

Cartographie thématique du Burundi à l'aide de données géospatiales et d'images satellitaires traitées par les méthodes de géoinformatique

Mapeamento temático do Burundi utilizando dados geoespaciais e imagens de satélite processadas por métodos geoinformáticos

Thematic mapping of Burundi using geospatial data and satellite images processed by geoinformatics methods

Cartografía temática de Burundi utilizando datos geoespaciales e imágenes de satélite procesadas mediante métodos geoinformáticos

Polina Lemenkova 

Alma Mater Studiorum – Université de Bologne
Bologne, Émilie-Romagne, Italie

Université libre de Bolzano-Bozen
Bolzano, Tyrol du Sud, Italie

polina.lemenkova2@unibo.it

RÉSUMÉ

Cet article présente la mise en œuvre des approches cartographiques intégrées pour la cartographie environnementale du Burundi, Afrique de l'Est. Sui-
vi des différents types de couverture terrestre par télédétection est présenté
dans cet article par les méthodes de GRASS SIG. Les questions méthodologi-
ques des scripts cartographiques sont discutées avec des extraits de codes
de programmation utilisant la syntaxe de GRASS GIS commentés. Plusieurs
modules de GRASS GIS sont utilisés pour la mosaïque d'images satellitaires,
le traitement des données vectorielles et raster, ainsi que la classification. La
série de cartes thématiques du Burundi, créée en utilisant le logiciel QGIS et
GMT, comprend des cartes des types de végétation et d'habitats, des paysa-
ges, du contexte topographique, géomorphologique et géologique du pays.
Ainsi, l'article examine les caractéristiques environnementales du Burundi,
telles que les types de végétation, les modèles de couverture terrestre, le ca-
dre géologique et la répartition du paysage à l'aide d'outils cartographiques
numériques. Une série de cartes thématiques est proposée pour soutenir les
politiques environnementales de gestion agricole au Burundi.

MOTS-CLÉS : télédétection ; cartographie ; images satellitaires.

RESUMO

Este artigo apresenta a implementação da abordagem cartográfica integrada para mapeamento ambiental do Burundi, África Oriental. O monitoramento de diferentes tipos de cobertura de terra na África por sensoriamento remoto é apresentado usando métodos GRASS SIG. A série de mapas temáticos de tipos de vegetação e habitat, paisagens, contexto topográfico, geomórfico e geológico do Burundi é criada no software QGIS e GMT. As questões metodológicas relativas aos processos de script cartográfico são discutidas com trechos comentados de códigos de programação usando a sintaxe do GRASS GIS. Vários módulos são usados para mosaico de imagens de satélite, processamento de dados vetoriais e raster e classificação. O artigo documenta características ambientais do Burundi, como tipos de vegetação, padrões de cobertura de terra, cenário geológico e distribuição de paisagens usando ferramentas cartográficas digitais. Uma série de mapas temáticos é proposta para dar suporte a políticas ambientais sobre gestão agrícola no Burundi.

PALAVRAS-CHAVE: sensoriamento remoto; mapeamento; imagens de satélite.

ABSTRACT

This paper presents the implementation of the integrated cartographic approach for environmental mapping of Burundi, East Africa. Monitoring different types of land cover in Africa by remote sensing is presented using GRASS SIG methods. The series of thematic maps of vegetation and habitat types, landscapes, topographic, geomorphic and geological context of Burundi is created in QGIS and GMT software. The methodological issues concerning the processes of cartographic scripting are discussed with commented snippets of programming codes using syntax of GRASS GIS. Several modules are used for satellite image mosaic, processing vector and raster data, and classification. The paper documents environmental features of Burundi, such as vegetation types, land cover patterns, geologic setting and landscape distribution using digital cartographic tools. A series of the thematic maps is proposed to support environmental policies on agricultural management in Burundi.

KEYWORDS: remote sensing; mapping; satellite images.

RESUMEN

En este artículo se presenta la implementación de un enfoque cartográfico integrado para la cartografía ambiental de Burundi, África Oriental. Se presenta el monitoreo de diferentes tipos de cobertura terrestre en África mediante

teledetección utilizando métodos GRASS SIG. La serie de mapas temáticos de vegetación y tipos de hábitat, paisajes, contexto topográfico, geomorfológico y geológico de Burundi se crea en el software QGIS y GMT. Se discuten las cuestiones metodológicas relacionadas con los procesos de creación de guiones cartográficos con fragmentos comentados de códigos de programación utilizando la sintaxis de GRASS GIS. Se utilizan varios módulos para el mosaico de imágenes satelitales, el procesamiento de datos vectoriales y raster y la clasificación. El artículo documenta las características ambientales de Burundi, como los tipos de vegetación, los patrones de cobertura terrestre, el entorno geológico y la distribución del paisaje utilizando herramientas cartográficas digitales. Se propone una serie de mapas temáticos para respaldar las políticas ambientales sobre la gestión agrícola en Burundi.

PALABRAS CLAVE: teledetección; cartografía; imágenes satelitales.

INTRODUCTION

Depuis le développement des techniques de télédétection et de géoinformatique dans les années 1970, une longue tradition des recherches géographiques voit en les images satellitaires et données géospatiales à la fois une source d'information et un défi pour les méthodes de cartographie : il est possible d'utiliser les données précises et fiables, mais en utilisant les méthodes avancées et techniquement solides. Les informations provenant des données de télédétection et géospatiales sont indispensables pour la préservation de l'environnement. Leur utilité réside dans leur capacité à cartographier la dynamique du paysage, ce qui permet de représenter la couverture végétale à différentes échelles de temps et d'espace. Mais l'utilisation de données géospatiales, même par les utilisateurs traditionnels de SIG, gêne toujours par ses méthodes et approches (Robert et Gangneron 2015 ; Sellin et al. 2015).

Le suivi environnemental peut être réalisé de manière efficace en utilisant des images satellitaires. Toutefois, le traitement d'images n'est pas efficace avec les méthodes SIG classiques en raison de la présence d'un grand nombre d'opérations manuelles. Il est donc préférable d'adopter une approche autonome de la vision par ordinateur à l'aide d'algorithmes de traitement automatique d'images. On se demande alors s'il s'agit d'images de paysages objectifs et comment les paysages visibles à la surface de la Terre peuvent être interprétés et corrélés avec d'autres données géospatiales, comme le cadre géologique, le réseau hydrographique, le relief et les processus géomorphologiques, l'occupation des sols, les variations régionales de la couverture végétale, etc. (Cabral et al. 2006 ; Diédhiou et al. 2020 ; Maswi et Mshiu, 2024).

Lors d'une analyse géographique, cette question devient d'une importance capitale. À cette occasion, l'interprétation des données couvrant la zone d'étude dans le contexte intégré est une approche essentielle pour l'analyse de la dynamique environnementale et des liens entre les variables géologiques et géographiques (El-Awady et al. 2016). La télédétection est utilisée depuis longtemps à ces fins dans diverses régions d'Afrique. Cependant, l'application des données spatiales et de la télédétection au Burundi est limitée. Il a principalement été utilisé pour cartographier les types généraux de couverture terrestre à l'aide des SIG traditionnels.

En utilisant un traitement performant des données géospatiales, il est possible de représenter la complexité des systèmes sociaux et environnementaux. Dans ce contexte se pose une ambiguïté supplémentaire des liens en-

tre les éléments des systèmes. D'un côté, il y a des évolutions sociales telles que les transitions démographiques et nutritionnelles ; de l'autre côté, les transitions des paysages (Cuq 2009). Les données géospatiales permettent d'observer les évolutions des couvertures terrestres visibles de l'espace, de la campagne aux zones urbaines.

On distingue plusieurs aspects des liens qui les unissent : les aspects géologiques-géomorphologiques, environnementaux-végétatifs, sociaux-nutritionnels. La diversité de la végétation dans les paysages d'Afrique de l'Est est influencée par le contexte géologique et géomorphologique. Les régions d'Afrique de l'Est sont constituées de plaines côtières, de forêts tropicales humides des régions centrales, de marécages et de zones humides dominantes dans les régions montagneuses, de forêts herbeuses et semi-décidues dans les régions centrales. On peut repérer la distinction entre ces différents types de végétation en utilisant des données de télédétection et géospatiales.

Donc il ne fait aucun doute que les images satellitaires ont contribué beaucoup à l'étude de l'Afrique de l'Est, permettant d'améliorer la compréhension de la complexité environnementale aux niveaux continental, régional et local. L'analyse et la compréhension des paysages d'Afrique de l'Est dans le contexte géologique profondément lié au Rift Est-Africain, avec une variété de caractéristiques régionales de sol et de végétation, ont été soutenues par les résultats obtenus à partir de la visualisation des données cartographiques, initialement composées de cartes, puis depuis les années 1970 d'images obtenues à partir de missions satellitaires, telles que Landsat.

L'objectif de cette étude est d'intégrer des images satellitaires et des données géospatiales aux formats vectoriels et raster au Burundi à l'aide de plusieurs outils logiciels cartographiques. Trois logiciels ont été utilisés pour le traitement des données. Le logiciel principal est GRASS SIG qui est utilisé pour le traitement des images satellitaires Landsat. Le logiciel Generic Mapping Tools (GMT) est utilisé pour une carte topographique, et le logiciel Quantum GIS (QGIS) est utilisé pour les applications SIG. Une procédure est développée pour combiner des données multi-sources comprenant des données géologiques, paysagères, végétales et géomorphologiques avec des images satellitaires classifiées traitées sous forme de mosaïque. L'utilisation de différentes données comme couches thématiques permet d'intégrer des données sur les caractéristiques environnementales d'Afrique de l'Est. Les performances de la classification des images satellitaires ont été présentées

par des méthodes de script et décrites avec des commentaires sur les fonctionnalités des modules sélectionnés de GRASS SIG.

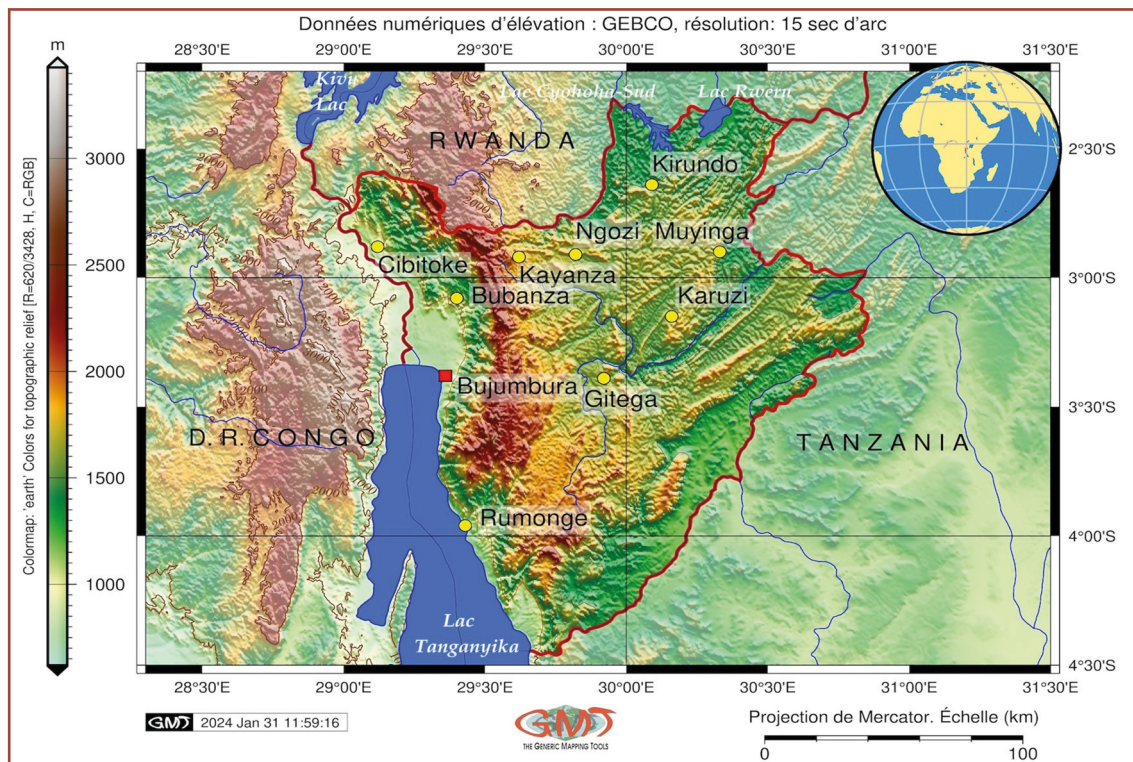
Cette recherche présente donc une description et une représentation visuelle des différents types de couverture terrestre, des modèles d'habitat et de végétation des paysages, ainsi que des cartes thématiques du Burundi. L'analyse géographique du Burundi à l'aide de données de télédétection et d'information cartographique, présentée dans cette étude, contribue à la suivi environnemental de l'Afrique de l'Est. Le programmation GRASS SIG ainsi que et les techniques de mosaïque de plusieurs images satellitaires sont expliquées. La compréhension des liens entre les paramètres géologiques et environnementaux du pays est étudiée en utilisant des données collectées, présentées, analysées et visualisées à l'aide de techniques cartographiques.

Dans le reste de l'article, après une brève introduction sur la spécificité du paysage au Burundi et les défis environnementaux actuels liés à la géologie, au contexte environnemental et climatique, ainsi qu'aux activités anthropiques, nous procéderons à l'analyse des données spatiales en utilisant le SIG GRASS. La méthodologie sera exposée en utilisant ses modules de programmation, avec des exemples de scripts inclus. Les codes fonctionnels choisis ont été fondés sur les travaux déjà réalisés en utilisant des exemples du SIG GRASS. Les scripts GRASS SIG ont été employés pour traiter des images satellitaires Landsat à résolution moyenne, en utilisant une étude de cas de la région du Burundi.

SITUATION GÉOGRAPHIQUE DE ZONE D'ÉTUDE : BURUNDI, AFRIQUE DE L'EST

L'étude est située au Burundi, en Afrique de l'Est. Le pays est bordé par le Rwanda au nord, la Tanzanie à l'est et la République démocratique du Congo à l'ouest, figure 1. Le lac Tanganyika qui appartient aux Grands Lacs africains forme la frontière sud du pays.

Récemment, les processus socioéconomiques et démographiques au Burundi ont entraîné des défis environnementaux qui affectent la biodiversité, les habitats écosystémiques (El-Hassanin et al. 1993), déclenchent des changements de couverture terrestre (Hennebert et al. 1996) et provoquent une fragmentation des parcelles de paysage (Nyirarwasa et al. 2024). Au cours des dernières années, la couverture terrestre et la végétation en Burundi ont connu des changements rapides en raison des impacts environnementaux et climatiques, ainsi que des actions humaines.

Figure 1 – Carte topographique de zone d'étude : Burundi

Source : auteur.

Les effets du changement climatique, tels que les sécheresses et la rareté de l'environnement, ont entraîné une surexploitation des ressources des agriculteurs locaux pour préserver les cultures et assurer la sécurité alimentaire (Ejigu, 2009 ; Bununu et al. 2023). En raison des changements climatiques et de la pauvreté de la population, l'insécurité alimentaire devient l'un des principaux défis au Burundi, notamment dans les régions rurales (Niragira et al., 2022). Toutefois, des activités agricoles incontrôlées ont conduit à la détérioration des terres et à la déforestation, comme l'ont révélé des études précédentes (Ndagijimana et al., 2019 ; Jacques et al., 1993).

Le Burundi fait face à des défis environnementaux récents, tels qu'une pression croissante sur les terres et les ressources naturelles en raison de l'augmentation rapide de la population et d'un système d'exploitation des terres incontrôlé et instable. Selon Placide et ses collègues (2021), la croissance démographique au Burundi s'élève à 11 %, ce qui implique une pression accrue sur les ressources naturelles et les activités agricoles au Burundi : augmentation de la pauvreté rurale de 70 % et une malnutrition de 67 % au Burundi, ce qui en fait l'un des pays les plus pauvres du monde.

Le Burundi se distingue par son emplacement dans la vallée du Rift Albertin, où il y a des dépôts alluviaux holocènes dans les fonds de vallées (Chuwa

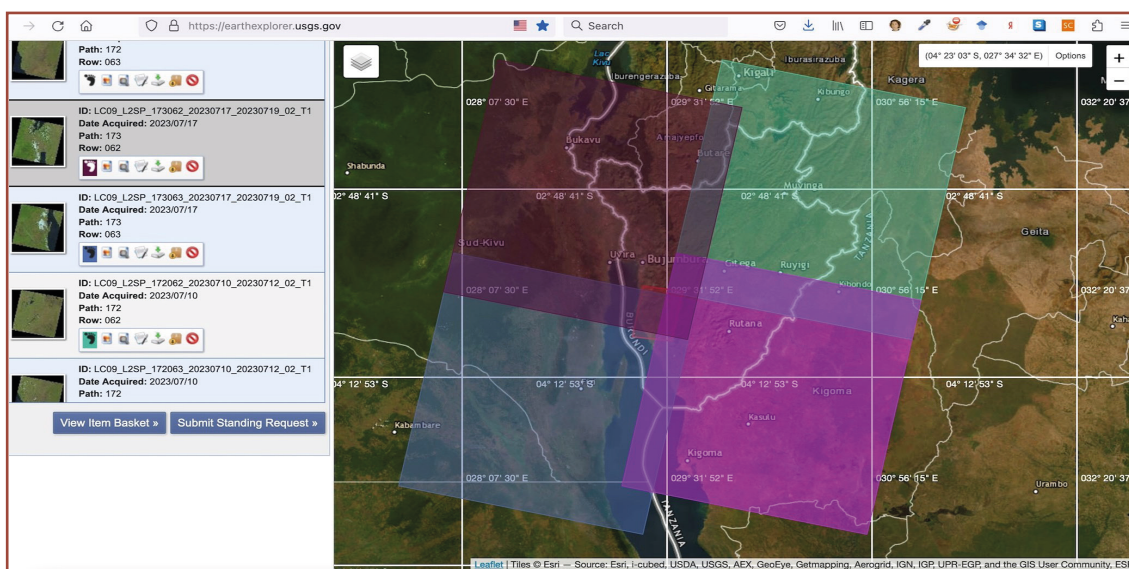
et al. 2023). Il s'agit également d'une extension occidentale du Grand Rift Est-Africain, ce qui explique son cadre géologique riche (Evans, 2015) et son terrain fortement végétalisé. La pétrologie et la géochimie se caractérisent par des roches cristallisées et des affleurements de la zone comprise entre la ceinture de Kibaran et le craton de Tanzanie (Midende et al. 2014). Entre autres ressources géologiques, le Burundi se distingue par ses gisements d'éléments de terres rares (Buyse et al. 2020). Par exemple, la minéralisation en éléments de terres rares du Néoprotérozoïque Gakara au Burundi se trouve sur les zones de fracture et dans la croûte supérieure des sédiments méso-protérozoïques du Groupe de Gikoro, qui reposent sur des roches de base gneissiques (Decrée et al. 2015).

DONNÉES ET MÉTHODES

Variables, données et procédures pour l'analyse spatiale de l'environnement

L'utilisation de données multi-sources (figure 2) présente un avantage en termes de comparabilité et de compatibilité. On a exporté les images satellitaires dans un environnement GRASS SIG afin de générer une mosaïque de données géospatiales. Cette mosaïque a été renforcée par l'ajout de données topographiques (localités, routes, réseau hydrographique et frontières des pays), d'une carte de la couverture terrestre de l'Organisation pour l'alimentation et l'agriculture (FAO) et de cartes géologiques.

Figure 2 – Images satellitaires multispectrales Landsat superposées couvrant le territoire du Burundi



Source : USGS. Compilation : auteur.

Les images satellitaires et les cartes thématiques peuvent être comparées lors de l'analyse géospatiale afin de déterminer les relations entre les cadres géologiques et environnementaux : répartition des types de végétation, formes géomorphologiques, structures tectoniques comme le rift Est-Africain. On a déjà abordé ces corrélations dans les contextes géologiques qui se manifestent dans le paysage (Emishaw et Abdelsalam, 2023 ; Lemenkova et Debeir, 2023a).

Objectifs et motivation

Dans cette étude, on a utilisé l'ensemble d'outils de script GMT pour cartographier la figure 1 ; QGIS pour la préparation des cartes thématiques des figures 2, 3, 4 et 9, et le logiciel GRASS GIS pour le traitement des images satellitaires (figures 7 et 8). Pour le traitement des images satellitaires, nous avons utilisé des images Landsat 8-9 OLI/TIRS couvrant le Burundi de USGS site web. Les données de télédétection présentent des bénéfices pour la cartographie environnementale et la détection des différents types de couverture terrestre, comme cela a été abordé dans de nombreux travaux précédents (Lemenkova et Debeir, 2022b, Lemenkova, 2024).

Ainsi, cette étude illustre diverses approches cartographiques pour traiter et visualiser des données géospatiales multi-sources par différents logiciels. Deux catégories de données géospatiales ont été utilisées pour représenter la région du Burundi : des données raster (images satellitaires et données topographiques DEM) et des données vectorielles (fichiers thématiques sur le paysage, les sols et les divisions administratives).

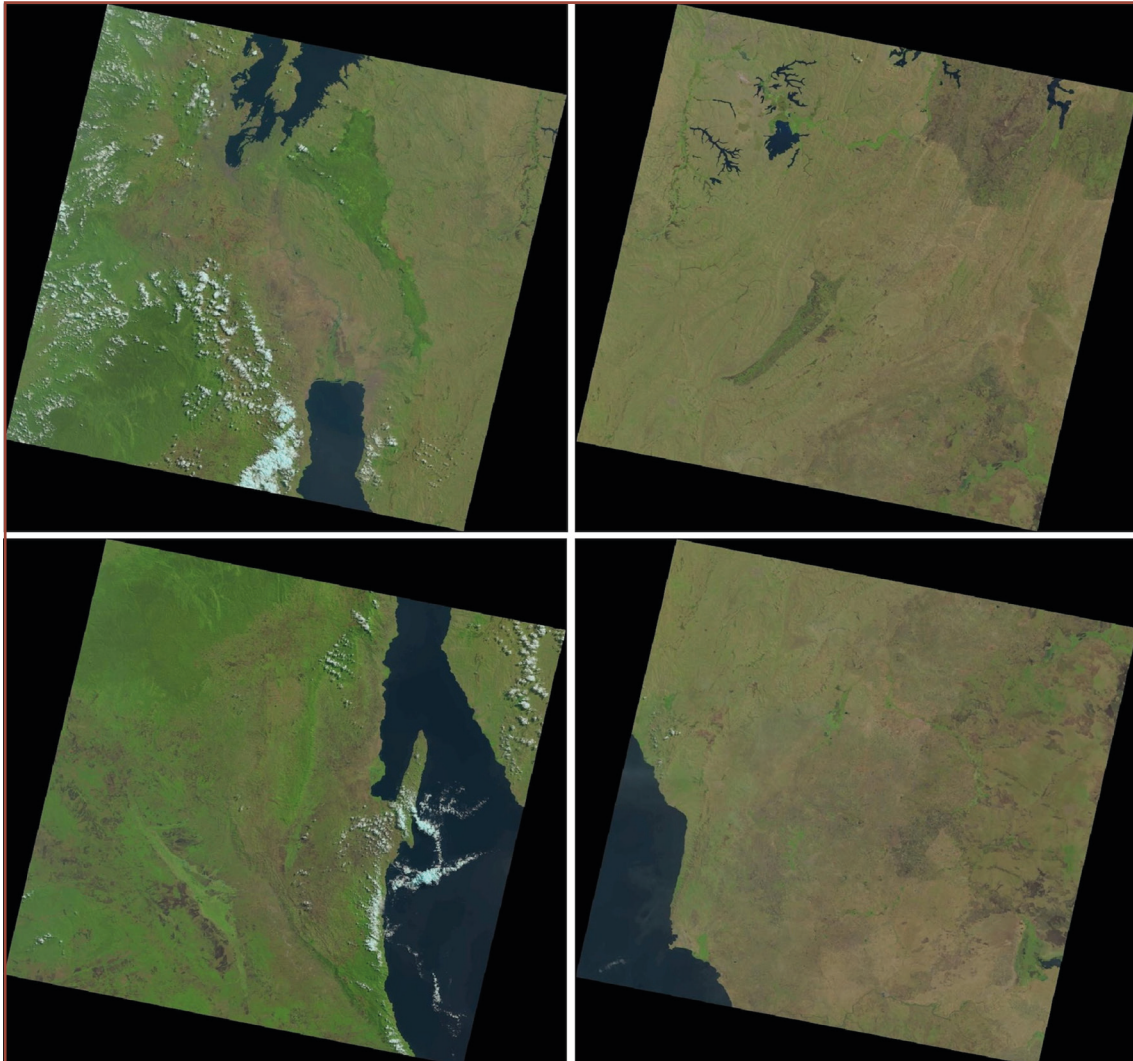
Traitement des données de télédétection

La base de données géographique est constituée d'images Landsat de 30 mètres de résolution dans les canaux multispectraux, qui sont illustrées en couleurs RVB dans la figure 3.

Landsat TM, lancé en 1982, constitue une ressource précieuse pour l'étude environnementale en Afrique. La disponibilité open source de ces images satellitaires est un avantage complémentaire. De plus, la bande de 185 km des images Landsat dans les caméras multispectrales présente l'avantage d'obtenir une couverture mondiale fréquente. Dans les régions du Burundi, où les nuages sont un obstacle majeur à l'acquisition d'images par temps clair, une bande d'images Landsat aussi étendue est avantageuse. Dans cette situation, on peut faire la comparaison entre les images satellitaires, telles que les

données précises et actuelles, et les données descriptives qui peuvent être subjectives ou obsolètes. L'imagerie multispectrale de Landsat sont constituée de bandes spectrales qui sont situées dans les spectres du visible et de l'infrarouge. La combinaison de trois de ces bandes spectrales est nécessaire pour la constitution des images RGB ou classification thématique.

Figure 3 – Quatre images satellitaires originales Landsat 8-9 OLI/TIRS sur le Burundi



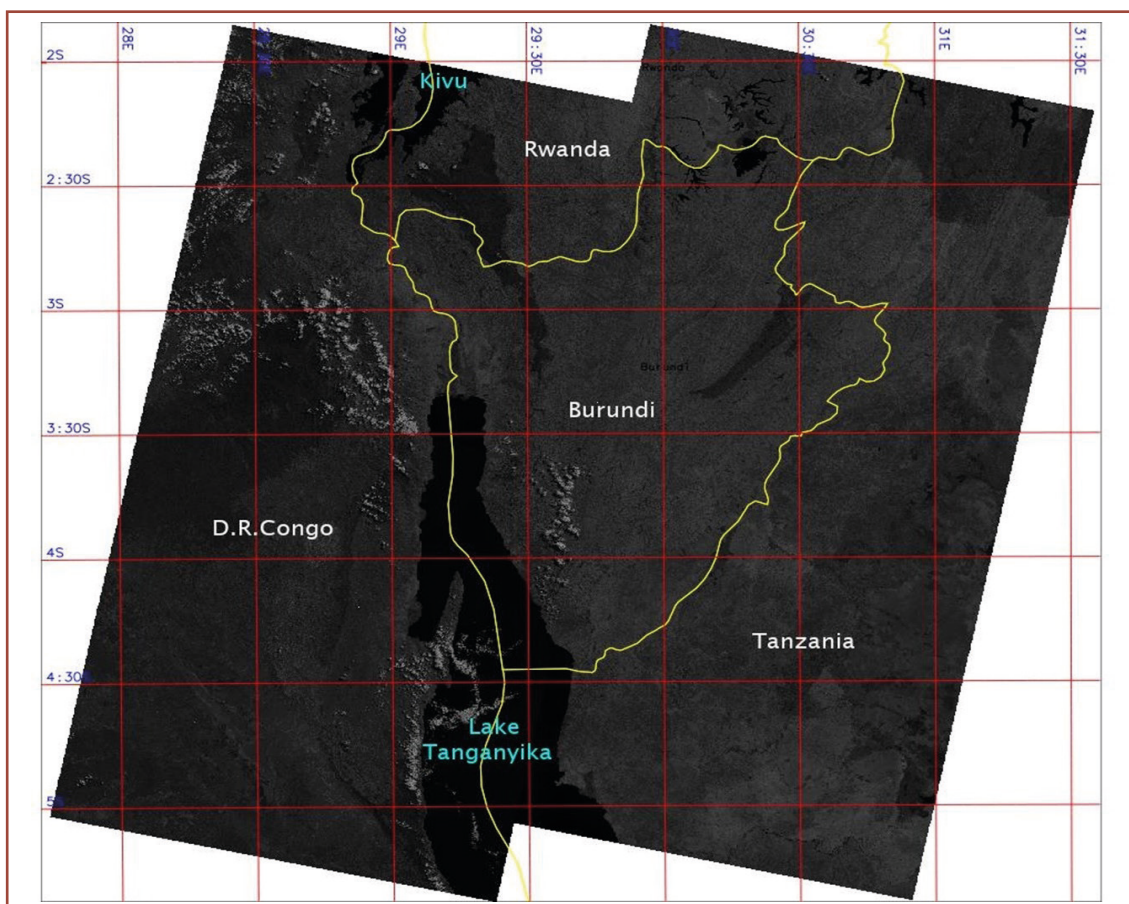
Source : USGS. Compilation : auteur.

Méthodes de programmation en cartographie

La carte topographique (figure 1) a été réalisée à l'aide d'outils de cartographie génériques (Generic Mapping Tools - GMT) qui peut être défini comme un outil informatique de scripts permettant de stocker, traiter et de représenter l'information géographique en utilisant des modules cartographiques.

Les modules du SIG GRASS jouent un rôle crucial dans la gestion des données de télédétection. Les méthodes employées dans le domaine de la visualisation sont basées sur les algorithmes qui forment la structure du programme. Les étapes du traitement d'images satellitaires étaient les suivantes. Les images satellitaires ont d'abord été prises sur le site de l'USGS avec un masque nuageux inférieur à 10% pour chaque image. Le pays du Burundi est couvert par les quatre images. Cela nécessite une technique de mosaïque pour une représentation par plusieurs images fusionnées. Ce problème a été résolu en utilisant le module 'g.region' de GRASS SIG, figure 4.

Figure 4 - Mosaïque d'images satellitaires Landsat 8-9 OLI/TIRS aux couleurs monochromes, bandes SWIR-1 et SWIR 2, superposées par des données vectorielles, couvrant le Burundi



Source : auteur. Logiciel : GRASS SIG.

Les images ont été importées dans le programme à l'aide du module 'r.import' en utilisant le code présenté dans la note 1. L'information sur les cou-

1 'r.import input=/Users/path/grassdata/Burundi/LC08_<...>_02_T1_SR_B1.TIF output=L_2023a_01' Ici, l'exemple est donné pour la bande 1 de l'image prise le 19 août. Le même code, modifié pour le nom de

leurs est divisée en diverses bandes spectrales dans une image satellitaire. Cependant, de la même manière que la représentation des images est double, l'interprétation l'est aussi : elle se concentre d'une part sur l'identification et la description des différents types de végétation, tandis que d'autre part, elle vise à détecter précisément les différents types de couverture du sol (Lemenkova et Debeir, 2023b).

Bien sûr, le traitement des images satellitaires et leur interprétation par la classification ne sont pas les mêmes, mais ce qui est conservé dans la cartographie en utilisant les données de télédétection, c'est une image classée avec les différents types d'occupation du sol détectés et identifiés, ainsi qu'une représentation des objets perçus. Cependant, cela devient plus complexe lorsque l'on doit tenir compte des variations saisonnières et naturelles de la couverture terrestre qui se situent d'abord dans les saisons « humides » et « sèches » dans les climats tropicaux. Par conséquent, il faut prendre des images similaires couvrant la même période de la saison afin de pouvoir comparer. Ainsi, nous avons obtenu des images Landsat aux dates suivantes. : images 1 et 2 le 19 août 2023 ; image 3 le 10 août 2023 et image 4 le 25 juillet 2023 selon la disponibilité de la scène des andains couvrant le Burundi avec une nébulosité minimale (inférieure à 10%), figure 6. La mosaïque des 4 images est présentée en figures 4 et 5.

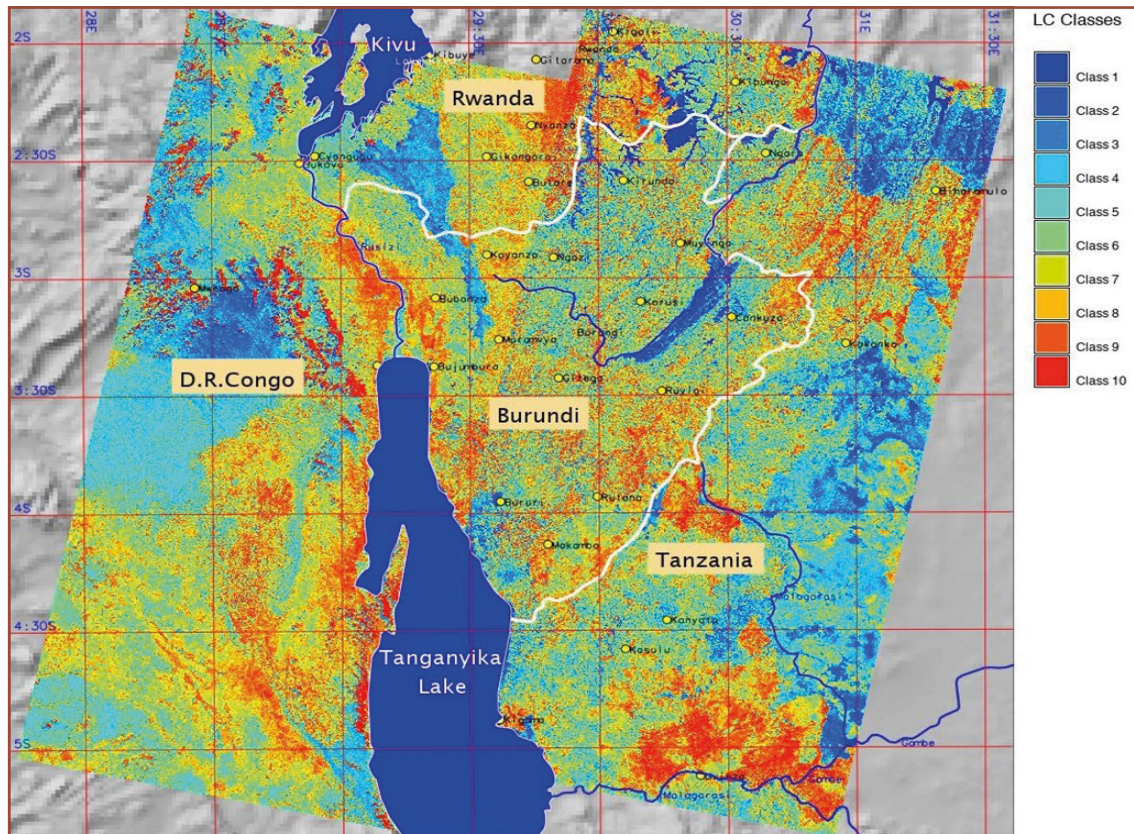
L'utilisation d'images satellitaires pose souvent des problèmes pour les pays dont l'étendue spatiale et la couverture sont très limitées, comme le Burundi. Il est possible que certaines régions du pays ne soient pas représentées dans les images et le pays se trouve à la frontière de plusieurs images. Dans de telles situations, il n'est donc pas envisageable d'utiliser une seule image. Il faut plutôt regrouper plusieurs images à l'aide de techniques de traitement d'image qui étudient les coordonnées de la région visée.

Dans le SIG GRASS, plusieurs approches sont possibles pour résoudre ce problème. Trois méthodes ont été employées dans cette étude afin de combiner des images satellitaires. : 'g.region', 'i.image.mosaic' et 'r.patch', figure 5. D'abord, l'étendue des coordonnées a été vérifiée à l'aide du module 'r.info', par exemple en utilisant la commande 'r.info L_2023a_07'. Le résultat est reçu sous forme de couverture géographique pour l'étendue ouest-est et

l'image et le nom de sortie du fichier, a été utilisé respectivement pour toutes les bandes multispectrales des Landsat et quatre images.

sud-nord². Une autre approche pour mosaïquer des images peut être réalisée en utilisant le module 'i.image.mosaic' qui mosaïque plusieurs images et étend leur palette de couleurs³.

Figure 5 - Classification des images satellitaires Landsat 8-9 OLI/TIRS selon la méthode 'Maximal Likelihood' sur le territoire du Burundi



Source : auteur. Logiciel : GRASS SIG.

Pourtant, une autre façon d'assembler plusieurs images repose sur l'utilisation du module 'r.patch' qui crée une mosaïque de cartes en utilisant la syntaxe bash. Ainsi, il crée une liste de cartes correspondant à un modèle, étend la région pour les inclure toutes et les rassemble pour créer une mosaïque. Dans cette méthode, on utilisera les cartes qui se superposent dans l'ordre donné. Pour cette méthode, le code suivant a été testé pour les quatre

2 De la même manière, les coordonnées des quatre images ont été inspectées et la zone de plus grande couverture comprenant les quatre images a été appliquée pour le projet GRASS GIS à l'aide de la commande 'g.region w=84585 e=345915 n=-204285 s=-596415'. Alors, les images ont été visualisées étape par étape sous forme de mosaïque de scènes.

3 Le code de SIG GRASS pour mosaïquer les images satellitaires : 'i.image.mosaic input=L_2023a_06,L_2023b_06,<...>L_2023c_06,L_2023d_06 output=mosaic_2023_SWIR1'.

images de (a) à (d) : en utilisant le code in Note 4. Une fois les images assemblées par des techniques de mosaïque, les données vectorielles au format '.shp' d'ArcGIS ont été ajoutées sous forme de couches superposées.

Ainsi, le fichier contenant les frontières des pays a été importé en utilisant l'importation des fichiers vectoriels dans le SIG GRASS, comme indiqué dans la note 5. Ici, la commande utilise le module 'v.in.ogr' qui permet d'importer des données vectorielles dans le GRASS SIG à l'aide de la bibliothèque OGR (Open Source Geospatial Resources). De même, on a importé des données vectorielles afin de visualiser les principaux éléments géographiques, comme les villes, les lacs, les rivières, les annotations textuelles, etc.

On peut utiliser de nombreuses approches de deux types du traitement d'images satellitaires : classification supervisées et non supervisées (Kim et al. 2013). Les algorithmes de clustering ont été employés dans cette étude car ils offrent des méthodes fiables et simples qui ont été utilisées dans de nombreuses études similaires auparavant. Donc, la classification des images a été réalisée en utilisant une combinaison des modules GRASS GIS « i.group », « i.cluster » et « i.maxlik » suivant la méthodologie décrite dans des études précédentes (Lemenkova, 2023b, 2023c).

RÉSULTATS

L'enjeu environnemental du Burundi : le développement d'agriculture, la nourriture de la population, et l'économie durable

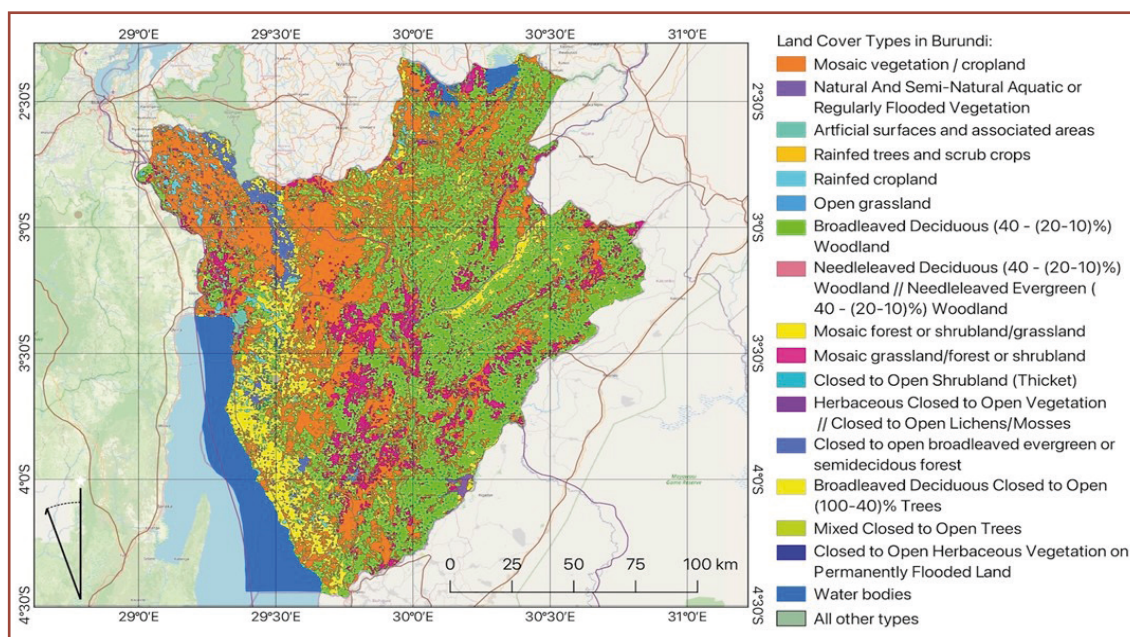
La réalisation de cette étude a permis d'évaluer les performances de l'approche de programmation GRASS SIG dans le traitement des données de télédétection. Grâce à l'étude environnementale, la biodiversité des différentes classes d'occupation du sol au Burundi a été surveillée. Le format de données raster et l'approche de scripts du GRASS SIG peuvent être utilisés pour étudier les écosystèmes en Afrique. Ainsi, il est possible d'utiliser les données Landsat-8 OLI/TIRS dans des études similaires en utilisant les codes de programmation proposés comme source de données continue pour la surveillance de la végétation et la cartographie géologique.

4 The code for merging several satellite images using r.patch ' module of SIG GRASS : " r.patch in=L_2023a_01,<...>,L_2023d_01 out=mosaic_2023_Burundi."

5 Le code d'importation des données sur les frontières des pays dans le SIG GRASS : «(v.in.ogr input=/Users/<...>/ne_10m_admin_0_countries.shp output=world_countries -o)».

Par la suite, l'analyse des données géospatiales permet de repérer d'importants défis environnementaux au Burundi. Les agriculteurs locaux ont été contraints de surexploiter leurs ressources en raison de l'insécurité alimentaire et des effets climatiques tels que les sécheresses et la rareté de l'environnement afin de préserver leurs cultures et de garantir leur alimentation. L'insécurité alimentaire, accentuée par les changements climatiques et provoquée par la pauvreté de la population, devient l'un des principaux défis au Burundi, notamment dans les régions rurales. Donc, on rappelle aussi l'importance d'analyse du changement de paysages et processus d'aménagement du territoire, à la fois du point de vue d'éthique social et du point de vue environnementale. Les activités agricoles incontrôlées ont entraîné une détérioration des terres et la déforestation.

Figure 6 – Carte des types de couverture terrestre



Source : auteur.

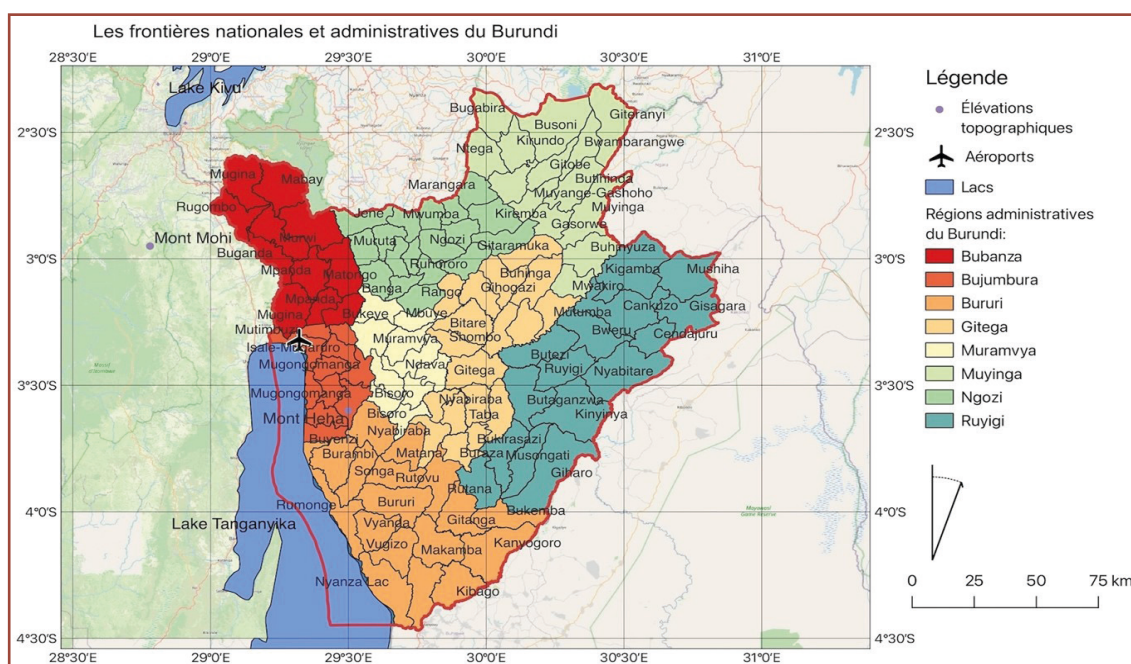
La cartographie reposait sur l'analyse et la visualisation des données de télédétection. La mosaïque des images satellitaires permet de visualiser et de comparer les sous-régions de la zone côtière du lac Tanganyika. Les résultats révèlent les différentes catégories d'occupation du sol détectées automatiquement grâce aux méthodes de GRASS SIG. La visualisation des données vectorielles a été réalisée dans GRASS SIG à l'aide du module `d.vect`⁶. Les

⁶ Par exemple, le lac Tanganyika sur la figure 9 a été visualisé à l'aide du code suivant : `<d.vect map=Burundi_lakes display=shape type=area color=white fill_color=blue width=1 attribut_column=name label_`

classes de types de couverture terrestre pour le Burundi sont présentés dans la figure 6.

Par exemple, parmi les enjeux environnementaux récents du Burundi, on observe une pression croissante sur les terres et les ressources naturelles en raison de l'augmentation rapide de la population et d'un système d'exploitation des terres incontrôlé et non durable. La croissance démographique au Burundi entraîne une pression accrue sur les ressources naturelles et les activités agricoles. La pression agricole est particulièrement élevée dans les provinces de Bururu, Bujumbura et Bubanza, figure 7.

Figure 7 – Division administrative du Burundi



Source : auteur. Logiciel : QGIS.

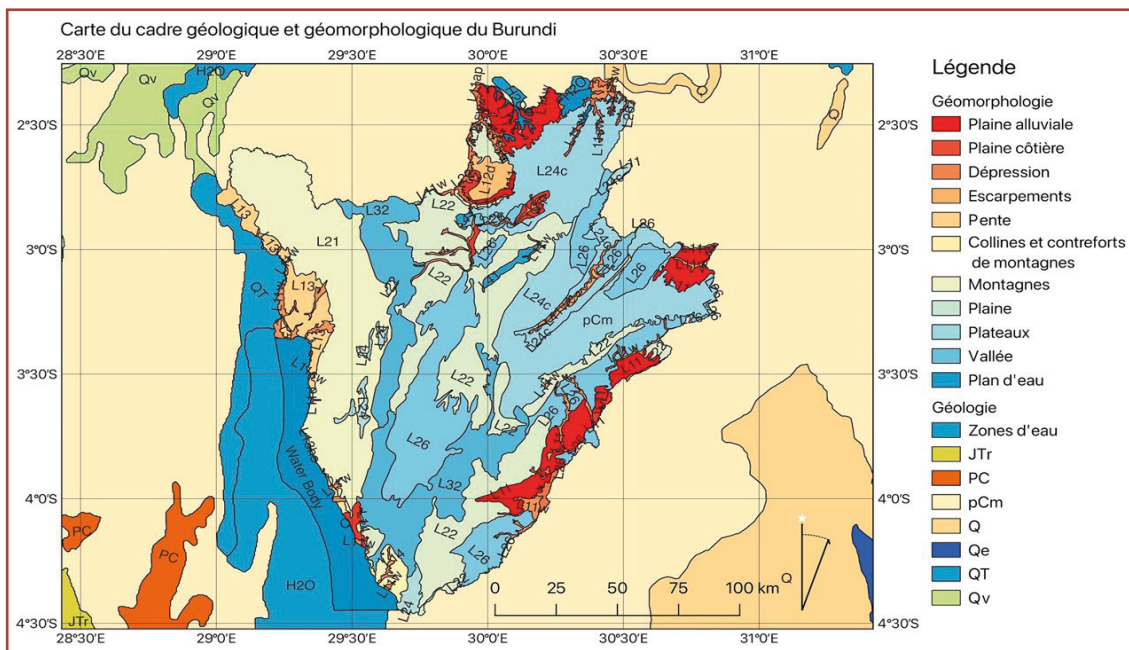
En outre, les tensions civiles et la guerre récente ont eu un impact dévastateur sur l'économie du Burundi, entraînant des répercussions néfastes sur la population. En outre, la pauvreté rurale et la malnutrition augmentent au Burundi, ce qui en fait l'un des pays les plus défavorisés au monde. Dans les systèmes socio-naturels, de tels indicateurs sociaux incitent naturellement les agriculteurs à renforcer leur agriculture et à aménager davantage de terres pour les cultures, ce qui entraîne un développement non durable et un épuisement des terres, créant ainsi un cercle vicieux.

color=white)). Le réseau de grille sur les figures 7 et 8 a été ajouté en utilisant le module 'd.grid' à l'aide de la commande «d.grid -g size=00:30:00 color=red width=0.1 fontsize=10 text_color=blue».

Le cadre géographique et géologique du Burundi : les formations principales tectoniques, type de roche et localisation

Le Burundi est situé dans la vallée du Rift Albertin, l'extension occidentale du Grand Rift Est-Africain, figure 8. Cela explique sa richesse géologique et son terrain abondant en végétation. Le Burundi présente un environnement géologique riche en roches sédimentaires et granitiques de la ceinture Karagwe-Ankolean, avec des dépôts alluviaux holocènes dans les fonds de vallées. La pétrologie et la géochimie du Burundi sont caractérisées par les roches cristallisées et les affleurements de la zone située entre la ceinture de Kibaran et le craton de Tanzanie, caractérisés par des composantes minérales complexes.

Figure 8 – Carte géologique et géomorphologique du Burundi : reliefs, types lithologiques et caractéristiques physiques générales des roches au Burundi selon Projet Africover des Nations Unies



Géologie : JTr - Jurassique et Trias ; PC - Permien-Carbonifère ; pCm - Précambrien ; Q - Quaternaire ; Qe - Holocène ; QT - Cénozoïque ; Qv - Roches extrusives et intrusives du Quaternaire.

Source : auteur. Logiciel : QGIS.

Les ressources géologiques et minières du Burundi sont particulièrement importantes, notamment les réserves régionales d'éléments de terres rares. La présence de terres rares peut jouer un rôle crucial dans l'économie de l'exploitation minière. Différentes utilisations de ces composants, tels que des composants électroniques, des matériaux magnétiques et des processus

industriels, peuvent favoriser le développement économique et la richesse du pays. Cependant, ils manquent d'une exploration géologique adéquate en raison des ressources limitées du Burundi.

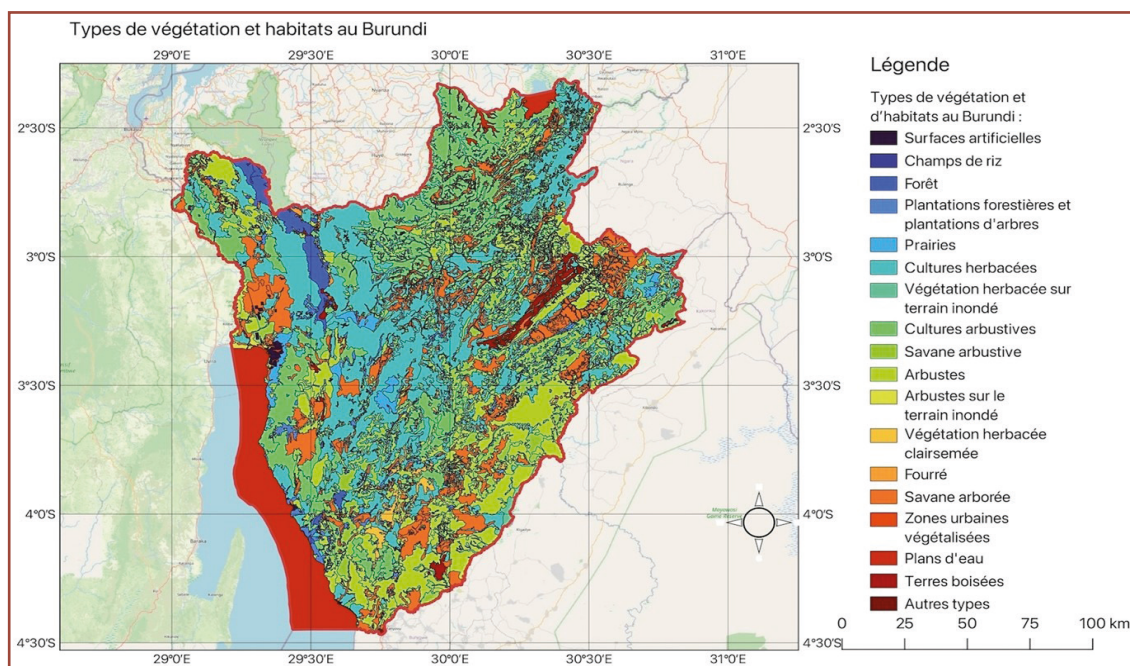
La situation géologique du pays est étroitement liée au contexte tectonique. Par exemple, on peut observer la minéralisation en éléments de terres rares du Néoprotérozoïque Gakara au Burundi, qui se trouve le long des zones de fracture et dans la croûte supérieure des sédiments mésoprotérozoïques du Groupe de Gikoro, qui sont basés sur des roches de surface gneissiques.

Le cadre environnemental et social du Burundi

Un nouvel aspect de cette étude consiste à évaluer le contexte écologique et environnemental du pays en utilisant des cartes géographiques, en utilisant les scripts GRASS SIS. Effectivement, l'analyse des paysages à l'aide de données de télédétection et géospatiales revêt une importance pour les recherches à venir sur les liens entre le climat et l'environnement en Afrique, car le traitement automatique des images satellitaires à l'aide d'approches cartographiques par ordinateur nécessite une grande complexité. Une fois que les caractéristiques géologiques et le contexte géomorphologique du pays ont été décrits, il est nécessaire de définir les types de végétaux (figure 4) ainsi que les activités humaines agricoles liées à ce facteur géologique du Burundi. Ils forment, comme on vient de le noter, un continuum de facteurs environnementaux au sein duquel il faut faire des distinctions régionales au Burundi et de déterminer entre ce qui revient aux spécifiques régionales environnementaux, figure 9.

Le Burundi est l'un des pays les plus petits d'Afrique, avec une petite superficie territoriale (environ 2° dans les directions ouest-est et sud-nord), mais il présente une grande diversité de paysages formés sous un climat équatorial. Plus de la moitié du pays est couvert de plateaux et de hautes terres, ce qui a un impact sur la distribution particulière des habitats tels que les mosaïques végétales, les forêts de feuillus, herbacés et à feuilles caduques. Les principales unités ont été identifiées comme suit : Zone urbaine, forêt, ensemble de forêts-savanes, savanes et steppes, végétation aquatique et marais (Henri 2009).

Deux parcs nationaux ont été mis en place au Burundi afin de préserver les espèces rares : le Parc National de Kibira, qui protège 40 000 hectares de forêts tropicales humides au nord-ouest du pays, et le Parc National de Ruvubu, situé le long de la rivière Ruvubu au nord-est du pays (Peyrot 1997). Le parc conserve l'habitat naturel des prairies qui occupait la majeure partie du Nord-Est.

Figure 9 – Carte de l'habitat terrestre du Burundi

Source : auteur.

Les liens entre le cadre géologique et le contexte environnemental du Burundi : défis pour l'agriculture et dynamiques environnementales

Le cadre géologique du Burundi est influencé par sa position à proximité des marges du craton tanzanien et par le contenu minéral des affleurements géologiques, principalement constitués de roches du socle précambrien, pour la plupart d'âge protérozoïque. Ainsi, la vallée principale du rift tectonique à l'ouest du Burundi est couverte de sédiments constitués principalement de sables alluviaux, de limons, de graviers et d'argiles qui descendent jusqu'au lac Tanganyika. La répartition de sols acides dans un tel contexte géologique varie de « forte » à « très forte » ($\text{pH} \leq 5,5$). Parallèlement, les sols acides sont un élément majeur de détérioration des terres qui affecte la productivité agricole et l'agriculture durable.

Par conséquent, l'agriculture au Burundi se limite à la moitié du territoire cultivable et seulement un tiers environ est aménagé pour le pâturage. Les cultures simples (haricots, maïs, manioc, sorgho) et certaines cultures d'exportation (café, coton, thé) occupent les plantations agricoles. La géochimie des roches et des minéraux entraîne des interrelations complexes entre le contexte géologique, la couverture et les types de végétation, ce qui a un impact sur le contenu, la plasticité, l'acidité et la structure du

sol (Hicintuka et Masilya, 2013). La géomorphologie régionale se manifeste également par le relief, la courbure et la raideur des pentes qui recouvrent des roches cristallines qui font partie des structures géologiques du Rift de l'Afrique de l'Est. Ainsi, la stabilité et les caractéristiques du sol sont régulées par le cadre géomorphologique et l'exposition, ce qui contribue à la répartition de certains types de végétation dans le pays. (Nkuzimana et al. 2020).

Suivi environnemental du Burundi

Les agriculteurs burundais, face aux ressources naturelles restreintes et à la population en constante augmentation, adaptent et intensifient leurs activités agricoles afin de minimiser l'influence de la rareté de l'environnement et des conditions météorologiques sur les rendements des cultures. À titre d'exemple, ils augmentent la variété des cultures, optent pour des cultures plus productives et plus résistantes au climat, adoptent diverses méthodes et techniques agricoles afin d'accroître les récoltes grâce à des cultures multiples, une irrigation supplémentaire et des variétés à haut rendement. (Niragira et al. 2021).

Cependant, une telle intensification des activités agricoles conduit à une fragmentation des paysages et à une surexploitation des terres. À cet égard, Turimubumwe et al. (2024) ont récemment souligné l'importance de planifier la gestion des terres en utilisant des données quantitatives afin de surveiller les sols au Burundi. Il est donc essentiel d'avoir une intégrité de données géospatiales qui relie le cadre géologique et environnemental du pays afin de garantir une analyse et un suivi complets (Lwasa 2019). Cette intégrité consiste à représenter les données reçues sous forme d'images satellitaires et de cartographie thématique, ce qui découle de la complexité environnementale de l'Afrique de l'Est.

DISCUSSION

L'analyse des caractéristiques de la couverture terrestre pour le suivi du paysage du Burundi nécessite une représentation cartographique des données recueillies à partir de différentes sources (imagerie spatiale, données vectorielles et raster) et une analyse descriptive des travaux déjà réalisés. Les approches SIG complexes sont illustrées dans des publications qui associent des images satellitaires à des cartes géologiques, des sols et de la végétation (Lemenkova, 2023a) ou des données climatiques (Ge et al. 2008).

En outre, le travail sur le terrain « in situ » est complexe dans ce pays et les informations sont peu abondantes.

Toutefois, ces recherches font appel à des techniques classiques de cartographie SIG afin d'analyser et de visualiser les données. Afin de continuer et d'élargir ces recherches, cette étude explore l'utilisation de techniques cartographiques de script pour une cartographie intégrée qui analyse en détail le contexte environnemental du Burundi. Dans le cadre de cette étude, la classification permet de représenter graphiquement les changements dans l'utilisation des sols. Par exemple, la prochaine étude pourrait examiner des méthodes de segmentation destinées à l'analyse d'images satellitaires à diverses échelles. Cette méthode pourrait être développée en utilisant la discrimination automatique d'objets, la segmentation et l'extraction de caractéristiques des différents types d'occupation du sol dans les paysages d'Afrique du Sud.

Le suivi environnemental et un système de gestion du paysage qui peuvent contribuer au développement d'un système agricole plus efficace. Par exemple, en utilisant la séquence d'images multi-temporelle, on peut analyser la dynamique des paysages du Burundi sous des aspects spatio-temporels plus détaillés. Il est possible d'extraire ces informations de l'imagerie satellite afin d'analyser le cadre environnemental.

En ce sens, cet article met en évidence l'importance d'incorporer les algorithmes de programmation, les méthodes de script et les techniques de calcul du SIG GRASS dans l'analyse des données spatiales dans le domaine des études paysagères. Cela permet également de développer de nouvelles méthodes qui pourraient enrichir les outils cartographiques classiques. En outre, cette étude a mis en pratique l'analyse interactive des données spatiales en utilisant des requêtes logiques sur des données raster portant sur différentes caractéristiques des paysages. Elle a également réalisé une analyse exploratoire et confirmatoire, ainsi qu'une visualisation cartographique à l'aide de scripts SIG GRASS. En conséquence, cet article a apporté une contribution à la cartographie thématique du Burundi en présentant une nouvelle série de cartes réalisée à partir de données géospatiales multi-sources et d'images satellitaires.

CONCLUSION

Dans cet article, l'analyse environnementale du Burundi ainsi que les principes d'utilisation de différents logiciels SIG ont été exposés, permettant ainsi de comprendre les différences entre les applications cartographiques en utilisant de données géospatiales sur le Burundi. Ainsi, nous examinons les

diverses méthodes pour visualiser des données géospatiales et des images satellitaires à l'aide des logiciels QGIS, GRASS GIS et GMT. En ce qui concerne le logiciel le plus approprié pour cette étude, nous opterions pour le GRASS SIG, suivi du GMT. Même s'il ne montre pas de approches tout a fait facile, il est catégoriquement plus rapide grâce aux algorithmes de programmation utilisées pour le traitement de données cartographiques et celles de télédétection. Donc, l'utilisation des scripts dans le cadre du suivi environnemental, cela peut s'avouer un très grand avantage.

D'une part, l'utilisation de scripts SIG GRASS et d'approches SIG classiques pour intégrer des données géospatiales et des images satellitaires était destinée à appuyer un processus d'analyse géographique visant à évaluer la dynamique environnementale en Afrique de l'Est. Par ailleurs, les performances cartographiques mises en évidence par les scripts exécutés dans GRASS GIS favorisent l'évolution de méthodes techniques de géoinformatique et de cartographie technique. Cette étude a donc réussi à atteindre le double objectif en combinant le traitement technique des données cartographiques par scripts avec l'analyse environnementale des paysages.

En outre, cet article met en évidence l'importance d'utiliser la programmation pour traiter les données de télédétection en se basant sur l'analyse des caractéristiques spectrales et de texture des images satellitaires. La méthode de programmation a obtenu des résultats assez satisfaisants sur des images Landsat-8 OLI/TIRS à texture de couleur simple qui couvrent le territoire du Burundi. L'utilisation d'images satellitaires et de cartographie thématique est bénéfique pour le suivi de l'environnement, et l'association des méthodes cartographiques et de la programmation permet de tirer le maximum d'informations de ces données. La classification des images satellitaires Landsat 8-9 OLI/TIRS réalisée à l'aide du logiciel GRASS SIG est utile pour l'apprentissage des motifs de paysages du Burundi sous forme de structures géospatiales détectés et identifiés par les algorithmes des scripts.

Le développement social du pays est généralement fortement lié à son cadre géographique naturel et aux ressources foncières disponibles. Cela concerne particulièrement le Burundi dont le potentiel économique limité est affecté par l'étendue du pays enclavé et petit. La relation entre la productivité des terres et la taille des exploitations agricoles, par exemple, est influencée par la fragmentation et l'hétérogénéité du paysage. En parallèle, une connaissance approfondie du contexte environnemental et géologique du pays permet de révéler le potentiel de ses ressources. Par exemple, la car-

tographie géologique est utile pour modéliser les paramètres hydrauliques régionaux et découvrir l'épaisseur de l'aquifère. À son tour, cela est utile pour l'analyse des ressources en eaux souterraines du Burundi qui sont des sources essentielles d'eau potable pour la population.

Par conséquent, la création de nouvelles cartes basées sur des données géospatiales fiables et des méthodes avancées permet d'améliorer la compréhension des ressources naturelles et environnementales du pays. Plusieurs auteurs ont mis en évidence les utilisations des techniques de programmation et d'intégration de données dans l'analyse environnementale et géographique (Fikadu et Olika 2023 ; Cloete et al. 2024). Dans l'étude présentée, une telle analyse environnementale intégrée comble le vide dans la littérature existante sur le Burundi qui manque d'approches sur la programmation des techniques cartographiques utilisées avec les logiciels SIG. ●

BIBLIOGRAPHIE

BETGE, D. A Holistic Approach to Address Food Security Risks and Climate Change Adaptation—Insights from Burundi. In: Leal Filho, W., Djekic, I., Smetana, S., Kovaleva, M. (eds) **Handbook of Climate Change Across the Food Supply Chain**. Climate Change Management. Springer, Cham, 2022. https://doi.org/10.1007/978-3-030-87934-1_20.

BUNUNU, Y. A.; BELLO, A.; AHMED, A. Land cover, land use, climate change and food security. **Sustainable Earth Reviews**, v. 6, n. 16, 2023. <https://doi.org/10.1186/s42055-023-00065-4>.

BUYSE, F.; DEWAELE, S.; DECRÉE, S.; MEES, F. Mineralogical and geochemical study of the rare earth element mineralization at Gakara (Burundi). **Ore Geology Reviews**, v. 124, n. 103659, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.oregeorev.2020.103659>.

CABRAL, A. I. R.; VASCONCELOS, M. J. P.; PEREIRA, J. M. C.; MARTINS, E.; É. BARTHOLOMÉ. A land cover map of southern hemisphere Africa based on SPOT-4 Vegetation data. **International Journal of Remote Sensing**, v. 27, n. 6, p. 1053-1074, 2006. <https://doi.org/10.1080/01431160500307409>.

CHUWA, G. L.; KASANZU, C. H.; APEN, F. E.; KAZIMOTO, E. O. Geochemistry and U–Pb zircon geochronology of S-type granites in the Karagwe Ankolean Belt, northwestern Tanzania: Implications for rare-metals mineralization. **Journal of African Earth Sciences**, v. 208, n. 105078, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2023.105078>.

CLOETE, D. N.; SHOKO, C.; DUBE, T.; SUMAYA C. Remote sensing-based land use land cover classification for the Heuningnes Catchment, Cape Agulhas, South Africa.

Physics and Chemistry of the Earth, Parts A/B/C, v. 103559, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.pce.2024.103559>.

CUQ, F. Actes des journées. Télédétection en Sciences Humaines », **Cybergeo: European Journal of Geography** [En ligne], Dossiers, 2009. <https://doi.org/10.4000/cybergeo.614>.

DECRÉE, S.; BOULVAIS, P.; COBERT, C.; BAELE, J.-M.; MIDENDE, G.; GARDIEN, V.; TACK, L.; NIMPAGARITSE, G.; DEMAIFFE, D. Structurally-controlled hydrothermal alteration in the syntectonic Neoproterozoic Upper Ruvubu Alkaline Plutonic Complex (Burundi): Implications for REE and HFSE mobilities. **Precambrian Research**, v. 269, p. 281-295, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.precamres.2015.08.016>.

DIÉDHIYOU, I.; MERING, C.; SY, O.; TIDIANE, S. Cartographier par télédétection l'occupation du sol et ses changements. **EchoGéo** [En ligne], v. 54, 2020. <https://doi.org/10.4000/echogeo.20510>.

EJIGU, M. Environmental Scarcity, Insecurity and Conflict: The Cases of Uganda, Rwanda, Ethiopia and Burundi. In: BRAUCH, H.G., et al. Facing Global Environmental Change. **Hexagon Series on Human and Environmental Security and Peace**, v. 4. Springer, Berlin, Heidelberg, 2009. https://doi.org/10.1007/978-3-540-68488-6_68.

EL-AWADY, M. M.; EL-BADRAWY, H. T.; ABUO EL-ELA, A. M.; SOLIMAAN, M. R.; ALREFAEE, H. A.; ELBOWAB, M. Integrated geophysical studies on the area east of Abu Gharadig basin, southern Cairo, Egypt, using potential field data. **NRIAG Journal of Astronomy and Geophysics**, v. 5, n. 2, p. 351-361, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.nrjag.2016.05.002>.

EL-HASSANIN, A. S.; LABIB, T. M.; GABER, E. I. Effect of vegetation cover and land slope on runoff and soil losses from the watersheds of Burundi. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 43, n. 3, p. 301-308, 1993. [https://doi.org/10.1016/0167-8809\(93\)90093-5](https://doi.org/10.1016/0167-8809(93)90093-5).

EMISHAW, L.; ABDELSALAM, M. G. Satellite gravity data for mapping lithospheric structure of Precambrian tectonic blocks in Africa: The advantages and limitations. **Journal of African Earth Sciences**, v. 197, n. 104775, 2023. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2022.104775>.

EVANS, D. M. Metamorphic modifications of the Muremera mafic-ultramafic intrusions, eastern Burundi, and their effect on chromite compositions. **Journal of African Earth Sciences**, v. 101, p. 19-34, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2014.09.004>.

FIKADU, G.; OLIKA G. Impact of land use land cover change using remote sensing with integration of socio-economic data on Rural Livelihoods in the Nashe watershed, Ethiopia. **Heliyon**, v. 9, n. 3, p. e13746, 2023.

GE, J.; QI, J.; LOFGREN, B. Use of vegetation properties from EOS observations for land-climate modeling in East Africa. **Journal of Geophysical Research**, v. 113, n. D15101, 2008. <https://doi.org/10.1029/2007JD009628>.

HENRI, N. Progrès de la connaissance du Congo, du Rwanda et du Burundi de 1993 à 2008. **Belgeo**, v. 3-4, 2009. <https://doi.org/10.4000/belgeo.7306>.

HENNEBERT, P. A.; TESSENS, E.; TOURENNE, D.; DELVAUX, B. Validation of a FAO land evaluation method by comparison of observed and predicted yields of five food crops in Burundi. **Soil Use and Management**, v. 12, p. 134-142, 1996.

HICINTUKA, C.; MASILYA, P. M. Gestion optimale et intégrée de la fertilité des sols acides du Burundi. **Vertigo**, v. 17, 2013. <https://doi.org/10.4000/vertigo.13898>.

JACQUES, P. ; MASSART, M. ; WILMET, J. Intérêt de l'analyse spatiale dans le traitement des données satellitaires pour un suivi agricole en Afrique Centrale. **Innovations et développement rural dans les pays tropicaux**. Bordeaux : Presses Universitaires de Bordeaux, pp. 205-212, 1993. (Espaces tropicaux, 8).

KIM, D.-Y.; THOMAS, V.; OLSON, J.; WILLIAMS, M.; CLEMENTS, N. Statistical trend and change-point analysis of land-cover-change patterns in East Africa. **International Journal of Remote Sensing**, v. 34, n. 19, p. 6636-6650, 2013.

LEMENKOVA, P. Using open-source software GRASS GIS for analysis of the environmental patterns in Lake Chad, Central Africa. **Die Bodenkultur: Journal of Land Management, Food and Environment**, v. 74, n. 1, p. 49-64, 2023a.

LEMENKOVA, P. A GRASS GIS Scripting Framework for Monitoring Changes in the Ephemeral Salt Lakes of Chotts Melrhir and Merouane, Algeria. **Applied System Innovation**, v. 6, n. 4, p. 61, 2023b. <https://doi.org/10.3390/asi6040061>.

LEMENKOVA, P. Monitoring Seasonal Fluctuations in Saline Lakes of Tunisia Using Earth Observation Data Processed by GRASS GIS. **Land**, v. 12, n. 11, p. 1995, 2023c. <https://doi.org/10.3390/land12111995>.

LEMENKOVA, P. Mapping Woodlands in Angola, Tropical Africa: Calculation of Vegetation Indices From Remote Sensing Data. **Agriculture and Forestry**, v. 70, n. 3, p. 185–202, 2024. <https://doi.org/10.17707/AgricultForest.70.3.13>.

LEMENKOVA, P.; DEBEIR, O. R Libraries for Remote Sensing Data Classification by K-Means Clustering and NDVI Computation in Congo River Basin, DRC. **Applied Sciences**, v. 12, n. 24, p. 12554, 2022a. <https://doi.org/10.3390/app122412554>.

LEMENKOVA, P.; DEBEIR, O. Satellite Image Processing by Python and R Using Landsat 9 OLI/TIRS and SRTM DEM Data on Côte d'Ivoire, West Africa. **Journal of Imaging**, v. 8, n. 12, p. 317, 2022b. <https://doi.org/10.3390/jimaging8120317>.

LEMENKOVA, P.; DEBEIR, O. Coherence of Bangui Magnetic Anomaly with Topographic and Gravity Contrasts across Central African Republic. **Minerals**, v. 13, n. 5, p. 604, 2023a. <https://doi.org/10.3390/min13050604>.

LEMENKOVA, P.; DEBEIR, O. Multispectral Satellite Image Analysis for Computing Vegetation Indices by R in the Khartoum Region of Sudan, Northeast Africa. **Journal of Imaging**, v. 9, n. 5, p. 98, 2023b. <https://doi.org/10.3390/jimaging9050098>.

LWASA, S. Appreciating the heterogeneity in the unity of Africa: A socio-ecological perspective on Africa's geographies. **The Canadian Geographer / Le Géographe canadien**, v. 63, p. 594-602, 2019. <https://doi.org/10.1111/cag.12576>.

MASWI, M. S.; MSHIU E. E. Remote sensing mapping of geothermal systems around Lake Natron in the east Africa rift system, northeastern Tanzania. **Geothermics**, v. 119, n. 102930, 2024. <https://doi.org/10.1016/j.geothermics.2024.102930>.

MIDENDE, G.; BOULVAIS, P.; TACK, L.; MELCHER, F.; GERDES, A.; DEWAELE, S.; DEMAIFFE, D.; DECRÉE, S. Petrography, geochemistry and U-Pb zircon age of the Matongo carbonatite Massif (Burundi): Implication for the Neoproterozoic geodynamic evolution of Central Africa. **Journal of African Earth Sciences**, v. 100, p. 656-674, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2014.08.010>.

NDAGIJIMANA, M.; KESSLER, A.; ASSELDONK, M. Understanding farmers' investments in sustainable land management in Burundi: A case-study in the provinces of Gitega and Muyinga. **Land Degradation & Development**, v. 30, n. 417-425, 2019.

NIRAGIRA, S.; D'HAESE, M.; BUYASSE, J. et al. Historical changes in the traditional agrarian systems of Burundi: endogenous drive to survive from food insecurity. **GeoJournal**, v. 86, p. 865-884, 2021. <https://doi.org/10.1007/s10708-019-10102-5>.

NIRAGIRA, S.; NDIMUBANDI, J.; VAN ORSHOVEN, J. et al. Modelling crop portfolios that minimize human macronutrient deficiency on subsistence farms in Burundi. **Food Security**, v. 14, p. 23-37, 2022. <https://doi.org/10.1007/s12571-021-01216-1>.

NKUNZIMANA, A.; BI, S.; ALRIAH, M. A. A.; ZHI, T.; KUR, N. A. D. Comparative analysis of the performance of satellite-based rainfall products over various topographical unities in central East Africa: Case of Burundi. **Earth and Space Science**, v. 7, n. e2019EA000834, 2020. <https://doi.org/10.1029/2019EA000834>.

NYIRARWASA, A.; HAN, F.; YANG, Z.; MPEREJEKUMANA, P.; DUFATANYE, UMWALI E.; NSENGIYUMVA, J. N.; HABIBULLOEV, S. Evaluating the Impact of Environmental Performance and Socioeconomic and Demographic Factors on Land Use and Land Cover Changes in Kibira National Park, **Burundi. Sustainability**, v. 16, n. 2, p. 473, 2024. <https://doi.org/10.3390/su16020473>.

PEYROT, B. Dynamiques paléoécologique et anthropogène de la forêt ombrophile de la dorsale Congo-Nil au Burundi. **Les Cahiers d'Outre-Mer**, v. 199, pp. 271-292, 1997. <https://doi.org/10.3406/caoum.1997.3656>.

PLACIDE, G.; LOLLCHUND, M. R.; DALSO, G. A. Wind Energy Potential Assessment of some Sites in Burundi using Statistical Modelling, **2021 IEEE PES/IAS PowerAfrica**, Nairobi, Kenya, p. 1-5, 2021. <https://doi.org/10.1109/PowerAfrica52236.2021.9543186>.

SELLIN, V.; MAGNANON, S.; GOURMELON, F.; DEBAINE, F.; NABUCET, J. Etude expérimentale en cartographie de la végétation par télédétection. **Cybergeogeo: European Journal of Geography, Cartographie, Imagerie, SIG**, v. 730, 2015. DOI: <https://doi.org/10.4000/cybergeogeo.27067>.

ROBERT, E.; GANGNERON, F. Un « SIG à dire d'acteurs » : décryptage des vulnérabilités environnementales des agro-éleveurs et pasteurs au Bénin. **Cybergeogeo: European Journal of Geography [En ligne]**, Cartographie, Imagerie, SIG, v. 748, 2015. <https://doi.org/10.4000/cybergeogeo.27285>.

TURIMUBUMWE, P.; ADAM, A. G.; ALEMIE, B. K. Managing public urban lands for sustainable urban development in Bujumbura, Burundi: The role of land administration system. **GeoJournal**, v. 89, p. 10, 2024. <https://doi.org/10.1007/s10708-024-10998-8>.

DIRECTEUR DE LA PUBLICATION

Cláudio Luiz Zanotelli.

Article reçu le: 27/09/2024

Article approuvé le: 06/11/2024

Article publié le: 18/11/2024