaction, and the reputational risk of a corridor perceived as operationally fragile.

Table 1. Summary of reported GNSS RFI events and operational effects in the DRC case

Period / Date	Area	Reported effect	Operational significance
29 May 2024 (first detection)	Near Goma	GPS jamming reported by crew at 12,500 ft, 26 NM from Goma; later spoofing cases noted	Initial operational detection of a transboundary safety problem
May-Jul 2024	Goma, Butembo, Beni, Lubero	Signal loss mainly between FL65 and FL180 affecting B737, ATR72, UAV, Do228, F50, B762, UN and military flights	Demonstrates multi-aircraft, multi-sector exposure
22 Dec 2024	En route 75 NM from Goma and Goma CTR	B767, Let410, AT72, D228 affected; some continued visually	Shows impact on both en-route and terminal operations
26 Dec 2024	Goma TMA	Additional aircraft affected at different altitudes	Suggests persistence of the hazard in terminal airspace
27 Dec 2024	Beni / IPULI / BKV-ZIRUD	Aircraft affected at FL170, FL180, FL190 and FL210	Confirms extended vertical and route-level exposure
3-4 Jan 2025	Goma, including ground operations	Jamming on the ground; multiple aircraft affected from surface to FL160; spoofing cases reported	Indicates that the hazard can disrupt the full operation chain from surface to airborne phases

5 DISCUSSION

The DRC case confirms three broader analytical points. The first is that GNSS dependence creates asymmetric vulnerability. The more ANSPs and operators modernize around satellite-based CNS and PBN, the more they gain efficiency under normal conditions, but the greater the operational disruption when GNSS becomes unavailable or misleading. This does not mean modernization is mistaken. It means modernization must be accompanied by resilience planning. ICAO and the 2025 joint ITU-ICAO-IMO statement explicitly recognize this by calling for the retention of sufficient conventional navigation infrastructure and the development of mitigation techniques for outages and misleading signals. In the DRC case, the challenge is heightened by terrain and meteorological realities in the Goma area, where scarce VMC conditions, mountains, and Lake Kivu constrain purely visual fallback options.

The second point is that transboundary and conflict-linked interference cannot be handled adequately by the aviation authority alone. In the DRC presentation, the source was reported as being outside national territory. That finding immediately places the issue at the interface of aviation safety governance, telecommunications regulation, diplomacy, and security coordination. ITU emphasizes that Member States must prevent harmful interference and act when harmful interference affecting safety services is brought to their attention. ICAO Assembly policy likewise urges close collaboration among aviation authorities, military authorities, service providers, radio regulators, and spectrum-enforcement authorities, and calls on States to refrain from jamming or spoofing affecting civil aviation. Therefore, the relevant institutional response is not merely technical troubleshooting by the ANSP; it is multi-agency governance with international escalation mechanisms.

The third point is that reporting and notification remain weak links in global resilience. ICAO's 2025 recommendations note the absence of standardized NOTAM coding for GNSS RFI and the practical difficulty faced by operators when different States use different Q-codes and free-text expressions. This matters in the DRC case because timely, unambiguous operational awareness is essential for dispatch, route planning, ATC contingency management, and pilot decision-making. The DRC authorities issued NOTAMs and airlines activated SMS GO/NO-GO procedures for Goma, which were appropriate reactive steps. Yet the broader lesson is that inconsistent reporting taxonomies reduce the usefulness of otherwise correct warnings. Harmonized terminology - for example distinguishing 'GNSS may be unreliable' from 'GNSS may be misleading' - is operationally important because spoofing can present more severe consequences than simple loss of signal.

6 PROPOSED RESILIENCE FRAMEWORK

Based on the DRC case and current international guidance, this article proposes a five-pillar resilience framework for conflict-proximate GNSS environments. Pillar 1 is threat monitoring. States should establish a recurrent process for collecting pilot reports, operator reports, ATC observations, maintenance findings, and regulator spectrum analyses in a common operational picture. Pillar 2 is risk assessment. Incident zones should be mapped by phase of flight, altitude band, severity, and probability, with explicit links to safety management systems, dispatch procedures, and aerodrome accessibility criteria. Pillar 3 is contingency navigation. ANSPs should preserve a minimum operational network of conventional navigation aids, maintain timely flight inspection, validate reversionary procedures, and ensure controller and pilot training for operations under GNSS degradation. Pillar 4 is civil-military and cross-sector coordination. Aviation authorities, spectrum regulators, defense actors, and foreign affairs institutions should share protocols for notification, deconfliction, escalation, and post-incident investigation. Pillar 5 is harmonized reporting and international escalation. GNSS RFI NOTAM practices should follow evolving ICAO guidance, and cases with international significance should be reported through the appropriate ICAO-ITU channels to support analysis, attribution, and diplomatic action.

Pillar	Core operational content
1. Threat monitoring	Integrate pilot reports, operator reports, ATC observations, NOTAM review, and telecommunications regulator analyses in one operational picture.
2. Risk assessment	Map exposure by route, phase of flight, altitude band, terrain, weather fallback, and procedure dependency; link outputs to SMS decisions.
3. Contingency navigation	Preserve and inspect conventional aids, validate reversion procedures, and train crews/controllers for GNSS-unreliable and GNSS-misleading scenarios.
4. Cross-sector coordination	Institutionalize coordination among ANSP, CAA, spectrum regulator, defense actors, foreign affairs bodies, and neighboring States.
5. Harmonized reporting	Standardize NOTAM language and escalate internationally significant events through ICAO/ITU mechanisms.

7 POLICY IMPLICATIONS FOR THE DRC AND SIMILAR STATES

For the DRC specifically, several practical priorities emerge. First, the eastern Kinshasa FIR should be treated as a persistent vulnerability zone, not as a temporary anomaly. Second, conventional aid resilience around Goma and adjacent corridors requires renewed attention, including regular flight inspection of VOR/DME and ILS where applicable, because deferred maintenance of terrestrial aids increases strategic dependence on the very systems most exposed to disruption. Third, operator and ATC training should include spoofing recognition and operational cross-checking, since misleading position information may be more dangerous than complete signal loss. Fourth, national procedures should institutionalize coordination between RVA, the CAA, ARPTC, security actors, and neighboring States when cross-border attribution is suspected. Fifth, the DRC should continue using ICAO regional and headquarters channels to push for stronger international norms concerning the protection of RNSS near international air routes and airports.

8 LIMITATIONS

This study has limitations. It relies primarily on a national technical presentation rather than a full anonymized safety database. Incident counts, durations, and exact geographic footprints could not be independently validated from raw surveillance or avionics records. The analysis is therefore best read as an evidence-informed case study, not as a definitive statistical measurement of interference intensity. Nevertheless, the consistency between the DRC account and current ICAO, ITU, EASA, and IATA warnings strengthens the plausibility and relevance of the findings.

9 CONCLUSION

GNSS RFI in the eastern Kinshasa FIR is a concrete safety and resilience challenge with implications that extend beyond the DRC. The reported sequence of jamming and spoofing events between May 2024 and January 2025 demonstrates how rapidly a localized signal problem can cascade into navigation uncertainty, procedural restrictions, delays, diversions, and wider confidence costs for civil aviation. The case also shows that States close to conflict zones face a double vulnerability: strong operational dependence on satellite-based CNS and weak direct control over extraterritorial or military sources of interference. In this context, the appropriate strategy is not to retreat from modernization but to modernize with resilience. That means monitoring threats continuously, assessing risk explicitly, retaining contingency navigation capability, coordinating across sectors, and improving the quality of operational reporting and international escalation. The DRC case should therefore be understood not only as a national incident record, but as an instructive African case study for the global debate on secure and resilient air navigation in the age of pervasive GNSS dependence.

ACKNOWLEDGMENT OF SOURCE MATERIAL

This manuscript was developed from the DRC presentation prepared by Billy DIABASENGA for the ACAO/ICAO Radio Navigation Workshop in Rabat in February 2025 and expands that operational material into an academic case study format.

REFERENCES

[1] Diabasenga K. B. (2025). GNSS RFI experienced in the Democratic Republic of the Congo and its impact on safety of civil air navigation. Presentation delivered at the ACAO/ICAO Radio Navigation Workshop, Rabat, Morocco, 24-26 February 2025.

[2] European Union Aviation Safety Agency. (2024). Safety Information Bulletin SIB 2022-02R3: GNSS outage and alterations leading to communication/navigation/surveillance degradation.

[3] European Union Aviation Safety Agency, & International Air Transport Association. (2025, June 18). EASA and IATA outline comprehensive plan to mitigate GNSS interference risks.

[4] International Civil Aviation Organization. (2006/updated consolidated text). Convention on International Civil Aviation (Doc 7300), Article 3 and Article 3 bis.

[5] International Civil Aviation Organization. (2022). A41-WP/196: GNSS interference.

[6] International Civil Aviation Organization. (2025). CNS SG/29-WP/28: GNSS interference and mitigating measures - recommendations of the Radio Navigation Symposium.

[7] International Telecommunication Union. (2022, August 23). ITU issues warning on interference with radio navigation satellite service.

[8] International Telecommunication Union. (2025, March 25). Protect satellite navigation from interference: Joint call by ITU, ICAO and IMO.

[9] International Telecommunication Union. (n.d.). Harmful interference / infringement - Radio Regulations overview.

[10] République Démocratique du Congo. (2020). Loi No. 20/017 du 25 novembre 2020 relative aux télécommunications et aux technologies de l'information et de la communication.

International Journal of Innovation and Scientific Research
ISSN 2336-0046 Vol. 85 No. 1 Jun. 2026, pp. 15-29
© 2026 Innovative Space of Scientific Research Journals
http://www.ijisr.issr-journals.org/

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 KUSUAMINA[1], NZUZI NZUZI André[2], and Sion DIABASENGA LUYINDULA[3]

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

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

[3]Section 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.

Corresponding Author: Billy DIABASENGA KUSUAMINA

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-CO_2, 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

[3]Dans 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.

[4]Les 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.

[5]La 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:

[6]Le 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.

[7]Les 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.

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

[9]CHIRPS 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:

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

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:

$$DID = (Y_AIR, actif - Y_AIR, creux) - (Y_REF, actif - Y_REF, creux)$$

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.

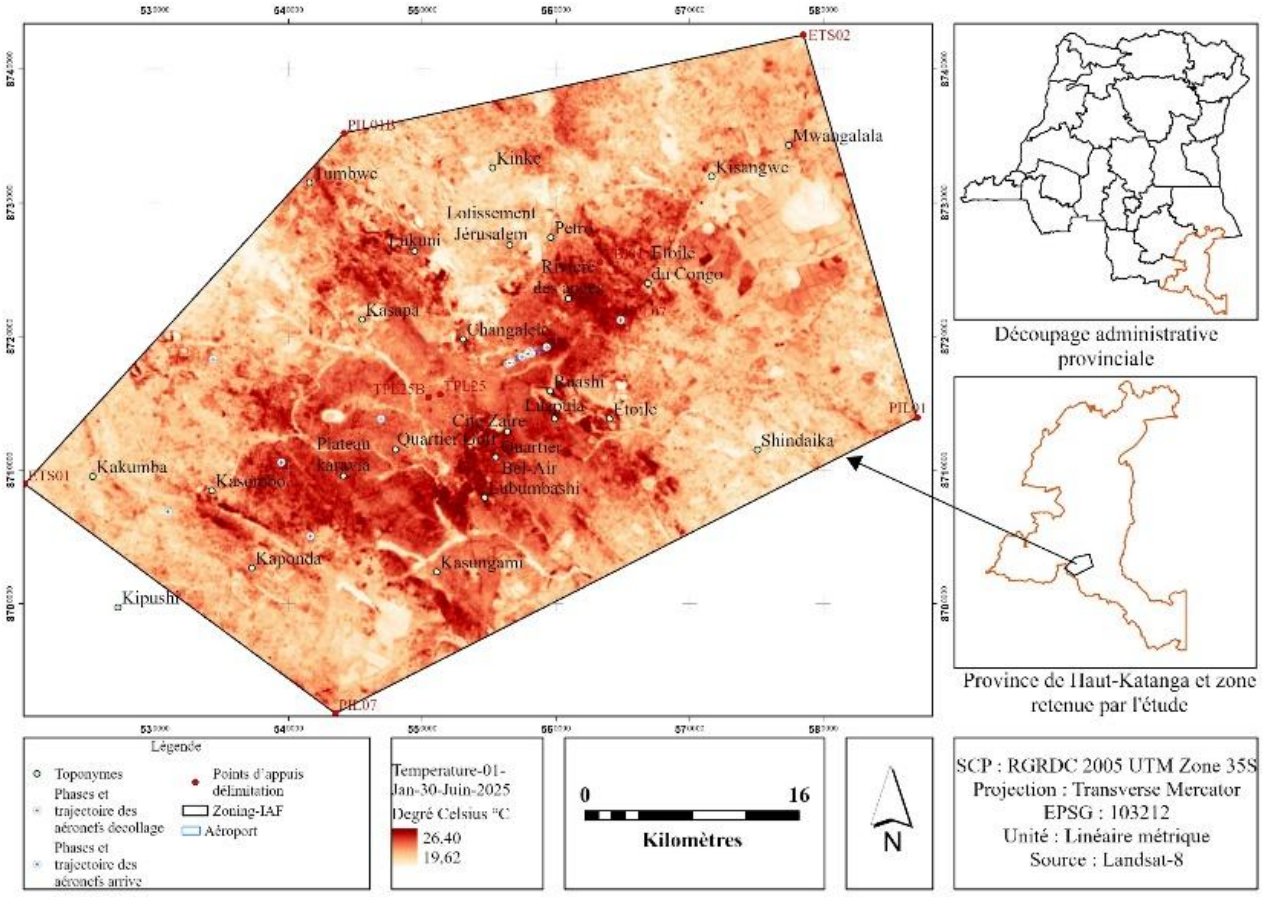


Fig. 1. Distribution spatiale de la température de surface (LST) dans la région de Lubumbashi, incluant l'aéroport de Luano (30 janvier 2025)

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.

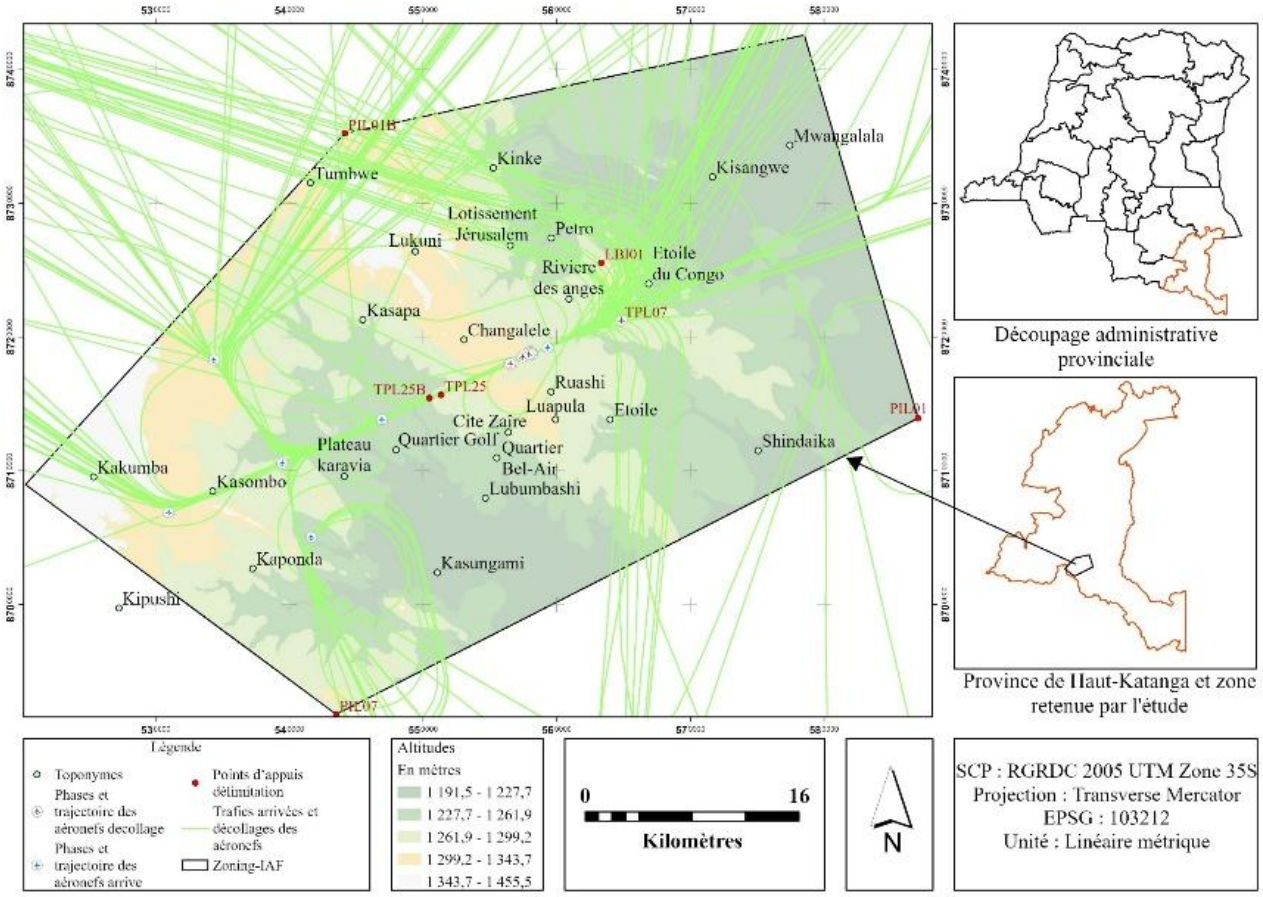


Fig. 2. Distribution spatiale des trajectoires des aéronefs (arrivées et départs) dans la région de Lubumbashi (FZQA) et leur relation avec le relief et les zones d'îlots de chaleur

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.

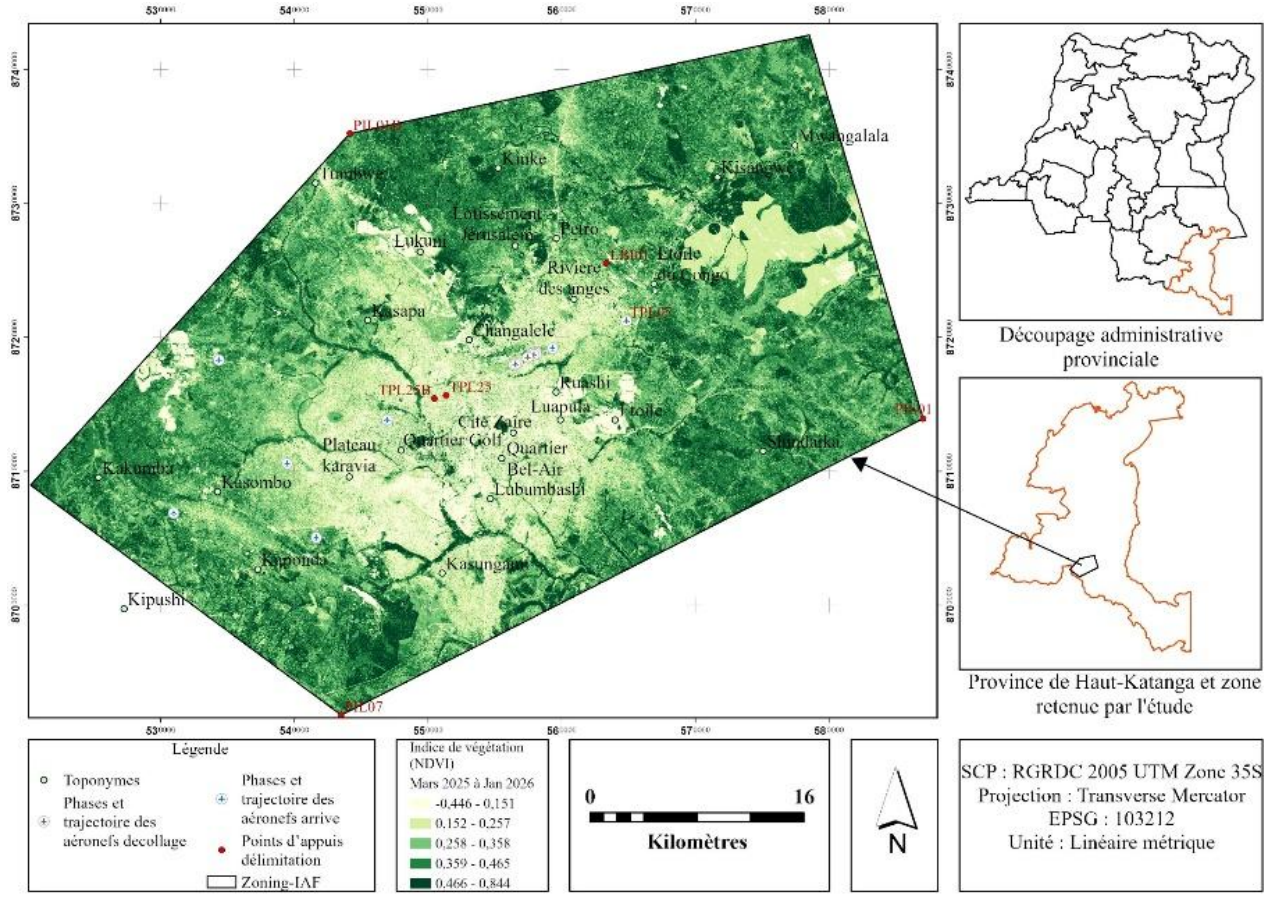


Fig. 3. Carte de l'indice de végétation normalisé (NDVI) de la région de Lubumbashi, incluant l'aéroport de Luano (mars 2025 – janvier 2026)

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.

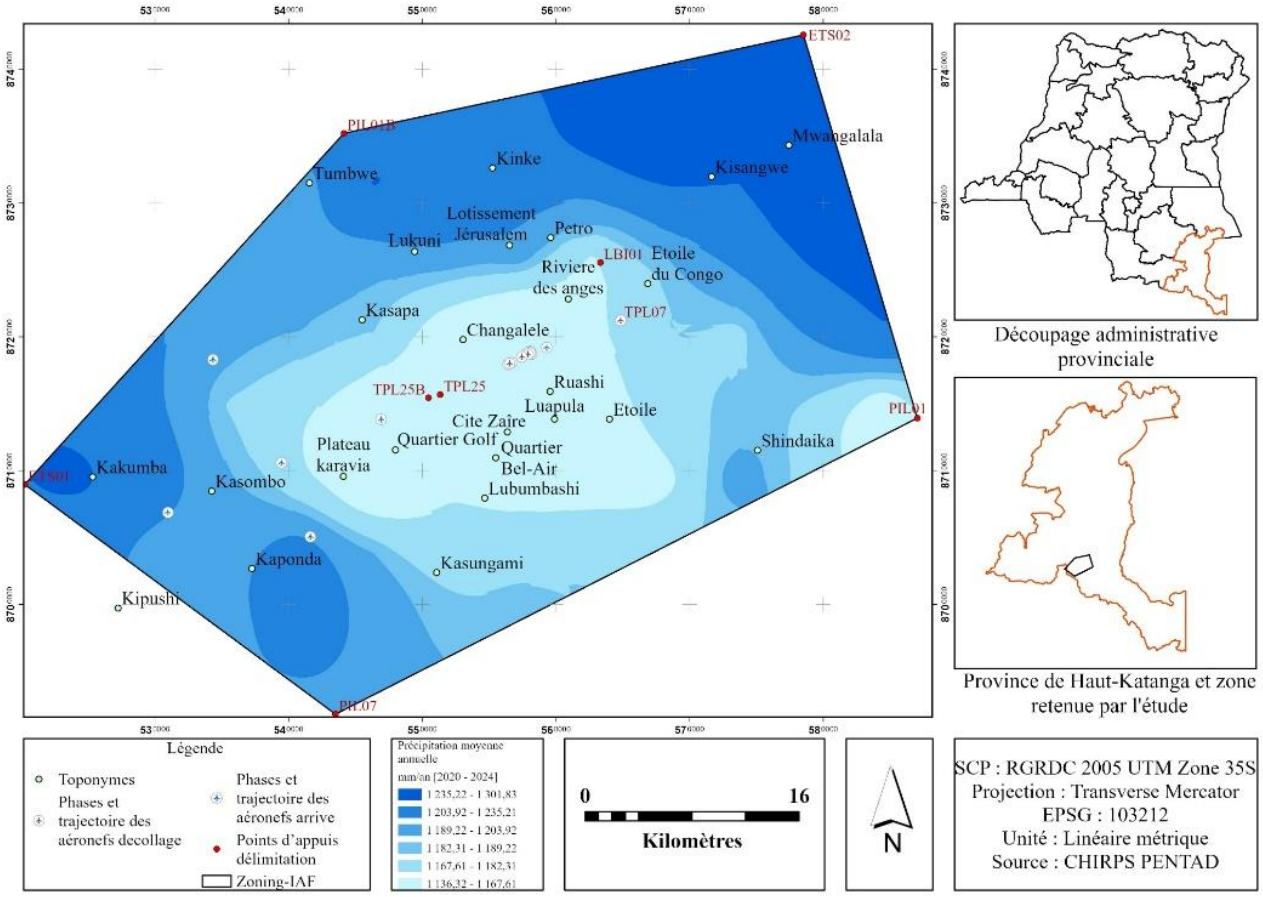


Fig. 4. Distribution spatiale des précipitations moyennes annuelles dans la région de Lubumbashi, incluant l'aéroport de Luano, et mise en évidence d'un gradient hydrométéorologique entre le centre urbain et les zones périphériques (période 2020–2024)

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.

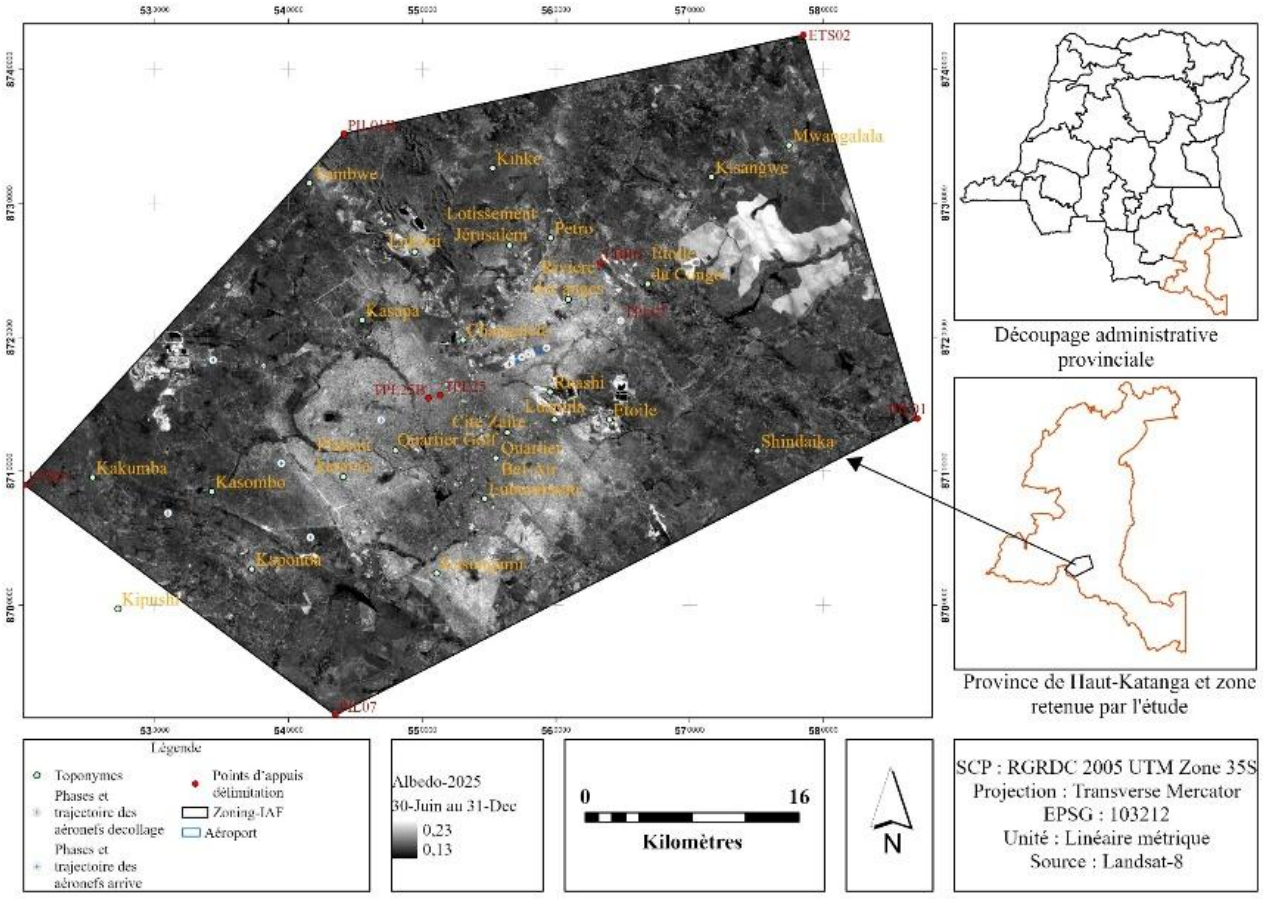


Fig. 5. Distribution spatiale de l'albédo de surface dans la région de Lubumbashi, incluant l'aéroport de Luano, et identification des zones à forte absorption radiative (juin – décembre 2025)

Source: Élaboration de l'auteur à partir des données NASA / USGS Landsat 8 (2025), dérivées des bandes spectrales, traitées et analysées sous ArcGIS et Python (projection UTM Zone 35S, WGS84).

Les faibles valeurs d'albédo observées au niveau du centre urbain et de la plateforme aéroportuaire traduisent une forte absorption du rayonnement solaire, contribuant à l'élévation des températures de surface et au renforcement des îlots de chaleur.

Le troisième résultat est la modulation saisonnière. Les contrastes sont plus lisibles en saison sèche qu'en saison humide. Cette observation est physiquement cohérente: une surface sèche, fortement irradiée et peu nuageuse accumule davantage de chaleur; elle fournit donc un fond thermique sur lequel l'effet des mouvements est plus détectable.

La variabilité saisonnière des paramètres climatiques à Lubumbashi met en évidence une fenêtre opérationnelle bien définie pour les activités LTO, avec des conditions optimales durant la saison sèche (juin–septembre), caractérisées par de faibles précipitations, une stabilité atmosphérique et un régime thermique favorable.

Les indices climatologiques de référence sont fondés sur des reconstructions et climatologies de longue durée couvrant **1980–2016,** telles que synthétisées par WeatherSpark à partir de stations, de réanalyses (notamment MERRA-2) et d'ensembles climatologiques régionaux[10].

[10] WeatherSpark (consulté en ligne) ; Gelaro et al. (2017), *Journal of Climate*, https://doi.org/10.1175/JCLI-D-16-0758.1.

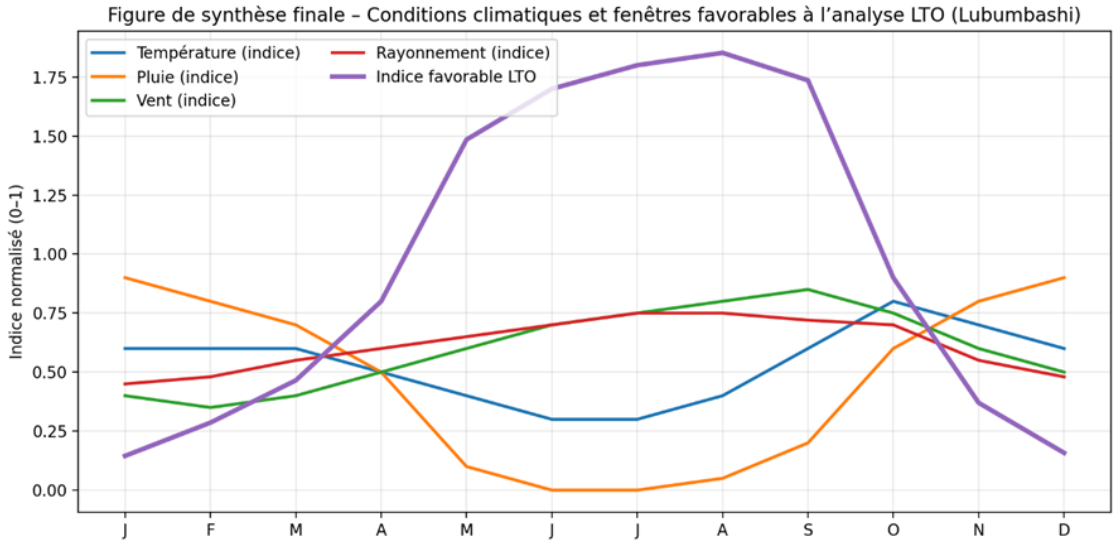


Fig. 6. Synthèse des conditions climatiques mensuelles et identification des fenêtres favorables aux opérations LTO à Lubumbashi (indices normalisés, 0–1)

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.

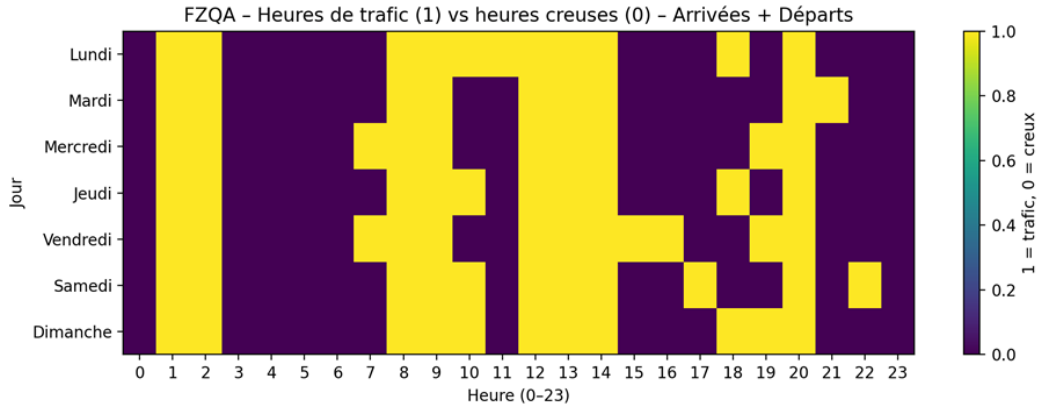


Fig. 7. Répartition horaire hebdomadaire du trafic aérien à l'aéroport de Lubumbashi/Luano (FZQA) : identification des heures actives (1) et des heures creuses (0) pour les arrivées et départs

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.

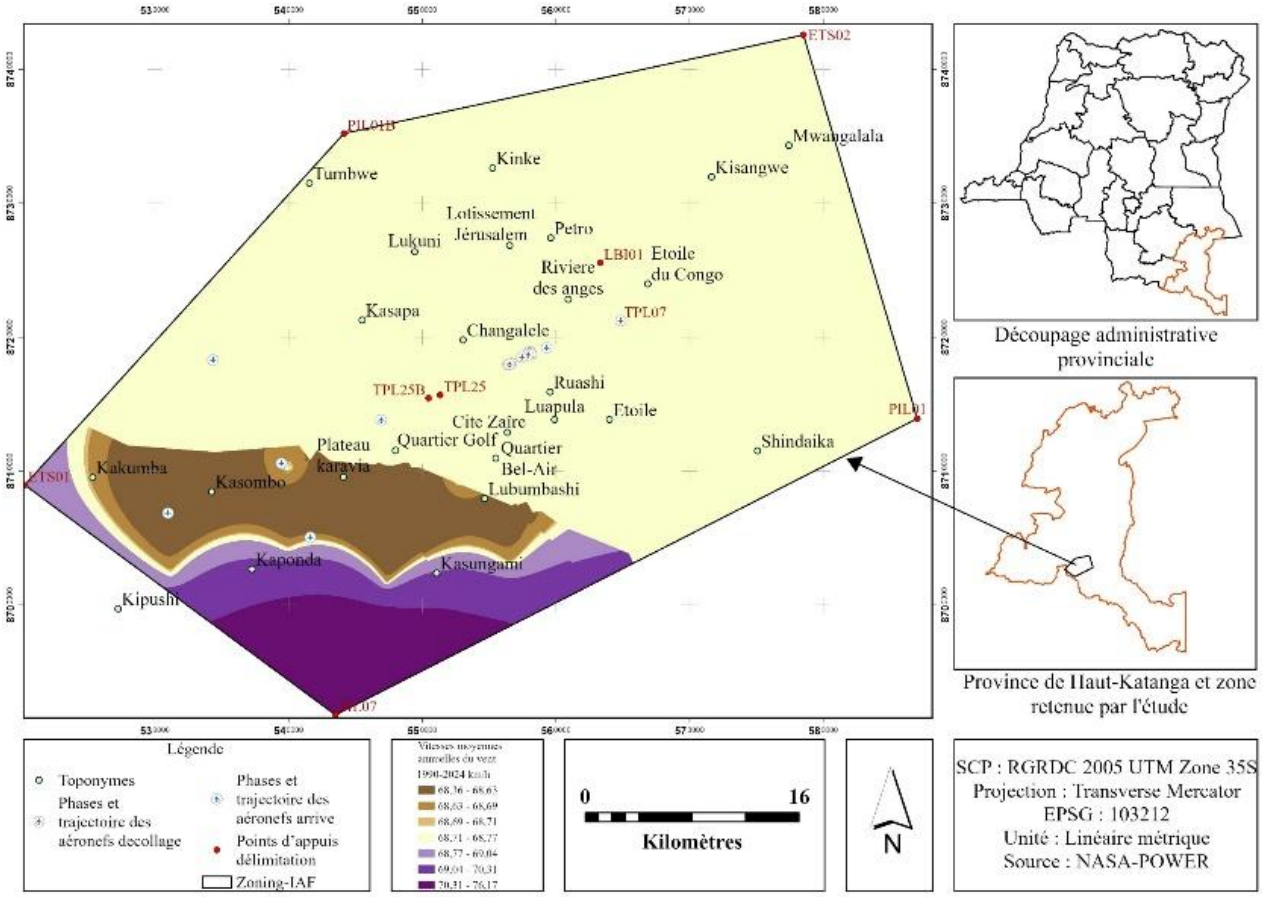


Fig. 8. Distribution spatiale des paramètres climatiques (température de l'air, précipitations, vent et rayonnement solaire) dans la région de Lubumbashi, incluant l'aéroport de Luano, et identification des zones différenciées influençant les conditions des opérations LTO

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

[12]La 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.

[13]Les 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.
[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.
[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, IJISR-23-020-17 art 2.

International Journal of Innovation and Scientific Research
ISSN 2336-0046 Vol. 85 No. 1 Jun. 2026, pp. 30-41
© 2026 Innovative Space of Scientific Research Journals
http://www.ijisr.issr-journals.org/

Analyse spatio-temporelle de l'occupation des terres dans la zone centrale de l'habitat de la girafe au Niger (Afrique de l'Ouest)

[Spatio-temporal analysis of land use in the central part of the giraffe's range in Niger (West Africa)]

MAMAN MOUTARI DANJOUMA Roumanatou[1], ABOUBACAR ADAMOU Kolafane[1], YOUNFA ABDOU Mourtala[1], ABDOULAYE ABDOU Siradji[1], DJIBO IDE Abdoul Rachid[1], BOURAHIMA KIMBA Saharatou[1], INOUSSA Maman Maarouhi[1], and MOROU Boubé[2]

[1]Département de Biologie, Faculté des Sciences et Techniques, Université Abdou Moumouni (UAM) BP 10662, Niamey, Niger

[2]Département des Sciences du Sol et de Télédétection, Faculté d'Agronomie et des Sciences de l'Environnement, Université Dan Dicko Dankoulodo, BP 465, Maradi, Niger

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: The tiger bush, the primary habitat of the giraffe, is facing severe soil degradation due to arid climate and increased human activity. This study aims to assess changes in different land cover units and the extent of forest cover degradation in the core giraffe habitat. To this end, Landsat images from 1990, 2006, and 2022 were downloaded using USGS and processed with ENVI 5.1 software. The results reveal that the landscapes of the giraffe zone are predominantly dominated by cultivated areas. The expansion of cultivated areas has contributed to the degradation of tiger bush and shrub steppes, which have seen their areas reduced from 1990 to 2022. The transition matrix showed a 73.21% change in regular tiger bush between 1990 and 2022. The degrading dynamics of forest cover caused by the overexploitation of natural resources should in the long-term lead to the complete anthropization of the landscape.

KEYWORDS: tiger bush, climatic aridity, degradation, land use units, change.

RESUME: La brousse tigrée constituant l'habitat principal de la girafe est confrontée à une dégradation accentuée des sols par l'aridité climatique et à l'accroissement des activités anthropiques. L'objectif de l'étude est d'évaluer les changements intervenus dans les différentes unités d'occupation du sol et l'ampleur de la dégradation du couvert forestier dans la zone centrale de l'habitat de la girafe. Pour ce faire, les images Landsat de 1990, 2006 et 2022 ont été téléchargées avec USGS et traitées avec le logiciel ENVI 5.1. Les résultats révèlent que les paysages de la zone girafe sont majoritairement dominés par les zones de cultures. L'expansion des zones de cultures a contribué à la dégradation des brousses tigrées et des steppes arbustives qui ont vu leurs superficies réduites de 1990 à 2022. La matrice de transition a permis de constater une mutation de 73,21 % des brousses tigrées régulières de 1990 à 2022. La dynamique dégradante du couvert forestier engendrée par la surexploitation des ressources naturelles devrait à long terme mener à l'anthropisation complète du paysage.

MOTS-CLEFS: brousse tigrée, aridité climatique, dégradation, unités d'occupation, mutation.

Corresponding Author: MAMAN MOUTARI DANJOUMA Roumanatou

1 INTRODUCTION

Au niveau mondial, les pertes forestières ont été estimées à 0,14 % par an de 2005 à 2010, tandis que l'Afrique de l'Ouest se caractérise par un taux de déboisement nettement plus élevé, évalué à 0,46 % (FAO, 2010). Cette diminution du couvert forestier est particulièrement marquée dans les pays d'Afrique occidentale, notamment au Niger, où les formations naturelles subissent une dégradation progressive (Inoussa et al., 2013). La population nigérienne, estimée à 22 752 385 habitants avec un taux d'accroissement naturel de 3,9 % (INS, 2022), est majoritairement rurale (environ 84 %) et tire l'essentiel de ses moyens de subsistance de l'exploitation directe des ressources naturelles (Baggnian, 2010).

Cette forte dépendance, combinée à la croissance démographique rapide, exerce une pression considérable sur les écosystèmes et accentue la dégradation des formations végétales.

Parmi ces formations, la brousse tigrée, typique des plateaux ouest-africains, occupe une place prépondérante. Cependant, elle est aujourd'hui soumise à un fort niveau d'exploitation, dû à la demande croissante en bois-énergie et aux défrichements agricoles (Suraud, 2011). Ces pressions ont entraîné une régression importante de cette formation lors des trois dernières décennies, notamment sur le plateau de Kouré, considéré comme le noyau central de l'habitat des girafes du Niger (Abdou, 2005). Dans ce contexte, la compréhension des mutations paysagères dans cette zone apparaît cruciale, car les dynamiques d'occupation du sol y sont étroitement liées aux pratiques humaines et aux processus écologiques. Le suivi spatio-temporel de ces changements constitue donc un outil essentiel pour la planification et la gestion durable des ressources naturelles.

Ainsi, cette étude vise à analyser la dynamique d'occupation des sols dans la zone centrale de l'habitat de la girafe afin de déceler les transformations intervenues au sein des différentes unités d'occupation.

2 MATÉRIEL ET MÉTHODES

2.1 PRÉSENTATION DE LA ZONE D'ÉTUDE

L'étude a été conduite dans la zone centrale de répartition des girafes qui s'étend sur certaines parties des régions de Tillaberi et Dosso. Située entre les longitudes 2°30′ et 3°30′ E et les latitudes 13°20′ et 14°30′ N (figure 1), elle couvre les départements de Kollo et Boboye et abrite les communes rurales de Kouré, Harikanassou et N'Gonga (ASGN, 2018) sur une superficie de 167 825,19 ha. Kouré est située à 50 km au sud-est de Niamey, la capitale du Niger. La zone centrale de Girafe est densément peuplée et possède une variété d'écosystèmes, notamment la brousse tigrée, la brousse diffuse, les prairies et les parcs agroforestiers.

La « zone centrale de la girafe » (figure 1) a été classée zone de transition de la réserve de biosphère par l'UNESCO et par le gouvernement nigérien en 1997 (Morou, 2010) et Réserve nationale Naturelle des Girafes (RNNG) en 2024 par le gouvernement nigérien.

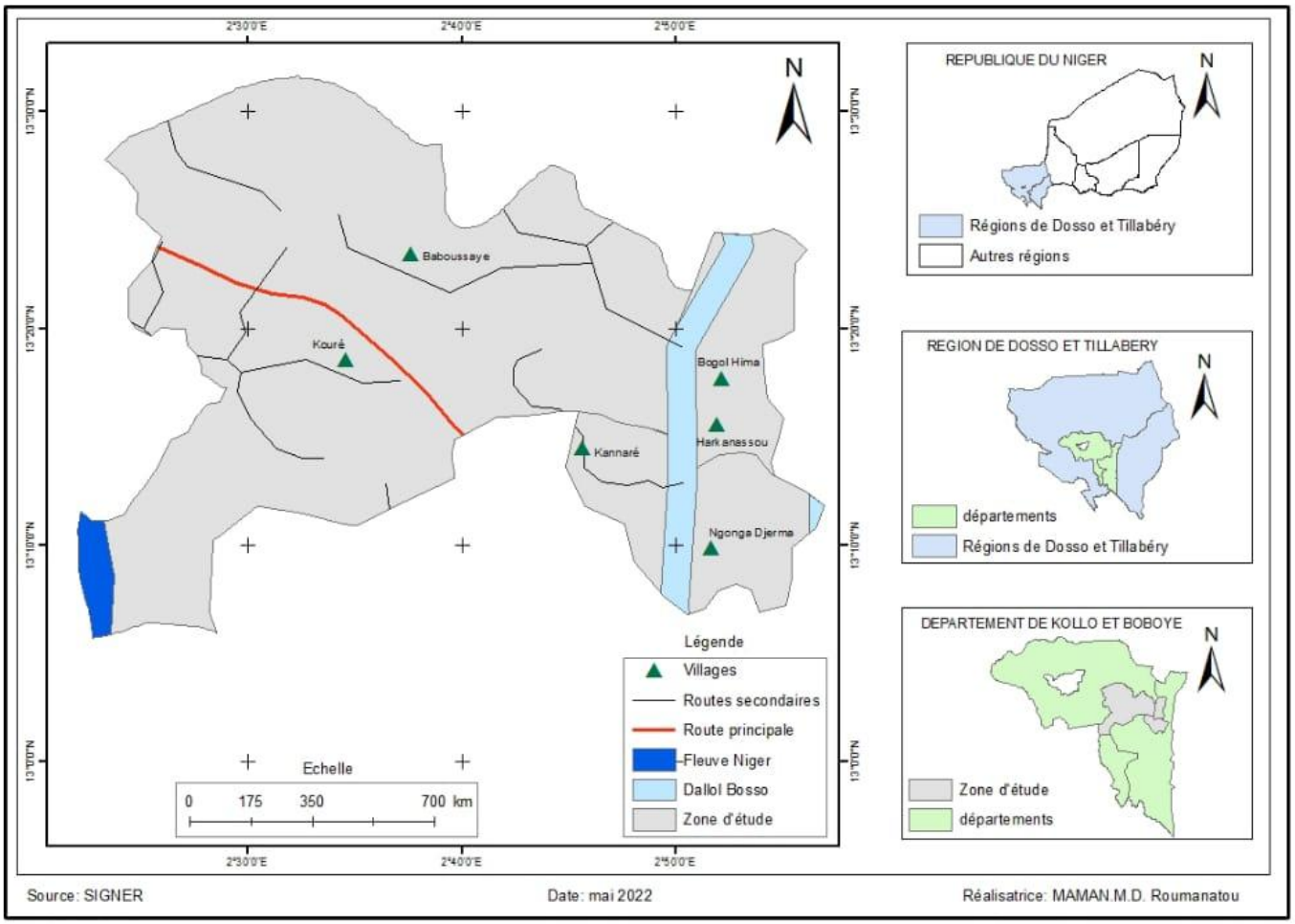


Fig. 1. Carte de localisation de la zone centrale de l'habitat de la girafe

2.2 ÉLABORATION DES CARTES D'OCCUPATION DU SOL

Identification et acquisition des scènes de la zone d'étude: pour étudier la dynamique des unités d'occupation du sol, il a été retenu les images de fin novembre et fin décembre, rendant ainsi possible l'acquisition d'images sans nuage. Par ailleurs, les images de la même saison ont été utilisées afin de diminuer les effets saisonniers (Koua et al., 2020). Les dates et caractéristiques des images LANDSAT choisies sont données dans le **tableau 1**.

Tableau 1. Dates et caractéristiques des images LANDSAT choisies

Satellite	Date	Référence	Wrs Path	Wrs Row	Format	Résolution (m)
LandSat 4-5 TM	26/12/1990	LT05_L1TP_192051_19901226_20200915_02_T1	192	51	Tif	30
LandSat 7 ETM+	28/11/2006	LE07_L1TP_192051_20061128_20200913_02_T1	192	51	Tif	30
LandSat 8-9 OLI/TIRS	26/12/2022	LC09_L1TP_192051_20221226_20230316_02_T1	192	51	Tif	30

Ensuite, des images de différents capteurs ont été utilisées: LANDSAT TM, ETM+ et OLI/TIRS. Le choix de ces capteurs se justifie par le fait que:

— Ces données sont issues du plus ancien programme d'observation de la Terre disposant ainsi d'une importante archive d'images sur une longue période d'années.
– Les données LANDSAT sont disponibles gratuitement sur la plateforme web du USGS « United States Geological Survey », qui est un organisme gouvernemental américain qui se consacre aux sciences de la terre.

Utilisée à des fins cartographiques, la base nationale de données topographiques (BNDT) a été utilisée pour l'exploitation des limites administratives des communes, des provinces et des régions; ainsi que les cours et plans d'eau, les voies de communication et les localités du Niger.

Prétraitements des images: ce sont des opérations de correction, des distorsions géométriques et/ou radiométriques appliquées aux images pour assurer une bonne qualité du produit en vue de leur utilisation ultérieure.

Des compositions colorées ont été réalisées pour mettre en exergue les différents types d'occupation des terres. Des compositions colorées combinant les bandes 4-3-2 pour les Landsat ETM+ et Tm et 5-4-3 pour les OLI-TIRS (Girard & Girard, 1999) furent réalisées.

Reconnaissance spectrale des classes d'occupation du sol sur le terrain: elle a consisté en la délimitation des différentes entités d'occupation des terres en fonction des signatures spectrales. Les discriminations vont porter sur les types de végétation, les zones de culture (jachère, champs), les cours d'eau, etc. Toutes ces entités ont été présentées sous forme d'unités polygonales et les routes et le réseau hydrographique en unités linéaires.

Une sortie de reconnaissance a été effectuée dans le but de reconnaître les lieux et de déterminer les clés d'interprétation. La connaissance du secteur d'étude a guidé le choix en faveur de la classification supervisée à partir de l'algorithme du maximum de vraisemblance (Salomon *et al*., 2021).

La numérisation à l'aide d'une table à numériser a consisté à intégrer élément par élément, soit sous forme linéaire, surfacique ou ponctuelle, les sites d'entrainement ou encore ROI (Region of Interest). Ce ROI ou encore classes d'information ont été choisis sur la base des entités recensées lors des travaux de terrain et relevées aux récepteurs GPS.

Le tableau suivant (**tableau 2**) présente les unités retenues pour cette étude.

Tableau 2. Clés d'interprétation des images satellites

Numéros	Classes	Symbole
1	Plans d'eau	PE
2	Forêt galerie	FG
3	Sols nus	SN
4	Brousse tigrée	BT
5	Steppes arbustives	SA
6	Affleurements rocheux	AR
7	Cultures pluviales	CL
8	Cultures maraîchères	CM
9	Bâtis	BÂ

** Classification: elle a été opérée à travers le renseignement du ROI (Regions Of Interest). L'algorithme Maximum de Vraisemblance (Maximum Likelihood), qui repose sur la règle de Bayes, a été choisi pour la classification des images.*

La qualité de la classification obtenue a été évaluée à l'aide des paramètres calculés par la matrice de confusion que sont la précision globale et le coefficient Kappa (Girard & Girard, 1999). Le coefficient Kappa prend en compte les erreurs d'omission et de confusion. De ce fait, il est le plus utilisé pour la validation des classifications (Kadio, 2023). Selon Landis & Koch (1977), la classification est satisfaisante lorsque le coefficient de Kappa est compris entre 0,61 et 0,81.

Qualité de la classification selon le coefficient de Kappa (Landis & Koch, 1977):

Excellent ≥ 0,81; Bon 0,81-0,61; Modéré 0,60-0,41; Médiocre 0,40-0,21; Mauvais 0,20-0,00;

Très mauvais <0,00

***Post-traitement**: la dernière étape du traitement des images a abouti à la conception des cartes d'occupation des terres et surtout à l'élaboration des statistiques. Elle regroupe les opérations comme la vectorisation, l'intégration des résultats sous SIG et la production des cartes.

2.3 ÉTUDE DE LA DYNAMIQUE DE L'OCCUPATION DU SOL

L'évolution spatio-temporelle de chaque classe d'occupation du sol a été évaluée à travers la détermination des superficies des différents types d'occupation du sol sur les images traitées pour les dates de prises de vue (Timite et al., 2023). Ainsi, à partir des valeurs de superficies des types d'occupation du sol, des histogrammes ont été établis.

Pour évaluer globalement les gains et les pertes sur la période considérée, les taux de changement globaux (Tg) des superficies ont été calculés entre 1990 et 2022 sur base de la formule suivante (Agbanou et al., 2018; Soro et al., 2014):

$$Tg = \frac{(S2 - S1)}{S1} \times 100$$

Tg représente le taux de changement global. Il exprime la proportion d'une unité d'occupation qui change au cours d'une période donnée ou entre deux dates. S1 représente la surface d'une classe à la date t1; S2 la superficie de la même classe d'unité de surface à la date t2.

Par ailleurs, le taux moyen annuel d'expansion (Tc) a été calculé. Il définit la proportion de chaque unité qui a changé au cours d'une année et est évalué suivant la formule utilisée par (Schulz et al., 2010; Timite et al., 2023)

$$Tc = \frac{(LnS2 - LnS1)}{(t2 - t1) * lne} \times 100$$

Avec S1 la surface d'une classe d'unité de surface à la date t1; S2 la superficie de la même classe d'unité de surface à la date t2, t2 – t1 étant le nombre d'années d'évolution, ln le logarithme népérien et « e » la base des logarithmes népériens (e =2,71828). Les valeurs positives représentent une progression de la superficie de la classe pendant la période analysée tandis que les valeurs négatives indiquent la perte de la superficie d'une classe entre les deux dates. Quant aux valeurs proches de zéro, elles expriment une relative stabilité de la classe sur les deux périodes (Kpedenou et al., 2016; Kpedenou et al., 2018).

2.4 OUTILS DE TRAITEMENT ET D'ANALYSE

Le matériel de traitement des données utilisé dans le cadre de cette étude est constitué des logiciels de traitement de données: ArcGIS 10.4 (pour la réalisation cartographique), ENVI 5.3 pour le traitement et le post-traitement d'images satellitaires; Microsoft Office 2013 pour la saisie et le traitement des données.

3 RÉSULTATS

3.1 CARTES D'OCCUPATION DES SOLS DE 1990, 2006 ET 2022

3.1.1 PRÉCISION DE LA CLASSIFICATION DES IMAGES SATELLITAIRES

Pour vérifier l'efficacité de la classification, le coefficient Kappa et celui des précisions globales **issus** de la matrice de confusion ont été évalués. Le coefficient Kappa est de 0,9597 en 1990, de 0,9285 en 2006 et de 0,97 en 2022 avec des précisions globales de 97,30; 95,33 à 98,06 % respectivement en 1990, 2006 et 2022: la classification est donc excellente.

3.1.2 CARACTÉRISATION DES UNITÉS PAYSAGÈRES

3.1.2.1 ÉTAT DE L'OCCUPATION DES SOLS EN 1990

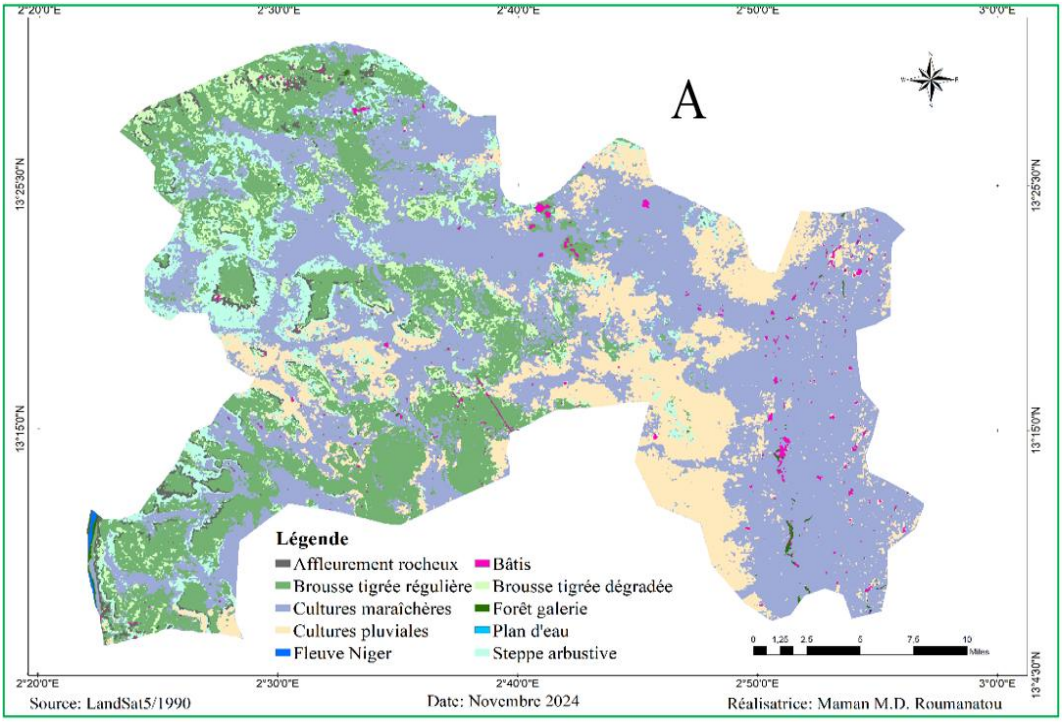
La carte d'occupation des sols de 1990 montre que sur une superficie de 167 825,19 ha, ce sont les CMA qui sont majoritaires avec 77 129,03 ha (45,95 %) suivis des BTR avec 37 497,9 ha (22,34 %), et des CPL avec 26 729,94 ha (15,92 %) (figure 3a). Les SA, les BTD et les BÂ sont moins représentés avec respectivement 12 728,79; 8146,49; et 2157,12 ha.

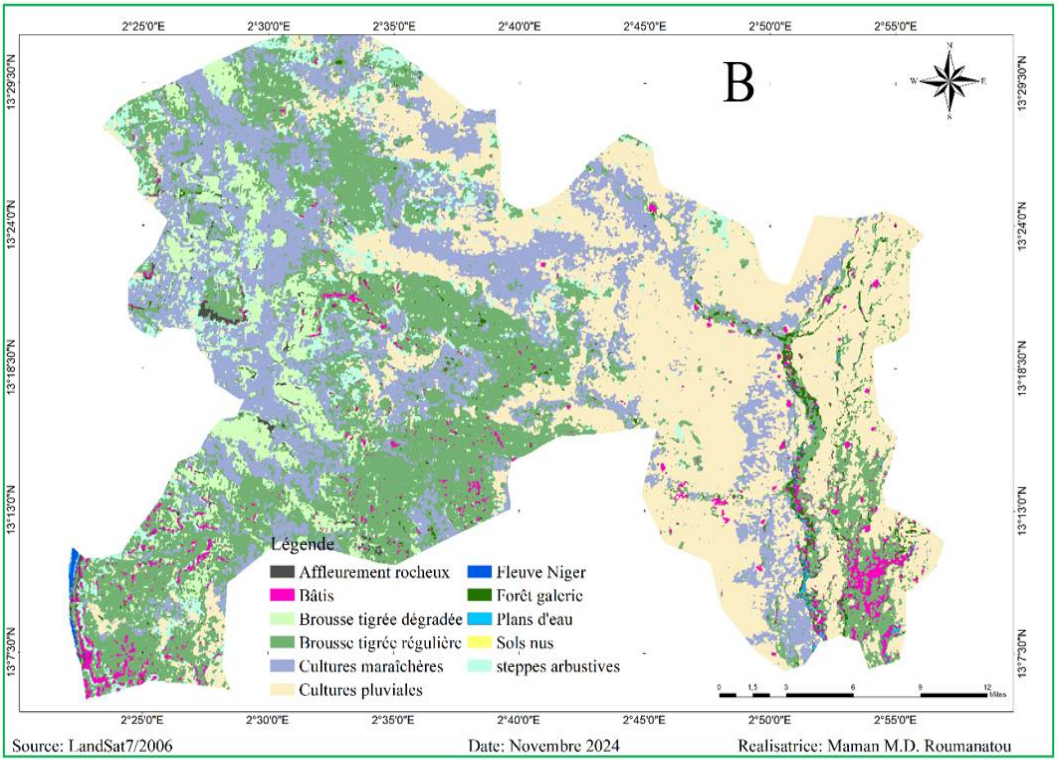
3.1.2.2 ÉTAT DE L'OCCUPATION DES SOLS EN 2006

Sur la carte de 2006 **(figure 3b),** les CPL sont majoritaires avec 55198,8 ha (32,89 %) suivis par les BTR avec 48923,13 ha (29,15 %) et les CMA avec 39354,64 ha (23,45 %). Les BTD, les BÂ, et les SA ont des superficies respectives de 10 808,92 ha; 3 479,25 ha et 7 280,26 ha. On note l'apparition d'une nouvelle unité d'occupation: sols nus: SN avec 56,16 ha.

3.1.2.3 ÉTAT DE L'OCCUPATION DES SOLS EN 2022

La carte d'occupation du sol de 2022 **(figure 3c)** montre également une dominance des CPL qui représentent 54464 ha (32,56 %) en termes de superficie, suivis par la CMA avec 39510 ha (23,45 %) et la BTR avec 28305 ha (16,92 %). Elles sont suivies par les BTD avec 20 915 ha et la SA avec 7 065,2 ha. Les autres unités sont faiblement représentées: SN, AR, FG, PE et FN.





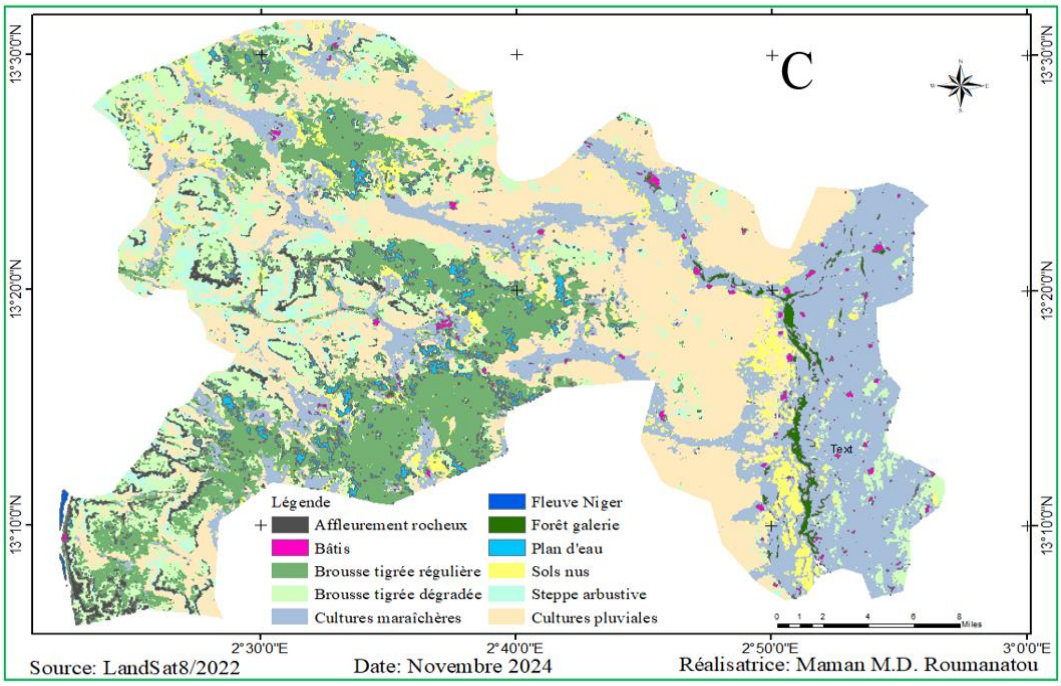


Fig. 2. Cartes d'occupation des sols: (A) 1990; (B) 2006; (C) 2022

3.2 DYNAMIQUE DES UNITÉS PAYSAGÈRES

Trois niveaux de statuts des unités d'occupation ont été observés (**figure 4**): la progression (augmentation de la superficie d'une unité), la régression (transformation d'une unité paysagère en une autre) et la stabilité (sans changement de l'état initial d'une unité). La progression et la régression s'observent tant à l'intérieur des unités (changements spécifiques) qu'entre les unités (changements globaux).

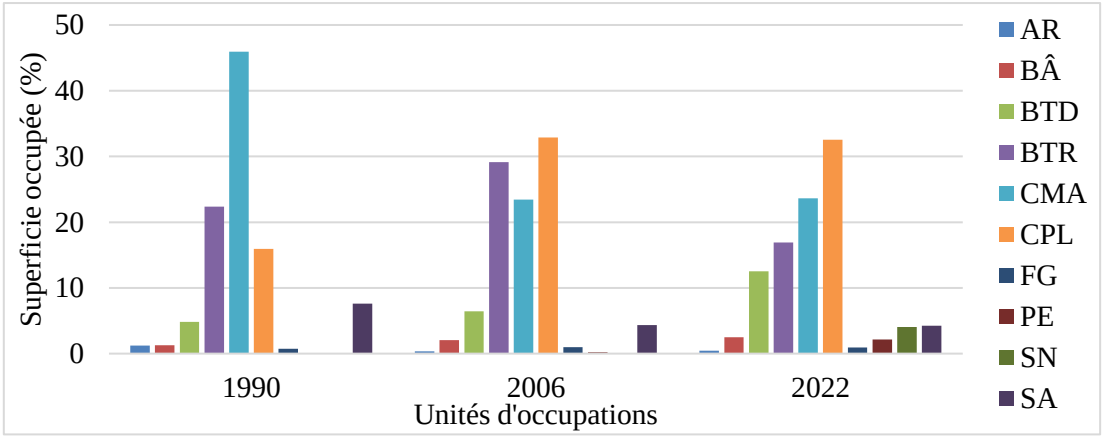


Fig. 3. Évolution des unités d'occupation de 1990 à 2022

AR: affleurement rocheux, BA: bâtis, BTD: brousse tigrée dégradée, BTR: brousse tigrée régulière, CMA: cultures maraîchères, CPL: cultures pluviales, FG: forêt galerie, PE: plans d'eau, SN: sols nus, SA: steppes arbustives.

Durant la période 1990-2022, la brousse tigrée régulière a connu une régression de sa superficie: elle est passée de 37 497,9 à 28 305 ha avec un taux de changement de -24,25 % (**tableau 3**). Entre 1990 et 2006, 54 % des brousses tigrées régulières sont converties en brousses tigrées dégradées et 10,44 % sont converties en bâtis entre 2006 et 2022 (**tableau 4**). Quant à la brousse tigrée dégradée, elle a connu une progression de sa superficie de 8145,5 ha en 1990 à 20915 ha en 2022 (**tableau 3**).

Elle a un taux de changement global de 15,76 %. Entre 1990 et 2006, 54 % de la brousse tigrée régulière s'est transformée en brousse tigrée dégradée (**tableau 4**). Les cultures pluviales ont connu une progression de leur superficie de 1990 à 2022 de 26729,9 à 54464 ha avec un taux de changement global de 10,45 % (**tableau 3**). Entre 1990 et 2006, 8,41 % de la brousse tigrée régulière et 10,91 % des cultures maraîchères sont converties en cultures pluviales et entre 2006 et 2022, 24,19 % des cultures maraîchères sont converties en cultures pluviales (**tableau 4**). Entre 1990 et 2006, les bâtis sont passés de 2157,1 ha à 3479,3 ha et de 3479,3 à 4160,8 ha entre 2006 et 2022, avec un taux de changement de 93,09 % (**tableau 3**). Les bâtis ont donc connu une progression entre 1990 et 2022: 29,43 % des brousses tigrées régulières sont transformées en bâtis entre 1990 et 2006 et 23,69 % des cultures maraîchères sont également transformées en bâtis entre 2006 et 2022 (tableau 5). Les cultures maraîchères ont connu une régression de leur superficie: elles sont passées de 77 129 ha en 1990 à 39 510 ha en 2022 avec un taux de changement global de -48,6 % (**tableau 3**). Ainsi, entre 1990 et 2006, 14,49 % des cultures maraîchères sont converties en cultures pluviales et 63,42 % des cultures maraîchères sont converties en steppe arbustive (**tableau 4**). Aussi, 8,67 % des cultures maraîchères sont converties en cultures pluviales entre 2006 et 2022 (**tableau 4**).

Les sols nus sont nouvellement apparus en 2006 sur une superficie de 56,2 ha (**tableau 3**). Cette unité a progressé et a atteint 6816,3 ha en 2022 avec un taux de changement global de 12,08 %. Les steppes arbustives sont passées de 12728,8 à 7065,2 ha entre 1990 et 2022 avec -2,64 % de taux de changement global: elles ont donc connu une régression de leur superficie (**tableau 3**). Entre 1900 et 2006, 19,03 % des steppes arbustives sont converties en cultures pluviales (**tableau 4**). Le fleuve Niger a connu moins de conversion en d'autres unités, il est stable à 92,07 % entre 1990 et 2022 (**tableau 4**). Les plans d'eau quant à eux sont stables à 35,25 % avec 45,10 % convertis en forêt-galerie entre 1990 et 2022 (**tableau 4**). Les affleurements rocheux sont passés de 2034,5 ha en 1990 à 744,1 ha en 2022 avec un taux de changement global de -63,30 % (**tableau 3**). Durant la même période, 5,12 % des affleurements rocheux sont convertis en brousses tigrées dégradées (**tableau 4**).

La forêt-galerie est passée de 1271,1 à 1585,8 ha entre 1990 et 2022 avec un taux de changement global de 27,11 %: elle a ainsi connu une progression de sa superficie (**tableau 3**). Elle est à 78,85 % de stabilité durant les trois décennies. Entre 1990 et 2006, 41,41 % des plans d'eau sont convertis en forêt-galerie (**tableau 4**).

Tableau 3. Taux de changement des différents types d'occupation du sol

	Superficie (ha)			Taux de changement (%)	
Noms des classes	**1990**	**2006**	**2022**	**Taux global**	**Taux annuel**
Affleurement rocheux	2034,5	587,6	744,1	-63,30	-3,13
Bâtis	2157,1	3479,3	4150,8	93,09	2,06
Brousse tigrée dégradée	8146,5	10 818,9	20915	15,76	2,96
Brousse tigrée régulière	37497,9	48923,1	28305	- 24,25	-0,87
Cultures maraîchères	77129,0	39354,6	39510	-48,60	-2,08
Cultures pluviales	26729,9	55198,9	54464	10,45	2,24
Fleuve Niger	125,7	131,4	106,11	– 15,30	-0,52
Forêt galerie	1271,1	1615,3	1585,8	27,11	1,50
Plans d'eau	4,6	338,6	3582,9	96,15	14,76
Sols nus	0,0	56,2	6816,3	12,08	30,01
Steppe arbustive	12728,8	7280,3	7065,2	-2,64	-0,17

Tableau 4. Matrices de transition des types d'occupation du sol au cours des décennies 1990-2006, 2006-2022 et 1990-2022

	CPL	PE	FG	FN	BÂ	BTR	BTD	AR	CMA	SA	Total 2006
CPL	**75,78**	0,00	0,37	0,00	12,77	3,91	1,12	3,38	14,49	19,03	100
PE	0,05	**66,67**	41,41	0,00	5,12	0,02	0,00	0,38	0,06	0,00	100
FG	0,19	5,88	**24,83**	0,00	10,29	0,56	0,10	0,60	0,54	0,03	100
FN	0,00	0,00	3,71	**95,97**	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	100
BÂ	0,95	21,57	7,73	0,00	**28,85**	2,86	0,65	23,83	0,58	0,14	100
BTR	8,41	0,00	4,87	0,00	29,43	**62,31**	54,00	39,70	7,42	15,11	100
BTD	1,82	0,00	0,03	0,00	1,93	14,11	**20,82**	8,17	0,55	15,38	100
AR	0,03	0,00	5,77	0,00	3,01	0,37	0,41	**15,35**	0,02	0,03	100
CMA	10,91	0,00	4,71	0,07	6,54	12,09	14,91	4,29	**12,84**	25,49	100
SA	1,81	0,00	4,68	3,89	1,39	3,67	7,81	4,04	63,42	**24,60**	100
SN	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,12	0,00	0,02	0,01	100
Total 1990	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	0

	BÂ	BTR	BTD	AR	CPL	FG	FN	PE	CMA	SA	Total 2022
BÂ	**9,69**	0,76	0,13	1,99	0,13	5,70	0,00	4,92	0,08	0,00	100
BTR	10,44	**22,13**	4,14	11,02	0,05	10,77	0,00	0,93	1,66	0,01	100
BTD	1,78	9,15	**28,14**	1,68	0,04	0,08	0,00	0,00	1,16	0,32	100
AR	11,71	0,58	0,84	**53,22**	0,02	0,76	0,00	0,19	0,02	0,02	100
CPL	1,81	1,74	1,47	0,00	**48,02**	0,43	0,00	0,00	8,67	0,26	100
FG	6,34	0,44	0,01	8,39	0,04	**29,45**	3,73	74,42	0,06	0,01	100
FN	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	**90,04**	0,03	0,00	0,00	100
PE	3,18	4,49	3,26	1,73	0,02	0,64	0,00	**4,89**	0,28	0,00	100
CMA	23,69	13,06	0,29	1,38	24,19	25,15	0,00	3,11	**28,46**	0,01	100
SA	1,25	2,81	6,42	1,26	1,06	0,06	0,00	0,00	1,24	**0,77**	100
SN	0,00	0,03	0,04	0,00	2,79	0,01	0,00	0,00	1,43	0,00	100
Total 2006	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	0,00

	BÂ	BTR	BTD	AR	CPL	FG	FN	PE	CMA	SA	Total 2022
BÂ	**24,76**	0,24	0,05	0,49	0,30	3,05	0,00	0,00	0,22	0,00	100
BTR	8,36	**26,79**	5,88	3,00	0,09	4,31	0,00	0,00	0,88	0,02	100
BTD	0,77	14,23	**34,06**	5,12	0,05	0,00	0,00	0,00	0,02	1,80	100
AR	2,46	0,54	0,42	**41,18**	0,04	0,90	0,00	0,00	0,00	0,24	100
CPL	6,21	2,44	0,19	1,38	**63,78**	0,00	0,00	0,00	5,78	8,11	100
FG	13,67	0,20	0,00	0,91	0,02	**78,85**	2,12	45,10	0,39	0,00	100
FN	0,00	0,00	0,00	0,00	0,00	1,96	**92,07**	0,00	0,00	0,00	100
PE	7,15	3,37	13,59	2,30	0,13	0,46	0,00	**35,29**	0,12	0,26	100
CMA	9,89	1,25	0,53	0,22	8,77	0,70	0,00	0,00	**13,81**	0,01	100
SA	0,03	2,42	0,35	6,89	1,61	0,00	0,00	0,00	0,12	**19,68**	100
SN	0,00	0,01	0,09	0,00	0,34	0,00	0,00	0,00	0,96	0,00	100
Total 1990	100	100	100	100	100	100	100	100	100	100	0,00

SN: sols nus; AR: affleurement rocheux; BTR: brousse tigrée régulière; BTD: brousse tigrée dégradée; CPL: cultures pluviales; CMA: cultures maraîchères; FG: forêt galerie; PE: plans d'eau; SA: steppe arbustive; BÂ: bâtis; FN: fleuve Niger.

4 DISCUSSION

Les valeurs élevées du coefficient Kappa et celles des précisions globales montrent que la classification est acceptable, sachant que la valeur critique du coefficient de Kappa au-delà de laquelle une classification est jugée acceptable est de 75 % (Girard et Girard, 1999). La brousse tigrée constitue l'habitat principal de la girafe. En effet, confrontée à une dégradation accentuée des sols du fait de l'aridité climatique et de l'accroissement des activités anthropiques, cette brousse tigrée tend à disparaitre. L'analyse de la matrice de transition a permis de déceler une dégradation des écosystèmes de la zone d'étude, une anthropisation marquée par l'augmentation de l'aire totale des bâtis et des zones de cultures pluviales et enfin, une faible tendance à la reprise de la végétation entre 1990, 2006 et 2022. Cette situation pourrait s'expliquer par la réduction du temps de jachère. La faiblesse du taux de progression de la brousse tigrée est un signe de perturbation de cet habitat. La contraction typique de la végétation étant une forme d'adaptation aux conditions défavorables du milieu (Ichaou, 2000), la proportion de cette formation est un indicateur d'une résilience des systèmes écologiques de la zone, autrement dit leur capacité à résister face aux chocs climatiques (baisse de la pluie) et anthropiques (Chaïbou & Banoin, 2008).

Pendant les trois décennies, les zones de cultures ont constitué les unités d'occupation les plus largement répandues. Cette dominance des zones de cultures pourrait aussi s'expliquer par le fait que ceux-ci ont connu moins de conversions en d'autres types. Les taux de conversion des milieux naturels en cultures et en plantations ont été, en une décennie (1980-1990), de 22,4 % en Côte d'Ivoire et de 32 % au Niger (Agosti et al., 2000).

Ces changements sont le résultat d'une mise en valeur agricole car on assiste de plus en plus à des pénétrations paysannes sur les plateaux latéritiques considérés jusqu'ici comme impropres à la culture (Sebillote, 1985; Trichon *et al.,* 2018). En Côte d'Ivoire et au Ghana par exemple, plus de 75 % de la surface forestière a disparu en 30 ans (Jons & Miranda, 1997). Aussi, ce défrichement s'explique par le désir des paysans de trouver de nouvelles terres fertiles, les terres du lit du Dallol et de la zone intermédiaire étant totalement saturées et relativement pauvres en éléments fertilisants (Morou et al., 2011).

Toutes ces mutations qui s'observent au niveau des différentes unités d'occupation des sols affectent le domaine vital de la girafe. Cette détérioration de l'habitat de la girafe est la résultante de la sécheresse climatique combinée à la forte croissance démographique. Entre 1990 et 2003, l'effectif de la population de la zone de distribution de la girafe est passé de 758 822 à 1 072 364 habitants et les superficies emblavées ont connu une augmentation de 50 % en 17 ans (Morou et al., 2011). L'accroissement de la population humaine va de pair avec l'augmentation des zones de cultures, mais inversement on assiste à une diminution de la brousse tigrée. Selon Mahamane (2005), il fallait prévoir la transformation complète de la brousse tigrée de Kirib Kaina en champs de culture en l'espace de 13 ans. Arouna (2012) confirme la fragmentation des forêts à Djidja au centre du Bénin par l'agriculture, la carbonisation et l'exploitation forestière par les populations locales. Le constat le plus remarquable dans l'évolution de l'occupation du sol est l'évolution grandissante de l'emprise agricole qui s'accompagne d'une fragmentation (Bogaert & Hong, 2003) et d'une homogénéisation des paysages via l'agrandissement des taches agricoles (Sabatier *et al*., 2010). En effet, les taches anthropiques comme les mosaïques de champs et jachères tendent vers des formes régulières rectangulaires ou carrées (Krummel et al., 1987).

5 CONCLUSION

L'analyse des types thématiques issus de la combinaison des techniques de télédétection aux systèmes d'information géographique a permis de mettre en exergue la dynamique spatio-temporelle de l'habitat principal de la girafe. Les résultats ont montré que les paysages de la zone girafe sont majoritairement dominés par les zones de cultures. L'expansion des zones de cultures a contribué à la dégradation des brousses tigrées et des steppes arbustives qui ont vu leurs superficies réduites de 1990 à 2022. La matrice de transition a permis de constater une mutation de 73,21 % des brousses tigrées régulières de 1990 à 2022.

Lors des 32 dernières années, les valeurs des superficies de la brousse tigrée et de la steppe arbustive ont chuté, et celles des bâtis ont augmenté, confirmant ainsi la fragmentation paysagère. En revanche, dans les zones de cultures, la création de nouvelles tâches et leur agrégation ont révélé une modification de la structure spatiale de ce paysage.

Cette étude a permis de mettre en évidence une forte anthropisation de la zone due à une intensification de la pression anthropique sur les ressources naturelles et à la péjoration climatique.

REFERENCES

[1] Abdou, N. (2005). Étude prospective des sites de formations contractées dans certaines zones de l'Ouest nigérien (Fandou et Tombo) dans la perspective de la décongestion de la zone de Kouré habitat actuel des girafes. [Mémoire de DEA]. Université Abdou Moumouni, Niamey.

[2] Agbanou, B., Djafarou, A., & Paegelow, M. (2018). Dynamique Spatio-Temporelle de l'Occupation du Sol en Zone d'Agriculture Extensive : Cas du Secteur Natitingou-Boukoumbe au Nord-Ouest du Benin. In Mélanges en hommage aux Professeurs Thomas Omer, Houssou Sègè Christophe et Houndaga Cossi Jean. *Géographie Au Service Du Développement Durable, 3,* 22–24.

[3] Agosti, D., Majer, D., Alonso, L., & Schultz, T. (2000). Ants - Standard methods for measuring and monitoring biodiversity. *Princeton Editorial Associates*.

[4] Arouna, O. (2012). Cartographie et modélisation prédictive des changements spatio-temporels de la végétation dans la Commune de Djidja au Bénin : implications pour l'aménagement du territoire. *Thèse de Doctorat unique, Géographie et Gestion de l'Enviro* [Thèse de Doctorat unique, Géographie et Gestion de l'Environnement]. UAC, Bénin, 162p.

[5] ASGN. (2018). Rapport annuel d'activités.

[6] Baggnian, I. (2010). Rôle des dynamiques démographiques et migratoires sur l'évolution des écosystèmes sahéliens : cas d'un terroir villageois reverdi et non reverdi du département de Mirriah dans la région de Zinder au Niger. [Mémoire de DESS en Protection de l'Environnement]. Faculté d'Agronomie/Univ Abdou Moumouni (CRESA – CER / UEMOA), 77p.

[7] Bogaert, J., & Hong, S. K. (2003). Landscape ecology: monitoring landscape dynamics using spatial pattern metrics. In: Ecological issues in a changing world, (eds. Hong, S.K.; Lee, J.A.; Ihm B.S.; Farina A.; Son Y.; Kim E.S. & Choe J.C),. *Kluwer Academic Publishers,* pp 109-131.

[8] Chaïbou, I., & Banoin, M. (2008). Analyse diachronique et structurale du paysage agraire de la zone de transition de la réserve transfrontalière de biosphère du W au Niger. *Bulletin de La Recherche Agronomique Du Bénin, 62,* 34–47.

[9] FAO. (2010). *Food and Agriculture Organization of the United Nations*. FAOSTAT. http://faostat.fao.org/default.aspx.

[10] Girard, M., & Girard, C. (1999). *Traitement des données de télédétection.* Dunod, Paris, France, 529 p.

[11] Ichaou, A. (2000). Dynamique et productivité des structures forestières contractées des plateaux de l'Ouest nigérien [Thèse de doctorat en Ecologie végétale tropicale]. Université Toulouse 3.

[12] Inoussa, T. M., Imorou, I. T., Gbègbo, M. C., & Sinsin, B. (2013). Structure et composition floristiques des forêts denses sèches de la région des Monts Kouffé au Bénin. *Journal of Applied Biosciences, 64,* 4787–4796.

[13] INS. (2022). Le Niger en Chiffres 2018-2020.

[14] Jons, G., & Miranda, L. (1997). Ovarian weight as an index of fecundity, maturity, and spawning periodicity. *Journal of Fish Biology, 50,* 150–156.

[15] Kadio, A. N. K. (2023). Dynamiques du paysage d ' une zone de contact forêt-savane et migration agricole pour la culture cacaoyère à l ' Ouest de la Côte d ' Ivoire (Issue August). https://doi.org/10.13140/RG.2.2.35595.67367.

[16] Koua, K. A. N., Barima, Y. S. S., B. Kpangui, K., & Bamba, I. (2020). Impact de la culture cacaoyère sur le paysage en zones rurale et domaniale de l'Ouest de la Côte d'Ivoire. *International Journal of Innovation and Scientific Research, 50* (2), 128–137.

[17] Kpedenou, K., Boukpessi, T., & Tchamie, T. (2016). Quantification des Changements de l'Occupation du Sol dans la Préfecture de Yoto (sud-est Togo) à l'aide de l'Imagerie Satellitaire Landsat. *Revue Des Sciences de l'Environnement, 13,* 137–156. url: %0Ahttps://hal.archives-ouvertes.fr/hal%0201409418.

[18] Kpedenou, K., Drabo, O., Ouoba, A., Da, D., & Tchamie, T. (2018). Analyse de l'Occupation du sol pour le suivi de l'Evolution du Paysage du Territoire Ouatchi au Sud-Est Togo entre 1958 et 2015. *Cahiers Du Cerleshs, 31* (55), 203–228.

[19] Krummel, J. R., Gardner, R. H., Sugihara, G., O'Neill, R. V., & P.R. Coleman. (1987). Landscape pattern in a disturbed environment. *Oikos, 48,* 321–324.

[20] Landis, J. R., & Koch, G. G. (1977). The measurement of observer agreement for categorical data. *Biometrics, 1* (33), 159–174.

[21] Morou, B. (2010). Impacts de l ' occupation des sols sur l ' habitat d e la girafe au Niger et enjeux pour la sauvegarde du dernier troupeau de girafes de l ' Afrique de l ' Ouest [Thèse de doctorat en Biologie Appliquée]. Université Abdou Moumouni de Niamey, 198p.

[22] Morou, B., Ambouta, J. M. K., Karim, S., Mahamane, A., Saadou, M., Mainassara, Z., & Sinsin, B. (2011). Etat de dégradation de l'habitat de la girafe (Giraffa camelopardalis peralta Linnaeus, 1758) au Niger (Afrique de l'Ouest) entre 1986 et 2003. *Secheresse, 22* (1), 57–64.

[23] Sabatier, R., Doyen, L., & Tichit, M. (2010). Reconciling production and conservation in agrolandscapes: does landscape heterogeneity help? Innovation and Sustainable Development in Agriculture and Food (ISDA). 10. Montpellier, France, 10 p.

[24] Salomon, W., Sikuzani, Y., Kouakou, A., Barima, Y., Theodat, J., & Bogaert, J. (2021). Cartographie et Quantification de la Perte du Couvert Forestier dans les Parcs Nationaux du Sud de la République d'Haïti de 1985 à 2018: Rôle des Activités Agricoles Locales. *International Journal of Biological and Chemical Sciences, 15* (2), 477–496. https://doi.org/10.4314/ijbcs.v15i2.9.

[25] Scaramuzza, P., Micijevic, E., & Chander, G. (2004). *SLC gap-filled products phase one methodology*. https://landsat.usgs.gov/documents/SLC_Gap_Fill_Methodology.pdf

[26] Schulz, J., Cayuela, L., Cheverria, C., Salas, & Rey, B. (2010). Monitoring Land Cover Change of the Dryland Forest Landscape of Central Chile (1975-2008). *Appl. Geogr, 30* (3), 436–447. https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2009.12.

[27] Sebillote, M. (1985). A travers champs, Agronomes et géographes. In *Orstrom* (Vol. 297). Paris.

[28] Soro, G., Ahoussi, E., Kouadio, E., Soro, T., Oulare, S., Saley, M., & Biemi, J. (2014). Apport de la Télédétection à la Cartographie de l'Evolution spatio_Temporelle de la Dynamique de l'Occupation du sol dans la Région des Lacs (Centre de la Côte d'Ivoire). *Afrique SCIENCE, 10* (3).

[29] Suraud, J. (2011). Identifier les contraintes pour la conservation des dernières girafes de l'Afrique de l'Ouest : déterminants de la dynamique de la population et patron d'occupation spatiale [Thèse de doctorat en Biologie animale]. Université Claude Bernard - Lyon I, 282p.

[30] Timite, N., Attey, K., Koua, N., Tamia, A., & Kouakou, M. (2023). Dynamiques spatio-temporelles des parcs agroforestiers dans la zone soudanienne de la Côte d ' Ivoire de 1990 à 2020 dans un contexte d ' expansion de l ' anacarde. *International Journal of Biological and Chemical Science, 17* (2), 484–504.

[31] Trichon, V., Hiernaux, P., Walcker, R., & Mougin, E. (2018). The persistent decline of patterned woody vegetation: The tiger bush in the context of the regional Sahel greening trend. *Global Change Biology, 24,* 2633–2648.

[32] USGS. (2004). *USGSSLC-off gap-filled products gap-fill algorithm methodology*. https://landsat.usgs.gov/documents/L7SLCGapFilledMethod.pdf

International Journal of Innovation and Scientific Research
ISSN 2336-0046 Vol. 85 No. 1 Jun. 2026, pp. 42-57
© 2026 Innovative Space of Scientific Research Journals
http://www.ijisr.issr-journals.org/

Etude du régime alimentaire du babouin de Guinée (*Papio papio,* Desmarest 1820) par rapport aux stades phénologiques de la flore du secteur de Simenti, Parc National du Niokolo Koba

[Study of the diet of the Guinea baboon (Papio papio, Desmarest 1820) in relation to the phenological stages of the flora of the Simenti sector, Niokolo Koba National Park]

Mallé GUEYE[1], Aïssatou SARR[1], Moustapha SY[2], Assane DIOUF[1], and Ibrahima GUEYE[3]

[1]Departement HydroSciences et Environnement, Université Iba Der Thiam de Thiès, Senegal

[2]Institut Supérieur de Formation Agricole et Rural, Université Alioune Diop de Bambey, Senegal

[3]Direction des Parcs Nationaux, Dakar-Fann, BP 5135, Dakar, Senegal

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: For primates, as for most other animals, the abundance and distribution of food resources and the risk of predation are generally considered primary determinants of their social organization. The overall objective of this project is to characterize the availability and diet of the Guinea baboon in the Niokolo Koba National Park, particularly in the Simenti sector. Descriptive information on plant phenology was needed to determine seasonal changes in food availability. Thus, the results show that there are more tree species available as the season becomes drier, the month of April with more plants available 15 species, the month of March with 12 species and the month of February 10 species. So, to find out which species the baboons consumed during our study, we followed the baboons for 47 days to collect data on their diet and daily activities from 6: 30 a.m. to 1 p.m. Thus, we were able to monitor several different groups, of which several parameters (daily activities) were listed. The results reveal for the three months of collection to give out of 986 events observed, the 526 concern the food, either 54.34% more than half of the events. Thus, the Guinea baboon spent most of its time satisfying its nutritional needs than focusing on its other activities such as socialization (81 events), movements (128 events), rest (251 events). The analysis show also that Guinea baboons are eclectic omnivores, they consume much more plants than other types of food. Plants account for 89.67% of their general diet, insects 7.46%, mammals 0.24%, and other foods 1.86%. Considered omnivorous with a frugivorous tendency, baboons show a preference for fruits on all parts of plants consumed with a proportion of 79.36%, for roots 6.2%, flowers 5.8%, bark and fiber 3.83% and for leaves sap and stems the least consumed parts with 4.80%). However, not all species were consumed at the same rate. The best consumed species were: *Piliostigma thonningii, Strychnos spinosa, Cyperus rotontus* and *Mimosa pigra.*

KEYWORDS: Phenology, Diet, Guinea Baboon, Event, Niokolo Koba national Park.

1 INTRODUCTION

Les babouins (*Papio spp*.) sont des singes vivant en groupe et très largement répandus sur le continent africain [1], [2], [3], [4], [5]. Il existe plusieurs espèces de babouins présentant des structures sociales variées et occupant une très large diversité d'habitats [6]. Compte tenu de leur vaste répartition, les six espèces de babouins (Chacma *(P. ursinus*), Olive (*P. anubis*), Kinda (*P. kindae*), babouin jaune (*P. cynocephalus,* le babouin de Guinée (*P. papio*) et le babouin hamadryas (*P. hamadryas*)) sont présentes dans une gamme d'habitats différentes et dans des conditions climatiques variées [7]. Bien que les babouins soient typiquement associés aux savanes et aux savanes boisées, ils occupent des habitats diversifiés allant des déserts (Namibie, en Mauritanie, au Niger, en Érythrée) aux forêts tropicales (Guinée-Bissau, dans l'Est de la République Démocratique du Congo, dans l'Ouest de l'Ouganda) [8]. Ils font partie des singes les mieux adaptés à la vie terrestre et vivent en grands groupes comprenant de 20 à plus de 100 individus. Quatre des six espèces composant le genre *Papio,* récemment surnommées le babouin COKY - Chacma *(P. ursinus*), Olive (*P. anubis*), Kinda (*P. kindae*) et Babouin jaune (*P.*

Corresponding Author: Mallé GUEYE

cynocephalus) [7], vivent dans des groupes sociaux à un seul niveau, avec une dispersion privilégiant les mâles [9]. Le babouin de Guinée (*P. papio*) et le babouin hamadryas (*P. hamadryas*), en revanche, présentent une organisation sociale emboîtée à plusieurs niveaux avec une dispersion partiale par les femelles [10], [11]. La disponibilité de la nourriture dans la plupart des habitats des babouins est souvent fortement influencée par les fluctuations entre la saison sèche et la saison des pluies [8].

Ainsi, la connaissance de l'écologie alimentaire d'une espèce est essentielle pour caractériser sa niche écologique et ses exigences en matière d'habitat [12], [13] et peut être considérée comme faisant partie d'une base socio-écologique pour intégrer des études plus approfondies sur l'organisation sociale, la structure sociale, la cognition et la communication [14], [15], [16]. Les conditions écologiques sont donc des facteurs majeurs qui influencent la taille du domaine vital, l'utilisation de l'habitat, la répartition des activités et le système social [17], [9], [18]. En particulier, la disponibilité de la nourriture est considérée comme un aspect majeur du bénéfice écologique, alors que le risque de prédation est supposé être un coût primaire dans le choix de l'habitat. Par conséquent, l'acquisition de nourriture et l'évitement des prédateurs sont les principales composantes des stratégies de survie chez les primates et les individus sont contraints d'échanger ces composantes afin de maximiser leur forme physique [1], [18]. Grâce à l'utilisation stratégique de différents types d'habitats, les animaux sont censés équilibrer ces demandes contradictoires [18]. Avec l'accroissement rapide des populations riveraines, ces espèces ne cessent d'être menacées d'une part par des actions anthropiques telles que les feux de brousse et le braconnage. C'est le cas au Parc National du Niokolo Koba.

De nombreuses études ont examiné l'écologie alimentaire des babouins [19], [14], [20], [21], [17], [22], [23], [24]. Particulièrement l'écologie des babouins (chacma, jaune, olive et hamadryas) est relativement bien étudiée dans les régions orientale et australe de l'Afrique. Comparativement à l'espèce de cette catégorie, la plus occidentale qui présente encore un gap d'informations, peu d'auteurs ont travaillé sur le babouin de Guinée [25], [8].

Des études approfondies doivent être effectuées sur la compréhension de l'écologie alimentaire du babouin de Guinée et les changements dans la disponibilité de la nourriture et le comportement alimentaire sur une échelle temporelle bien déterminée. C'est pour toutes ces raisons que ces travaux de recherches ont été initiés afin d'apporter des réponses à toutes ces préoccupations.

Ce travail a pour objectif global de caractériser le régime alimentaire du babouin de Guinée dans le Parc National du Niokolo-Koba notamment dans le secteur de Simenti. Il s'agit spécifiquement de:

- inventorier les espèces végétales et déterminer les différentes parties des végétaux consommées par le babouin de Guinée durant l'étude;
- suivre la phénologique des espèces végétales consommées par le babouin de Guinée dans la zone d'étude;
- déterminer les préférences alimentaires du babouin de Guinée dans la zone d'étude.

2 MATÉRIEL ET MÉTHODES

2.1 ZONE D'ÉTUDE

Le Parc National du Niokolo-Koba (PNNK) est situé au Sud-est du Sénégal, à cheval sur les régions administratives de Tambacounda, Kédougou et Kolda. Il a été créé par décret du 4 août 1954 par l'Administration coloniale française (JORF, 8 août 1954, pp. 7674-7675 et JOAO, 28 août 1954, p. 1502) et couvre une superficie de 913 000 hectares et ses coordonnées sont N 13°4' 0, W 12°43' 0. A l'instar de tous les parcs nationaux du Sénégal, le PNNK fait l'objet d'une réglementation stricte de protection intégrale [26]. La zone d'étude proprement dite est localisée dans le secteur de Simenti là où se trouve le Centre Recherche en Primatologie sis au centre du parc (-13.294076°/ 13.026138°). Située dans une zone bien appariée le long des rives du fleuve Gambie, les forets galerie et les mosaïques de la savane boisée du PNNK, la zone de Simenti se distingue par une diversité de la flore et de la faune.

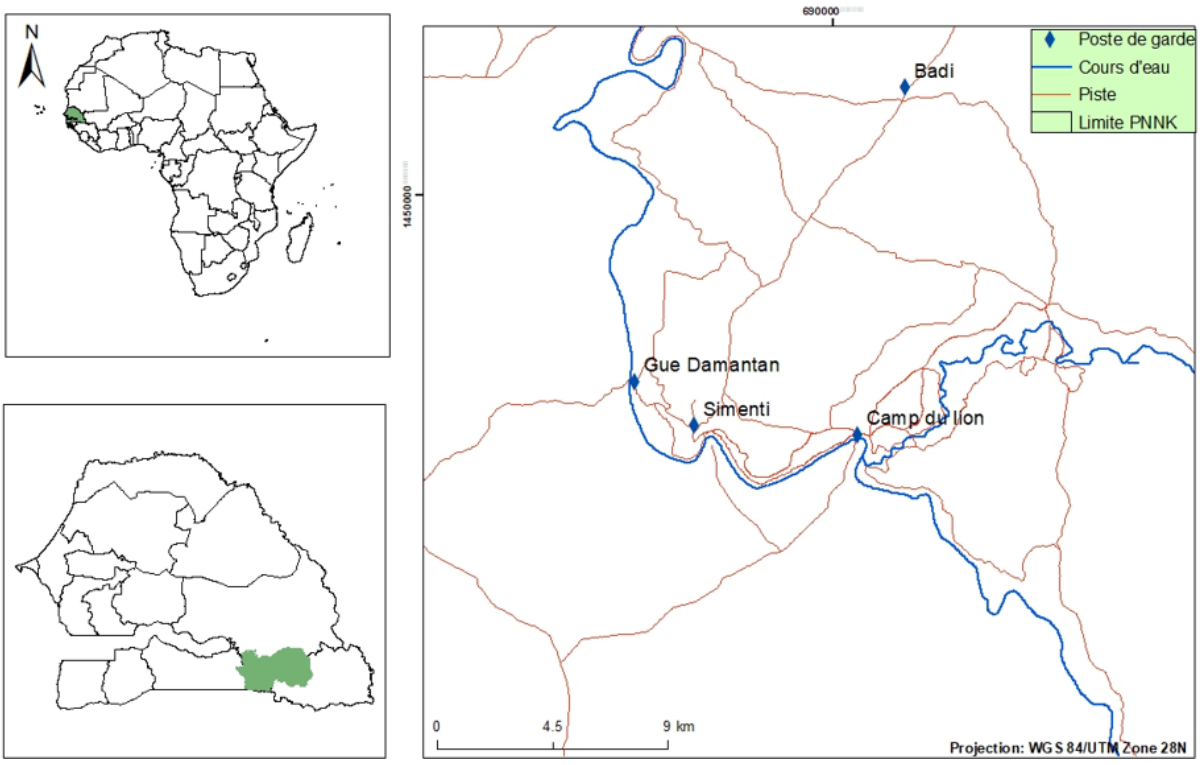


Fig. 1. Localisation du PNNK et secteur Simenti

2.2 MÉTHODOLOGIE

L'étude s'est effectuée dans le secteur de Simenti du 8 février au 26 avril 2022.

2.2.1 COLLECTE DE DONNÉE SUR LA PHÉNOLOGIE

Des études préliminaires ont été effectuées dans la zone d'étude et avait permis d'identifier une cinquantaine d'espèces végétales consommées par le babouin de Guinée [27]. Dans le cadre de cette étude, 28 espèces végétales les plus consommées ont été sélectionné dont 10 individus (arbres) de chacune ont fait l'objet d'un suivi.

Tableau 1. Liste des 28 espèces suivies

Familles	Espèces
Anacardiaceae	*Lannea macrocarpa*
Annonaceae	*Hexalobus monopetalus*
	Spondias mombin
Arecaceae	*Borassus akeassii*
Apocynaceae	*Saba senegalensis*
Bombacaceae	*Bombax costatum*
	Ceiba pentandra
Caesalpinioideae	*Cordyla pinnata*
	Piliostigma reticulatum
	Piliostigma thonningii
	Tamarindus indica
Combretaceae	*Combretum micranthum*
	Terminalia macroptera
Ebenaceae	*Diospyros mespiliformes*
Loganiaceae	*Strychnos spinose*
Mimosiodeae	*Mimosa pigra*
	Acacia macrostachya
	Acacia seyal
	Acacia sieberiana
	Dicrostachys cinera
	Parkia biglobosa
Moraceae	*Ficus ingens*
Papilionoideae	*Pterocarpus erinaceus*
	Ziziphus mucronate
Rubiaceae	*Sarcocephalus latifolius*
Tiliaceae	*Grewia lasiodiscus*
Ulmaceae	*Celtis integrifolia*
Verbenaceae	*Vitex madiensis*

Une collecte d'informations sur le stade phénologique des espèces végétales sélectionnées (10 individus par espèce) a été effectuée. Des transects chacun de 2 à 3 km ont été définis et suivis à la première semaine de chaque mois pour la collecte de données effectuée du 8 février au 26 avril 2022. Un Système de Positionnement Géographique (GPS) de type Garmin 64s a été utilisé pour s'orienter et enregistrer les coordonnées géographiques des arbres faisant l'objet de suivi. Une paire de jumelle a été utilisé pour mieux les observer surtout ceux qui ont une grande hauteur et aussi ceux qui ne pouvait pas être approchés à cause de la présence des abeilles. Les stades phénologiques ont été codés suivant le Tableau 2 et les données ont été consignées sur des fiches conçues à cet effet.

Tableau 2. Les différents stades phénologiques

Code	**0**	**1**	**2**	**3**	**4**	**5**	**6**	**7**
Description	Rien	Jeunes feuilles	Jeunes fleurs	Fleurs	Fruits Immatures	Fruits Intermédiaires	Fruits Mûres	Feuilles

Un smartphone Samsung *Galaxy Note II N7100* a été utilisé pour collecter les données sur la phénologie des plantes via l'application *Pendragon VI* installé à cet effet. Les données obtenues ont été synchronisée avec un mini-ordinateur muni d'une connexion internet pour y être sauvegardées.

Un code de couleurs a été utilisé pour une meilleure exploitation des données sur les stades phanologiques des plantes:

- la couleur verte indique que l'espèce est disponible, c'est-à-dire que l'espèce végétales présente des stades phénologiques telles que des fruits, fleurs, feuilles en abondance;
- la couleur jaune-orangée indique que l'espèce est peu disponible, c'est-à-dire qu'on y trouve moins de stades phénologiques peu de fruits, de fleur et de feuilles;

- enfin la couleur rouge-roux indique que l'espèce n'est pas disponible, c'est-à-dire qu'elle ne présente aucune stades phénologiques, elle a tout juste des feuilles mortes ou rien;
- la couleur grise indique les stades phénologiques des arbres.

Le logiciel R avec l'interface Rstudio est utilisé pour l'analyse des données. Une comparaison entre les mois avec l'utilisation de la Classification Ascendante Hiérarchique (CAH) est nécessaire pour représenter les groupes d'espèces et les variables dans le demi-plan.

2.2.2 RÉGIME ALIMENTAIRE

La méthodologie adoptée pour étudier le régime et les préférences alimentaires du babouin de Guinée a consisté au suivi journalier des différents groupes préalables identifiés par l'équipe de recherche sur place et le mâle dominant dispose d'un collier GPS pour leur localisation. Cette opération a démarré le 8 février 2022 par un système de suivi télémétrique effectué à l'aide d'une antenne VHF pour la localisation des groupes. La journée de travail commence à partir de 6h 30min et se termine à 13h. Ainsi, chaque 15 minutes (utilisation d'un minuteur) les informations codifiées sur l'activité du groupe de babouins sont enregistrées dans le Smartphone (1: Déplacement, 2: Recherche de nourriture, 3: Repos, 4: Social, 5: Autres) de tous les individus visibles. En cas d'activité alimentaire, les informations elles aussi codifiées (1: Plante; 2: Insecte; 3: Viande (mammifère); 4: Autres) sont enregistrés. Si c'est une plante qui est consommée on note l'espèce et la partie de la plante consommée (fruit, écorce, racine, feuille, fleur, etc.). Au cas où les babouins consomment une plante inconnue, cette dernière est récoltée afin d'être identifiée à l'aide du logiciel *« Les ligneux du Sahel »* ou le manuel *« Arbres, arbustes et lianes des zones sèches d'Afrique de l'ouest »* de Michel Arbonnier 2002.

2.2.3 PRÉFÉRENCE ALIMENTAIRE

Il s'agit de trouver les espèces végétales les plus consommées par le babouin de Guinée.

$$F = \frac{ni}{N}$$

F: fréquence proportionnelle ou importance de l'espèce; *N:* nombre total de toutes les espèces;

ni: nombre d'évènements d'une espèce

3 RÉSULTATS

3.1 PHÉNOLOGIE DES PLANTES

Le suivi de la phénologie des espèces végétales étudiées s'est effectué sur une période de 3 mois avec 3 jours de terrain mensuel et a concerné 276 individus. Les résultats obtenus sont consignés dans le tableau 3.

Tableau 3. ***Phénologie des espèces végétales suivies***

Famille	Espèces	Février	Mars	Avril	Codes phénologiques							
													1	2	3	4	5	6	7
Mimosiodeae	*Acacia macrostachya*											
Mimosiodeae	*Acacia seyal*											
Mimosiodeae	*Acacia sieberiana*											
Bombacaceae	*Bombax costatum*											
Arecaceae	*Borassus akeassii*											
Bombacaceae	*Ceiba pentandra*											
Ulmaceae	*Celtis integrifolia*											
Combretaceae	*Combretum micranthum*											
Caesalpinioideae	*Cordyla pinnata*											
Mimosiodeae	*Dicrostachys cinera*											
Ebenaceae	*Diospyros mespiliformes*											
Moraceae	*Ficus ingens*											
Tiliaceae	*Grewia lasiodiscus*											
Annonaceae	*Hexalobus monopetalus*											
Anacardiaceae	*Lannea macrocarpa*											
Mimosiodeae	*Mimosa pigra*											
Mimosiodeae	*Parkia biglobosa*											
Caesalpinioideae	*Piliostigma reticulatum*											
Caesalpinioideae	*Piliostigma thonningii*											
Papilionoideae	*Pterocarpus erinaceus*											
Apocynaceae	*Saba senegalensis*											
Rubiaceae	*Sarcocephalus latifolius*											
Annonaceae	*Spondias mombin*											
Loganiaceae	*Strychnos spinosa*											
Caesalpinioideae	*Tamarindus indica*											
Combretaceae	*Terminalia macroptera*											
Verbenaceae	*Vitex madiensis*											
Papilionoideae	*Ziziphus mucronate*											

Au mois de Février les résultats ont montré que 10 espèces sont disponibles, 8 espèces sont peu disponibles et 10 espèces sont indisponibles. En ce qui concerne le mois de Mars, les résultats ont révélé que 12 espèces sont disponibles, 9 espèces sont peu disponibles, 7 espèces sont indisponibles. Enfin, durant le mois d'Avril il a été noté que 15 espèces sont disponibles, 5 espèces sont peu disponibles, 8 espèces sont indisponibles.

En somme, la phénologie des espèces suivies diffère en fonction des mois, des espèces disponibles dans un mois peuvent ne pas l'être dans un autre mois. Pour les stades phénologiques, les jeunes feuilles ont été les plus disponibles, s'en suivent les feuilles et les fruits (immatures intermédiaire et mures). La figure 2 montre la CAH (Classification Ascendante Hiérarchique) des espèces pendant les trois mois. Elle montre que les mois ont été divisés en deux. Il a été constaté que le mois de Mars et Avril ont des ressemblances et sont classés dans un même groupe, le mois de Février classé en un groupe.

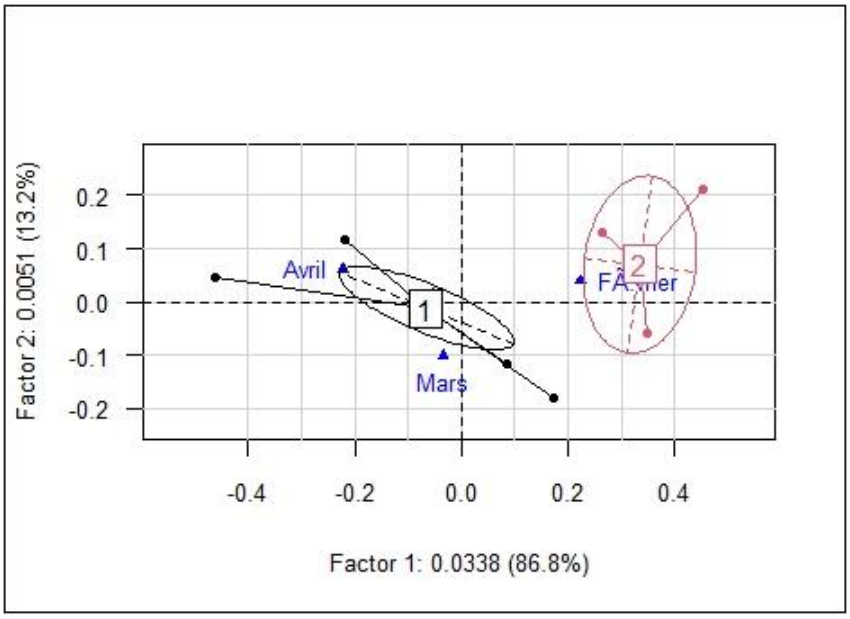


Fig. 2. CAH des trois mois

3.2 RÉGIME ALIMENTAIRE

ACTIVITÉS JOURNALIÈRES DU BABOUIN DE GUINÉE

Les résultats obtenus sur les activités journalières du babouin de Guinée durant le mois février montrent que sur 298 évènements observés, les 157, concernent l'alimentation, soit plus de la moitié des évènements. En ce qui concerne les mouvements liés à la recherche de la nourriture, 43 évènements sont enregistrés. Néanmoins une forte activité de repos est notée, 67 évènements qui pourraient s'expliquer par les fortes températures qui coïncident avec la période de l'étude. Pour les activités de socialisation, 31 évènements ont été enregistrés.

En ce qui concerne le mois de mars, les résultats obtenus sur l'activité journalière du babouin de Guinée révèlent que (figure 3), sur 399 évènements observés, les 218 concernent l'alimentation, soit plus de la moitié des évènements. Pour ce qui est des mouvements liés à la recherche de la nourriture, 55 évènements sont enregistrés. Une forte activité de repos, 95 évènements sont notés. Pour les activités de socialisation, 31évènements ont été enregistré.

Durant le mois d'avril, les résultats obtenus sur les activités journalières du babouin de Guinée sont représentés sur la figure 3 et ils révèlent que sur 289 évènements observés, les 151concernent l'alimentation, soit plus de la moitié des évènements. En ce qui concerne les mouvements liés à la recherche de la nourriture, 30 évènements sont enregistrés. Néanmoins une forte activité de repos, 89 évènements. Cette activité était le plus souvent observée le matin quand ils se réveillaient et à la fin de la journée vers 12h00. Pour les activités de socialisation, 19 évènements ont été enregistrés et l'activité était le plus souvent observée quand ils descendaient de leurs dortoirs.

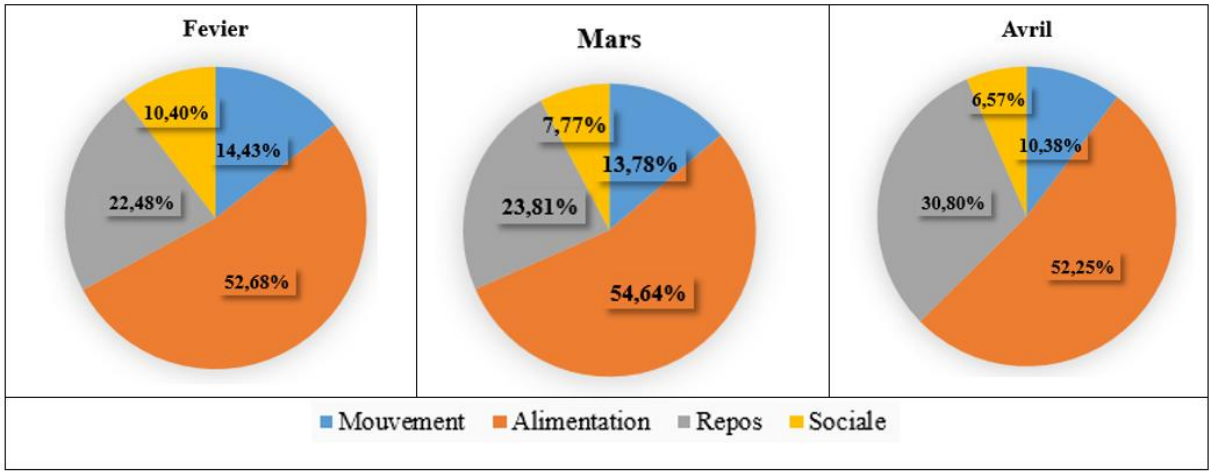


Fig. 3. Les activités journalières des babouins de Guinée durant la période d'étude

En somme, durant la période d'étude, il a été observé que l'activité principale des babouins était la recherche de nourriture. L'activité de déplacement était plus concentrée entre 9h et 11h, avant que les températures journalières ne soient plus élevées. Les activités de repos étaient le plus souvent observée le matin quand ils se réveillaient et à la fin de la journée vers 12h00. L'activité de socialisation était le plus souvent observée quand ils descendaient de leurs dortoirs.

3.3 ALIMENTATION

La figure 4 montre que durant le mois de février, la consommation des plantes est beaucoup plus importante avec 84,33%. Ensuite la consommation des insectes avec 11,94%. La consommation des petits mammifères est occasionnelle 1 seule fois pour le mois de février un Guib harnaché (*Tragelaphus scriptus*). Il y a aussi certains aliments non identifiés qui étaient présents dans leurs régimes alimentaires avec 3,36%.

Au courant du mois de mars la consommation des plantes est beaucoup plus importante avec 293 évènements des évènements totaux qui sont de 319. La consommation des insectes avec 20 évènements. La consommation des petits mammifères est occasionnelle 1 évènements le mois de mars le céphalophe de Grimm (*Sylvicarpa grimmia*). Il y a aussi certains aliments non identifiés qui étaient présents dans leurs régimes alimentaires avec 5 évènements (Figure 4)

En ce qui concerne le mois d'avril, les résultats obtenus révèlent que la consommation des plantes est beaucoup plus importante que les autres types de nourriture pour les babouins de Guinée, avec 202 évènements des évènements totaux qui sont 211. Ensuite, la consommation des insectes avec 8 évènements. Par contre ils n'ont pas consommé de mammifère pendant le mois d'avril. Il y a aussi certains aliments non identifiés qui étaient présents dans leurs régimes alimentaires avec 1 évènement (Figure 4).

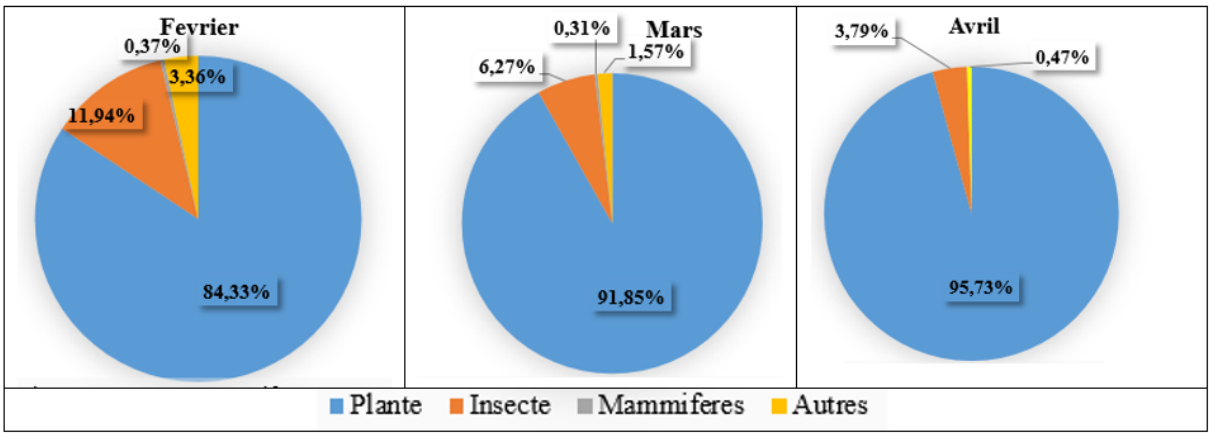


Fig. 4. Régime alimentaire des babouins de Guinées durant la période d'étude

3.4 INVENTAIRE DE LA FLORE ET DES PARTIES CONSOMMÉES PAR LE BABOUIN DE GUINÉE

➢ **Espèces végétales et parties consommées durant le mois de Février**

Les résultats ont montré que durant le mois de février, 21 espèces d'arbres avec les différentes parties de la plante ont été consommées par les babouins de Guinée (Tableau 4). Chez les espèces telles que le *Dicrostachys cinera, Borassus akeassii* ce sont les écorces, les fibres des branches et du tronc qui sont consommés ainsi que les fruits de *Borassus akeassii*. Les espèces comme le *Xeroderris stuhlmannii,* ils consomment occasionnellement les nouvelles feuilles. Ensuite vient les *espèces comme l'Hexalobus monopetalus, Pterocarpus erinaceus, Wissadula rostrata* et aussi *Acacia seyal,* sur ces espèces d'arbres, ce sont les fleurs qui les intéressent. Chez les espèces comme *l'Acacia macrostachya, Acacia sieberiana, Acacia seyal, Piliostigma thonningii, Piliostigma reticulatum, Hibiscus asper, Mimosa pigra, Ceiba pentandra, Detarium microcarpum, Strychnos spinosa, Ziziphus mucronata* ce sont les Fruits (gousses, graines) qui sont consommées et aussi il y a des espèces consommées juste par occasion c'est le cas du *Ziziphus mucronata*.

Chez les espèces telles que *(Anogeissus leiocarpa, Combretum glutinosum, Terminalia macroptera)* c'est la sève qu'ils sucent occasionnellement. Enfin, chez *Cyperus rotondus,* ce sont les racines (les tubercules et grains) et les tiges qui sont consommés.

La figure 5 révèle que les parties des plantes les plus consommées par les babouins de Guinée sont les fruits avec un pourcentage de 69,4%, ce qui fait apparaitre une certaine dépendance des individus vis à vis des fruits. Ensuite, viennent les racines 10% et les fleurs 9,2%. Les écorces, les fibres, feuilles, sève et tige sont rarement utilisés.

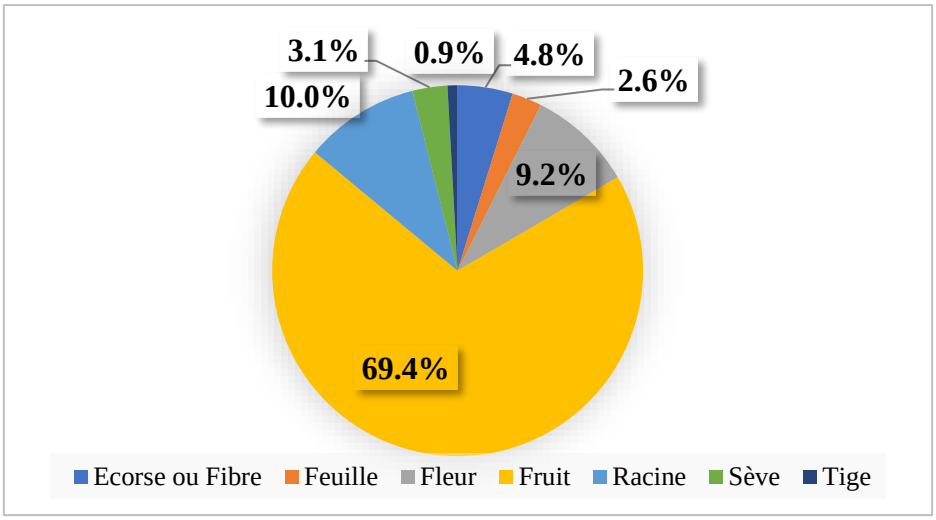


Fig. 5. Parties de la plante consommées

➢ **Espèces végétales et parties consommées durant le mois de mars**

Les résultats révèlent que pour le mois de mars, 17 espèces d'arbres avec les différentes parties de la plante ont été consommées par les babouins de Guinée (Tableau 4). Ils révèlent aussi que de nouvelles espèces sont consommées en plus de celles consommées pendant le mois de février et qui ne l'étaient pas durant le mois de mars et aussi il y a moins d'espèces consommées durant le mois de Mars. *Dicrostachys cinera,* et *Acacia seyal* ce sont les écorces des branches et du tronc qui sont consommés ainsi que les fruits, pour le *Borassus akeassii,* les fibres des branches et aussi les fruits (noyau, fibre) qui sont consommés. Pour *Xeroderris stuhlmannii,* les babouins de Guinée consomment occasionnellement les nouvelles feuilles. Chez *Hexalobus monopetalus* et *Wissadula rostrata,* ce sont les fleurs qui sont consommées.

Chez les espèces d'arbres comme *Piliostigma thonningii, Piliostigma reticulatum, Mimosa pigra, Bombax costatum, Ceiba pentandra, Capparis fascicularis, Detarium microcarpum* et *Strychnos spinosa,* ce sont les fruits (gousses, graines) qui sont consommés tandis que chez *Cyperus rotondus,* ce sont les racines (les tubercules) et les graines qui sont consommés. Les espèces telles que *Anogeissus leiocarpa* et *Terminalia macroptera,* c'est la sève qu'ils sucent occasionnellement.

La figure 6 révèle que les parties des plantes les plus consommées par les babouins de Guinée durant le mois mars sont les fruits avec un pourcentage de 82,6% suivi des fleurs avec 7,2% et la sève 3,1%. Par contre, les écorces, les fibres, les racines et feuilles, sont rarement consommées.

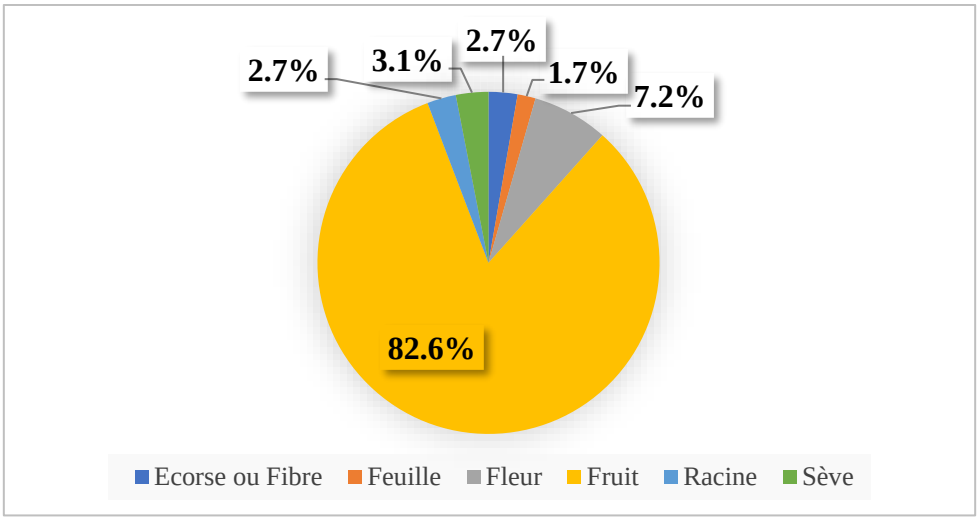


Fig. 6. Parties de la plante consommées

➢ **Espèces végétales et parties consommées durant le mois d'Avril**

Les résultats obtenus révèlent que durant le mois d'avril, le babouin s'est nourri de 19 espèces de plantes, avec les différentes parties de celles-ci consommées. Il a été constaté aussi qu'il y a de nouvelles espèces consommées autres que celles consommées durant les mois de février et mars.

Chez *Borassus akeassii* et *Acacia seyal,* les écorces des branches et du tronc sont consommées ainsi que les fruits (noyau, fibre) du *Borassus akeassii.* Pour *Xeroderris stuhlmannii,* les babouins de Guinée consomment occasionnellement les nouvelles feuilles. alors que chez *Parkia biglobosa,* ce sont les fleurs qui les intéressent.

Les espèces d'arbres comme *Piliostigma thonningii, Piliostigma reticulatum, Capparis fascicularis, Cordila pinnata, Detarium microcarpum, Dicrostachys cinera, Ficus ingens, Lannea microcarpa, Saba senegalensis, Strychnos spinosa, Tamarindus indica, Mimosa pigra* et *Combretum glutinosum,* ce sont les fruits (gousses, grains) qui sont consommés. Chez *Terminalia macroptera,* c'est la sève qu'ils sucent et sa consommation est occasionnelle tandis que chez *Cyperus rotondus,* ce sont les racines (les tubercules) et les grains qui sont consommées.

Tableau 4. Espèces végétales et parties consommées durant la période d'étude

Familles	Espèces consommées	Parties consommées						
		Ecorce ou Fibre	Feuille	Fleur	Fruit	Racine	Sève	Tige
Mimosiodeae	*Acacia macrostachya*				F, M			
	Acacia sieberiana				F, M			
	Acacia seyal	M, A		F	F, M			
Combretaceae	*Anogeissus leiocarpa*						F, M	
Arecaceae	*Borassus akeassii*	F, M, A			F, M, A			
Bombacaceae	*Bombax costatum*				M			
	Ceiba pentandra				F, M			
Combretaceae	*Combretum glutinosum*				A		F, M	
Combretaceae	*Cyperus rotondus*					F, M, A		F, M
Cesalpiniaceae	*Detarium microcarpum*				F, M, A			
Mimosiodeae	*Dicrostachys cinera*	F, M			F, A			
Annonaceae	*Hexalobus monopetalus*			F, M				
Malvaceae	*Hibiscus asper*				F, M			
Mimosiodeae	*Mimosa pigra*				F, M, A			
	Parkia biglobosa			A				
Caesalpinioideae	*Piliostigma thionnigii*				F, M, A			
	Piliostigma reticulatum				F, M, A			

Papilionoideae	*Pterocarpus erinaceus*			F, M				
Loganiaceae	*Strychnos spinosa*				F, M, A			
Combretaceae	*Terminalia macroptera*						F	M, A
Malvaceae	*Wissadula rostrata*			F, M				
Fabaceae	*Xeroderris stuhlmannii*		F, M, A					
Rhamnaceae	*Ziziphus mucronata*				F, M			
Apocynaceae	*Saba senegalensis*				A			
Caesalpinioideae	*Tamarindus indica*				A			
Moraceae	*Ficus ingens*				A			
Anacardiaceae	*Lannea macrocarpa*				A			
Capparaceae	*Capparis fascicularis*				M, A			
Caesalpinioideae	*Cordyla pinnata*				A			

F: Février; M: Mars; A: Avril

La figure 7 révèle que les parties des plantes les plus consommées par les babouins de Guinée durant le mois d'avril sont les fruits avec un pourcentage de 86,1%, suivies des racines avec 5,9% et des écorces ou fibres 4%. En outre, les fleurs, la sève, les feuilles, sont rarement consommées durant le mois d'avril.

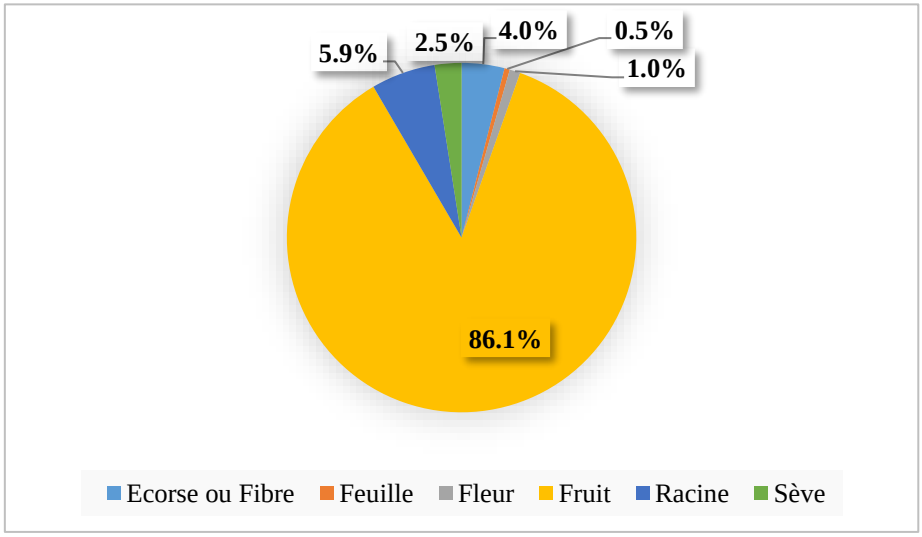


Fig. 7. Parties de la plante consommées

En somme, le régime alimentaire des babouins de Guinée est varié donc considéré comme omnivores à tendance frugivore. Parmi les espèces consommées par ces derniers, il y en a qui ne font pas partie des 28 espèces sélectionnées pour le suivi de la phénologie des plantes (Tableau 5).

Tableau 5. Espèces consommées non inscrites dans la liste sélectionnée

Famille	Espèce	Partie consommée
Combretaceae	*Anogeissus leiocarpus*	Sève
	Cyperus rotondus	Grains, racine, tige
Cesalpiniaceae	*Detarium microcarpum*	Fruits
Fabaceae	*Xeroderris stuhlmannii*	Jeunes feuilles
Malvaceae	*Hibiscus asper*	Grains
	Wissadula rostrata	Fleurs
Combretaceae	*Combretum glutinosum*	Sève, fruit
Capparaceae	*Capparis fascicularis*	Fruits

D'autres espèces sont présentes sur la liste des espèces sélectionnées pour le suivi de la phénologie et qui n'ont pas étés consommées par les babouins de Guinée durant cette étude, c'est le cas du *Spondias mombin, Combretum micranthum, Diospyros mespiliformes, Sarcocephalus latifolius, Grewia lasiodiscus, Celtis integrifolia, Vitex madiensis.*

3.5 PRÉFÉRENCE ALIMENTAIRE

La figure 8 ci-dessous montre que pour le mois de février c'est *Strychnos spinosa* qui est l'espèce la plus consommée par les babouins de Guinée avec 26,20%, suivi de *Piliostigma thonningii* avec 17,46%. Ils s'en suivent le *Cyperus rotondus* avec 10,91% *Mimosa pigra* 5,24%. *Borassus akeassii* et *Piliostigma reticulatum* enregistre chacun 5,67% alors que le reste des espèces inventoriées est consommé occasionnellement.

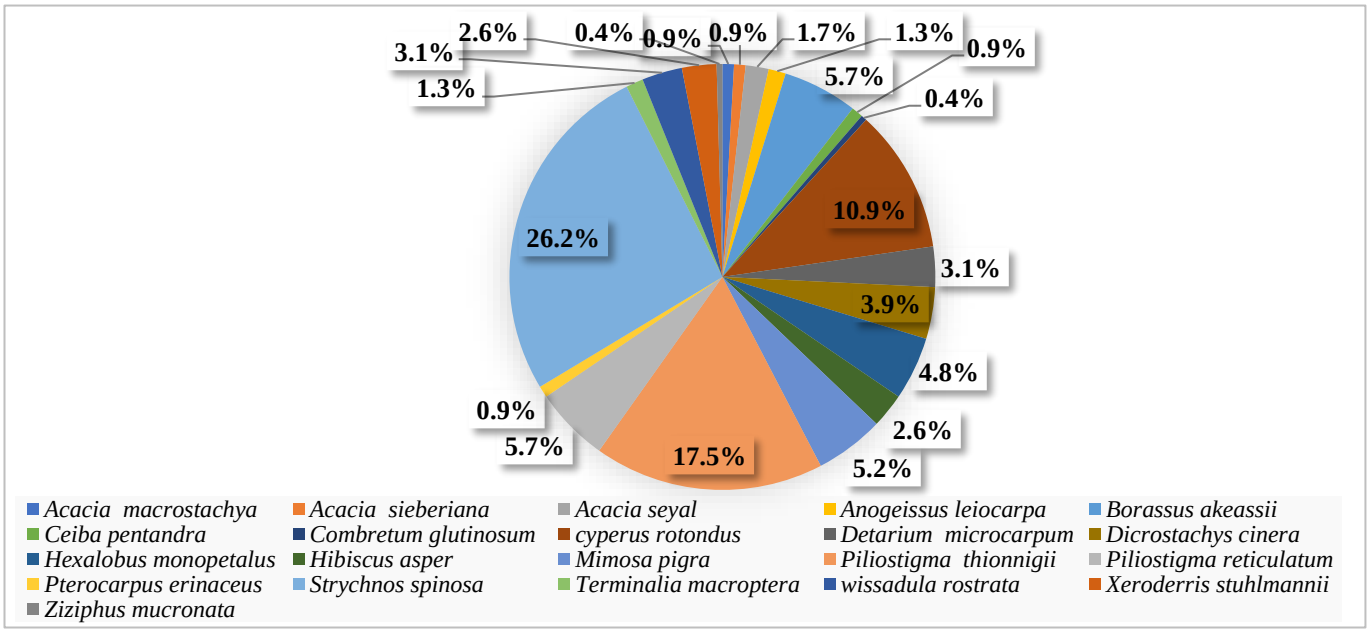


Fig. 8. Proportion des espèces consommées durant le mois de Février

La figure 9 révèle que durant le mois de mars, c'est *Piliostigma thonningii* qui est l'espèce la plus consommée (44,36%) suivie de *Strychnos spinosa* (13,65%) et *Acacia seyal (*8,19%). A la suite de ces espèces *Borassus akeassii* s'affiche avec 6,82% suivie de *Wissadula rostrata* qui est une herbacée consommée à taux de 6,14% par rapport aux autres. Les espèces restantes sont consommées par occasion.

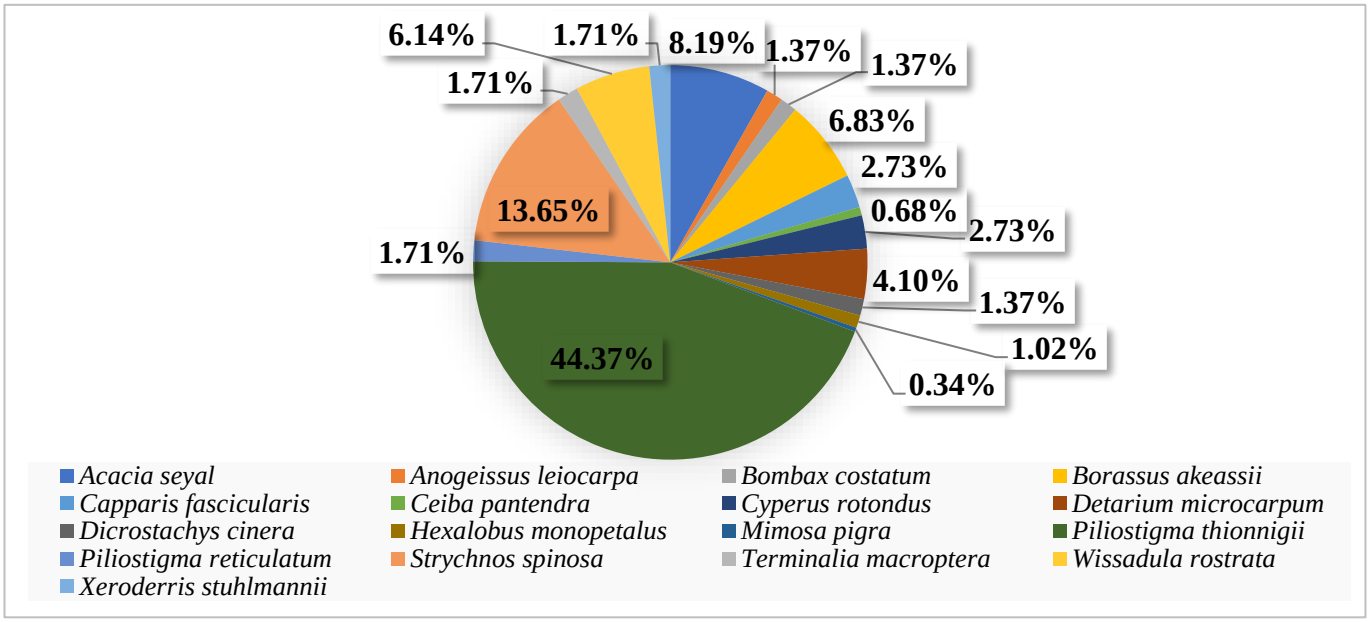


Fig. 9. Espèces consommées durant le mois de Mars

Durant le mois d'avril, les babouins se focalisaient plus sur *Piliostigma thonningii* avec 40,09% suivie de *Strychnos spinosa* avec 14,35%. Par la suite, *Lannea microcarpa* vient en troisième position avec 11,38% suivie de *Borassus akeassii* 7,42% et *Cyperus rotondus* 5,94%. Le reste des espèces est consommé rarement (figure 10).

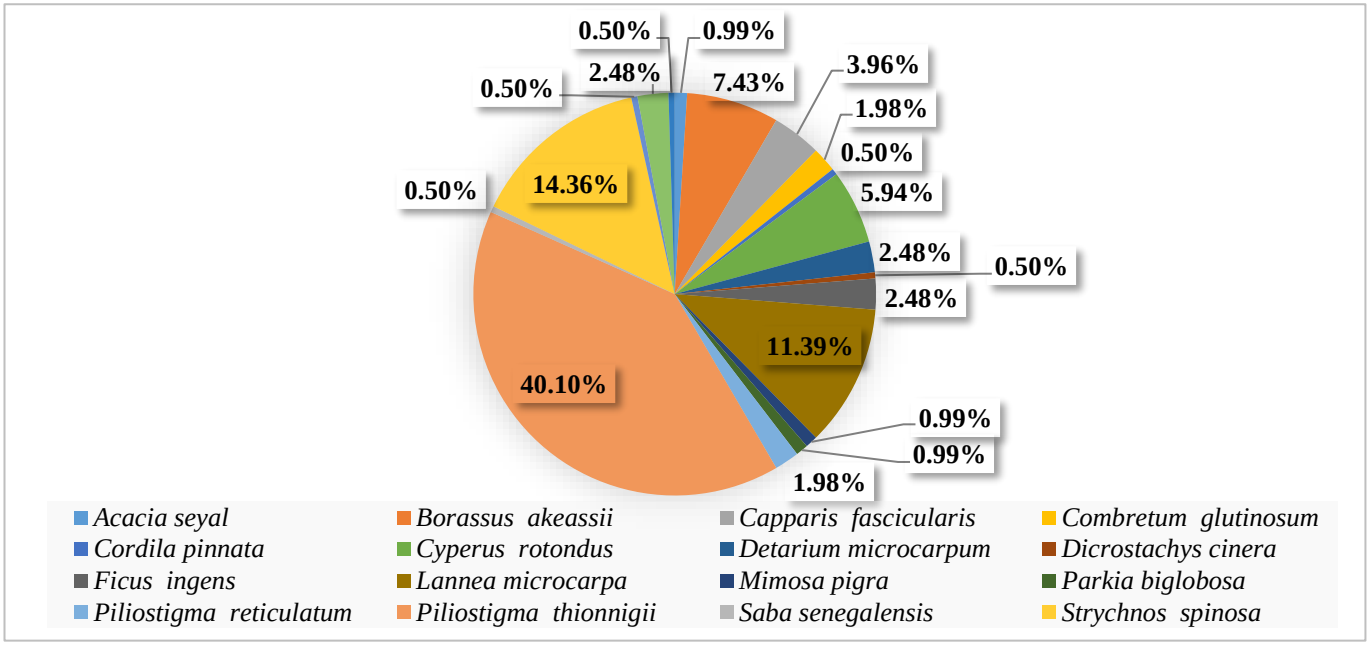


Fig. 10. Espèces consommées durant mois d'avril

La figure 11 montre la préférence alimentaire des babouins durant la période d'étude. Alors pour les trois mois c'est le *Piliostigma thonningii* qui est l'espèce la plus préférée suivie par *Strychnos spinosa.*

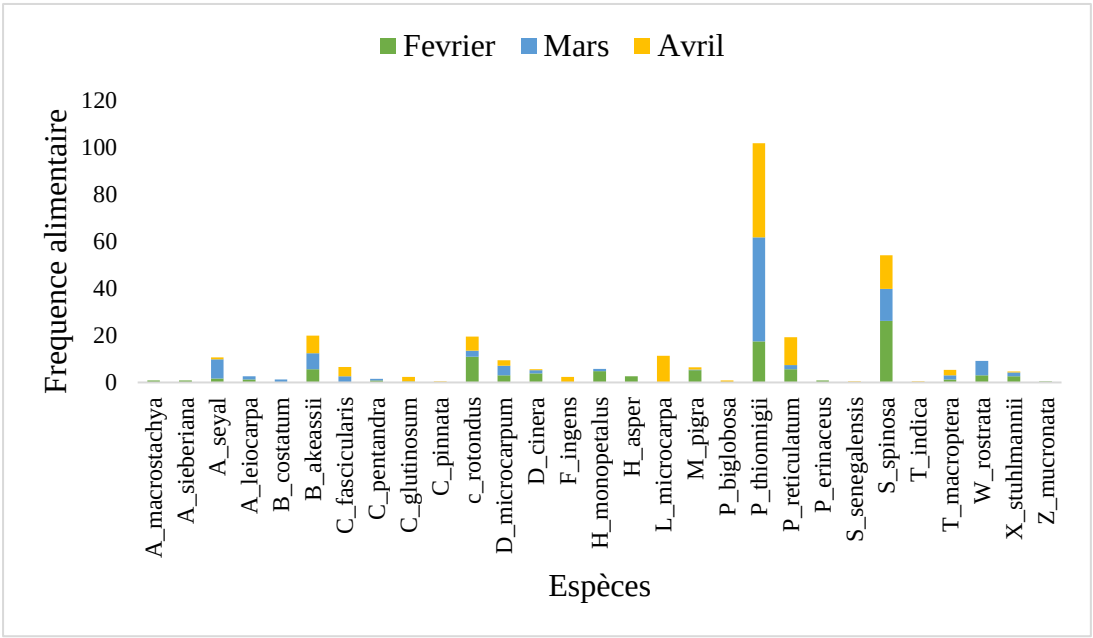


Fig. 11. Classification pour les trois mois

4 DISCUSSION

4.1 STADE PHÉNOLOGIQUE

Les résultats présentés dans cette étude démontrent que la disponibilité des espèces végétales pouvant être consommées par le babouin de Guinée, changée entre les mois. Cependant, en ce qui concerne les fluctuations saisonnières, il n'y a pas de données écologiques disponibles pour examiner les relations entre l'organisation sociale des babouins de Guinée et leurs variables écologiques respectives [27]. Ainsi, il était nécessaire d'avoir des informations descriptives sur la phénologie des plantes afin de déterminer les changements mensuels de la disponibilité alimentaire. En outre, des données phénologiques sur les espèces d'arbres clés des babouins sont nécessaires car chez les végétaux, la phénologie est l'étude de leurs phases de développements saisonniers: feuillaison, floraison, fructification, jaunissement automnal. Ces développements sont liés à certains paramètres climatiques [28]. Il y a plus de stades phénologique sur les espèces végétales disponibles au fur et à mesure que la saison devient plus sèche, certaines espèces atteignent leurs stades de maturation, le mois d'avril avec plus de plantes disponibles 15 espèces, le mois de mars avec 12 espèces et le mois de février 10 espèces. Cela semble aller dans le même sens que les résultats de Sharman [25] qui disent durant la saison sèche, le babouin de Guinée consacre les 80,5% de son alimentation aux plantes. Il ait supposé que ce soit parce qu'il y a beaucoup plus de plantes disponibles.

Par contre, il ait noté aussi des espèces pour qui leurs disponibilités est dégressive, comme le *Strychnos spinosa*. Il y a aussi des espèces qui ne sont pas disponibles sur les résultats de la phénologie et pourtant sont fortement consommées par les babouins cela peut être expliqué par le passage des feux de brousses ou les babouins sont déjà passés sur ces arbres sélectionnés pour la suivie de la phénologie comme le *Piliostigma thionnigii* et le *Piliostigma reticulatum*.

4.2 RÉGIME ALIMENTAIRE

Les facteurs les plus importants, susceptibles d'influencer directement l'organisation sociale de la population, sont des facteurs écologiques tels que la disponibilité, l'abondance et la distribution des ressources alimentaires dans l'espace et le temps, ainsi que le degré de risque de prédation [22].

L'alimentation du babouin était plus élevée en saison des pluies qu'en saison sèche et que le nombre d'espèces consommées augmentait au cours de l'année [25]. Les résultats semblent aller dans ce sens. Le nombre d'évènements pour l'alimentation augmente d'un mois à un autre le mois de février 52,68%, le mois mars 54,64% et le mois d'avril avec moins de jours de terrain mais quand même on obtient 52,25%. Ce qui suppose que si les nombres de jours étaient égaux le pourcentage du mois d'avril aurait pu être supérieur aux autres mois.

Sur les trois mois, il y a de nouvelles espèces consommées par les babouins de Guinées ne faisant pas parties des 28 espèces sélectionnées pour la phénologie, on suppose que ces espèces n'étaient pas disponibles pendant la période d'étude de Klapproth [27], comme *l'Anogeissus leiocarpus, Cyperus rotondus, Detarium microcarpum, Xeroderris stuhlmannii, Hibiscus asper, Wissadula rostrata, Combretum glutinosum, Capparis fascicularis.* Par contre y a aussi des espèces non consommées sur la liste des 28 espèces les plus consommées comme le *Spondias mombin, Combretum micranthum, Diospyros mespiliformes, Sarcocephalus latifolius, Grewia lasiodiscus, Celtis integrifolia, Vitex madiensis.* Ce phénomène peut être dû par le fait que la période de cette étude ne coïncidé pas avec les stades de maturation de ces espèces, et aussi elles n'étaient pas disponibles lors de phénologie.

Selon Sharman [29] durant la saison sèche, le babouin de Guinée consacre les 80,5% de son alimentation aux plantes. Ce qui est relativement en accord avec nos résultats 84,3 et 95,7% de Février jusqu'en Avril.

En outre, d'après plusieurs auteurs [20], [29], [4], [30], les babouins mangent une grande variété d'aliments comme les fruits, les graines, les herbes, les feuilles, les racines, les écorces, pousses, fleurs, bougeons de fleurs, champignons et diverses classes d'animaux. D'après nos résultats qui vont à l'encontre de ces données, qui nous laisse dire que les babouins sont considérés comme des omnivores à tendance frugivores.

4.3 PRÉFÉRENCE ALIMENTAIRE

Il a été trouvé que le régime alimentaire des babouins change d'un mois à un autre en fonction de la disponibilité des espèces végétales. Pour le mois de février c'est le *Strychnos spinosa* qui était la plus consommée tandis qu'aux mois de mars et d'avril c'est le *Piliostigma thionnigii*. Cependant, à un certain moment de l'étude au mois d'avril, les groupes de babouins visitaient régulièrement les savanes arborées lorsque l'oranger de brousse ou le *Strychnos spinosa* était en fin de production et ils consommaient les coques des fruits, ce qui laisserait supposer que leur mouvement se faisait en fonction de la disponibilité des fruits dans différents endroits. Et l'analyse pour le cumul des trois mois montre que le *Piliostigma thionnigii* est l'espèce la plus consommée.

De nombreuses études ont montré que la sélection nutritionnelle des babouins est corrélée positivement aux taux de protéines et de lipides et négativement aux taux de fibres, de phénols et d'alcaloïdes [16], [30]. Sur nos résultats on trouve que les espèces les plus

consommées sont très riches en protéines, c'est le cas du *Piliostigma thionnigii* la richesse de ce fruit en fer, en protéine et en calcium ferait de cet aliment une potentielle source de nourriture. Le peuplement des espèces consommées est légèrement dominé par quelques espèces comme le *Piliostigma thionnigii* et le *Strychnos spinosa.*

5 CONCLUSION

Le régime alimentaire du babouin de Guinée, *Papio papio,* une espèce encore mal connue, a été étudié durant trois mois de saison sèche dans le Parc National du Niokolo-Koba notamment dans le secteur de Simenti au Centre de Recherche en Primatologie. L'objectif de cette étude était de déterminer la disponibilité et le régime alimentaire de l'espèce. Pour les activités journalières, les babouins de Guinée passent la plupart du temps à s'alimenter. Son alimentation est beaucoup plus accentuée sur les plantes notamment les fruits. Les résultats montrent que le babouin de Guinée est omnivore mais marque une préférence claire pour les fruits qui constituent 79,3% de son régime. Il se montre très sélectif dans le choix de sa nourriture. Cette étude a mis en évidence qu'au moins 36 espèces végétales contribuent au régime alimentaire du babouin de Guinée dont l'écologie est d'une grande importance pour la gestion de cette aire protégée. Ce primate très abondant dans le parc et est un agent de dispersion pour de nombreuses plantes dont il se nourrit de ses fruits. Cette étude devrait être poursuivie durant toute une année et dans tout le parc afin de mieux cerner l'écologie alimentaire du babouin de Guinée.

REFERENCES

[1] Altmann, J. (1980). Baboon Mothers and Infants. Cambridge, Mass, s.l.: s.n.

[2] Altmann, J., Hausfater, G., Altmann, S. A. (1988). Determinants of reproductive success in savannah baboons, Papio cynocephalus. Dans: *Reproductive success: studies of individual variation in contrasting breeding systems.* Chicago: University of Chicago Press, pp. 403-418.

[3] Caroline, M. (2003). Contribution a l'etude d'un probleme de mortalite infantile au sein d'un group de babouins de Guinee (Papio papio) en captivite au parc zoologique de Paris. toulouse: s.n.

[4] Dunbar, R. I. M. et Barrett, L. (2001). Planète singes: nos cousins les primates. Paris: Bordas, s.l.: s.n.

[5] Gauthier, C. A. (1994). Socialisation et système social chez Papio papio au Parc Zoologique de Paris, s.l.: s.n.

[6] Whiten, A., Byrne, R. W., Barton, R. A., Waterman, P. G., & Henzi, S. P. (1991). *Dietary and foraging strategies of baboons, Phil. Trans. R. Soc. Lond. Biol. Sci.* s.l.: s.n.

[7] Jolly, C. J. (2020). Philopatry at the frontier: A demographically driven scenario for the evolution of multilevel societies in baboons (Papio).102819. *Journal of Human Evolution,* Issue 146.

[8] Zinner, D., Klapproth, M., Schell, A., Ohrndorf, L., Chala, D., Ganzhorn, J. U., & Fischer, J. (2021). Comparative ecology of Guinea baboons (Papio papio). *Primate Biology,* 21 May, pp. 20-35.

[9] Swedell, L. (2011). African papionins: Diversity of social organization and ecological flexibility. Dans: *Primates in Perspective.* s.l.: s.n., p. 241–277.

[10] Kummer, H. (1990). The social system of hamadryas baboons and its presumable evolution. Dans: *In Behaviour and Ecology, Use and Care.* s.l.: Selected Proceedings XII Congr. Int. Primatol. Soc., p. 43–60.

[11] Fischer, J., Kopp, G. H., Pesco, F. D., Goffe, A., Hammerschmidt, K., Kalbitzer, U., Klapproth, M., Maciej, P., Ndao, I., Patzelt, A., & Zinner, D. (2017). Charting the neglected West: The social system of Guinea baboons. American Journal of Physical Anth. *American Journal of Physical Anthropology,* Volume 162 (S63), 15–31. https://doi.org/10.1002/ajpa.23144.

[12] Clutton-Brock, T. H. (1977). Studies of feeding and ranging behaviour in lemurs, monkeys, and apes. *Primate ecology:.*

[13] Robbins, M. et Hohmann, G. (2006). An Integrative Approach. Feeding Ecology in Apes and Other Primates. Dans: *Primate Feeding Ecology.* s.l.: s.n., pp. 1-13.

[14] Clutton-Brock, T. et Janson, C. (2012). Primate socioecology at the crossroads: Past, present, and future.:, News, and Reviews,. *Evolutionary Anthropology,* Issue Issues, p. 136–150.

[15] Wrangham, R. W. (1980). An Ecological Model of Female-Bonded Primate Groups. 75 (3–4),. s.l.: s.n.

[16] Janson, C. H. (2000). Primate socio-ecology: The end of a golden age. Evolutionary Anthropology: Issues, News, and Reviews, 9 (2), 73–86.

[17] Barton, R., Whiten, A., Strum, S. C., Byrne, R. W., & Simpson, A. J. (1992). *Habitat use and resource availability in baboons. Animal Behaviour.* s.l.: s.n. https://doi.org/10.1016/S0003-3472 (05) 80206-4.

[18] Klapproth, M. (2010). Classification of the Guinea baboon habitat at Simenti (Niokolo Koba National Park, Senegal) by means of Remote Sensing. s.l.: s.n.

[19] Kummer, H. (1971). Primate societies: Group techniques of ecological adaptation. Aldine. s.l.: s.n.

[20] Dunbar, R. (1988). Primate Social Systems. Springer US. s.l.: s.n.

[21] Barton, R. (1990). Foraging Strategies, Diet and Competition in Olive Baboons.University of St. Andrews. s.l.: s.n.

[22] Jolly, C. J. (2020). Philopatry at the frontier: A demographically driven scenario for the evolution of multilevel societies in baboons (Papio).102819. *Journal of Human Evolution,* Issue 146.

[23] Henzi, S., Lycett, J., Piper, S. (1997). Fission and troop size in a mountain baboon population. Animal Behaviour,. Issue 53 (3), p. 525–535.
[24] Swedell, L. (2002). Ranging Behavior, Group Size and Behavioral Flexibility in Ethiopian Hamadryas Baboons (Papio hamadryas hamadryas). Folia Primatologica. Issue 73 (2–3), p. 95–103.
[25] Sharman, M. J. (1982). Feeding, ranging and social organisation of the Guinea baboon [PhD Thesis]. s.l.: s.n.
[26] UICN. (2009). Evaluation de l'efficacité de la gestion des Biens Naturels du Patrimoine Mondial en Afrique de l'Ouest: Evaluation de l'Efficacité de la Gestion des Aires Protégées. s.l.: s.n.
[27] Klapproth, M. (2014). Ecological basis for fission-fusion dynamics in Guinea baboons (Papio papio), Seasonality as proximate cause for a fluid social organization?, allemagne: Centre for Biodiversity and Ecology.
[28] ONF. (2015). Qu'est ce que la phenologie chez les plantes?.Renecofor, France: s.n.
[29] Sharman, M. (1981). Feeding, Ranging and the Social Organisation of the Guinea baboon. PhD. s.l.: s.n.
[30] Whiten, A., Barton, R.A., Strum, S.C; Byrne, R.W., & Simpson, A.J. (1992). *Habitat use and resource availability in baboons. Animal Behaviour.* s.l.: s.n.

International Journal of Innovation and Scientific Research
ISSN 2336-0046 Vol. 85 No. 1 Jun. 2026, pp. 58-70
© 2026 Innovative Space of Scientific Research Journals
http://www.ijisr.issr-journals.org/

Étude de la variabilité spatiale et analytique de la concentration en uranium résiduel dans les hydroxydes de cobalt d'exportation: Application pour la radioprotection à Kolwezi

[Study of the spatial and analytical variability of residual uranium concentration in cobalt hydroxides for export: Application for radiation protection in Kolwezi]

Kayembe Kitenge Sylva, Faila Lutina Inès, Nawezi Kasongo Raymond, Malala Kitenge Pascal, Mpiana Kasela Olivier, Mutomb Kapend Habacuc, and Katubilwa Katele Christian

Université de Lubumbashi, 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: In accordance with the international safety requirements, particularly those established by the International Atomic Energy Agency (IAEA) in the General Safety Requirements (GSR part 3), materials containing naturally occurring radionuclides from the uranium and thorium decay series with an activity concentration of 1 Bq/g are generally considered to fall within the scope of regulatory control. This work was devoted to the analysis of variability of specific activity of cobalt hydroxides from four companies in the city of Kolwezi, particulary those reputed to have deposits slightly enriched in radioactive materials. Nearly 150 samples were collected to carry out this study, and the specific activities were calculated after analysis using an X-ray fluorescence spectrometer.
The activity concentration determined in the present study remains below this reference level. Nevertheless, the findings warrant a documented radiological assessment conducted under a graded approach to radiation protection.
Consistent with the fundamental principles of radiation protection recommended by the IAEA namely justification, optimization and dose limitation- the measured radiological levels indicate that handling, storage, and transport operation may be performed under normal operating conditions. This conclusion is contigent upon the implementation of good industrial practices and the establishment of periodic radiological monitoring to ensure continued compliance with regulatory standards.

KEYWORDS: Variability, mass activity, standards, dose rate, Kolwezi, radioprotection.

RESUME: Au regard des exigences internationales de sureté, notamment celles établies par l'agence Internationale à l'Energie atomique (AIEA) dans les normes fondamentales de sureté (GSR part 3), les matériaux présentant une activité de 1Bq/g pour les radionucléides naturels des chaines de l'uranium et du Thorium sont généralement considérés comme relevant du régime de contrôle réglementaire. Ce travail a été consacré sur l'analyse de la variabilité de l'activité massique de l'uranium dans les hydroxydes de cobalt des quelques entreprises de la ville de Kolwezi, notamment celles réputées avoir des gisements légèrement riches en matériaux radioactifs. Près de 150 échantillons ont été collectés pour réaliser cette étude et les activités massiques ont été calculées après analyse au spectromètre de fluorescence X. La valeur mesurée de cette étude demeure inférieure au seuil de référence, mais justifie néanmoins une évaluation radiologique documentée dans le cadre d'une approche graduée de la radioprotection.
Conforment aux principes fondamentaux de radioprotection recommandés par l'AIEA justification-optimisation-limitation des doses, les niveaux observés suggèrent que les opérations de manipulation, de stockage et de transport peuvent être réalisées en conditions normales d'exploitation, sous réserve du maintien de bonnes pratiques industrielles et d'une bonne surveillance radiologique périodique.

MOTS-CLEFS: Variabilité, activité massique, Norms, débit de dose, Kolwezi, radioprotection.

Corresponding Author: Kayembe Kitenge Sylva

1 INTRODUCTION

L'environnement, en particulier celui du Katanga renferme un certain nombre d'éléments naturellement radioactifs. Certains radionucléides que l'on dit primordiaux sont présent dans ce sol depuis la création de la terre et les principaux sont l'Uranium-238, le Thorium-232, l'Uranium-235 e le K-40.

Ces radionucléides sont principalement contenus dans des roches bréchiques, souvent associés à des dolomies, des calcshistes et des schistes noirs. Il se trouve souvent sous forme de pechblende dans des gisements hydrothermaux liés à la ceinture du cuivre du katanga.

La présente étude aura permis de caractériser l'état radiologique de plusieurs échantillons d'hydroxyde de cobalt destinés à l'exportation. Les analyses ont permis de mettre en évidence une activité massique maximale de 0.65Bq/g, indiquant la présence de radionucléide naturel associé aux minerais (NORM).

Le débit de dose mesuré au contact des échantillons et à une minute est de 0.18 µSv/h, valeur qui est dans la fourchette du bruit de fond naturel moyen mondial, et demeure dans un intervalle compatible avec certaines activités industrielles impliquant des matériaux contenant des radionucléides naturels mais surtout avec le contexte géographique de cette région riche en uranium naturel.

2 CADRE GÉOLOGIQUE DU KATANGA MÉRIDIONAL

2.1 CONTEXTE GÉOLOGIQUE RÉGIONALE

Les formations géologiques du Katanga sont subdivisées en deux grands ensembles (Cahen 1954; Fernandez et al., 2012) dont:

- Les formations de soubassement (protérozoïques) souvent plissées, constituées des roches magmatiques, métamorphiques et sédimentaires,
- Les formations de couverture (phanérozoïque, essentiellement composée des roches sédimentaires tabulaires reposant en discordance sur le socle ancien.

Le Katanguien ou le Super-Groupe du Katanguien correspond à un vaste ensemble sédimentaire Néoprotérozoïque mis en place entre le craton du Congo et celui du Kalahari. Il s'agit d'une chaine qui s'étend du Nord de la Zambie jusqu'au sud-est de la République Démocratique du Congo et définissant l'arc Lufilien (François 1973, 1974, 1996; Kipata et al., 2008).

La sédimentation katanguienne s'est développée dans un contexte extensif associe à l'ouverture d'un rift intracontinental ultérieurement inverse lors de l'orogenèse lufilienne (Batumike et al., 2007). L'épaisseur cumulée des dépôts est estimée à environ 10 Km.

Le district de Kolwezi se situe dans la portion congolaise de l'arc cuprifère de l'Afrique centrale (CAC), il constitue l'un des districts métallogénique majeurs de la région en raison de l'abondance et de l'importance de ses gisements cuprifères et cobaltifères.

La nappe de Kolwezi correspond à une structure synclinale orientée Nord-Est Sud-Ouest, d'environs 23Km de longueur et 8 Km de largeur. Elle est interprétée comme la racine d'un chevauchement dirigé vers le Nord-Ouest.

Les formations affleurantes appartiennent exclusivement au groupe du Roan et sont fortement plissées. La base de la klippe est matérialisée par une surface de décollement séparant tectoniquement les formations du groupe du Roan (en position structurale supérieure) des sédiments plus récents du groupe du Kundelungu, dispose géométriquement en dessous à la suite des mouvements compressifs.

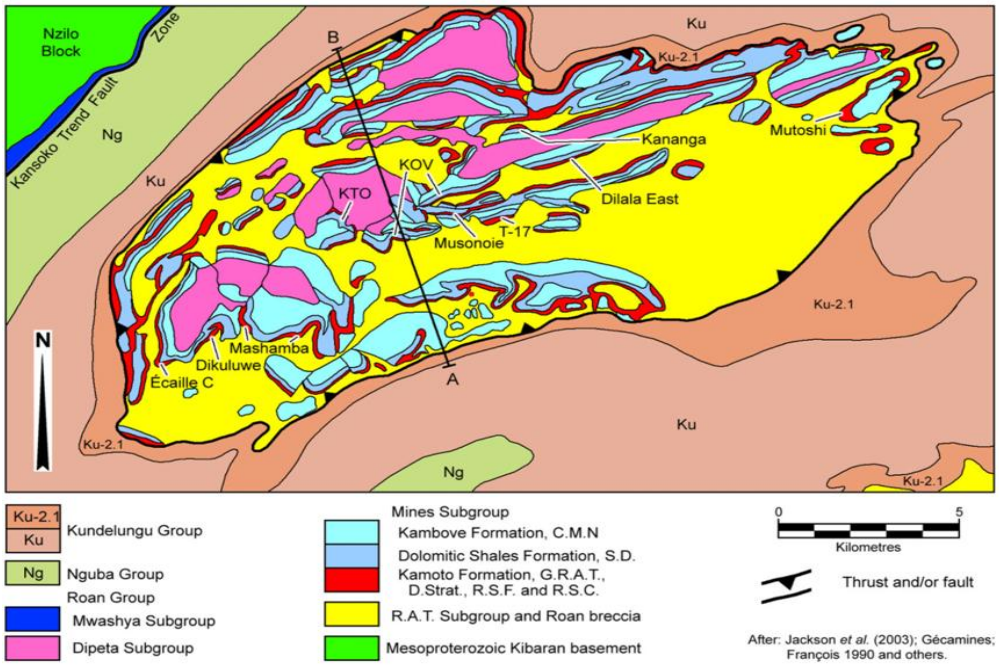


Fig. 1. Carte géologique du district de Kolwezi (Porter 2012)

2.2 CADRE LITHOSTRATIGRAPHIQUE ET MINÉRALISATION

Les minéralisations cuprifères et cobaltifères sont encaissées principalement dans une mégabrèche au-dessus du décollement. Cette mégabrèche est constituée des écailles tectoniques composée des blocs du sous-groupe des Mines, emballés dans une matrice de Roches Argilo-Talqueuses (RAT), de brèches de RAT et de brèches hétérogènes à fragments anguleux et subarrondis.

La succession lithologique du groupe de Roan, de la base au sommet, on observe les formations suivantes:

- RAT rouge-lilas (sous-groupe R1; 0 à 235 m de puissance): il s'agit des roches argilo-talqueuses (RAT) associées a des niveaux gréseux, généralement pauvres sulfures, parfois dolomitique (Bartholomé et al., 1971); c'est une unité tectonique qui peut recouper les autres unités;
- RAT grise (0,5 – 2 m de puissance), lithologiquement identique à la RAT rouge-lilas, mais elle se distingue par la présence de pyrite et de chalcocite, ainsi que l'abondance de chlorite et de talc;
- Formation de Kamoto (sous-groupe R2; 7-9 m de puissance), constituée des dolomies stratifiées et des roches siliceuses feuilletées, avec magnésite, nodules de dolomie, cherts et sulfures: elle correspond au corps minéralisé inférieur (Debruyne et al., 2013);
- Roches siliceuses cellulaires, correspondant à des dolomies silicifiées non minéralisées en sulfures; par contre l'oxydation supergène peut entrainer la précipitation des minéraux secondaires tels que la malachite à hautes teneurs en cuivre;
- Shales dolomitiques; souvent bien minéralisées, dont la base grise, parfois carbonée, forme les shales dolomitiques de base, il constitue le corps minéralisé supérieur;
- Formation de Kambove (sommet du R2), constitué d'un calcaire à minerai noir, riche en oxydes de Fer, Manganèse et Cobalt.

Comme le minerai cupro-cobaltifère, l'uranium et ses accompagnateurs se localisent dans une unité stratigraphique d'âge précambrien, appelé Roan moyen ou série des mines ou encore groupe des mines. Il se compose à la base d'un silt chloriteux et dolomitique gris désigné sous le sigle R.A.T grises et au-dessus d'une alternance de dolomies siliceuses et des shales dolomitiques gris, comprenant des horizons stromatolitiques et plus ou moins riche en magnésite.

Par rapport au gisement de cuivre et cobalt très peu d'étude ont consacrées sur la genèse des minéralisations uranifères du katanga. Ceci confirme que très peu de chercheurs ont pu avoir accès à ce gisement.

3 CONTEXTE RADIOLOGIQUE DE KATANGA

Le Katanga situé géographiquement au sud de la République Démocratique du Congo, province riche en cuivre, cobalt, manganèse, uranium ect.

Le contexte radiologique du katanga reste marqué par une intense activité minière historique et actuelle, impliquant la présence d'uranium dans les hétérogénites (minerais de cobalt) radioactives, notamment dans les zones de Lubudi, Mutshatsha, Kambove te Kipushi. La gestion, le transport et le stockage pour des fins de traitement en vue de produire du cuivre métallique ou des hydroxydes de cobalt conduisent à des risques environnementaux, sanitaires et radiologiques surtout dans des zones d'exploitations artisanales dans des conditions peu contrôlées exposant les travailleurs à des risques dus effets des radiations ionisantes.

4 MATÉRIELS ET MÉTHODES

Plusieurs échantillons ont fait l'objet de notre étude, réalisée sur 3 périodes: décembre 2025, janvier 2026 et février 2026.

Ces échantillons ont été prélevés sur des lots prêts à l'exportation, conformément aux normes internationales d'échantillonnage, lesquelles constituent une procédure de contrôle qualité assurant une inspection à 100%.

Hormis l'homogénéisation et le quartage, les différents échantillons n'ont subi aucun traitement préalable, étant déjà fin et secs. Après homogénéisation, ils ont été conditionnés dans des sachets en plastiques. Une aliquote de 100 grammes a ensuite été prélevée pour analyse élémentaire à l'aide du spectromètre de fluorescence X Niton XL3t.

5 RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

5.1 ACTIVITÉS MASSIQUES DE DÉCEMBRE 2025

5.1.1 KCC

Tableau 1. Activité massique des hydroxydes de KCC

CODE	CONCENTRATION EN Bq/g	
	URANIUM	THORIUM
KH2/25/3251	0.2232	-
KH2/25/3261	0.3968	-
KH2/25/3257	0.434	-
KH2/25/3254	0.31	-
KH2/25/3237	0.496	-
KH2/25/3245	0.4836	-
KH2/25/3248	0.3224	-
KH2/25/3255	0.372	-
KH2/25/2025	0.4092	-
KH2/25/3249	0.5704	-
KH2/25/3238	0.434	-

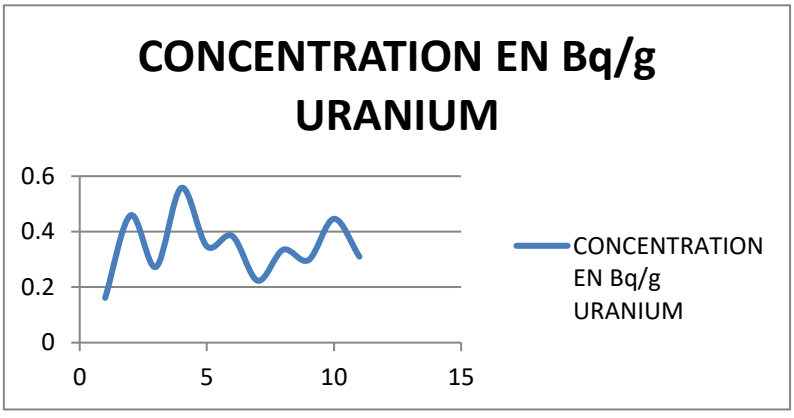


Fig. 2. Distribution des concentrations en uranium (Bq/g) des échantillons KCC

5.1.2 MUMI

Tableau 2. Activité massique des hydroxydes de MUMI

CODE	CONCENTRATION EN Bq/g	
	URANIUM	THORIUM
MH 0019	0.1612	-
MH 0021	0.4588	-
MH 0020	0.2728	-
MH 0018	0.558	-
MH 0017	0.3472	-
MH 0012	0.3844	-
MH 0014	0.2232	-
MH 0016	0.3348	-
MH 0015	0.2976	-
MH 0013	0.4464	-
MH 0010	0.31	-

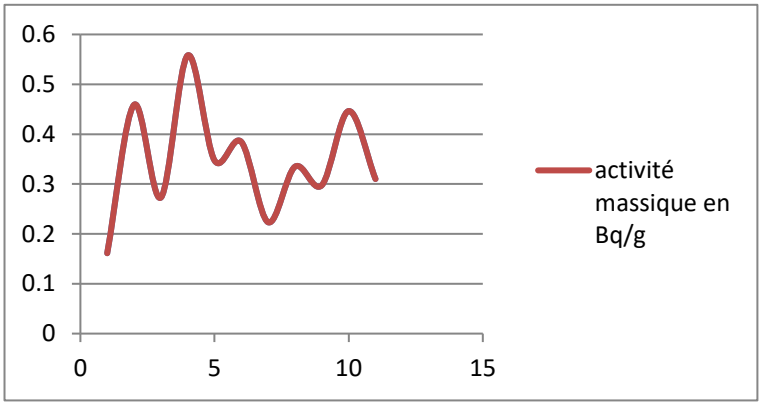


Fig. 3. Distribution des concentrations en uranium (Bq/g) des échantillons MUMI

5.1.3 LAMIKAL

Tableau 3. Activité massique des hydroxydes de LAMIKAL

CODE	CONCENTRATION EN Bq/g	
	URANIUM	THORIUM
LMK 009	-	-
LMK 029	0.0372	-
LMK 031	0.2852	-
LMK 010	0.0124	-
LMK 011	0.5456	-
LMK 038	0.62	-
LMK 007	-	-
LMK 032	0.2232	-
LMK 049	0.1364	-
LMK 058	0.2976	-
LMK 041	0.062	-

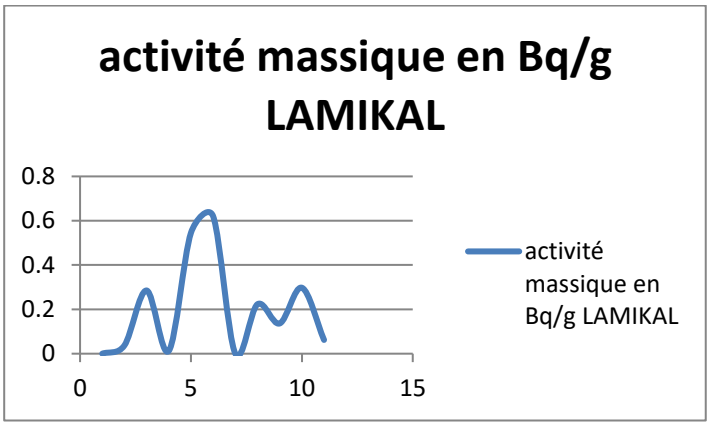


Fig. 4. Distribution des concentrations en uranium (Bq/g) des échantillons LAMIKAL

5.1.4 METALKOL

Tableau 4. Activité massique des hydroxydes de METALKOL

CODE	CONCENTRATION EN Bq/g	
	URANIUM	THORIUM
MT 10316	0.2108	-
MT 10289	0.2976	-
MT 10293	0.1736	-
MT 10245	0.1364	-
MT 10323	0.2356	-
MT 10301	0.2232	-
MT 10285	0.2728	-
MT 10282	0.186	-
MT 10324	0.248	-
MT 10359	0.2356	-
MT 10294	0.2852	-

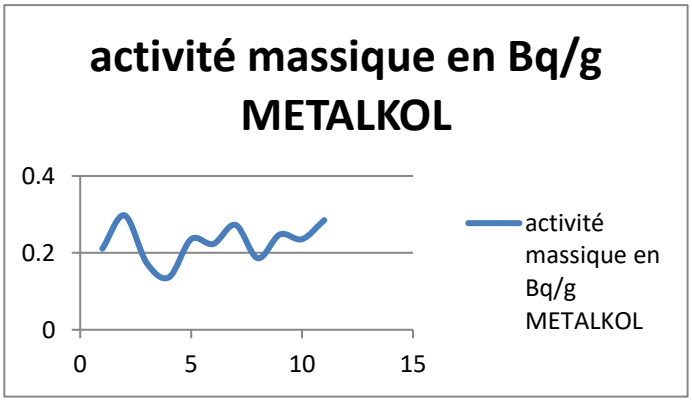


Fig. 5. Distribution des concentrations en uranium (Bq/g) des échantillons METALKOL

5.2 ACTIVITÉS MASSIQUES DE JANVIER 2026

5.2.1 KCC

Tableau 5. Activité massique des hydroxydes de KCC

CODE	CONCENTRATION EN Bq/g	
	URANIUM	THORIUM
KH2/25/3777	0.6572	-
KH2/25/3406	0.4712	-
KH2/25/3428	0.6076	-
KH2/25/3396	0.4464	-
KH2/25/3387	0.5208	-
KH2/25/3394	0.6944	-
KH2/25/3446	0.5828	-
KH2/25/3408	0.5332	-
KH2/25/3424	0.4216	-
KH2/25/3400	0.4712	-
KH2/25/3392	0.6324	-

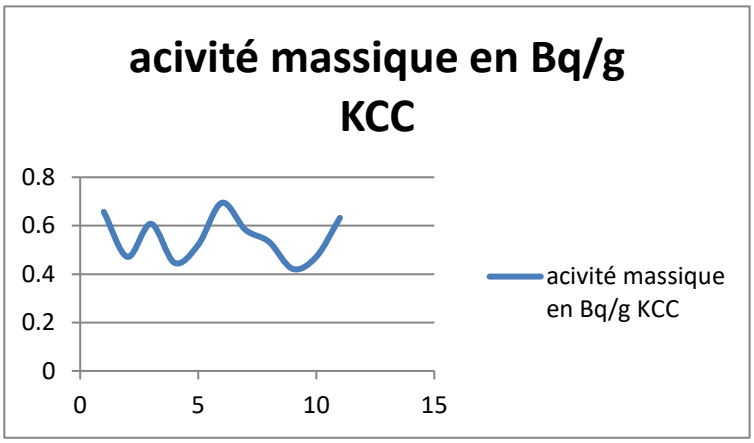


Fig. 6. Distribution des concentrations en uranium (Bq/g) des échantillons KCC

5.2.2 MUMI

Tableau 6. Activité massique des hydroxydes de MUMI

CODE	CONCENTRATION EN Bq/g	
	URANIUM	THORIUM
MH 0030	0.2108	-
MH 0022	0.2356	-
MH 0023	0.2604	-
MH 0012	-	-
MH 0010	-	-
MH 0011	0.1364	-
MH 0009	-	-
MH 0008	-	0.00406
MH 0007	-	-
MH 0006	-	-
MH 0003	-	-

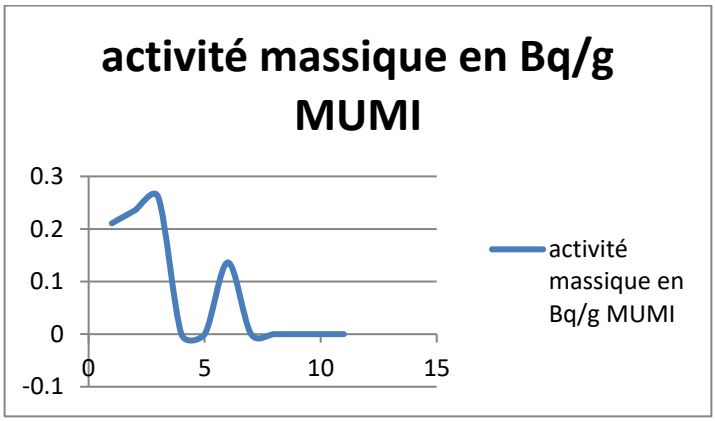


Fig. 7. Distribution des concentrations en uranium (Bq/g) des échantillons MUMI

5.2.3 LAMIKAL

Tableau 7. Activité massique des hydroxydes de LAMIKAL

CODE	CONCENTRATION EN Bq/g	
	URANIUM	THORIUM
LMK 028	0.3472	-
LMK 005	0.4588	-
LMK 023	0.248	-
LMK 018	0.5332	-
LMK 022	0.2604	-
LMK 012	0.4122	-
LMK 011	0.4464	-
LMK 013	0.3224	-
LMK 017	0.5828	-
LMK 015	0.5332	-
LMK 004	0.4092	-

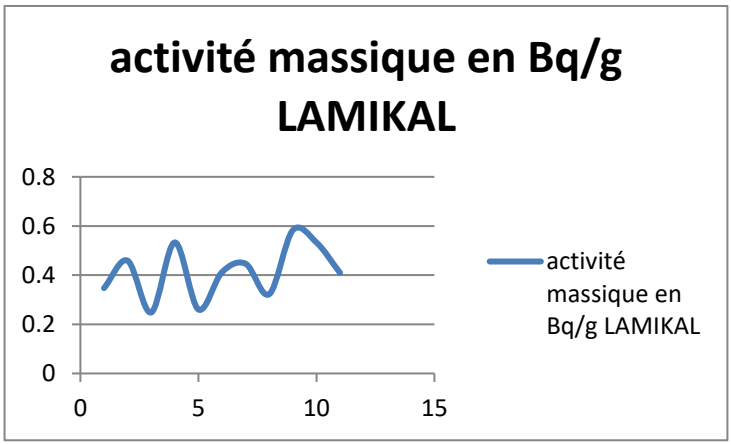


Fig. 8. Distribution des concentrations en uranium (Bq/g) des échantillons LAMIKAL

5.2.4 METALKOL

Tableau 8. Activité massique des hydroxydes de METALKOL

CODE	CONCENTRATION EN Bq/g	
	URANIUM	THORIUM
MT 10174	0.1364	-
MT 10159	0.0868	-
MT 10309	0.0496	-
MT 10348	0.0992	-
MT 10375	0.0372	-
MT 10381	-	-
MT 10159	0.0744	-
MT 10175	0.062	-
MT 10376	0.124	-
MT 10277	0.062	-
MT 10132	0.0248	-

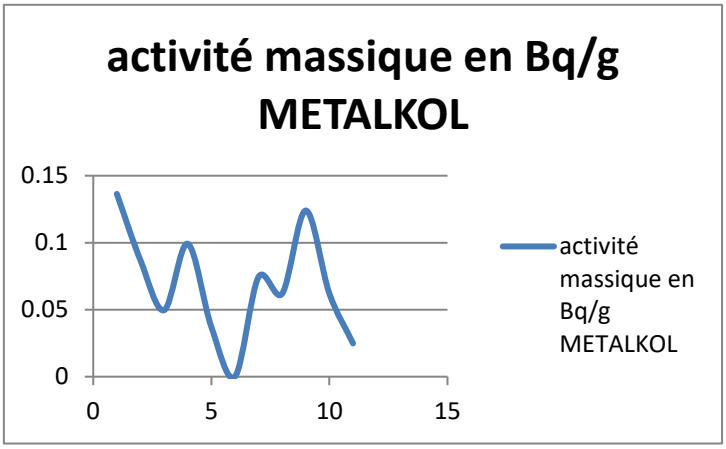


Fig. 9. Distribution des concentrations en uranium (Bq/g) des échantillons METALKOL

5.3 ACTIVITÉS MASSIQUES DE FÉVRIER 2026

5.3.1 KCC

Tableau 9. Activité massique des hydroxydes de KCC

CODE	CONCENTRATION EN Bq/g	
	URANIUM	THORIUM
KH2/25/3505	0.3844	-
KH2/25/3324	0.3968	-
KH2/25/3506	0.496	-
KH2/25/3445	0.4092	-
KH2/25/3291	0.3844	-
KH2/25/3384	0.496	-
KH2/25/3527	0.3596	-
KH2/25/3304	0.5084	-
KH2/25/3357	0.4836	-
KH2/25/3535	0.4216	-
KH2/25/3336	0.6572	-

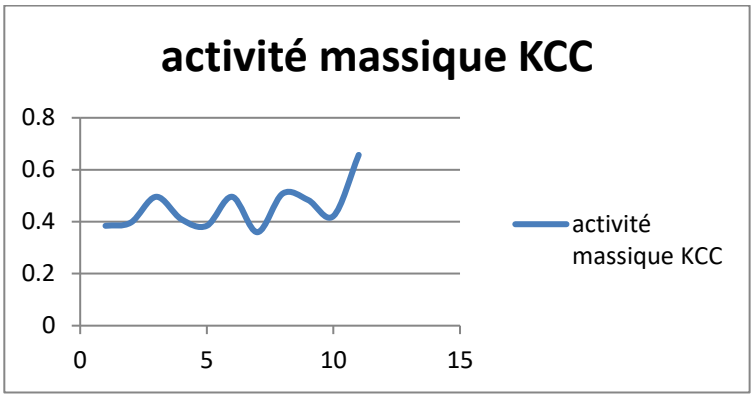


Fig. 10. Distribution des concentrations en uranium (Bq/g) des échantillons KCC

5.3.2 MUMI

Tableau 10. Activité massique des hydroxydes de MUMI

CODE	CONCENTRATION EN Bq/g	
	URANIUM	THORIUM
MH 039	-	-
MH 0041	-	-
MH 0036	-	-
MH 0035	-	-
MH 0044	-	-
MH 0042	-	-
MH 0048	-	-
MH 0047	-	-
MH 0043	-	-
MH 0050	-	-
MH 0051	-	-

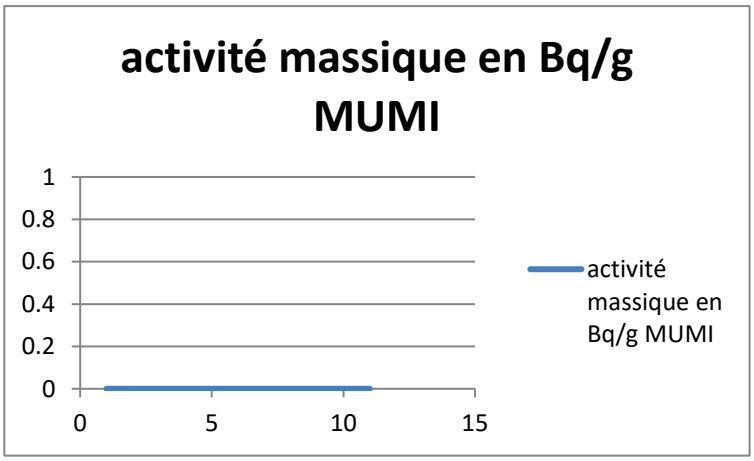


Fig. 11. Distribution des concentrations en uranium (Bq/g) des échantillons MUMI

5.3.3 LAMIKAL

Tableau 11. Activité massique des hydroxydes de LAMIKAL

CODE	CONCENTRATION EN Bq/g	
	URANIUM	THORIUM
LMK 062	0.3472	-
LMK 065	0.3644	-
LMK 059	0.248	-
LMK 061	0.3332	-
LMK 060	0.5102	-
LMK 064	0.4012	-
LMK 067	0.3755	-
LMK 070	0.0451	-
LMK 069	0.3031	-
LMK 068	0.3258	-
LMK 071	0.4566	-

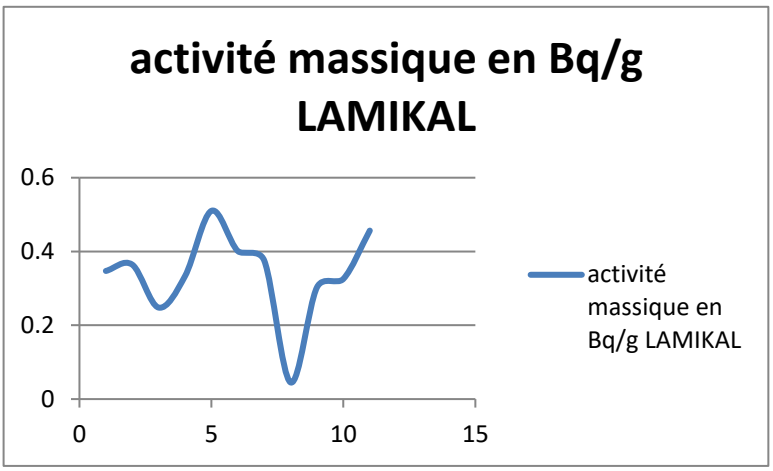


Fig. 12. Distribution des concentrations en uranium (Bq/g) des échantillons LAMIKAL

5.3.4 METALKOL

Tableau 12. Activité massique des hydroxydes de METALKOL

CODE	CONCENTRATION EN Bq/g	
	URANIUM	THORIUM
MT 10587	0.062	-
MT 10594	0.0372	-
MT 10536	-	-
MT 10233	-	-
MT 10586	-	-
MT 10229	-	-
MT 10474	-	-
MT 10223	-	-
MT 10584	-	-
MT 10491	-	-
MT 10542	-	-

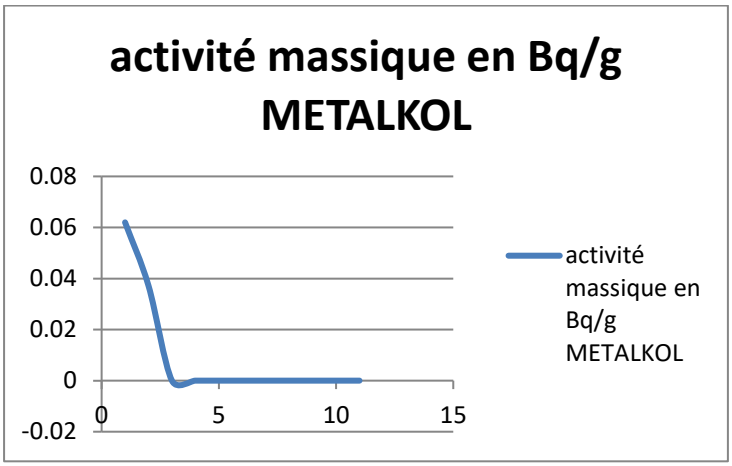


Fig. 13. Distribution des concentrations des concentrations en uranium (Bq/g) des échantillons METALKOL

Au regard des résultats présentés dans les tableaux et par les graphiques ci-dessus, nous pouvons constater:

- Une dispersion modérée autour de la moyenne pour chaque entreprise prise séparément;
- la variabilité de l'activité massique suggère une hétérogénéité naturelle du matériau.
- les valeurs d'activités massiques de l'uranium résiduel de KCC, MUMI, METALKOL et LAMIKAL sont restées faibles dans une plage allant de 0 à 0.57Bq/g, ce qui correspond à des valeurs tolérables par rapport aux limites d'activités massiques des NORMS;
- alors que pour les tableaux 7.2.1, 7.2.2, 7.2.3 et 7.2.4: les valeurs d'activités massiques de l'uranium résiduel de MUMI sont restés faibles dans la fourchette compris entre 0 et 0.65 Bq/g;
- celles présentées dans les 7.3.1, 7.3.2, 7.3.3 et 7.3.4 sont compris dans la fourchette allant de 0 à 0.65Bq/g qui est inférieure à 1Bq/g, tandis ce que les valeurs d'activités massiques de Metalkol sont restées proches ou égale à zéro;
- des résultats présentés dans les tableaux ci-haut, nous constatons que les différentes valeurs d'activités massiques sont restées inférieures à 1Bq/g qui est la valeur limite du seuil d'exemption retenu par l'AIEA dans sa norme RS-G-17, ceci correspond à la valeur des matières devant être exemptées.
- De tous les échantillons ayant fait objet de notre étude, les différentes valeurs d'activité massique du Thorium sont restées inférieure à zéro avec une distribution autour de moyenne qui est zéro.
- Ceci justifie les valeurs du débit d'équivalent de dose trouvée de 0.18µSv/h; qui sont des valeurs proches du bruit de fond naturel (backgrournd natural).

6 CONCLUSION

La présente étude a porté sur l'analyse de la tendance de l'activité massique de plusieurs échantillons d'hydroxyde de cobalt d'exportation afin d'évaluer leur activité radiologique comparée aux exigences de radioprotection.

Les résultats obtenus lors de cette étude révèlent une activité massique moyenne de 0.65Bq/g, traduisant une présence mesurable de radionucléides naturels associés à la matrice minérale.

Le débit de dose mesuré, de 0.18 µSv/h demeure compatible avec les valeurs observées dans certains environnements industriels liés aux minerais naturellement radioactifs. Bien que, cette valeur reste dans la fourchette du bruit de fond naturel moyen mondial, elle n'exclue pas néanmoins la mise en œuvre de mesures appropriées de radioprotection étant donné que le contexte géologique n'est pas stationnaire du point de vue radiologique, considérant les anomalies radiométriques et des variations dues aux structures.

Il ressort de ces résultats l'importance d'un contrôle radiologique systématique des produits miniers destinés à l'exportation, particulièrement dans le contexte des substances contenant du cobalt. Une surveillance régulière, associée au respect strict des normes internationales de sureté radiologique, permettra de garantir la protection des travailleurs, du public et de l'environnement.

En perspective, des analyses complémentaires visant l'identification spécifique des radionucléides responsables de cette activité outre de l'uranium, contribueraient à une meilleure caractérisation radiologique et à une gestion optimisée des risques associés; cela par des méthodes beaucoup plus adaptées notamment la spectrométrie gamma ou alpha beta total.

REFERENCES

[1] Batumike, M.J., Cailteux J.L. H.and Kampunzu A.B., 2007: Lithostratigraphy, basin development, base metal deposits, and regional correlation of the Neoproterozoic Nguba and Kundelungu rock successions, central AfricanCopperbelt. Gondwana Reseach11 (3): 432-447p.

[2] Cahen, 1954: géologie du Congo Belg. Ed vaillant carmanne, liège, Belgique 577p.

[3] International Atomic Agency (IAEA). (2014). Radiation protection and safety of radiation sources: international Basic Safety satandrds (GCR Part 3) ? Vienna AIEA.

[4] International Atomic agency (IAEA), 2016, management of NORM Residues (safety reports series No.78). Vienna: IAEA.

[5] International atomic agency (IAEA). Application of the concepts of exclusion, exemption and clearance (safety guide RS-G-1.7).

[6] UNESCAR 2008, effects of atomic rdiation. Sources and effects of ionizing radiation, United nation.

[7] International commission on the radiological protection (ICRP) 2007, recommendations of the international commission on radiological protection, ICRP publication 103, anals of the ICRP, 37 (2-4).

[8] Cailteux et al (2007): The NeoproterozoicMwashya–Kansuki sedimentary rock succession in the central African Copperbelt, its Cu–Co mineralisation, and regional correlations, 18p.

[9] Cailteux J. et al., 1994: Lithostratigraphy of the Neoprotorozoic Shaba-type (Zaire) Roan Super-group metallogenesis of associated mineralization.

[10] Cailteux, J et Kampunzu, A.B., 1993: Etude du Katanguien de Zambie et du Zaïre Nouvelles contraintes lithostratigraphiques et tectoniques. Bull. Séanc. Acad. r. Sc. Outre-Mer. 38, pp 353-360p.

[11] Cailteux, J. (1983): Le Roan Katangais dans la région de KAMBOVE (Katanga, Congo), Thèse. Université de Liège, pp 3578p.

[12] François, A. et Cailteux J., 1981: La couverture katanguienne entre le socle de N'zilo et de la Kabongo. Région de Kolwezi. Ann. Mus. Roy. Af. Cent. Tervuren, 50p.

[13] François, A. (1997): Étude géologique de l'arc cuprifère du Shaba. Progrès réalisés entre 1950 et 1980. In: Charlet, J.M., Gisements stratiformes de cuivre et minéralisations associées.

[14] François, A., 1973: L'extrémité occidentale de l'Arc cuprifère shabien. Etude géologique.

[15] Gécamines-Likasi (Zaïre). Ed. Malvaux Bruxelles (Belgique), 315p.

[16] François, A., 1974: Stratigraphie, tectonique et minéralisation dans l'Arc cuprifère du Katanga. pp79-101p.

[17] François, A., 1987: Synthèse géologique sur l'arc cuprifère du Sha4ba (Rép. du Zaïre).

[18] Centenaire de la Société Belge de Géologie, 15–65p.

International Journal of Innovation and Scientific Research
ISSN 2336-0046 Vol. 85 No. 1 Jun. 2026, pp. 71-75
© 2026 Innovative Space of Scientific Research Journals
http://www.ijisr.issr-journals.org/

Évaluation du risque radiologique environnemental associé aux rejets solides industriels contenant des radionucléides naturels (NORMs): Application de l'approche graduée au cas de la carrière de l'UCK

[Environmental radiological risk assessment associated with industrial solid releases containing naturally occurring radionuclides (NORMs): Application of the graded approach to the case of the UCK quarry]

Kayembe Kitenge Sylva, Faila Lutina Inès, Mpiana Kasela Olivier, Mutomb Kapend Habacuc, Katubilwa Katele Christian, and Malala Kitenge Pascal

Université de Lubumbashi, 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: Environmental radiological assessment is an essential process for characterizing human exposure levels in order to limit or reduce the risks associated with exposure to ionizing radiation. The approach involves identifying the transfer pathways of radionuclides and assessing the potential risks to ecosystems and nearby populations. To optimize the use of resources and adapt the level of analysis to the degree of radiological risk, international radiation protection organizations recommend the application of the graded approach in radiological impact studies. This approach consists of adjusting the depth and complexity of the assessment according to the potential significance of the radiological impacts associated with a given activity.
Indeed, after energy and efficiency calibration, the peaks identified and correct for background radiation show that the calculated mass activities obtained after peak integration do not indicate any abnormal levels.
Thus, the results of this study will contribute to establishing a database for environmental radiological monitoring.

KEYWORDS: environment, artisanal activity, mass activity, risk index, radium equivalent.

RESUME: L'évaluation radiologique environnementale constitue un processus essentiel pour caractériser les niveaux d'exposition de l'homme afin de limiter ou réduire les dangers liés à l'exposition aux rayonnements ionisants. Cette démarche implique d'identifier les voies de transfert des radionucléides et évaluer les risques potentiels pour les écosystèmes et les populations riveraines. Afin d'optimiser l'utilisation des ressources et d'adapter le niveau d'analyse au degré de risque radiologique, les organismes internationaux de radioprotection recommandent l'application de l'approche graduée dans les études d'impact radiologique. Cette approche consiste à ajuster la profondeur et la complexité de l'évaluation en fonction de l'importance potentielle des impacts radiologiques associés à une activité quelconque.
En effet, après un étalonnage en énergie et en efficacité, les pics trouvés soustrait du bruit de fond, les activités massiques calculées après intégration des pics ne démontrent pas un niveau anormal.
Ainsi, les résultats de cette étude permettront de constituer une base des données pour la surveillance radiologique environnementale.

MOTS-CLEFS: environnement, activité artisanale, activité massique, indice de risque, radium équivalent.

1 INTRODUCTION

Les activités minières industrielles, notamment celles liées au traitement des minerais, peuvent entrainer la mobilisation et la concentration de radionucléides naturellement présents dans la croute terrestre (NORMS). Ces radionucléides naturels, comprennent

essentiellement des isotopes appartenant aux séries de l'uranium-238, du Thorium -232 et du Potassium-40. Lorsque ces derniers sont concentrés ou redistribués par des procédés industriels, ils peuvent devenir une source potentielle d'exposition radiologique pour l'homme et pour l'environnement.

Les activités liées à l'extraction, au concassage et au traitement des minerais peuvent favoriser une accumulation des fortes concentrations en radionucléides naturels dans une zone donnée. Cependant, la dispersion de ces substances dans le sol, les eaux de surface et les sédiments peuvent entrainer un accroissement du niveau de radioactivité dans l'environnement, soulevant ainsi des préoccupations liées à la radioprotection et la gestion durable des ressources naturelles.

Dans ce contexte, la présente étude vise à réaliser une évaluation radiologique sur des rejets miniers pouvant contenir des radionucléides naturels en appliquant le principe de l'approche graduée. L'étude prend comme cas d'application la carrière de l'UCK, où les activités d'exploitation artisanale peuvent contribuer à la mobilisation de radionucléides naturels dans l'environnement. L'objectif est de caractériser le niveau de radioactivité associée aux rejets et d'évaluer les implications en matière de radioprotection environnementale.

Les résultats de cette étude devraient contribuer à une meilleure compréhension de l'impact radiologique potentiel des activités minières antérieures associées aux NORMS et fournir des éléments scientifiques utiles pour la gestion et la surveillance radiologique des sites industriels.

Ainsi, un ensemble de 3 échantillons pris aléatoirement ont été prélevés dans la carrière, ils ont été concassé, broyé et pulvérisé puis conditionner dans une géométrie adaptée et analyser au spectromètre gamma.

L'analyse des résultats obtenus révèle une activité typique pour un sol minier, qui est légèrement supérieure à la moyenne mondiale mais n'est pas anormal dans un contexte géologique à tendance uranifère.

2 APERÇU SUR LES ACTIVITÉS MINIÈRES ARTISANALES

L'exploitation minière artisanale et à petite échelle est un secteur complexe et diversifié dans une grande partie du monde en développement. C'est une activité qui fait vivre des milliers de personnes en République Démocratique du Congo notamment dans la région du Katanga. Ce secteur aide donc à réduire la pauvreté par la création d'emplois pour une nombreuse main d'œuvre inemployée ou sous employée, par l'effet multiplicateur de sa croissance, par la stabilité économique et sociale qui résulte de l'accès à l'infrastructure et par les avantages résultant de l'emploi des femmes. A Kolwezi, capitale mondiale du cobalt, les creuseurs artisanaux extraient les minerais de cobalt et cuivre dans des conditions difficiles, souvent au péril de leur vie. Ces activités faites à base des moyens rudimentaires et en utilisant des méthodes et procédés traditionnels, présentent néanmoins des risques sanitaires importants notamment des risques d'accidents graves dus aux affaissements de sol. Ces creuseurs font face à une situation due au manque de ZEA ce qui les oblige de se recoquiller sur les sites d'exploitations des rejets industriels d'autre entreprise. Il est indiqué que la plupart des sites d'extraction en RDC ne disposent pas des équipements de protection individuelle, de l'expertise technique et des systèmes de gestion adéquats pour garantir la santé et la sécurité physique et le bien-être mental des travailleurs. D'où les conditions de travail sont mauvaises et souvent très dangereuses. Dans certaines mines la présence des minerais radioactifs augmente les risques pour la santé des travailleurs, ainsi que de l'environnement.



Fig. 1. Activité minière artisanale

3 RADIOACTIVITÉ NATURELLE

L'environnement contient un certain nombre d'éléments naturellement radioactifs, appelés radionucléides.

Certains de ces radionucléides, dits « primordiaux » sont présents dans le sol depuis la formation de la terre. Les principaux sont l'uranium-238, l'uranium-235, le thorium-232 et le potassium-40. On les retrouve dans le sol et dans les matériaux de construction, en proportion variables selon la composition géologique de chaque région.

L'uranium-238, l'uranium-235 et le thorium-232 se transforment progressivement en donnant naissance à d'autres radionucléides, appelés produits de filiation ou descendants. Ces transformations successives sont appelées « désintégrations » et l'ensemble de transformation successives constitue une « chaîne de désintégration ».

Au cours de leur désintégration, ces radionucléides naturels émettent des particules alpha ou bêta, et dans certains cas des rayonnements électromagnétiques. Les rayonnements correspondent à l'énergie libérée par les atomes sous forme d'ondes électromagnétiques (rayonnement gamma ou X) ou de particules (neutron, particules alpha ou béta). Les êtres humains sont aussi exposés en permanence à des sources naturelles de rayonnements ionisants provenant notamment du sol, de l'eau, des aliments et du tabac, des rayons cosmiques etc. une part importante de cette exposition est liée aux nombreuses substances radioactives présentes dans le sol.

4 RISQUES LIÉS AUX RAYONNEMENTS IONISANTS

Les rayonnements ionisants interagissent avec les constituants fondamentaux de la matière vivante en provoquant des transformations chimiques.

Lorsqu'ils traversent les tissus biologiques, ils peuvent ioniser les atomes et les molécules, c'est-à-dire arracher les électrons, ce qui perturbe le fonctionnement normal des cellules.

A faibles doses, les rayonnements ionisants peuvent déjà accroitre le risque d'effets sanitaires. A des doses plus élevées, des effets sanitaires aigus tel que des brulures cutanées, des lésions tissulaires ou des syndromes d'irradiation aiguë peuvent se produire lorsque les doses de rayonnements dépassent un certain seuil. Ces effets dits déterministes surviennent généralement au de-là d'un certain niveau de dose spécifique et leur gravité augmente avec la dose reçue.

La sensibilité aux rayonnements ionisants varie selon plusieurs facteurs notamment aussi de l'âge, l'état physiologique et la radiosensibilité des tissus. Plus un individu est jeune, plus il est sensible, en raison de la forte activité de division cellulaire. Le fœtus constitue un groupe particulièrement sensible, ce qui justifie des mesures de protection spécifiques pour les femmes enceintes. Certains organes et tissus, comme la moelle osseuse, les gonades ou la thyroïde, présentent également une radiosensibilité accrue.

Le risque lié aux rayonnements dépend non seulement de la dose reçue, mais de la durée et de la fréquence d'exposition. L'effet peut être cumulatif: une exposition répétée, même à des faibles doses, peut augmenter la probabilité d'apparition d'effets à long terme. Ces effets dits « stochastiques", tels que les cancers ou certaines anomalies génétiques, peuvent se manifester plusieurs années après l'exposition et ne présentent pas de seuil clairement établi: leur probabilité augmente avec la dose.

Sur le plan biologique l'ionisation de l'eau « principale composante des cellules » conduit à la formation des radicaux libres très réactifs. Ces espèces chimiques peuvent endommager des macromolécules essentielles, notamment l'ADN, les protéines et les membranes cellulaires. Les altérations de l'ADN peuvent entrainer des mutations si les mécanismes de réparation cellulaire ne corrigent pas correctement les lésions. Ces mutations peuvent être à l'origine de cancers ou, lorsqu'elles affectent les cellules germinales, être transmises à la descendance.

L'ensemble de ces risques justifie la mise en œuvre des principes fondamentaux de radioprotection, notamment la justification des pratiques, l'optimisation des expositions (principe ALARA: maintenir les doses aussi faibles que raisonnablement possible) et le respect des limites réglementaires de dose afin de protéger les travailleurs, les patients et le public.

5 PRÉSENTATION DES RÉSULTATS ET DISCUSSIONS

5.1 PARAMÈTRES D'ANALYSE DU SPECTROMÈTRE GAMMA

- La mesure de l'échantillon de rejet minier a été effectuée par spectrométrie gamma à l'aide d'une chaîne de détection Germanium de haute pureté caractérisé par son efficacité de 30% et sa meilleure résolution en énergie: 1.8 keV à une énergie de 1332.5 keV.
- Les résultats d'analyse des principaux émetteurs des familles ^{238}U, ^{235}U, ^{232}Th, et ^{40}K pour les échantillons sous analyse, sont rapportés dans les tableaux suivant. Les activités des radioéléments sont ramenées au jour de l'analyse.

5.2 RÉSULTATS D'ANALYSE

Note importante: *l'activité massique de certains radionucléides des chaînes de désintégration naturelle ne peuvent pas être directement mesurés par spectrométrie gamma, mais seulement par le mesurage de leurs descendants. A l'instar l'activité massique du radium-226 qui a été déterminée après un scellage de l'échantillon pendant 21 jours, afin de piéger le radon-222 qui produit le déséquilibre de la chaîne U-238*.

Temps de comptage:

- UCK1.CNF**:** 92923.97 (s)
- UCK2.CNF: 92722.46 (s)
- UCK3.CNF: 93345.58 (s)

Masse moyenne d'échantillon: 120g

Tableau 1. Activités massiques des radionucléides dans différents les échantillons analysés

Radioélément	Activité massique (Bq/kg)		
CHAINE U-238	**UCK1.CNF**	**UCK2.CNF**	**UCK3.CNF**
Th-234	175,1 ±10,9	175,1 ± 10,9	163,3 ± 9,7
Ra-226	99,4 ± 13,6	99,4 ± 13,6	100,1±14,7
Pb-214	87,5 ± 2, 3	87,5 ± 2,3	76,4 ± 1,7
Bi-214	90,2 ± 8,1	90,2 ± 8,1	97,5 ± 9,3
Pa-234m	237,8 ± 27,0	237,8 ± 27,0	245,6 ± 31,1
CHAINE U-235			
U-235	5,76 ± 1,45	5,76 ± 1,45	9,54 ± 1,7
CHAINE Th-232			
Ac-228	18,6 ± 1,9	18,6 ± 1,9	21,2 ± 2,1
Pb-212	24,5 ± 1,2	24,5 ± 1,2	36,1 ± 1,5
Bi-212	24,5 ±1,2	24,5 ± 1,2	36,1 ± 1,5
Tl-208	20,55 ± 2,32	20,55 ± 2,32	18,3 ± 1,9
POTASSIUM			
K-40	257,33 ± 24,5	257,33 ± 24,5	227,45 + 19,8

5.3 PARAMÈTRES DE RISQUE RADIOLOGIQUES

Tableau 2. Présentation des paramètres calculés à partir des différentes activités

ECHANTILLON	Indice de risque externe en Bq/kg	Indice de risque interne en Bq/kg	Radium equivalent en Bq/kg
UCK1.CNF	0.43	0.71	159.85
UCK2.CNF	0.40	0.67	150.67
UCK3.CNF	0.43	0.70	157.52

5.4 INTERPRÉTATIONS

Nous constatons des différents résultats présentés dans les tableaux ci-dessus:

- Il y'a équilibre séculaire, le Bismuth-214 et le Plomb-214 étant des descendants de l'Uranium-238 ont des activités massiques proches: par exemple 91,6Bq/kg pour le Plomb-214 et 93,3Bq/kg pour le Bismuth-214 pour UCK1.CNF;
- Les indices de risque externe et interne restent inférieurs à 1 qui est la limite règlementaire, d'où il n'y a pas de risque significatif c'est-à-dire que le risque interne au radon reste faible;
- L'indice équivalent radium (Radium Equivalent) est inférieur par rapport à la limite réglementaire de 370 Bq/Kg et ne représente aucun risque significatif d'irradiation externe, l'exposition est donc inférieure au seuil du public;
- L'activité massique de l'Uranium trouvée à partir de celle du radium-226 est supérieur à la moyenne mondiale de 35Bq/g selon UNESCAR;

- Cette activité est typique pour un sol minier mais n'est pas anormal dans un contexte géologique à tendance uranifère;
- L'activité massique du Thorium est conforme aux normes alors que celle du Potassium reste inférieure à la moyenne mondiale;

6 CONCLUSION

Cette étude a porté sur l'évaluation radiologique environnementale des rejets miniers. Un ensemble de 3 échantillons analysés par spectrométrie gamma et le laboratoire du CNESTEIN nous a servi de cadre pour réaliser cette étude. En analyse de ces résultats, nous constatons que ce sol présente une radioactivité naturelle légèrement supérieure à la moyenne mondiale en uranium, compatible avec un environnement minier, mais ne dépasse pas les limites internationales de radioprotection pour les matériaux naturels. Nous notons un enrichissement modéré en uranium et du potassium faible à modéré, cependant les indices radiologiques restent inférieurs aux seuils réglementaires.

Au long terme afin d'avoir une base des données beaucoup plus complète, nous suggérons une étude approfondie sur un vaste ensemble d'échantillons pouvant être beaucoup plus représentative du site d'étude en y associant des échantillons des sédiments du cours d'eau et de l'eau.

REFERENCES

[1] International Atomic Energy Agency (IAEA). (2014). Radiation Protection and safety of radiation sources: international basic safety standards (BSS). IAEA safety standards series No. GSR part 3. Vienne: AIEA.
[2] International Commission on Radiological Protection (ICRP). (2007). The 2007 Recommendations of the international Commission on Radiological Protection. ICRP publication 103. Annals of the ICRP, 37 (2-4).
[3] Quantification des risques radiologiques associés aux associés aux radionucléides naturels dans les sols, le granite et les roches charnockitiques de certains champs de l'Ekiti, au Nigéria-PMC.
[4] United Nations Scientific Committee on the Effects of Atomic Radiation (UNESCAR). (2008). Sources and Effects of ionizing Radiation. Report to the General Assembly with scientific Annexes. New York: United Nations.
[5] Word health Organization (WHO). (2016). Ionizing radiation, health effects and protectives measures. Genève: OMS.
[6] National council on radiation protection and measurements (NCRP). (2009). Ionizing radiation exposure of the population of the united states. NCRP report No. 160. Bethesda, MD.
[7] Hall, E. J., & Giaccia, A.J. (2019). Radiobiologie for the radiologist (8th ed). Philadelphia: wolters Kluwer.
[8] Institute de radioprotection et de sureté nucléaire (IRSN). (2018). La radioactivité naturelle et ses efftets sur la santé. Fontenay-aux-Roses: IRSN.
[9] Cember, H., & Johnson, T.E. (2009). Introduction to health phisics (4th ed.) New York: McGraw-Hill.
[10] Fair Cobalt Alliance, la professionalisation des sites miniers artisanaux. (2026).