

REPUBLIQUE DU SENEGAL

Un peuple-Un but-Une foi



Ministère de l'économie, des finances et du plan



Agence nationale de la Statistique et de la Démographie



Ecole nationale de la Statistique et de l'Analyse économique Pierre Ndiaye

RAPPORT DU PROJET DE STATISTIQUE EXPLORATOIRE SPATIALE

Conception d'une application R-shiny pour le calcul de quelques indicateurs spatiaux

Rédigé par :

FOGWOUNG DJOUFACK Sarah-Laure

NIASS Ahmadou

NGUEMFOUO NGOUMTSA Céline

SENE Malick

*Elèves ingénieurs statisticiens économistes
3e année cycle long.*

Sous la supervision :

M. Aboubacar HEMA

Research analyst

Janvier 2025

Décharge

L'École nationale de la Statistique et de l'Analyse économique (ENSAE) Pierre Ndiaye de Dakar n'entend donner aucune approbation ni improbation aux opinions émises dans ce document. Ces opinions doivent être considérées comme étant propres aux auteurs.

Remerciements

Nous tenons à exprimer notre profonde gratitude à toutes les personnes qui, de près ou de loin, ont contribué à la réalisation de ce travail.

A l'orée, nous tenons à remercier **M. Abdou DIOUF**, Directeur général de l'Agence nationale de la Statistique et de la Démographie (ANSD), ainsi que **M. Idrissa DIAGNE**, Directeur de l'ENSAE Pierre Ndiaye de Dakar, pour leur soutien institutionnel. Une mention spéciale est adressée à **M. Mamadou BALDE**, Responsable de la filière des Ingénieurs statisticiens économistes à l'ENSAE-Dakar, qui veille au bon déroulement des cours.

Dans la même lancée, nous voulons exprimer notre reconnaissance à l'ensemble du corps professoral pour la qualité de la formation dont nous bénéficions et tout particulièrement à notre professeur de statistique exploratoire spatiale, **M. Aboubacar HEMA** pour son suivi, la clarté de ses explications, sa pédagogie et surtout son approche axée sur la pratique. Grâce à lui, nous avons non seulement découvert de nouveaux concepts, mais aussi renforcé nos connaissances avec une meilleure compréhension et une application concrète des notions abordées.

Enfin, nous tenons à exprimer notre gratitude à nos camarades de classe, aînés académiques et amis pour leurs suggestions et critiques constructives lors de l'élaboration de ce travail. Que toute autre personne ayant contribué, de quelque manière que ce soit, à l'élaboration de ce travail trouve ici l'expression de notre reconnaissance la plus sincère.

Avant-propos

L'École nationale de la Statistique et de l'Analyse économique Pierre Ndiaye (ENSAE) est un établissement d'enseignement supérieur rattaché à l'Agence nationale de la Statistique et de la Démographie (ANSD). Elle est membre du Réseau des Écoles de Statistiques africaines (RESA), avec l'École nationale de la Statistique et d'Économie Appliquée (ENSEA) d'Abidjan, l'Institut sous-régional de la Statistique et d'Économie appliquée (ISSEA) de Yaoundé et l'École nationale d'Économie appliquée et de Management (ENEAM) de Cotonou.

La formation délivrée par l'ENSAE comprend plusieurs filières : les Ingénieurs de Travaux Statistiques (ITS), une formation de quatre ans achevée en 2023 ; les Analystes Statisticiens (AS), un programme de trois ans lancé en 2020 ; les Ingénieurs Statisticiens Économistes (ISE) en cycle court sur trois ans et en cycle long sur cinq ans, ce dernier ayant également commencé en 2020. S'ajoutent à ces programmes le Master Aide à la Décision et Évaluation des Politiques publiques (ADEPP) et le Master en Statistiques agricoles.

L'ENSAE dispense des cours théoriques de modélisation et de méthodes statistiques. Les formations comprennent également un volet pratique régi par les stages, les enquêtes pédagogiques, et techniques d'utilisation de logiciels statistiques.

Ainsi, en tant qu'élèves Ingénieurs Statisticiens Economistes et en deuxième année de formation, ce rapport est rédigé dans le cadre du cours de statistiques exploratoires spatiales. Il porte sur la **conception d'une application R-shiny de calcul de quelques indicateurs spatiaux** appris lors de ce cours de trente (30) heures.

Sommaire

Décharge.....	i
Remerciements	ii
Avant-propos	iii
Sommaire	iv
Liste des sigles et acronymes	v
Liste des tableaux	vi
Résumé	vii
Introduction	1
CHAPITRE 1 : Présentation des indices calculés	3
I- Indices spectraux spécifiques à la surveillance des eaux	3
II- Indices spectraux spécifiques à la végétation	5
III- Indices spectraux pour l’observation des sols	8
IV- Indices spectraux pour l’observation des zones urbaines	12
V- Autres indices	14
CHAPITRE 2 : Méthodologie de calcul des indices spectraux	16
I- Méthodologie de calcul des indices spectraux	16
II- Traitement des rasters obtenus et shapefiles.....	18
CHAPITRE 3 : Méthodologie de conception de l’application	24
I- Présentation des principaux modules et des bibliothèques utilisées.....	24
II- Fonctionnalités de l’application.....	26
III- Difficultés rencontrées.....	30
IV- Limites de l’application	31
Conclusion.....	32
Glossaire.....	a
Annexe	b
Table de matière	d

Liste des sigles et acronymes

ANDWI	Augmented Normalized Difference Water Index
ARI	Anthocyanin Reflectance Index
ARI2	Anthocyanin Reflectance Index 2
ARVI	Atmospheric Resistant Vegetation Index
ATSAVI	Adjusted Transformed Soil-Adjusted Vegetation Index
AVI	Advanced Vegetation Index
AWEInsh	Automated Water Extraction Index
AWEIsh	Automated Water Extraction Index with Shadows Elimination
BaI	Bareness Index
BCC	Blue Chromatic Coordinate
BI/BSI	Bare Soil Index
BITM	Landsat TM-based Brightness Index
BIXS	SPOT HRV XS-based Brightness Index
BLFEI	Built-Up Land Features Extraction Index
BNDIV	Blue Normalized Difference Vegetation Index
BNIRV	Blue Near-Infrared Reflectance of Vegetation
BRBA	Band Ratio for Built-up Area
CDI	Confliction Diffusion Indicator
DBI	Dry Built-Up Index
DBSI	Dry Bareness Index
EBBI	Enhanced Built-up and Bareness Index
EMBI	Enhanced Modified Bare Soil Index
FAI	Floating Algae Index
IBI	Index-Based Built-Up Index
LSWI	Land Surface Water Index
NBAI	Normalized Built-up Area Index

Liste des tableaux

Tableau 1 : formule de calcul pour les différents indices spectraux	b
Tableau 2 : Présentation des bandes spectrales	c

Résumé

Dans un contexte de défis environnementaux, agricoles et urbains croissants, ce projet montre l'importance des données géospatiales pour aider à prendre des décisions éclairées. Ces données, collectées par satellite ou capteurs aériens, fournissent des informations clés sur la végétation, les sols, l'eau et l'urbanisation. Cependant, leur complexité rend leur utilisation difficile. Pour résoudre ce problème, le projet a développé une application interactive avec R Shiny, facilitant l'analyse et la visualisation de ces données à travers des indices spectraux. Le projet s'est concentré sur quatre pays d'Afrique de l'Ouest : Burkina Faso, Mali, Niger et Sénégal. Il a utilisé des images satellitaires de Landsat 9, combinées avec des fichiers géographiques des divisions administratives. À l'aide de Google Earth Engine, plusieurs indices spectraux ont été calculés pour analyser l'état de la végétation, l'eau, les sols et les zones urbanisées. Les données ont ensuite été traitées et présentées sous forme de rasters adaptés aux régions et départements. L'application permet aux utilisateurs d'explorer ces données via des cartes interactives, des graphiques et des tableaux. Elle offre aussi la possibilité de télécharger les données pour d'autres analyses. Cette plateforme rend les données accessibles et faciles à comprendre, tout en permettant une exploration détaillée des indices spectraux.

Ce projet démontre comment les outils modernes de statistique spatiale peuvent être appliqués à des problèmes concrets. Il met en avant l'importance des technologies interactives dans la gestion des ressources naturelles, l'urbanisation et la surveillance environnementale, tout en transformant des données complexes en informations utiles pour les décideurs et utilisateurs.

Introduction

Dans un contexte où des défis environnementaux, agricoles et urbains sont de plus en plus pressants, les données géospatiales occupent une place centrale dans la prise de décision éclairée. Ces données, souvent issues de la télédétection par satellite ou de capteurs aéroportés, contiennent des informations précieuses sur les phénomènes observés, mais leur volume et leur complexité rendent leur interprétation difficile.

Les indices spatiaux, obtenus à partir des bandes spectrales de ces données, permettent de synthétiser ces informations et de révéler des tendances ou des anomalies invisibles à l'œil nu. Leur utilisation s'intègre parfaitement dans le cadre de la statistique exploratoire spatiale, une discipline qui vise à analyser et visualiser les relations spatiales entre les données géographiques.

Pour rendre ces analyses exploitables, il est indispensable de manipuler et de transformer les données géospatiales brutes en des formats adaptés, tels que les rasters et les shapefiles. Ces transformations permettent de structurer les données et de faciliter leur interprétation, tout en respectant des contraintes géographiques précises, telles que les projections et les étendues spatiales. Cependant, une question centrale se pose : comment mobiliser les techniques de statistique exploratoire spatiale pour extraire des informations pertinentes à partir d'indices spectraux, et concevoir une interface interactive permettant une analyse dynamique de ces données ? L'enjeu réside non seulement dans le calcul et l'organisation des indices spectraux, mais aussi dans leur communication. Une fois calculés et transformés, ces indices doivent être rendus accessibles à travers des outils visuels interactifs, comme les interfaces développées avec R Shiny, afin de permettre une exploration dynamique des résultats et une meilleure appropriation des analyses par les utilisateurs.

Face à ces défis, ce projet a pour objectif général d'appliquer les outils de statistique exploratoire spatiale pour calculer et intégrer les indices sp dans une interface interactive facilitant leur exploration et leur analyse en se focalisant sur quatre pays d'Afrique de l'Ouest : le Burkina Faso, le Mali, le Niger et le Sénégal. Plus spécifiquement, il s'agit de :

- Identifier et calculer différents indices spatiaux ;

- Concevoir une interface interactive avec R Shiny pour visualiser et explorer les données géospatiales ;
- Intégrer ces indices dans l'application de manière structurée et bien organisée.

Pour atteindre ces objectifs, ce rapport est structuré en trois principaux chapitres. Le premier chapitre est consacré à la présentation des indices spatiaux calculés. Il met en lumière leur rôle dans l'analyse géospatiale, leurs domaines d'application, ainsi que leurs limites. Le deuxième chapitre détaille la méthodologie adoptée pour le calcul des indices spatiaux. Il décrit les étapes nécessaires à la manipulation des données géospatiales, notamment sous forme de rasters et de shapefiles, et explique les transformations effectuées pour préparer ces données à leur intégration dans la plateforme interactive. Enfin, le troisième chapitre s'intéresse au développement de l'interface interactive avec R Shiny. Il présente le processus de conception et de mise en œuvre de l'interface, en détaillant les fonctionnalités développées, les défis techniques rencontrés au cours de sa réalisation, ainsi que les avantages qu'elle offre.

En s'appuyant sur les concepts théoriques abordés en cours, ce projet illustre l'intégration des outils de statistique exploratoire spatiale et des applications interactives pour répondre à des problématiques géospatiales concrètes.

CHAPITRE 1 : Présentation des indices calculés

Ce chapitre est consacré à la présentation des indices spatiaux calculés dans le cadre de l'application développée. Il débute par les indices spectraux liés à l'eau, à la végétation, aux sols et à l'observation des zones urbaines, avant d'inclure d'autres indicateurs tels que le CDI et le taux de prévalence paludisme. Il met en lumière leur rôle, leurs domaines d'application, leurs performances, leurs avantages, ainsi que certaines de leurs limites.

Un **indice spectral** est une mesure calculée à partir des données de télédétection, généralement obtenues par satellite ou drone, qui utilise des combinaisons spécifiques de bandes spectrales pour extraire des informations sur les caractéristiques de surface de la Terre. Ces indices sont conçus pour mettre en évidence des propriétés spécifiques des surfaces observées, telles que la végétation, les sols, l'eau ou les zones urbaines. Ils permettent de simplifier et d'amplifier les signaux liés à des phénomènes particuliers, facilitant ainsi leur interprétation. Utilisés dans divers domaines comme l'agriculture, la gestion des ressources naturelles, la surveillance environnementale et les études sur le changement climatique, les indices spectraux sont devenus des outils incontournables pour l'analyse et la gestion des territoires. Les indices spectraux calculés dans le cadre de ce travail correspondent à divers domaines d'applications à savoir l'eau, les sols, la végétation et l'urbain.

I- Indices spectraux spécifiques à la surveillance des eaux

L'utilisation des indices spectraux dans l'observation des zones aquatiques permet une évaluation détaillée de la qualité de l'eau, de la présence d'algues flottantes, de l'humidité du sol et des variations saisonnières des ressources en eau. Ces indices sont essentiels pour la gestion durable des ressources hydriques, la surveillance de la pollution, et la détection de la salinité. Des exemples d'indices de ce domaine sont les suivants :

ANDWI (Augmented Normalized Difference Water Index)

L'ANDWI est un indice de télédétection amélioré, conçu pour détecter plus précisément la présence d'eau dans les images satellites, notamment dans les zones où la végétation est dense ou l'eau présente des caractéristiques particulières. Cet indice améliore le traditionnel NDWI

en affinant la différenciation entre l'eau et les autres types de couverture terrestre et en se basant sur la différence de réflectance entre les bandes infrarouge et proche infrarouge. L'ANDWI est particulièrement utile pour étudier les ressources en eau, la gestion des inondations, la cartographie des zones humides et l'analyse des changements de la couverture de l'eau en lien avec les activités humaines ou le changement climatique. Ses avantages incluent une précision accrue, permettant une détection plus nette de l'eau, même dans des environnements complexes, et une adaptabilité à différents types de formations aquatiques, telles que les lacs, rivières et zones humides. Il peut être appliqué à diverses résolutions spatiales en fonction des capteurs utilisés, ce qui facilite une analyse fine des zones aquatiques et le suivi des changements dans la distribution de l'eau sur de longues périodes. Par rapport aux indices classiques, l'ANDWI est plus sensible à la présence d'eau et moins influencé par la végétation ou les sols secs, ce qui le rend particulièrement pertinent pour des études hydrologiques, agricoles et environnementales.

AWEInsh (Automated Water Extraction Index)

L'AWEInsh est une variation de l'AWEI qui prend en compte la présence d'ombres et normalise leur influence pour une meilleure extraction de l'eau. Il est particulièrement adapté aux environnements où les ombres peuvent fausser les résultats d'autres indices en réduisant la visibilité des surfaces aquatiques. Cet indice utilise les bandes spectrales proches infrarouge (NIR), rouge, et infrarouge moyen (SWIR) pour différencier efficacement l'eau des autres types de couverture terrestre. Grâce à la prise en compte des ombres et à la normalisation de leur impact, AWEInsh permet une détection plus précise des zones aquatiques, ce qui le rend très utile pour des applications comme la surveillance des inondations, la gestion des ressources en eau, et la cartographie des zones humides, notamment dans des régions où l'ombre des objets ou de la végétation est importante.

AWEIsh (Automated Water Extraction Index with Shadows Elimination)

L'AWEIsh est un indice spectral conçu pour détecter la présence d'eau dans les images satellites tout en tenant compte des ombres. Il est particulièrement utile dans les environnements où l'eau peut être partiellement masquée par des ombres ou des éléments de surface complexes. L'AWEIsh utilise des bandes spectrales spécifiques, notamment le proche infrarouge (NIR), l'infrarouge moyen (SWIR) et le bleu, pour mieux identifier les surfaces aquatiques tout en excluant les zones ombragées ou autres artefacts. Cet indice est couramment appliqué dans les études de gestion de l'eau, la cartographie des zones humides, et le suivi des inondations,

notamment dans les régions où les ombres ou la végétation dense peuvent interférer avec d'autres indices traditionnels de détection de l'eau.

FAI (Floating Algae Index)

Le FAI est un indice spectral utilisé pour détecter et surveiller la présence d'algues flottantes dans les plans d'eau. Il est principalement appliqué dans les études de qualité de l'eau, notamment pour identifier les proliférations d'algues (phénomènes d'eutrophisation), qui peuvent avoir des impacts significatifs sur les écosystèmes aquatiques et la santé publique. Le FAI est calculé à partir de la réflexion de la lumière dans les bandes spectrales du rouge et du proche infrarouge (NIR), qui sont sensibles aux caractéristiques optiques des algues en surface. Il est particulièrement utile pour suivre les variations de la biomasse d'algues flottantes dans les lacs, rivières et réservoirs, ce qui permet de détecter rapidement des changements dans les écosystèmes aquatiques. Le FAI est donc un outil important dans la gestion des ressources en eau, l'évaluation des impacts environnementaux et la prévention de la pollution des eaux.

LSWI (Land Surface Water Index)

Le LSWI est un indice spectral utilisé pour surveiller l'humidité du sol et la présence d'eau à la surface terrestre, notamment dans les zones humides, les sols mouillés et les inondations. Basé sur l'utilisation des bandes du proche infrarouge (NIR) et du moyen infrarouge (SWIR), il permet de détecter les variations d'humidité et d'observer l'étendue des zones inondées. LSWI est largement utilisé dans la gestion des ressources en eau, le suivi de la sécheresse, ainsi que pour l'évaluation des impacts des événements climatiques extrêmes comme les inondations. En agriculture, il aide à ajuster la gestion de l'eau en fonction des besoins des cultures, tandis qu'en environnement, il est utilisé pour étudier les effets du changement climatique sur les écosystèmes aquatiques.

II- Indices spectraux spécifiques à la végétation

L'observation de la végétation à l'aide des indices spectraux est une méthode essentielle pour évaluer l'état de la couverture végétale et surveiller sa santé. Ces indices permettent de quantifier divers aspects de la végétation tels que la photosynthèse, la biomasse et l'humidité. En utilisant des bandes spectrales spécifiques comme l'infrarouge proche (NIR), le rouge et le bleu, ces indices aident à différencier les zones de végétation des autres types de sol, et à fournir

des informations cruciales pour la gestion des ressources naturelles et l'agriculture de précision. Ce domaine inclut plusieurs indices, tels que :

ARI (Anthocyanin Reflectance Index)

L'ARI est un indice spectral utilisé pour quantifier la présence d'anthocyanines dans les plantes, des pigments responsables de la couleur rouge, violette ou bleue dans les feuilles et autres parties végétales. Cet indice est basé sur la réflexion de la lumière dans des bandes spectrales spécifiques, généralement dans les domaines du rouge et du proche infrarouge (NIR), qui sont sensibles à la présence d'anthocyanines. L'ARI est couramment utilisé pour surveiller le stress des plantes, comme la réponse au froid, à la sécheresse ou aux infections, car les anthocyanines sont souvent produites en réponse à ces conditions. Il est également utilisé pour étudier les cycles saisonniers de la végétation, notamment le changement de couleur des feuilles pendant l'automne, et pour analyser les variations dans la composition chimique des végétaux.

ARI2 (Anthocyanin Reflectance Index 2)

L'ARI2 est une version améliorée de l'ARI, conçue pour quantifier la présence d'anthocyanines dans les plantes, en particulier en utilisant une approche plus précise dans la détection des pigments responsables de la couleur rouge, bleue et violette dans les feuilles. ARI2 se base sur la réflectance dans les bandes spectrales spécifiques, généralement dans le rouge et le proche infrarouge, avec une meilleure sensibilité et une précision accrue par rapport à l'ARI traditionnel. Cet indice est largement utilisé pour évaluer le stress végétal, comme la réponse à des conditions environnementales extrêmes telles que la sécheresse, les températures élevées ou les attaques parasitaires. L'ARI2 permet aussi d'analyser le processus de sénescence des plantes, notamment la transition des couleurs des feuilles au fil des saisons, ce qui en fait un outil précieux dans les études écologiques et agricoles.

ARVI (Atmospheric Resistant Vegetation Index)

L'ARVI est un indice spectral utilisé pour évaluer la santé de la végétation tout en prenant en compte l'influence de l'atmosphère. Il est dérivé des données de télédétection en utilisant une combinaison de bandes spectrales dans le rouge, le proche infrarouge (NIR) et l'infrarouge moyen. L'ARVI est conçu pour corriger les effets atmosphériques, comme la diffusion de la lumière par les aérosols, qui peuvent perturber l'analyse des caractéristiques de la végétation. Cet indice est principalement utilisé pour surveiller la végétation dans des environnements où la couverture nuageuse ou d'autres facteurs atmosphériques peuvent altérer la réflectance des surfaces végétales. En compensant ces effets, l'ARVI permet une estimation plus précise de la

santé des plantes, de la densité de la végétation et de la photosynthèse. Il est utilisé dans des domaines comme l'agriculture de précision, la gestion des ressources naturelles et l'étude des impacts des changements climatiques sur les écosystèmes végétaux. Grâce à sa capacité à minimiser les erreurs causées par les conditions atmosphériques, l'ARVI est un outil précieux pour le suivi à grande échelle de la santé de la végétation et de son évolution au fil du temps.

ATSAVI (Adjusted Transformed Soil-Adjusted Vegetation Index)

L'Adjusted Transformed Soil-Adjusted Vegetation Index (ATSAVI) est un indice spectral conçu pour évaluer la végétation tout en minimisant l'influence de l'arrière-plan du sol, qui peut fausser les résultats dans les zones avec peu de couverture végétale. Il est basé sur une version modifiée du Soil-Adjusted Vegetation Index (SAVI), et utilise une transformation spécifique pour mieux corriger les effets des sols qui peuvent affecter la mesure de la végétation. ATSAVI est particulièrement utile dans les régions semi-arides et arides, où les sols dégagés sont fréquents et peuvent perturber les indices de végétation classiques comme le NDVI. En ajustant cette influence, l'ATSAVI permet une détection plus précise de la végétation, offrant ainsi une meilleure estimation de la santé et de la couverture végétale. Il est couramment utilisé dans l'agriculture de précision, la surveillance des forêts et l'étude des changements environnementaux.

AVI (Advanced Vegetation Index)

L'AVI est un indice spectral conçu pour fournir une évaluation plus précise de la végétation en utilisant des bandes spectrales spécifiques. Il est basé sur la combinaison de différentes longueurs d'onde, en particulier celles sensibles à la chlorophylle et à l'humidité des plantes. AVI améliore les capacités de détection des indices traditionnels en offrant une plus grande sensibilité aux variations de la santé et de la densité de la végétation, même dans des conditions où les indices classiques comme le NDVI peuvent être saturés. Cet indice est utilisé dans des applications telles que la surveillance des cultures agricoles, la gestion des forêts, l'étude des impacts du changement climatique sur la végétation et la détection des stress environnementaux. L'AVI est particulièrement utile pour évaluer les changements subtils dans la végétation et les performances agricoles, offrant ainsi des informations cruciales pour la gestion des ressources naturelles et la planification des interventions.

BCC (Blue Chromatic Coordinate)

Le BCC est un indice spectral utilisé pour évaluer la couleur de la végétation à partir de données de télédétection. Cet indice se base sur la réflexion de la lumière dans la bande bleue, une longueur d'onde sensible à la composition et à la santé de la végétation. Le BCC est principalement utilisé pour détecter les variations de la couleur des plantes, qui peuvent être liées à des facteurs de stress comme la sécheresse, les maladies, ou la dégradation de la végétation. Cet indice est également utile pour surveiller les changements dans la composition des écosystèmes végétaux, notamment en détectant les tendances de déclin de la végétation ou de changements dans la photosynthèse. Le BCC peut être employé dans des applications comme l'agriculture de précision, la gestion des écosystèmes, et la surveillance des effets du changement climatique sur la végétation.

BNDIV (Blue Normalized Difference Vegetation Index)

Le BNDVI est un indice spectral utilisé en télédétection pour surveiller la végétation, en particulier en mettant l'accent sur la réflexion dans les bandes bleue et proche infrarouge (NIR). Il est calculé en utilisant la différence normalisée entre la réflectance dans ces deux bandes. Le BNDVI est particulièrement utile pour évaluer la santé de la végétation, car il est sensible aux variations de chlorophylle et permet de détecter les zones de végétation en stress, notamment en cas de sécheresse, de maladies ou de perturbations environnementales. Il est utilisé pour le suivi agricole, la gestion des ressources naturelles, la surveillance des écosystèmes et les études climatiques. Il est plus sensible dans les zones à faible couverture végétale mais moins efficace dans les zones très végétalisées où d'autres indices, comme le NDVI, sont plus adaptés.

III- Indices spectraux pour l'observation des sols

Les indices spectraux utilisés pour l'analyse des sols sont essentiels pour évaluer la couverture du sol, détecter les sols nus, surveiller les zones agricoles et analyser les conditions de sécheresse. Ces indices, qui utilisent des bandes spectrales comme le rouge, le vert et le proche infrarouge, permettent de distinguer les différents types de sol (par exemple, les sols nus, les sols humides ou agricoles) et d'évaluer leur état. Ils sont particulièrement importants pour la gestion des terres, l'agriculture et la préservation des sols contre l'érosion et la dégradation. Quelques indices associés à ce domaine et utilisés dans le cas présent incluent :

Bal (Bareness Index)

Le BaI est un indice spectral utilisé pour quantifier la proportion de surface nue (c'est-à-dire les surfaces sans végétation) dans un environnement donné, à partir de données de télédétection. Calculé à partir des réflectances dans les bandes spectrales proches infrarouges (NIR) et rouges, le BaI permet de différencier les zones recouvertes de végétation des zones où la couverture végétale est absente, telles que les sols nus, les zones de déforestation ou les terrains agricoles récemment exploités. En utilisant cet indice, il est possible d'analyser et de surveiller l'extension des zones nues au fil du temps, ce qui est essentiel dans des contextes comme la gestion des terres, la dégradation des sols et le suivi des impacts des activités humaines, notamment l'agriculture, l'urbanisation et les changements climatiques.

Le Bareness Index est particulièrement utile pour les études liées à la dégradation des terres et à l'érosion, car il fournit une évaluation précise des surfaces affectées par l'absence de couverture végétale. Il permet également de suivre l'évolution de ces surfaces sur de grandes zones géographiques et sur des périodes prolongées, offrant ainsi une vue d'ensemble des tendances et des changements dans l'usage des sols. Toutefois, il peut rencontrer des limites dans les environnements où les surfaces nues sont difficiles à différencier des autres types de couvertures, comme dans les zones urbaines denses ou les terrains fortement perturbés.

BI/BSI: Bare Soil Index

Le BSI est un indice utilisé pour identifier et extraire les zones de sol nu à partir des images satellitaires. Il repose sur une combinaison des bandes spectrales bleu, rouge, proche infrarouge (NIR) et infrarouge à ondes courtes (SWIR), permettant de détecter les caractéristiques spécifiques des sols dépourvus de végétation. Le BSI trouve son application dans divers domaines, notamment la gestion agricole, où il est utilisé pour surveiller les sols exposés, surtout pendant les périodes de jachère. Il est également essentiel dans l'évaluation des zones sujettes à l'érosion et à la désertification, ainsi que dans la cartographie des changements d'occupation des sols liés à l'urbanisation ou la déforestation. En planification urbaine, il permet de distinguer les sols nus des zones bâties et végétalisées.

L'application du BSI permet une identification précise des zones de sol nu, ce qui est crucial pour la gestion des terres agricoles et la surveillance environnementale. Par exemple, une étude en Asie du Sud-Est¹ a démontré son efficacité pour identifier les sols nus pendant la période de

¹ Selon Nguyen, C. T., Chidthaisong, A., Diem, P. K., & Huo, L. Z. (2021). A Modified Bare Soil Index to Identify Bare Land Features during Agricultural Fallow-Period in Southeast Asia Using Landsat 8. *Land*, 10(3), 231.

jachère agricole. Comparé à d'autres indices, le BSI réduit les erreurs d'interprétation en distinguant efficacement les sols nus des autres types de couvertures terrestres. Sa polyvalence, notamment dans des environnements arides, semi-arides ou tropicaux, et sa simplicité de calcul en font un outil accessible et pratique pour des applications variées, notamment dans des logiciels de télédétection comme ArcGIS ou QGIS.

BITM (Landsat TM-based Brightness Index)

Le BITM est un indice utilisé pour évaluer la brillance des surfaces terrestres à partir des images satellites Landsat, notamment celles issues du capteur Thematic Mapper (TM). En exploitant les bandes spectrales visibles et proches de l'infrarouge, il permet d'identifier des éléments comme les sols nus, les zones urbaines et la végétation. Cet indice est largement appliqué dans la cartographie de l'occupation des sols, la surveillance environnementale (déforestation, expansion urbaine, sols nus) et l'agriculture, où il aide à suivre la santé des cultures. Le BITM se distingue par sa précision dans l'identification des variations de brillance et sa capacité à différencier efficacement les classes de couverture terrestre.

Grâce à la résolution spatiale de 30 mètres des images Landsat TM et à la disponibilité des données depuis les années 1980, le BITM offre des analyses temporelles cohérentes et détaillées sur de vastes paysages. Son accès gratuit et sa polyvalence en font un outil essentiel pour divers domaines, tels que la gestion des ressources en eau et la surveillance des forêts. De plus, il peut être combiné avec d'autres indices pour renforcer la fiabilité des analyses.

BIXS (SPOT HRV XS-based Brightness Index)

Le BIXS est un indice utilisé pour analyser la luminosité des surfaces terrestres à partir des images satellites SPOT HRV XS, en combinant les bandes visibles et proche infrarouge. Il permet de distinguer efficacement les types de couverture terrestre (urbaines, rurales, agricoles, naturelles) et est utilisé pour la cartographie des sols, la surveillance environnementale (déforestation, urbanisation), ainsi que la gestion agricole. Grâce à sa résolution spatiale précise (20-30 m) et à la disponibilité des données SPOT sur le long terme, le BIXS offre une analyse détaillée et cohérente des évolutions environnementales. Accessible et polyvalent, il peut être combiné à d'autres indices pour renforcer la précision des analyses, faisant de lui un outil essentiel pour les études environnementales et la gestion des ressources naturelles.

DBSI (Dry Bareness Index)

Le DBSI est un indice utilisé pour détecter et quantifier les zones de sol nu, particulièrement dans les régions sèches ou semi-arides. Il repose sur l'analyse de la réflectance dans les bandes

spectrales du proche infrarouge (NIR) et de l'infrarouge à ondes courtes (SWIR), ce qui permet de différencier les sols nus des autres types de couverture terrestre. Le DBSI est particulièrement utile pour identifier les sols secs et dénudés, qui sont souvent difficiles à distinguer des surfaces végétalisées ou urbaines avec d'autres indices. Cet indice est principalement utilisé pour la gestion des terres, notamment pour identifier les zones de sol nu et suivre leur évolution, en particulier dans les zones de jachère ou soumises à l'érosion. En agriculture, il permet de surveiller les sols nus dans les paysages agricoles, facilitant ainsi la gestion de l'irrigation et des cultures. Le DBSI est aussi précieux en écologie pour cartographier les zones touchées par la désertification et l'érosion, offrant des informations sur les sols exposés à des conditions environnementales extrêmes. Il se distingue par sa précision dans la différenciation des sols secs des surfaces végétalisées ou urbaines, permettant une identification efficace des zones de sol nu dans les environnements arides et semi-arides. Grâce à sa flexibilité en termes de résolution spatiale, il permet des analyses à différentes échelles. Polyvalent et adapté à divers environnements géographiques et climatiques, le DBSI est essentiel pour les analyses environnementales dans des zones soumises à la sécheresse ou la désertification. Il peut également être combiné avec d'autres indices comme le BSI pour améliorer la précision des analyses des sols nus et des zones dégradées.

EMBI (Enhanced Modified Bare Soil Index)

L'EMBI est une version améliorée du Bare Soil Index (BSI), conçu pour identifier de manière plus précise les zones de sol nu à partir des données de télédétection. Il intègre des ajustements permettant de réduire les interférences dues aux surfaces végétalisées et aux zones urbaines. En se basant sur l'utilisation de plusieurs bandes spectrales, notamment dans les domaines du rouge, du proche infrarouge (NIR) et de l'infrarouge à ondes courtes (SWIR), l'EMBI améliore la distinction entre les sols nus et d'autres types de couverture terrestre. Cet indice est particulièrement utilisé dans les zones semi-arides et arides, où l'identification des sols nus est cruciale pour surveiller l'impact des activités humaines et des phénomènes naturels comme l'érosion ou la désertification. Il est appliqué dans divers domaines, tels que la surveillance de la dégradation des sols, la gestion des terres agricoles pour distinguer les zones de jachère, et l'analyse des changements d'occupation du sol pour évaluer l'impact de l'urbanisation et de la déforestation. L'EMBI offre une meilleure précision et fiabilité que les indices classiques de sol nu, étant capable de distinguer plus efficacement les sols nus des surfaces végétalisées, ce qui le rend adapté aux études dans des environnements variés. Il peut être utilisé à différentes résolutions spatiales, permettant ainsi d'analyser des zones de tailles variables.

IV- Indices spectraux pour l'observation des zones urbaines

Les indices spectraux appliqués aux zones urbaines permettent d'analyser les caractéristiques des surfaces bâties, d'évaluer l'extension des zones urbanisées et de surveiller les phénomènes environnementaux liés à l'urbanisation, tels que l'îlot de chaleur urbain. Ces indices utilisent principalement des bandes spectrales visibles et proches de l'infrarouge pour différencier les matériaux de construction, les surfaces imperméables et les espaces verts. Ils sont indispensables pour la planification urbaine durable, la gestion des risques liés à l'urbanisation et l'amélioration de la qualité de vie en ville. Parmi les indices caractéristiques de ce domaine, on trouve dans notre cas :

BLFEI (Built-Up Land Features Extraction Index)

Le BLFEI est un indice utilisé pour identifier les zones urbaines et les caractéristiques du sol construit, en se basant sur la réflexion dans les bandes spectrales spécifiques. Il permet de distinguer les surfaces urbaines des autres types de couverture terrestre comme les zones rurales ou naturelles. Cet indice est particulièrement utile pour l'urbanisme, la gestion des infrastructures et la planification territoriale, en aidant à surveiller l'expansion urbaine et l'impact des constructions sur l'environnement. Il est performant pour détecter les zones urbaines et les surfaces artificielles, mais moins adapté pour les environnements naturels denses.

BRBA (Band Ratio for Built-up Area)

Le BRBA est un indice utilisé pour identifier les zones urbaines à partir de données satellitaires. Il est basé sur le rapport entre deux bandes spectrales spécifiques, généralement dans les parties du spectre visible et du proche infrarouge. Cet indice est particulièrement utile pour la détection des zones urbaines et pour l'analyse de l'extension des surfaces construites dans les environnements urbains. Il permet de différencier les zones urbaines des zones non urbaines, notamment en mettant en évidence les différences de réflexion de la lumière entre les constructions et les autres types de couverture terrestre. Ce ratio est efficace pour surveiller l'expansion urbaine, la gestion des terres et les changements dans l'utilisation du sol.

DBI (Dry Built-Up Index)

Le DBI est un indice spectral utilisé pour détecter les zones urbaines sèches, en particulier dans les régions où les surfaces construites, telles que les bâtiments et les routes, sont exposées à des conditions de sécheresse ou à des températures élevées. Le DBI utilise un rapport entre différentes bandes spectrales, principalement dans les parties du spectre proche infrarouge et de la bande thermique, pour distinguer les zones urbaines sèches des autres types de couverture terrestre. Cet indice est particulièrement utile pour l'analyse des surfaces bâties dans des environnements arides ou semi-arides et pour évaluer l'impact de la sécheresse sur l'urbanisation. Il peut être employé dans la gestion des risques liés à la sécheresse, l'expansion urbaine et les études environnementales.

EBBI (Enhanced Built-up and Bareness Index)

L'EBBI est un indice spectral conçu pour distinguer les zones urbaines bâties et les zones dégagées de la végétation. Il utilise les bandes du proche infrarouge (NIR), du rouge (Red) et de la bande à longue onde infrarouge (SWIR) pour mettre en évidence les surfaces urbanisées et les zones de sol nu. L'EBBI est particulièrement utile dans l'analyse de l'expansion urbaine et de la dégradation des terres, en permettant d'identifier les zones de construction et les surfaces exposées. Cet indice est couramment utilisé pour surveiller l'urbanisation et la gestion des terres, ainsi que pour l'étude des impacts de l'urbanisation sur les écosystèmes et l'environnement.

IBI (Index-Based Built-Up Index)

L'IBI est un indice spectral utilisé pour identifier et cartographier les zones urbaines à partir des images satellitaires. Il se base sur l'utilisation de bandes spectrales spécifiques qui distinguent les caractéristiques des surfaces construites, comme les bâtiments, les routes et les autres infrastructures urbaines, tout en réduisant l'impact de la végétation, de l'eau et d'autres éléments naturels. L'IBI est largement utilisé dans les études d'urbanisation et d'étalement urbain, ainsi que dans la planification des infrastructures et la gestion des ressources territoriales. Cet indice permet une détection efficace des zones bâties, même dans des environnements urbains denses, facilitant ainsi la surveillance et l'analyse de l'évolution des villes.

NBAI : Normalized Built-up Area Index

Le NBAI est un indice conçu pour extraire les zones urbaines ou bâties à partir d'images satellites, en mettant l'accent sur les différences de réflexion spectrale entre certaines bandes satellites. Il est particulièrement efficace pour réduire la confusion avec d'autres types de couverture terrestre, tels que les sols nus ou la végétation. Cet indice est couramment utilisé dans l'extraction automatique des zones urbaines, la cartographie des zones bâties et la planification urbaine, notamment dans les contextes d'urbanisation élevée.

Comparé à des indices plus anciens comme le NBI et le NDBI, le NBAI offre une précision améliorée, avec une augmentation de 10 à 13 % dans l'extraction des zones bâties. Une étude basée sur les données Landsat TM a démontré que le NBAI fournit des résultats plus fiables pour distinguer les zones bâties des sols nus. Son efficacité à réduire la confusion entre différentes couvertures terrestres en fait un outil précieux pour des analyses géospatiales plus précises.

V- Autres indices

CDI: Confliction Diffusion Indicator

Le **CDI (Confliction Diffusion Indicator)** est un indice utilisé pour évaluer la propagation et l'intensité des conflits dans une région donnée en analysant des données géospatiales et temporelles. Il permet de mesurer l'impact des conflits sur les territoires en identifiant les zones où ils se propagent, leur densité et leur influence sur les populations locales. Cet indice est utile pour surveiller l'extension des conflits, évaluer leurs impacts socio-économiques, orienter l'aide humanitaire et analyser les dynamiques de diffusion des conflits au fil du temps. Il est particulièrement applicable dans les études géopolitiques, la gestion des crises, la planification d'interventions humanitaires et les politiques de réconciliation et de reconstruction.

Taux de prévalence de paludisme

Le taux de prévalence du paludisme pour 1 000 habitants représente le nombre de personnes infectées par le parasite du paludisme sur une population donnée. Pour les pays comme le Mali, le Sénégal, le Niger et le Burkina Faso, ce taux est un indicateur crucial de l'ampleur de la maladie dans ces régions, où le paludisme est endémique.

Dans ces pays d'Afrique subsaharienne, où les conditions sont idéales pour la reproduction des moustiques *Anopheles*, des efforts continus pour réduire le taux de prévalence, comme l'utilisation de moustiquaires et de traitements préventifs, sont essentiels. Les taux de prévalence pour 1 000 habitants dans ces pays sont utilisés pour suivre l'efficacité des programmes de lutte contre le paludisme et pour ajuster les stratégies de santé publique en conséquence. La formule de calcul utilisée est : $\frac{\text{population atteinte}}{\text{population totale}} * 1000$.

CHAPITRE 2 : Méthodologie de calcul des indices spectraux

Ce chapitre, divisé en deux sections, présente la méthodologie de calcul des indices spectraux et de génération des outputs. La première section décrit les étapes de manipulation des données géospatiales et les calculs nécessaires pour obtenir les indices. La deuxième section aborde la sortie des résultats, en détaillant les formats de sortie, les ajustements graphiques et les considérations techniques pour optimiser l'intégration des données dans l'interface R Shiny.

I- Méthodologie de calcul des indices spectraux

Le calcul des différents indices spectraux a été fait à l'aide de Google Earth Engine puis exportés sous forme de raster. En entrée, nous avons les shapefiles des 4 pays (Burkina Faso, Mali, Niger et Sénégal) au niveau adm0 et des images de Landsat9. Ces images satellitaires journalières permettent l'étude des sols, de la végétation, de l'eau, et des zones urbaines, servant ainsi au calcul des indices. Les différentes étapes de calcul sont les suivantes :

I-1. Source et importation des données

Tout d'abord le shapefile (ADM 0) de la région concernée a été importée. Puis la collection d'images à utiliser a également été importé en utilisant le mot clé **ee.ImageCollection**. Pour sélectionner les images de **Landsat 9**, le mot clé '**LANDSAT/LC09/C02/T1_L2**' a été utilisée. Ensuite, il a fallu définir la période d'intérêt ainsi que la région. Pour ce script, les images choisies sont celles prises entre le **1^{er} janvier et le 1^{er} février 2022**.

I-2. Traitement des rasters importés

Deux fonctions ont été créées : une pour appliquer les facteurs de normalisation des bandes et une autre pour masquer les nuages. Concernant la fonction de normalisation des bandes, la bande **SR_B** a été multipliée par 0,0000275, puis ajustée de -0,2. Quant à la bande **ST_B**, elle a été multipliée par 0,00341802, puis ajustée de 149,0. Pour la fonction de masquage des nuages, le mot clé **QA_PIXEL**, qui indique l'emplacement des nuages, a été utilisé, et les pixels sélectionnés ont été remplacés par 0. Une fois ces deux fonctions créées, elles ont été appliquées aux images sélectionnées précédemment.

Pour atténuer l'effet des nuages, une image a été créée en utilisant la médiane des pixels, c'est-à-dire la valeur la plus fréquente pour chaque pixel durant la période sélectionnée (du 1^{er} janvier au 1^{er} février 2022). L'image obtenue est ainsi plus nette et plus réaliste.

Les bandes disponibles pour cette image ont été affichées. La résolution a été réduite à 3000 m (au lieu de 30 m) pour diminuer la taille des images en sortie. Ensuite, l'image obtenue a été découpée avec le mot clé **clip** sur la région concernée. Quelques paramètres de visualisation ont été définis, puis l'image finale obtenue a été visualisée en centrant sur la région sélectionnée. Comme d'habitude, les mots clés utilisés sont **Map.centerObject** et **Map.addLayer**.

I-3. Calcul des indices

Des fonctions ont été créées pour calculer divers indices de végétation. Chacune de ces fonctions retourne un raster. Une grande fonction **calculateAllVegetationIndices** a ensuite été développée pour calculer tous ces indices végétaux. Cette fonction applique à l'image (son unique paramètre d'entrée) chacune des fonctions des indices de végétation mentionnées précédemment.

Des fonctions ont été créées pour calculer les indices d'urbanisation. Comme précédemment, une fois ces fonctions créées, une fonction **calculateAllUrbanIndices** a été développée pour calculer tous les indices d'urbanisation en prenant un raster en paramètre.

Des fonctions ont été créées selon le même schéma pour calculer les indices liés au sol, puis la fonction **calculateAllSoilIndices** a été développée.

Le même schéma a également été suivi pour calculer les indices liés à l'eau, et la fonction **calculateAllWaterIndices** a été créée.

Une fois que toutes ces fonctions ont été créées, elles ont été appliquées à l'image obtenue à l'étape précédente, puis toutes les images obtenues par indice ont été fusionnées dans une seule image (raster).

I-4. Visualisation des indices calculés

Des paramètres de visualisation ont ensuite été définis pour chacun des indices calculés plus haut. Ensuite, chaque indice a été visualisé sur la carte de GEE en sélectionnant la bande concernée. Comme tous les indices ont été fusionnés dans une seule image, il s'agissait à chaque fois de la même image.

I-5. Exportation des indices calculés

Des paramètres communs pour l'exportation ont été définis :

- Echelle : 300m ;
- CRS : « EPSG :4326 » ;
- maxPixels : 1e13.

Les rasters correspondants aux indices ont été exportés dans le drive en utilisant la fonction **Export.image.toDrive**. Pour ce faire, la bande correspondante à l'indice concerné a été sélectionnée à chaque fois.

Ainsi, au terme de code, nous obtenons vingt-quatre (24) indices spectraux pour chacun des quatre (04) pays d'étude, soit quatre-vingt-seize (96) rasters.

II- Traitement des rasters obtenus et shapefiles

Cette partie traite de l'extraction, de l'agrégation et de la présentation des données raster pour les pays du Mali, du Sénégal, du Burkina Faso et du Niger. Les rasters, définis pixel par pixel, sont regroupés par unités administratives (régions et départements) afin de fournir une vue synthétique des indicateurs géospatiaux. Les moyennes départementales et régionales sont calculées pour générer des statistiques clés, résumés textuels et graphiques dynamiques, facilitant ainsi l'exploration des données et leur intégration dans l'application.

II-1. Packages et fonctions utilisées

Pour la sortie des outputs à intégrer dans l'application, différents packages ont été utilisés à cet effet :

- **dplyr** : ce package permet de manipuler des tables de données sous forme de dataframes, en filtrant et transformant les informations nécessaires à l'analyse, comme l'extraction des données spécifiques à chaque région dans le cas présent. Les fonctions de ce package utilisées sont les suivantes :
 - **filter()** : cette fonction est utilisée pour filtrer les données du dataframe en fonction des régions.
 - **mutate()** : utilisée pour ajouter une colonne des régions dans le tableau des valeurs pour les différents départements en effectuant une jointure spatiale entre les départements et les régions.

- **group_by()** : permet de réaliser des calculs agrégés sur chaque groupe de régions.
- **summarise()** : utilisée pour calculer la valeur moyenne, minimale et maximale pour chaque région, ainsi que pour identifier les départements.
- **rowwise()** : utilisée pour générer des descriptions détaillées pour chaque région.
- **pull()** : est utilisée pour extraire les descriptions textuelles générées dans le dataframe.
- **ggplot2** : utilisé pour créer des graphiques, il permet de générer des nuages de points afin de visualiser les relations entre les départements et les valeurs moyennes des indicateurs, avec une personnalisation des axes et des éléments graphiques. Les fonctions utilisées sont ;
 - **ggplot()** : pour préparer le graphique des valeurs des indicateurs (en ordonnée) pour chacun des départements (en abscisse).
 - **geom_point()** pour afficher les points représentant chaque département et la valeur correspondante.
 - **geom_text()** : pour afficher le nom du département à côté de chaque point.
- **readr** : ce package facilite la lecture des fichiers de données sous des formats courants, tels que csv. Il est plus rapide et plus efficace que la fonction *read.csv()* native de R. Avec sa fonction *read.csv()*, il a permis ici d'importer les données contenant les informations nécessaires pour la création des graphiques.
- **raster** : il est principalement utilisé pour travailler avec des données raster, c'est-à-dire des images géospatiales où chaque pixel contient une valeur. Dans ce code, il permet de charger, manipuler, et analyser les rasters. Les fonctions utilisées sont :
 - **raster()** qui permet de lire chaque raster pour les différents pays et indicateurs spécifiés.
 - **projectRaster()** pour projeter un raster afin qu'il ait le même système de coordonnées (CRS) que le shapefile des départements. Cela garantit que le raster et les shapefiles sont correctement alignés spatialement.
- **sf** (simple features) : il est utilisé pour manipuler des objets géospatiaux, notamment des shapefiles. Il permet de lire, manipuler et analyser des données géographiques sous forme de polygones, de points ou de lignes. Les fonctions de ce package utilisées dans le cadre de ce travail sont :

- **st_read()** : permet de lire un shapefile (dans ce cas, des limites administratives de départements dans différents pays).
- **st_crs()** : permet de récupérer le système de coordonnées de référence (CRS) d'un objet géospatial (ici les départements). Elle est utilisée pour vérifier si le CRS du shapefile correspond à celui du raster.
- **st_crs(departments)** : permet de vérifier le CRS des départements avant d'effectuer une conversion du raster si nécessaire.
- **st_transform()** : est utilisée pour transformer le CRS d'un objet spatial afin qu'il corresponde au CRS du raster, si nécessaire.
- **st_join** : permet de joindre deux objets spatiaux en fonction de leur relation géométrique. Ici, elle est utilisée pour associer les départements à leurs régions respectives.
- **exactextratr** : ce package permet d'extraire des valeurs de rasters en fonction de zones définies par des objets géospatiaux (comme les départements, dans ce cas). Il permet d'effectuer des extractions rapides et précises. La fonction **exact_extract()** utilisée permet ici d'extraire la valeur moyenne du raster pour chaque département et pour les différents indicateurs.
- **Terra** : ce package permet l'analyse et la visualisation de données spatiales raster et vectorielles. Successeur du package **raster**, il offre des performances améliorées, notamment pour gérer de grandes données grâce à un traitement par blocs et une compatibilité avec les formats GDAL. Il permet des opérations variées, telles que le calcul sur des couches raster, la reprojection, la découpe, et l'analyse spatiale avancée, tout en restant compatible avec les objets des packages sf et sp.

II-2. Agrégation suivant les niveaux administratifs

Les rasters, initialement définis pixel par pixel, ont été agrégés à deux niveaux administratifs : d'abord au niveau des régions, puis au niveau des départements, en utilisant le script *R raster_Nomdupays.R*. Pour cela, les shapefiles *adm1* (régions) et *adm2* (départements) ont été associés aux rasters précédents. Une fonction spécifique a été développée pour effectuer cette agrégation. Elle prend en entrée un raster, un shapefile, le chemin de sortie pour enregistrer les résultats, le nom du raster, et le niveau administratif. Cette fonction calcule la moyenne des valeurs des pixels à l'intérieur des polygones définis par le shapefile (à l'aide de la méthode *exact_extract*) et génère un nouveau raster où chaque polygone est assigné à la valeur moyenne calculée. Le fichier résultant est ensuite sauvegardé avec un nom indiquant le niveau

administratif correspondant (*adm1* ou *adm2*). Une boucle a été mise en place pour automatiser ce processus sur l'ensemble des rasters de la liste. La fonction *process_raster* est appliquée deux fois : une fois pour les régions et une fois pour les départements, et les résultats sont enregistrés dans des dossiers distincts selon le niveau administratif.

II-1. Extraction des différentes valeurs des rasters pour les régions

La méthode suivie consiste à analyser des données géographiques pour résumer les informations à différents niveaux administratifs, comme les départements et les régions. Les données de départ, sous forme de rasters, sont croisées avec des limites géographiques définies dans des fichiers shapefile.

Pour chaque région, les données des rasters sont d'abord regroupées au niveau des départements. La moyenne des valeurs à l'intérieur de chaque département est calculée, ce qui permet d'obtenir un aperçu des conditions dans chaque zone. Ensuite, ces moyennes départementales servent à créer un résumé pour chaque région.

Les informations résumées incluent la valeur la plus basse et la plus haute enregistrée dans les départements d'une région, ainsi que les départements où elles se trouvent. Une moyenne générale pour tous les départements de la région est également calculée.

Enfin, tous ces résultats sont regroupés pour former un tableau global qui permet de comparer les régions et leurs départements entre eux. Cette approche simplifie et organise des données complexes pour les rendre plus faciles à comprendre et à utiliser.

II-2. Extraction des différentes valeurs des rasters pour les départements

L'objectif de cette étape est d'extraire les données raster (indicateurs géospatiaux) et de les associer aux unités administratives (départements et régions) des pays Mali, Sénégal, Burkina Faso et Niger. Avant cette extraction, il est essentiel de s'assurer que les systèmes de coordonnées des données raster et vectorielles sont compatibles. À la fin du processus, une série de fichiers CSV contenant des résumés statistiques par département est générée. Le processus se déroule en trois étapes :

1. **Lecture des fichiers raster et shapefiles pour chaque pays :** après importation et chargement des packages, les fonctions *st_read()* et *raster()* sont utilisées pour lire respectivement les shapefiles et raster. Ensuite, les données vectorielles (shapefiles des

départements) sont associées aux rasters, en vérifiant et, si nécessaire, en ajustant les systèmes de coordonnées des deux types de fichiers à l'aide des fonctions `st_crs()` et `projectRaster()`.

2. **Extraction des valeurs raster pour chaque département :** La fonction `exact_extract()` est utilisée avec l'option `mean` pour extraire la valeur moyenne des pixels à l'intérieur des zones délimitées par chaque département. Ceci permet d'obtenir une valeur moyenne du raster pour chaque département.
3. **Création et sauvegarde de la base de données par département :** un tableau (`data.frame()`) est créé, contenant les noms des départements, les régions d'appartenance et les valeurs moyennes extraites des rasters. Ce tableau est ensuite sauvegardé dans un fichier CSV à l'aide de la fonction `write.csv()`.

II-3. Génération des graphiques

L'objectif ici est de produire des graphiques dynamiques, organisés par région et indicateur, afin d'optimiser l'exploration des données dans la plateforme. Ainsi, les étapes utilisées sont les suivantes :

1. **Chargement des données :** Après l'installation et le chargement des packages, les données nécessaires pour générer les graphiques proviennent de fichiers CSV obtenus précédemment, qui contiennent des informations sur les départements, les régions et la valeur moyenne des indicateurs. Chaque fichier CSV correspond à un indicateur spécifique et contient plusieurs lignes de données, une pour chaque département des différentes régions des pays concernés. Les données sont lues dans R à l'aide de la fonction `read.csv()`, après avoir défini le chemin vers le dossier contenant les fichiers.
2. **Filtrage et traitement des données :** Une fois les fichiers chargés, nous procédons à la vérification de la présence des colonnes essentielles (Région, Département, et Valeur de l'indice). En cas de colonnes manquantes, le processus est interrompu pour le fichier concerné et un message d'avertissement est affiché. Ensuite, pour chaque région unique dans les données, un sous-ensemble des données est extrait afin de préparer un graphique spécifique à cette région.
3. **Génération des graphiques :** Pour chaque région, un nuage de points est créé, représentant la valeur moyenne de l'indicateur par département. Le graphique est généré à l'aide de `ggplot2`, où chaque point correspond à un département, avec l'axe des abscisses représentant le département et l'axe des ordonnées représentant la valeur

moyenne de l'indicateur. Des étiquettes sont ajoutées aux points pour identifier chaque département.

4. **Sauvegarde des graphiques :** Les graphiques sont enregistrés dans un dossier spécifié sous format PNG. Chaque fichier est nommé de manière à inclure à la fois la région et l'indicateur concerné, facilitant ainsi leur identification. Cette méthode permet de produire plusieurs graphiques simultanément, en fonction des régions et des indicateurs présents dans les fichiers sources. Les fichiers sont ensuite stockés dans un dossier organisé par région et indicateur, grâce à la fonction *dir.create()*, pour les intégrer ensuite dans la plateforme.

II-4. Présentation textuelle des résultats obtenus au niveau des régions de chaque pays

L'objectif de cette section est de résumer et de présenter les résultats des valeurs moyennes extraites des rasters au niveau régional. Ce processus comprend le calcul des statistiques clés pour chaque région (moyenne, valeur minimale et maximale), la génération de résumés textuels basés sur ces statistiques, ainsi que l'affichage et la sauvegarde des résultats pour leur intégration dans la plateforme. Le déroulement de cette étape est structuré comme suit :

1. **Agrégation des résultats par région :** Cette étape consiste à résumer les valeurs des départements à l'échelle régionale. Pour chaque région, il est d'une part, identifié le département ayant la valeur minimale et celui ayant la valeur maximale, et d'autre part, calculé calculant la moyenne des valeurs. A cet effet, les fonctions *group_by()* et *sumarize()* sont utilisées pour agréger les données par région puis par la suite ressortir ces statistiques clés pour chaque groupe.
2. **Génération des descriptions textuelles :** une fois les statistiques calculées, l'objectif est de formuler des résumés textuels pour chaque région, basés sur les résultats obtenus (moyenne, valeur minimale et maximale). La fonction *mutate()* est utilisée pour créer une nouvelle colonne contenant ces résumés, avec l'aide de *paste0()* pour concaténer les informations.
3. **Affichage et sauvegarde des résultats :** les descriptions générées pour chaque région sont affichées à l'écran pour vérification. Elles sont ensuite sauvegardées dans un fichier texte pour être chargées ultérieurement dans la plateforme. Pour cela, les fonctions *print()* et *writeLines()* sont employées respectivement pour l'affichage et la sauvegarde des résultats.

CHAPITRE 3 : Méthodologie de conception de l'application

Ce chapitre décrit le processus de conception et de mise en œuvre de l'application développée avec R Shiny, conçue pour permettre la visualisation des indices préalablement calculés. Il présente en détail les modules et bibliothèques exploités, les fonctionnalités intégrées, ainsi que les principaux défis techniques rencontrés lors de sa réalisation et les limites de celle-ci.

L'application a été conçue à l'aide de R Shiny, une plateforme permettant de développer des applications web interactives directement à partir de R. Celle-ci offre plusieurs avantages clés, parmi lesquels :

- ✚ **Interopérabilité** : Les applications Shiny peuvent être déployées en ligne, intégrées à des sites web existants, ou utilisées localement, offrant ainsi une grande souplesse d'utilisation.
- ✚ **Intégration transparente avec R** : Elle permet une exploitation des analyses et indices déjà réalisés dans R, facilitant l'implémentation de résultats dans l'application.
- ✚ **Interactivité avancée** : Shiny offre des visualisations dynamiques et des interfaces interactives qui permettent aux utilisateurs d'explorer les résultats en temps réel, pour une meilleure expérience d'analyse.
- ✚ **Facilité de déploiement** : Les applications peuvent être facilement partagées via un simple navigateur, sans nécessiter d'installation supplémentaire, ce qui simplifie leur accessibilité.
- ✚ **Flexibilité et personnalisation** : Elle est compatible avec des bibliothèques R puissantes, telles que ggplot2 et leaflet, permettant la création de graphiques et d'outils interactifs parfaitement adaptés aux besoins de l'application.

I- Présentation des principaux modules et des bibliothèques utilisées

L'objectif de l'application est de concevoir une interface interactive à l'aide de R Shiny, permettant de visualiser et d'explorer de manière dynamique des données spatiales. À travers des cartes interactives, l'application présente les divers indices, facilitant ainsi l'analyse et l'interprétation de ces données géospatiales. Les utilisateurs pourront interagir avec les

différentes couches de données, ajuster les paramètres en temps réel et obtenir des résultats immédiats. De ce fait les modules suivant ont été utilisés :

- ✚ **module_selecteurs.R** : il permet de créer une interface utilisateur qui facilite la sélection des pays et des indicateurs dans l'application. Il utilise la fonction *selectInput* pour générer des listes déroulantes.
- ✚ **Module_description.R** : il fournit les descriptions détaillées des indicateurs sélectionnés par l'utilisateur. Grâce à la fonction *textOutput*, lorsqu'un utilisateur sélectionne un indicateur dans la liste déroulante du module précédent, la description associée apparaît immédiatement sur l'interface. Aussi la fonction *renderText* permet la mise à jour des descriptions en fonction de la sélection.
- ✚ **Module_cartes.R** : ce module est chargé de la génération de cartes interactives, permettant de visualiser des données géospatiales sous forme de cartes dynamiques. Le module s'appuie sur la fonction *leafletOutput* pour intégrer des cartes interactives à l'interface. La bibliothèque *leaflet* est utilisée pour créer ces cartes, offrant ainsi des fonctionnalités telles que le zoom, le déplacement et l'interaction avec des couches spécifiques. De plus, la fonction *leafletProxy* permet de mettre à jour les cartes en temps réel sans avoir à recharger l'ensemble de la page. Aussi, les fonctions *addPolygons* et *addCircles* permettent la superposition des données géospatiales sur les cartes.
- ✚ **Module_tabs.R** : Ce module sert à structurer l'application en plusieurs onglets, organisant ainsi les différentes sorties (résumés, tableaux, graphiques) de manière accessible. Il permet de présenter les informations sous forme de sections bien délimitées. Le module utilise la fonction *tabsetPanel* pour créer un ensemble d'onglets, *DTOutput* pour afficher les tableaux interactifs et *plotOutput* pour afficher les graphiques statistiques. Chaque onglet peut contenir différents types de contenu, comme des graphiques interactifs, des tableaux de données, ou des résumés descriptifs. Cette organisation permet à l'utilisateur de naviguer facilement entre les différentes analyses, tout en maintenant une interface bien structurée.

En plus des bibliothèques du chapitre 2 qui précède, différentes bibliothèques ont été utilisées pour renforcer les fonctionnalités de l'application, parmi lesquelles :

- ✚ **Shiny** : Fournit l'infrastructure principale pour la création d'applications web interactives. Elle permet de développer l'interface utilisateur (UI) et de gérer les

interactions via le serveur (server), assurant ainsi une communication fluide entre l'interface et les données.

- ✚ **Leaflet** : Elle est une bibliothèque de cartographie interactive, basée sur JavaScript, intégrée dans R pour la création de cartes interactives. Elle est utilisée pour visualiser des données géospatiales sous forme de couches dynamiques, offrant des fonctionnalités avancées telles que le zoom, le déplacement et la personnalisation des cartes.
- ✚ **DT** : Permet d'afficher des tableaux interactifs avec des fonctionnalités de tri, de recherche et d'exportation des données. Elle est utilisée pour présenter des données tabulaires de manière claire et manipulable, offrant aux utilisateurs un moyen pratique d'interagir avec les informations.
- ✚ **shinythemes** : Fournit des thèmes prédéfinis qui améliorent l'esthétique de l'application. Le thème "*Flatly*" a été choisi pour offrir une interface moderne et épurée, contribuant à une expérience utilisateur agréable.
- ✚ **shinycssloaders** : Ajoute des indicateurs de chargement lors des traitements, pour ainsi signaler visuellement les processus en cours. Ces éléments sont particulièrement utiles lors du rendu des cartes et des graphiques.

II- Fonctionnalités de l'application

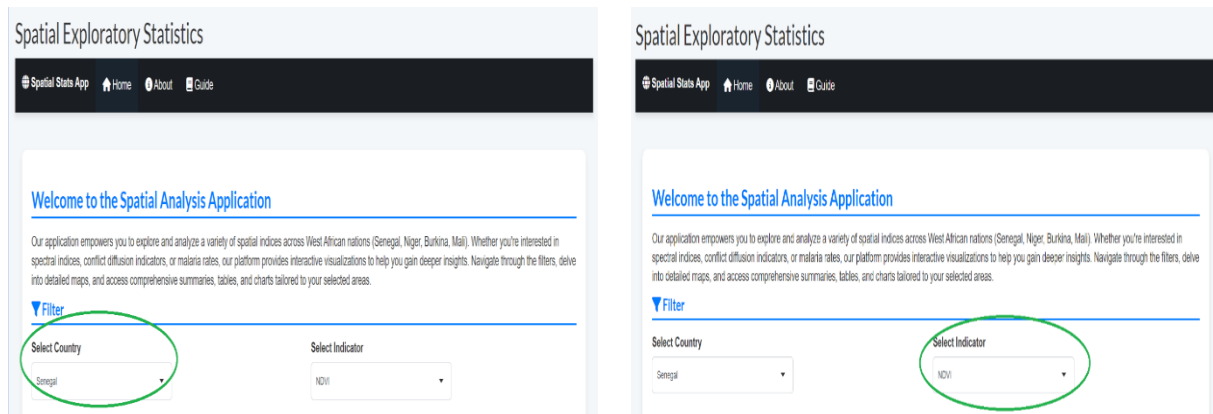
L'application R Shiny offre plusieurs fonctionnalités, chacune conçue pour répondre à des besoins spécifiques. Ci-après une description détaillée des fonctionnalités clés :

II-1. Chargement et exploration des données

Cette fonctionnalité permet à l'application de charger facilement des fichiers de données et de pouvoir les afficher dans l'interface. Voici les étapes clés de cette fonctionnalité :

- **Téléversement des fichiers** : L'application importe les fichiers CSV précédemment obtenus depuis l'appareil local, tout en s'assurant qu'ils contiennent les colonnes région, département et valeur correspondante.
- **Lecture des données** : Une fois les fichiers importés, leur contenu est lu et analysé à l'aide de la fonction `read.csv`.

- **Sélection du pays et de l'indicateur** : une section « Filtres » est présente en haut dans l'onglet Accueil pour sélectionner un pays puis un indicateur.



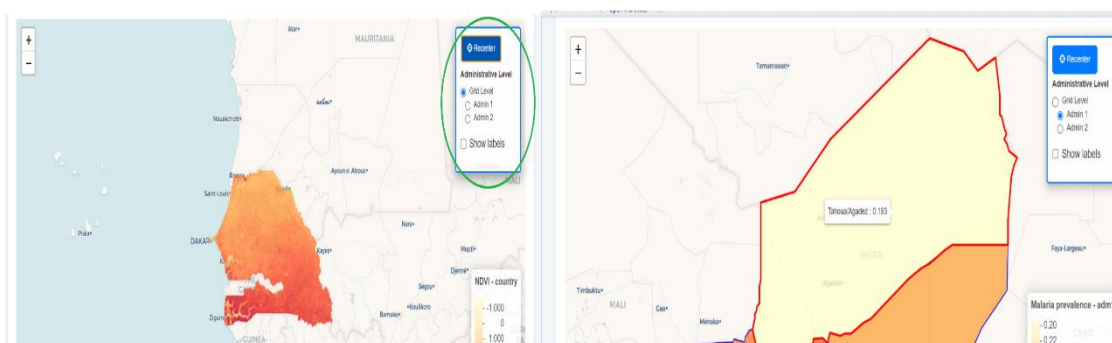
- **Description des différents indicateurs** : la fonction `inputs$indicator()` est utilisée pour récupérer l'indicateur sélectionné par l'utilisateur et la fonction `index_descriptions[[ind]]` recherche la description correspondant à des indicateur dans la liste conçue et si elle existe, elle est affichée dans `textOutput("description")`, sinon un message par défaut « aucune description disponible » est affichée.

II-2. Visualisation cartographique

Cette fonctionnalité permet d'afficher des cartes interactives, offrant aux utilisateurs la possibilité d'explorer les données géospatiales à travers une interface dynamique. Les principales étapes techniques sont :

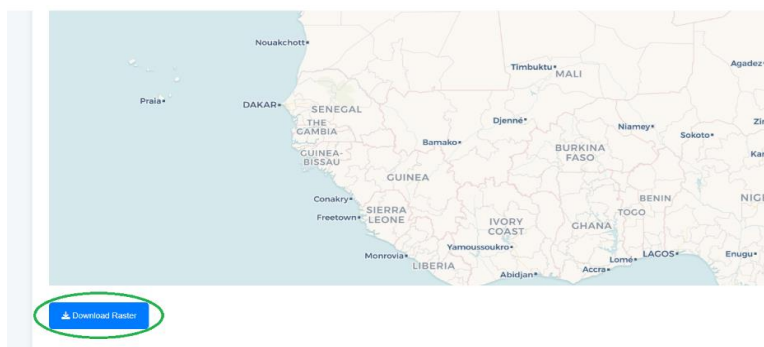
- **Chargement des données raster et shapefiles** : Les fichiers raster contenant les valeurs des indicateurs et les shapefiles des pays sont chargés à l'aide des fonctions *raster* et *st_read*. Une vérification du système de coordonnées (CRS) est réalisée pour s'assurer de leur compatibilité. En cas de divergence, une harmonisation du CRS est effectuée pour garantir l'alignement spatial des données.
- **Sélection des niveaux administratifs** : trois options sont disponibles : pixel par pixel et les niveaux administratifs 1 et 2.
- **Affichage des cartes** : La bibliothèque Leaflet est utilisée pour intégrer des cartes interactives à l'application. Elle permet d'ajouter des tuiles de fond personnalisées via la fonction *addTiles*.

- **Superposition de données** : Les données géospatiales, raster et shapefiles, sont superposées à la carte grâce aux fonctions *addPolygons* et *addCircles*. Cela permet de visualiser les différentes entités géographiques et leurs attributs.
- **Interaction avec la carte** : Lorsqu'un utilisateur clique sur une zone spécifique, l'événement est capturé par *input\$map_click*, ce qui permet d'afficher des informations détaillées sur la zone sélectionnée, notamment le nom de la région et la valeur de l'indicateur associé à cette région. Par ailleurs, l'utilisateur peut également zoomer/dézoomer à travers différents régions de la carte. En outre si l'option afficher les étiquettes est cochée, alors les noms des régions et la valeur de l'indicateur correspondant s'affichent directement sur la carte ; à défaut, c'est en survolant qu'ils s'afficheront en infobulle. Enfin, un bouton qui recentre immédiatement la carte sur l'étendue par défaut du pays sélectionné, assure de ne jamais perdre de vue la zone d'intérêt.



II-3. Téléchargement des rasters

L'application permet aux utilisateurs de télécharger les cartes grâce à *downloadHandler* et *ggsave*. Les fichiers exportés incluent le raster correspondant à l'indicateur sélectionné pour le pays spécifié par l'utilisateur.



II-4. Navigation dans les onglets résumés, tableau et graphique

Les utilisateurs peuvent avoir un résumé de l'indicateur sélectionné dans le pays ou la région choisie, puis interagir avec les données sous forme de tableaux dynamiques. Cette fonctionnalité inclue :

- **Tri et recherche** : Grâce à *DT::datatable*, les utilisateurs peuvent trier les colonnes, rechercher des données (régions ou de départements) spécifiques et naviguer rapidement dans de grands ensembles de données.
- **Onglet résumé** : le résumé national présente une vue d'ensemble pour le pays et le résumé régional agrège suivant les régions sélectionnées en présentant également les minimas/maxima ou les décompositions départementales. Ceci est fait à l'aide de *dplyr::summarise*.
- **Onglet Tableau** : chaque ligne correspond à un niveau d'agrégation et les colonnes sont triables alphabétiquement et numériquement.
- **Onglet graphique** : À l'aide d'une boucle for, les données sont filtrées par région, ce qui permet de créer un graphique spécifique pour chaque région. Chaque graphique illustre les départements de la région concernée et les valeurs associées à l'indicateur analysé.
- **Personnalisation** : La bibliothèque DT permet également d'ajouter des fonctionnalités supplémentaires comme la pagination, le redimensionnement des colonnes, et l'édition en ligne, améliorant ainsi l'interactivité des tableaux.

Summary

Table

Chart

Within the region of Kayes, the department with the lowest value of BCC is Niono (0.20121918618679), while the highest is Bafoulabe (0.215119822813438).

Show 1 entries

Search:

Region	Indicator	MinValue	MaxValue	MinDepartment	MaxDepartment	
1	Kayes	BCC	0.20121918618679	0.215119822813438	Niono	Bafoulabe

Showing 1 to 1 of 1 entries

Previous

1

Next

Department	Value
1 Bafoulabe	0.215119822813438
2 Diéma	0.20251205035452
3 Kayes	0.207936256444786
4 Kénédougou	0.214811938988077
5 Kita	0.210351407527924



II-5. Personnalisation et esthétique

L'apparence visuelle de l'application a été élaborée avec soin afin d'offrir une interface à la fois moderne, intuitive et agréable. Les caractéristiques suivantes ont été prises en compte :

- **Thème principal** : L'application utilise le thème « Flatly » de la bibliothèque shinythemes pour une présentation visuelle moderne et épurée.
- **Personnalisation via CSS** : Une feuille de style CSS dédiée a été intégrée pour adapter l'apparence des éléments interactifs tels que les cartes, les sélecteurs et les boutons, permettant une harmonie visuelle et une navigation fluide.
- **Indicateurs de chargement** : Grâce à la bibliothèque shinycssloaders, des spinners élégants signalent les processus en cours (par exemple, lors du chargement des cartes ou des graphiques), améliorant ainsi l'expérience utilisateur en offrant un retour visuel immédiat.

III- Difficultés rencontrées

La mise en place de cette application Shiny modulaire, intégrant des données spatiales pour plusieurs pays et de multiples indicateurs, a nécessité de surmonter un certain nombre de défis techniques et organisationnels.

D'une part, nous avons dû veiller à ce que la structure des répertoires et l'emplacement des fichiers respectent les conventions de Shiny (répertoires ui.R, server.R, modules/, www/), tout en maintenant une logique de nommage cohérente pour les shapefiles, les rasters, et les ressources statiques (images, feuilles de style CSS). L'exigence de stocker certains fichiers dans www/ pour qu'ils soient accessibles dans l'interface a parfois créé de la confusion, en particulier lorsque des chemins d'accès absolus s'entremêlaient avec des chemins relatifs.

D'autre part, la gestion de l'interaction entre les modules s'est avérée délicate. L'application repose sur quatre modules principaux (sélecteurs, description, cartes, onglets) auxquels s'ajoute un système de filtrage dynamique par région. Chacun de ces blocs doit échanger des données, comme transmettre le pays ou l'indicateur sélectionné pour mettre à jour les cartes ou les onglets. Nous avons dû utiliser des fonctions spécifiques de Shiny (moduleServer(), reactive(), observeEvent()), et veiller à éviter les boucles de dépendances ou les conflits de noms. Par ailleurs, les erreurs de débogage telles une parenthèse manquante, une virgule superflue ou un guillemet mal placé ont parfois été difficiles à détecter : Shiny ne signalait qu'un parse error « fin d'entrée inattendue » ou un message peu explicite, nous obligeant à revoir chaque ligne avec attention.

Enfin, nous avons fait face à des problèmes de performances lors du chargement de rasters volumineux ou de shapefiles très détaillés. Bien qu'on puisse envisager des optimisations (mise en cache ou réduction de résolution), elles n'ont pas encore pu être implémentées dans cette version.

IV- Limites de l'application

L'une des limites de cette application réside dans ses capacités d'analyse, qui se concentrent principalement sur l'exploration. Bien qu'elle offre des statistiques descriptives (résumés, tableaux, graphiques) et une visualisation cartographique, elle ne permet pas de réaliser des analyses spatiales complexes. Les utilisateurs souhaitant effectuer des interpolations géostatistiques, des régressions spatiotemporelles ou des analyses multi-variables avancées devront exporter les données vers des outils externes comme R, QGIS ou ArcGIS.

En outre, la gestion de très gros volumes de données, tels que des rasters en haute résolution ou des shapefiles détaillés, pose des problèmes de performance. Ces fichiers peuvent allonger les temps de chargement et affecter la réactivité de l'application, en l'absence de mécanismes de mise en cache ou d'optimisation des données.

La flexibilité de l'application est également limitée par sa dépendance à des données prédéfinies. Ajouter un nouveau pays, un indicateur ou des shapefiles plus fins nécessite une intervention manuelle dans la structure des fichiers et une adaptation du code, ce qui complique son extensibilité.

Une autre contrainte notable est liée à l'unicité de la sélection régionale. L'analyse détaillée ne peut se faire que sur une seule région ou un ensemble restreint à la fois. Pour comparer plusieurs régions, l'utilisateur doit naviguer manuellement, ce qui rend les analyses interrégionales moins fluides.

Enfin, certaines fonctionnalités essentielles, comme la gestion temporelle des données (séries chronologiques) ou la possibilité de croiser et fusionner différents indicateurs directement dans l'interface, sont absentes, ce qui limite encore davantage les possibilités offertes par l'application.

Conclusion

Dans le cadre du cours de statistiques exploratoires spatiales, ce projet a permis de mettre en pratique les concepts appris. L'objectif était de développer une application interactive pour visualiser des indices spectraux basés sur des données géospatiales. Cette application permet de faciliter l'exploration des données géospatiales liées à des phénomènes environnementaux, agricoles et urbains dans quatre pays d'Afrique de l'Ouest. En intégrant des outils statistiques pour l'analyse des indices spectraux, nous avons transformé des données brutes issues de satellites en informations facilement accessibles et interprétables.

Néanmoins, ce travail a également mis en lumière certaines limites, notamment la gestion de gros volumes de données et la nécessité d'analyses plus complexes. Ces défis ouvrent la voie à des améliorations futures, comme l'optimisation des performances de l'application et l'intégration de fonctionnalités d'analyse spatiale avancée.

Ce projet illustre l'importance de la statistique exploratoire spatiale comme un outil essentiel pour l'analyse et la compréhension des phénomènes géographiques complexes, tout en offrant une plateforme concrète et pratique qui enrichit nos compétences dans ce domaine.

Glossaire

- ✚ **Bandes spectrales** : Plages spécifiques du spectre électromagnétique capturées par des capteurs.
- ✚ **CRS (Système de Référence de Coordonnées)** : Système définissant comment les coordonnées géographiques (latitude, longitude) sont projetées sur une carte plane.
- ✚ **Etendue** : la plus petite boîte rectangulaire qui contient l'ensemble des données géospatiales d'un objet.
- ✚ **Pixel** : Plus petite unité d'une image raster, représentant une zone géographique avec une valeur attribuée.
- ✚ **Projection** : Transformation mathématique permettant de représenter la surface 3D de la Terre (sphérique) sur une surface plane (2D), comme une carte ou une image.
- ✚ **Résolution spatiale** : Taille des plus petits détails qu'un capteur peut identifier, exprimée comme la taille d'un pixel. Une résolution spatiale élevée signifie des pixels plus petits et plus de détails, tandis qu'une résolution basse correspond à des pixels plus grands et moins de détails.
- ✚ **Résolution temporelle** : fréquence à laquelle des données ou des images sont capturées pour un même endroit par un capteur ou un satellite. Une haute résolution temporelle signifie que les données sont acquises fréquemment, tandis qu'une faible résolution temporelle signifie qu'il y a un laps de temps plus long.
- ✚ **Shapefile** : Format couramment utilisé pour stocker des données vectorielles (points, lignes, polygones) et leurs attributs, répartis sur plusieurs fichiers (.shp, .shx, .dbf, etc.).
- ✚ **Vecteur** : Représentation géographique sous forme de points, lignes ou polygones, souvent utilisée pour des entités comme des limites administratives.
- ✚ **Raster** : Structure de données spatiales composée d'une grille régulière de cellules (pixels), où chaque cellule contient une valeur représentant une caractéristique de la surface.

Annexe

Tableau 1 : formule de calcul pour les différents indices spectraux

Indice	Nom complet	Formule de calcul
Domaine d'application : urbain (relatif aux zones bâties et aux villes)		
BLFEI	Built-Up Land Features Extraction Index	$((((G+R+S2)/3.0)-S1)/(((G+R+S2)/3.0)+S1))$
BRBA	Band Ratio for Built-up Area	$R/S1$
DBI	Dry Built-Up Index	$((B - T1)/(B + T1)) - ((N - R)/(N + R))$
EBBI	Enhanced Built-Up and Bareness Index	$(S1 - N) / (10.0 * ((S1 + T) ** 0.5))$
IBI	Index-Based Built-Up Index	$((((S1-N)/(S1+N))-(((N-R)*(1.0+L)/(N+R+L))+((G-S1)/(G+S1)))/2.0)/(((S1-N)/(S1+N))+(((N-R)*(1.0+L)/(N+R+L))+((G-S1)/(G+S1)))/2.0))$
NBAI	Normalized Built-up Area Index	$(S2 - S1/G)/(S2 + S1/G)$
Domaine d'application : sols (relatifs aux terres, sols nus ou agricoles)		
BaI	Bareness Index	$R + S1 - N$
BI/BSI	Bare Soil Index	$((S1 + R) - (N + B))/((S1 + R) + (N + B))$
BITM	Landsat TM-based Brightness Index	$((B**2.0)+(G**2.0)+(R**2.0))/3.0)**0.5$
BIXS	SPOT HRV XS-based Brightness Index	$((G**2.0)+(R**2.0))/2.0)**0.5$
DBSI	Dry Bareness Index	$((S1 - G)/(S1 + G)) - ((N - R)/(N + R))$
EMBI	Enhanced Modified Bare Soil Index	$(((((S1 - S2 - N)/(S1 + S2 + N)) + 0.5) - ((G - S1)/(G + S1)) - 0.5)/(((S1 - S2 - N)/(S1 + S2 + N)) + 0.5) + ((G - S1)/(G + S1)) + 1.5))$
Domaine d'application : végétation		
ARI	Anthocyanin Reflectance Index	$(1 / G) - (1 / RE1)$
ARI2	Anthocyanin Reflectance Index 2	$N * ((1 / G) - (1 / RE1))$
ARVI	Atmospherically Resistant Vegetation Index	$(N - (R - \text{gamma} * (R - B))) / (N + (R - \text{gamma} * (R - B)))$
ATSAVI	Adjusted Transformed Soil-Adjusted Vegetation Index	$\text{sla} * (N - \text{sla} * R - \text{slb}) / (\text{sla} * N + R - \text{sla} * \text{slb} + 0.08 * (1 + \text{sla} ** 2.0))$
AVI	Advanced Vegetation Index	$(N * (1.0 - R) * (N - R)) ** (1/3)$
BCC	Blue Chromatic Coordinate	$B / (R + G + B)$
BNDVI	Blue Normalized Difference Vegetation Index	$(N - B)/(N + B)$
Domaine d'application : eau		
ANDWI	Augmented Normalized Difference Water Index	$(B + G + R - N - S1 - S2)/(B + G + R + N + S1 + S2)$
AWEInsh	Automated Water Extraction Index	$4.0 * (G - S1) - 0.25 * N + 2.75 * S2$
AWEIsh	Automated Water Extraction Index with Shadows Elimination	$B + 2.5 * G - 1.5 * (N + S1) - 0.25 * S2$
FAI	Floating Algae Index	$N - (R + (S1 - R)*((\text{lambda}N - \text{lambda}R)/(\text{lambda}S1 - \text{lambda}R)))$
LSWI	Land Surface Water Index	$(N - S1)/(N + S1)$

Source : awesome-spectral-indices/output/spectral-indices-table.csv at [main · awesome-spectral-indices/awesome-spectral-indices.](https://main.awesome-spectral-indices/awesome-spectral-indices/)

Tableau 2 : Présentation des bandes spectrales

Les bandes spectrales sont des intervalles spécifiques dans le spectre électromagnétique détectés par les capteurs satellitaires.			
Bande spectrale	Nom standard	Description	Principales applications
Blue	B	Lumière visible - Bande bleue	Analyse des plans d'eau, détection de la turbidité, et parfois identification de certaines espèces de végétation.
Green	G	Lumière visible - Bande verte	Réflexion liée à la chlorophylle : utile pour surveiller la santé végétale et cartographier les zones agricoles ou forestières
Red	R	Lumière visible - Bande rouge	Indicateur clé pour la végétation et le stress végétal, utilisé dans plusieurs indices comme le NDVI.
NIR	N	Proche Infra-Rouge (Near Infrared)	Analyse de la biomasse et de la structure des plantes ; très utilisé pour évaluer la densité et la santé des végétaux.
SWIR1	S1	Infrarouge à onde courte 1	Mesure de l'humidité des sols et de la végétation ; analyse des zones arides, couverture terrestre et détection des feux.
SWIR2	S2	Infrarouge à onde courte 2	Identification des sols nus, minéraux, et analyse des zones brûlées ou impactées par des incendies.
Thermal 1	T1	Bande thermique 1	Mesure de la température de surface : utile pour étudier le climat, détecter les incendies ou des anomalies thermiques.
Thermal 2	T2	Bande thermique 2	Complément à T1 : affine les mesures thermiques et permet des analyses plus détaillées des températures de surface.
Red Edge 1	RE1	Bande rouge-edge (bord rouge) 1	Détection des variations subtiles de santé végétale, particulièrement utile pour les zones cultivées et forestières.
Red Edge 2	RE2	Bande rouge-edge (bord rouge) 2	Analyse avancée des zones végétales et des transitions avec le sol nu ou les zones dégradées.

Source : awesome-spectral-indices/output/spectral-indices-table.csv at main · awesome-spectral-indices/awesome-spectral-indices.

Table de matière

Décharge.....	i
Remerciements	ii
Avant-propos	iii
Sommaire	iv
Liste des sigles et acronymes	v
Liste des tableaux	vi
Résumé.....	vii
Introduction	1
CHAPITRE 1 : Présentation des indices calculés	3
I- Indices spectraux spécifiques à la surveillance des eaux	3
II- Indices spectraux spécifiques à la végétation	5
III- Indices spectraux pour l’observation des sols	8
IV- Indices spectraux pour l’observation des zones urbaines	12
V- Autres indices	14
CHAPITRE 2 : Méthodologie de calcul des indices spectraux	16
I- Méthodologie de calcul des indices spectraux	16
I-1. Source et importation des données	16
I-2. Traitement des rasters importés	16
I-3. Calcul des indices	17
I-4. Visualisation des indices calculés	17
I-5. Exportation des indices calculés	18
II- Traitement des rasters obtenus et shapefiles.....	18
II-1. Packages et fonctions utilisées	18
II-2. Agrégation suivant les niveaux administratifs	20
II-1. Extraction des différentes valeurs des rasters pour les régions	21

II-2.	Extraction des différentes valeurs des rasters pour les départements	21
II-3.	Génération des graphiques	22
II-4.	Présentation textuelle des résultats obtenus au niveau des régions de chaque pays	23
CHAPITRE 3 : Méthodologie de conception de l'application		24
I-	Présentation des principaux modules et des bibliothèques utilisées.....	24
II-	Fonctionnalités de l'application.....	26
II-1.	Chargement et exploration des données	26
II-2.	Visualisation cartographique.....	27
II-3.	Téléchargement des rasters	28
II-4.	Navigation dans les onglets résumés, tableau et graphique	29
II-5.	Personnalisation et esthétique	29
III-	Difficultés rencontrées.....	30
IV-	Limites de l'application	31
Conclusion.....		32
Glossaire.....		a
Annexe		b
Table de matière		d