



République du Sénégal

Un Peuple-Un But- Une Foi

MINISTERE DE L'ECONOMIE, DU PLAN ET DE LA COOPERATION

AGENCE NATIONALE DE LA STATISTIQUE ET DE LA DEMOGRAPHIE



ECOLE NATIONALE DE LA STATISTIQUE ET DE L'ANALYSE ECONOMIQUE PIERRE NDIAYE

(ENSAE-SENEGAL)



RAPPORT DE SYNTHÈSE

Travaux Pratiques de Statistique Exploratoire Spatiale

Rédigé par :

Gérald Guerngué ADDJITA

Elève Ingénieur Statisticien Economiste

Sous la supervision de :

M. Aboubacar HEMA

Ingénieur Statisticien Economiste

Table de matières

Table de matières	i
Introduction	1
TP 1 : Analyse Spatiale du Paludisme au Sénégal	2
1.1 Contexte et objectifs.....	2
1.2 Données utilisées.....	2
1.3 Méthodologie et outils	2
1.4 Analyses réalisées.....	2
1.5 Principaux résultats	3
TP 2 : Analyse des Distances entre Infrastructures et Aires Protégées au Sénégal	4
2.1 Problématique	4
2.2 Sources de données.....	4
2.3 Plateforme et méthodes.....	4
2.4 Résultats et exports	4
TP 3 : Analyse de l'Accessibilité aux Infrastructures Essentielles au Sénégal	6
3.1 Objectifs et enjeux.....	6
3.2 Architecture des données.....	6
3.3 Fonctionnalités développées.....	6
3.4 Analyses thématiques.....	6
3.5 Contributions et applications	7
TP 4 : Identification des Terres Arables au Burundi	8
4.1 Contexte et finalité du projet	8
4.2 Données mobilisées.....	8
4.3 Chaîne de traitement des données	8
4.4 Interface interactive et visualisation	9
4.5 Restitution statistique.....	9
TP 5 : Analyse du Ratio LCRPGR en Tanzanie	10
5.1 Cadre conceptuel et objectifs.....	10
5.2 Architecture des données	10
5.3 Méthodologie d'analyse.....	10
5.4 Cadre d'interprétation.....	11
5.5 Optimisations techniques et validation	11
5.6 Livrables et applications	11

TP 6 : Analyse Spatiale par Indices Spectraux au Sénégal	13
6.1 Présentation générale	13
6.2 Données communes.....	13
6.3 Indicateur 1 : NDTI - Turbidité des eaux	13
6.4 Indicateur 2 : NDVI - Végétation et biomasse.....	14
6.5 Indicateur 3 : NDBI - Urbanisation.....	14
6.6 Indicateur 4 : BAI - Zones brûlées.....	14
6.7 Indicateur 5 : BSI - Sol nu	15
6.8 Limites et perspectives	15
Conclusion.....	16
Conclusion.....	18
Annexes : Eléments d'interprétations des ACM.....	20

Introduction

Ce rapport présente une synthèse complète des six travaux pratiques réalisés dans le cadre du cours de statistique exploratoire spatiale durant l'année académique 2025-2026. Ces travaux ont permis d'explorer différentes dimensions de l'analyse géospatiale en s'appuyant sur des technologies de pointe telles que R/RStudio, Google Earth Engine et Python.

L'objectif de ces travaux pratiques était double : d'une part, maîtriser les outils et méthodes de la géomatique moderne pour le traitement et l'analyse de données spatiales ; d'autre part, appliquer ces compétences à des problématiques concrètes de santé publique, d'environnement, d'urbanisation et de développement territorial en Afrique subsaharienne.

Chaque travail pratique a abordé une thématique spécifique : l'évolution spatio-temporelle du paludisme, les relations spatiales entre infrastructures et zones protégées, l'accessibilité des populations aux services essentiels, l'identification des terres cultivables, l'analyse de l'étalement urbain, et enfin la caractérisation environnementale par télédétection. Cette diversité thématique a permis d'acquérir une vision panoramique des applications de la géomatique dans les domaines de la santé, de l'environnement et de l'aménagement du territoire.

TP 1 : Analyse Spatiale du Paludisme au Sénégal

1.1 Contexte et objectifs

Le premier travail pratique s'inscrit dans une problématique de santé publique majeure en Afrique subsaharienne : le paludisme à *Plasmodium falciparum*. L'objectif principal était d'analyser l'évolution spatio-temporelle du taux d'incidence de cette maladie sur le territoire sénégalais sur une période de 25 ans, de 2000 à 2024. Cette analyse longitudinale permet de comprendre la dynamique de la maladie et d'identifier les zones géographiques les plus touchées au fil du temps.

1.2 Données utilisées

Pour mener à bien cette analyse, deux types de données géospatiales ont été mobilisés. D'une part, des données raster provenant de la base de données mondiale sur le paludisme (Malaria Atlas), fournissant des informations sur le taux d'incidence de la maladie avec une résolution spatiale fine. D'autre part, des données vectorielles issues de GADM (Database of Global Administrative Areas), comprenant les limites administratives du Sénégal à différents niveaux (pays, régions, départements), essentielles pour l'agrégation et la visualisation des statistiques sanitaires.

1.3 Méthodologie et outils

L'analyse a été réalisée dans l'environnement R/RStudio, reconnu pour sa puissance en matière de traitement statistique et cartographique. Plusieurs packages spécialisés ont été utilisés de manière complémentaire. Le package `sf` a permis la manipulation efficace des données vectorielles, tandis que `terra` (ou `raster` selon les versions) a servi au traitement des données raster. Pour la création de cartes thématiques de qualité, `tmap` s'est révélé particulièrement adapté, offrant une syntaxe intuitive pour la production de visualisations complexes. Les cartes interactives ont été générées grâce à `leaflet`, permettant une exploration dynamique des données par zoom et déplacement. Enfin, `ggplot2` a complété la palette d'outils pour les visualisations statistiques complémentaires, tandis que `dplyr` a facilité les opérations de manipulation et de transformation des données.

1.4 Analyses réalisées

Le travail d'analyse s'est articulé autour de quatre axes principaux. Premièrement, une cartographie statique a été produite pour l'année pivot de 2010, permettant de visualiser la distribution spatiale du taux d'incidence à travers des cartes thématiques complètes incluant légende, échelle et orientation. Deuxièmement, une carte interactive au format HTML a été développée, offrant aux utilisateurs la possibilité d'explorer les données de manière dynamique avec des fonctionnalités de zoom, de déplacement et d'affichage d'informations détaillées au survol des zones d'intérêt.

Troisièmement, une analyse comparative multi-annuelle a été conduite pour identifier les évolutions significatives entre plusieurs années clés de la période d'étude. Cette approche comparative a permis de distinguer les zones à forte endémie persistante des zones ayant connu

une amélioration de la situation sanitaire. Quatrièmement et enfin, une analyse de l'évolution temporelle sur l'ensemble de la période 2000-2024 a été réalisée, mettant en évidence les tendances à long terme et les variations régionales du paludisme au Sénégal.

1.5 Principaux résultats

Les analyses ont permis d'établir une cartographie précise de la distribution spatiale du paludisme sur le territoire sénégalais, révélant des disparités géographiques importantes. Les zones à forte endémie ont été clairement identifiées, permettant ainsi de cibler les interventions sanitaires de manière plus efficace. L'étude temporelle a mis en évidence l'évolution de la maladie au fil des années, avec des tendances contrastées selon les régions administratives. Ces résultats constituent une base solide pour la planification des politiques de lutte contre le paludisme et l'allocation optimale des ressources sanitaires.

TP 2 : Analyse des Distances entre Infrastructures et Aires Protégées au Sénégal

2.1 Problématique

Le deuxième travail pratique aborde une thématique environnementale essentielle : la relation spatiale entre les infrastructures humaines et les aires protégées. Cette analyse revêt une importance capitale pour la gestion durable du territoire, car elle permet d'évaluer les pressions anthropiques potentielles sur les espaces naturels protégés et d'identifier les zones de conflit potentiel entre développement et conservation.

2.2 Sources de données

Trois sources de données vectorielles ont été mobilisées pour cette étude. Les limites administratives à cinq niveaux (pays, régions, départements, communes, arrondissements) proviennent de GADM et fournissent le cadre spatial de référence. Les données d'infrastructures, extraites d'OpenStreetMap, couvrent neuf catégories distinctes incluant les villes, hôpitaux, écoles et autres équipements publics, représentés sous forme de points géolocalisés. Enfin, les aires protégées, issues de Protected Planet (World Database on Protected Areas - WDPA), comprennent trois niveaux de protection et sont représentées à la fois par des points et des polygones selon leur nature.

2.3 Plateforme et méthodes

L'analyse a été entièrement réalisée sur Google Earth Engine (GEE), une plateforme cloud de traitement géospatial massif, en utilisant le langage JavaScript. Cette plateforme offre l'avantage de pouvoir traiter de grandes quantités de données spatiales sans nécessiter de puissance de calcul locale importante. La méthodologie s'est articulée autour de quatre fonctionnalités principales.

Premièrement, le calcul des distances a été effectué grâce à la transformation de distance euclidienne rapide (Fast Distance Transform), générant neuf rasters de distance, un pour chaque type d'infrastructure. Cette approche permet de quantifier précisément l'éloignement de chaque point du territoire par rapport aux infrastructures les plus proches. Deuxièmement, des statistiques zonales ont été calculées pour chaque aire protégée, incluant la distance moyenne, minimale et maximale aux différentes infrastructures, ainsi que des statistiques agrégées par niveau administratif.

Troisièmement, une analyse de proximité a été conduite en créant une zone tampon de 10 kilomètres autour de chaque aire protégée. Cette zone critique a permis d'identifier et de comptabiliser les infrastructures situées à proximité immédiate des espaces protégés, constituant ainsi des sources potentielles de pression anthropique. Quatrièmement, une visualisation interactive a été développée avec superposition de couches cartographiques activables ou désactivables à la demande, offrant une exploration flexible des résultats.

2.4 Résultats et exports

Les résultats de l'analyse ont été exportés sous forme de fichiers CSV dans Google Drive, facilitant leur exploitation ultérieure dans d'autres logiciels d'analyse ou de reporting. Les visualisations cartographiques montrent les aires protégées en vert, les zones tampons de 10 kilomètres en jaune, les rasters de distance avec un gradient de couleur allant du bleu au rouge, et les points d'infrastructures dans la zone critique en rouge. Ces représentations permettent une compréhension immédiate des enjeux spatiaux et facilitent l'identification des aires protégées les plus exposées aux pressions anthropiques.

TP 3 : Analyse de l'Accessibilité aux Infrastructures Essentielles au Sénégal

3.1 Objectifs et enjeux

Le troisième travail pratique se concentre sur une problématique fondamentale du développement territorial : l'accessibilité géographique des populations aux infrastructures et services essentiels. Cette analyse multidimensionnelle vise à évaluer la couverture spatiale des équipements de santé, d'éducation, des réseaux de transport et des ressources en eau à travers le Sénégal. L'objectif est de mettre en évidence les disparités territoriales en matière d'accès aux services de base et d'identifier les zones sous-équipées nécessitant des interventions prioritaires.

3.2 Architecture des données

Le projet s'appuie sur une architecture de données complexe combinant informations vectorielles et raster. Les données vectorielles comprennent les limites administratives (régions, frontières nationales), les infrastructures de santé (hôpitaux, cliniques, pharmacies), les établissements d'éducation (écoles, collèges, lycées, universités), les localités (villes, villages, hameaux, banlieues), le réseau de transport (routes bitumées, non bitumées, voies ferrées) et les ressources en eau (cours d'eau). Les données raster apportent une dimension démographique à l'analyse avec la population totale et la densité de population, permettant ainsi de pondérer l'accessibilité par la concentration humaine.

3.3 Fonctionnalités développées

Le travail a donné lieu au développement d'une application cartographique interactive particulièrement riche en fonctionnalités. La cartographie interactive permet la visualisation simultanée de toutes les infrastructures avec activation ou désactivation des couches par catégorie, le tout sur une vue hybride combinant imagerie satellite et carte traditionnelle. Les zones tampons d'accessibilité, calculées à trois distances différentes (5, 10 et 20 kilomètres), visualisent la couverture géographique des services autour de chaque infrastructure.

Des statistiques nationales sont calculées automatiquement, avec décompte précis des infrastructures par catégorie et export possible en format CSV. Les cartes choroplèthes offrent une visualisation thématique de la distribution spatiale des hôpitaux, des écoles et de la population, facilitant l'identification visuelle des déséquilibres territoriaux. L'analyse de couverture calcule le pourcentage de population non desservie par chaque type d'infrastructure à différentes échelles de distance, fournissant ainsi des indicateurs quantitatifs précis de l'accessibilité.

Enfin, l'interactivité est poussée avec la possibilité de cliquer sur n'importe quel point de la carte pour obtenir des informations détaillées dans un rayon de 10 kilomètres, un panneau de statistiques nationales se mettant à jour en temps réel, et des boutons dédiés pour l'export des résultats et la réinitialisation de la vue.

3.4 Analyses thématiques

L'analyse s'est déclinée selon quatre thématiques principales. Pour les infrastructures de santé, la distribution spatiale des hôpitaux, cliniques et pharmacies a été cartographiée, les zones de couverture sanitaire délimitées, et le pourcentage de population ayant accès aux services de santé calculé à différentes échelles. L'infrastructure éducative a fait l'objet d'une analyse similaire, permettant d'évaluer l'accessibilité aux différents niveaux d'enseignement et la couverture éducative du territoire.

La dimension démographique a été intégrée à travers la visualisation de la population totale et de la densité, mettant en évidence la répartition spatiale de la population et permettant d'établir des corrélations entre concentration démographique et présence d'infrastructures. Enfin, les aspects de transport et mobilité ont été analysés en cartographiant le réseau routier (bitumé et non bitumé) et ferroviaire, et en évaluant l'accessibilité générale du territoire.

3.5 Contributions et applications

Les résultats de cette analyse fournissent une base factuelle précieuse pour la planification territoriale et la prise de décision en matière d'aménagement du territoire. L'identification des zones à faible accessibilité permet d'orienter les investissements publics vers les territoires les plus défavorisés. La quantification de la couverture géographique par région facilite l'établissement de priorités d'intervention et l'allocation rationnelle des ressources. Le calcul du pourcentage de population non desservie fournit des indicateurs clairs pour le suivi des politiques publiques. Enfin, la visualisation des disparités régionales constitue un outil puissant de communication et de sensibilisation aux enjeux de l'équité territoriale.

TP 4 : Identification des Terres Arables au Burundi

4.1 Contexte et finalité du projet

Le quatrième travail pratique s'inscrit dans une problématique agricole et de sécurité alimentaire cruciale pour le Burundi. L'objectif principal consiste à réaliser une analyse spatiale exhaustive des terres arables afin d'estimer avec précision la superficie totale des zones réellement aptes à l'agriculture. Cette estimation ne se limite pas à identifier les terres théoriquement cultivables, mais tient compte des multiples contraintes physiques et légales qui restreignent leur exploitation effective. L'approche méthodologique repose sur l'identification et la cartographie des terres cultivables, en excluant systématiquement les espaces non exploitables ou soumis à des restrictions légales.

4.2 Données mobilisées

L'analyse s'appuie sur un ensemble riche et diversifié de données géospatiales provenant de sources reconnues. Les limites administratives du Burundi à trois niveaux (niveau 0 pour le pays, niveau 1 pour les 17 provinces, niveau 2 pour les 133 communes) proviennent de GADM et constituent le cadre spatial de référence. Ces données administratives sont datées de 2015, reflétant l'organisation territoriale antérieure à la réforme qui a conduit à la création de la province de Rumonge.

Les données GFSAD (Global Food Security-support Analysis Data) de 2015 définissent la base arable en identifiant les zones actuellement cultivées. Les données Hansen GFC (Global Forest Change) permettent d'intégrer les forêts déboisées entre 2000 et 2015 comme terres potentiellement arables. Plusieurs masques d'exclusion sont appliqués : les zones protégées issues de WDPA (World Database on Protected Areas) constituent un masque d'exclusion légal, les eaux permanentes identifiées par JRC GSW (Global Surface Water) avec un seuil d'occurrence supérieur à 75% représentent un masque d'exclusion physique lié à l'hydrologie.

Les données topographiques SRTM permettent d'exclure les pentes supérieures à 15 degrés, jugées trop raides pour l'agriculture. Enfin, les données GMIS (Global Man-made Impervious Surface) identifient les surfaces imperméables (zones bâties, routes) dépassant 10% d'imperméabilité, constituant un dernier masque d'exclusion.

4.3 Chaîne de traitement des données

Le traitement des données s'effectue en plusieurs étapes méthodiques. Le pré-traitement consiste à convertir toutes les couches d'entrée en masques binaires où la valeur 1 indique la présence de la caractéristique et 0 son absence. Une attention particulière est portée au nettoyage de la couche GMIS dont les valeurs spéciales (255 pour NoData et 200 pour Non-HBASE) sont traitées pour garantir la précision du masque d'exclusion.

Le calcul de la base arable s'effectue par union logique (opération OR) de deux composantes complémentaires : les zones actuellement cultivées selon GFSAD 2015, et les zones de déforestation récente identifiées par Hansen GFC entre 2000 et 2015. Cette approche

permet de capturer à la fois les terres agricoles existantes et les zones récemment déboisées susceptibles d'être converties en terres cultivables.

L'application des exclusions se fait par création d'une zone d'exclusion totale résultant de l'union (OR) de quatre masques de contraintes : eaux permanentes, pentes fortes, zones protégées et surfaces imperméables. Les terres arables finales sont obtenues en retirant cette zone d'exclusion totale de la base arable, ne conservant ainsi que les zones à la fois potentiellement arables et non soumises à des contraintes physiques ou légales.

4.4 Interface interactive et visualisation

L'application développée offre une interface cartographique interactive particulièrement élaborée. La superposition multi-couches permet d'activer ou de désactiver chaque couche intermédiaire (limites administratives, terres cultivées, forêts déboisées, pentes, zones protégées, eaux permanentes, surfaces imperméables) ainsi que les couches dérivées (base arable, zone d'exclusion totale, terres arables finales). Cette fonctionnalité permet de vérifier visuellement l'application des critères d'inclusion et d'exclusion.

Un panneau de statistiques nationales, positionné dans le coin supérieur gauche, affiche en temps réel les indicateurs clés : nombre de provinces et de communes, superficie totale du Burundi en kilomètres carrés, superficie totale des terres arables, et ratio national représentant le pourcentage du territoire national classé comme terre arable. Ces statistiques agrégées fournissent une vue d'ensemble immédiate du potentiel agricole du pays.

La fonctionnalité d'interrogation par clic permet à l'utilisateur d'obtenir instantanément les statistiques locales pour n'importe quel point de la carte. Un panneau interactif dans le coin inférieur gauche affiche alors les informations détaillées pour la commune (nom, superficie totale, superficie arable, ratio arable) et pour la province d'appartenance, facilitant l'identification rapide des unités administratives ayant un fort ou faible potentiel agricole.

4.5 Restitution statistique

L'analyse produit automatiquement six diagrammes en barres affichés dans la console de Google Earth Engine, présentant les classements des provinces et communes selon trois critères : superficie arable, ratio arable et superficie totale. Ces visualisations permettent d'identifier rapidement les zones prioritaires pour l'expansion agricole. Deux fichiers CSV sont générés pour export vers Google Drive : Stats_Communes.csv contenant les données des 133 communes avec leurs caractéristiques (type, nom, province d'appartenance, superficies et ratios), et Stats_Provinces.csv présentant les mêmes informations pour les 17 provinces. Ces exports garantissent la traçabilité des résultats, l'interopérabilité avec d'autres outils d'analyse, et facilitent l'intégration dans les systèmes de planification agricole et d'aide à la décision.

TP 5 : Analyse du Ratio LCRPGR en Tanzanie

5.1 Cadre conceptuel et objectifs

Le cinquième travail pratique aborde la problématique de l'étalement urbain et de son efficacité à travers l'analyse de l'indicateur **ODD 11.3.1**, communément appelé **LCRPGR** (Ratio de la Consommation des Terres par rapport au Taux de Croissance Démographique). Cet indicateur, développé dans le cadre des Objectifs de Développement Durable des Nations Unies, permet d'évaluer si la croissance spatiale des zones urbaines est proportionnelle à la croissance démographique, ou si au contraire elle révèle un étalement urbain inefficace. L'objectif principal est d'évaluer l'efficacité de la gestion de l'étalement urbain en Tanzanie en comparant la vitesse d'expansion des surfaces bâties avec le taux de croissance démographique sur la période 2017-2022.

5.2 Architecture des données

L'analyse s'appuie sur trois sources de données principales couvrant la période d'étude. Les limites administratives de Tanzanie proviennent de GADM et fournissent les géométries des régions tanzaniennes (niveau ADMIN1) pour les années 2017 et 2022. Les données d'occupation du sol issues d'ESRI Global Land Cover, avec une résolution de 10 mètres, permettent d'identifier les surfaces bâties (classe 7) au début et à la fin de la période d'étude, information essentielle pour le calcul du **LCR** (Land Consumption Rate). Les données démographiques proviennent de WorldPop et fournissent des rasters de population à 100 mètres de résolution pour 2017 et 2022, indispensables au calcul du **PGR** (Population Growth Rate).

5.3 Méthodologie d'analyse

L'analyse suit un processus de traitement géospatial en quatre étapes clés, entièrement automatisé dans Google Colab avec Python. La première étape consiste en la collecte et la préparation des données. Les données ESRI Global Land Cover subissent un mosaïquage des tuiles pour constituer une couverture complète du territoire. Les rasters de population WorldPop font l'objet d'une correction des facteurs d'échelle pour obtenir des valeurs démographiques réelles. Une harmonisation des systèmes de coordonnées est effectuée avec reprojection en UTM Zone 35S pour garantir la cohérence des calculs de superficie.

La deuxième étape porte sur le calcul des indicateurs clés. Pour chaque région, trois indicateurs sont calculés. Le LCR (Land Consumption Rate) représente le taux annuel de croissance des surfaces bâties et se calcule selon la formule :

$$LCR = \left(\frac{V_{2022} - V_{2017}}{V_{2017}} \right) / 5$$

où **V** représente la superficie bâtie.

Le **PGR** (Population Growth Rate) mesure le taux annuel de croissance démographique selon la formule :

$$PGR = \ln\left(\frac{Pop_{2022}}{Pop_{2017}}\right)$$

Le **LCRPGR**, qui est l'indicateur ODD 11.3.1, est simplement le ratio **LCR/PGR**. Les calculs sont effectués à deux échelles : régionale pour les 31 régions de Tanzanie, et nationale par agrégation des valeurs régionales.

5.4 Cadre d'interprétation

Le ratio **LCRPGR** est interprété selon trois catégories distinctes, chacune révélant un mode de développement urbain spécifique. Un ratio supérieur à 1 indique un étalement urbain où les terres sont consommées plus rapidement que la croissance démographique ne le justifie, signalant une utilisation inefficace de l'espace et des ressources. Un ratio inférieur à 1 révèle un processus de densification où la population croît plus vite que l'expansion spatiale, suggérant une meilleure gestion de l'espace urbain. Un ratio égal à 1 indique un équilibre relatif entre croissance spatiale et démographique.

Des indicateurs secondaires complètent l'analyse pour affiner la compréhension des dynamiques territoriales : la densité urbaine exprimée en habitants par kilomètre carré, la superficie bâtie par habitant en mètres carrés par personne, et la variation absolue des surfaces bâties en kilomètres carrés. Ces indicateurs permettent de contextualiser le ratio **LCRPGR** et d'identifier les facteurs spécifiques influençant les modes de développement urbain dans chaque région.

5.5 Optimisations techniques et validation

Plusieurs optimisations techniques ont été implémentées pour garantir la robustesse de l'analyse. Les réductions spatiales utilisent des échelles de calcul adaptatives, avec une résolution de 50 mètres pour les surfaces bâties afin d'optimiser le temps de traitement tout en préservant la précision. La gestion des erreurs intègre un contrôle robuste des valeurs nulles et des divisions par zéro, évitant ainsi les biais dans les résultats. L'agrégation parallèle traite chaque région indépendamment pour minimiser la charge mémoire et accélérer les calculs.

La validation des résultats s'effectue selon plusieurs contrôles de qualité. Une vérification de la plausibilité démographique compare les résultats avec les estimations officielles des organismes statistiques nationaux et internationaux. Une analyse de cohérence spatiale permet de détecter visuellement les valeurs aberrantes et de s'assurer de la logique géographique des résultats. Ces validations garantissent la fiabilité des indicateurs produits.

5.6 Livrables et applications

Le projet produit plusieurs types de livrables exploitables. Un fichier CSV complet présente un tableau de 32 lignes (31 régions plus une ligne nationale) et 15 colonnes d'indicateurs, permettant des analyses statistiques approfondies. Une carte interactive HTML offre une visualisation choroplèthe colorée selon le ratio **LCRPGR**, avec une barre de recherche de région facilitant la navigation, un panneau d'informations nationales permanentes,

et des fonctionnalités d'interaction au survol et au clic. Des graphiques analytiques permettent la comparaison visuelle du **LCR** versus le **PGR** et le classement des régions selon différents indicateurs. Ces résultats fournissent une base quantitative pour évaluer l'efficacité des politiques de gestion du territoire, identifier les régions prioritaires nécessitant des interventions de densification, suivre les progrès vers l'ODD 11, et éclairer les décisions d'aménagement urbain et régional.

TP 6 : Analyse Spatiale par Indices Spectraux au Sénégal

6.1 Présentation générale

Le sixième et dernier travail pratique constitue un projet collectif ambitieux visant à analyser plusieurs dimensions environnementales et territoriales du Sénégal à partir d'indices spectraux calculés sur des images satellites Sentinel-2. Cette approche par télédétection permet de caractériser finement l'environnement à travers différents indicateurs complémentaires : qualité des eaux, vigueur de la végétation, niveau d'urbanisation, zones brûlées et surfaces de sol nu. L'étude est réalisée à l'échelle des 45 départements sénégalais pour l'année 2018, avec pour objectif d'intégrer ces indicateurs environnementaux aux données socio-économiques de l'enquête EHCVM (Enquête Harmonisée sur les Conditions de Vie des Ménages), permettant ainsi une analyse conjointe environnement-conditions de vie.

6.2 Données communes

L'ensemble du projet s'appuie sur un socle de données communes garantissant la cohérence des analyses. L'imagerie satellitaire provient du satellite Sentinel-2 du programme Copernicus, utilisant spécifiquement la collection COPENICUS/S2_SR_HARMONIZED qui fournit des données de réflectance de surface corrigées atmosphériquement. Les images couvrent l'année 2018 dans son intégralité (1er janvier au 31 décembre) avec une résolution spatiale de 10 à 20 mètres selon les bandes spectrales. Un prétraitement rigoureux incluant correction atmosphérique et masquage des nuages est appliqué à l'ensemble des images.

Les limites administratives proviennent de GADM et comprennent le niveau 0 (Sénégal dans son ensemble) et le niveau 2 (45 départements), projetées en WGS84 (EPSG:4326). Les données socio-économiques de l'enquête EHCVM 2018 comprennent la base individu et la base welfare, avec comme variables de liaison les identifiants de grappe, de ménage et de département, facilitant la fusion ultérieure avec les indicateurs environnementaux.

6.3 Indicateur 1 : NDTI - Turbidité des eaux

Le premier indicateur, le NDTI (Normalized Difference Turbidity Index), permet d'évaluer et de cartographier la turbidité des eaux de surface afin d'identifier les zones à risque environnemental et les priorités de gestion hydrique. Cet indice estime la concentration en matières en suspension dans l'eau selon la formule : $NDTI = (Rouge - Vert) / (Rouge + Vert)$, utilisant la bande 4 (665 nm) pour le rouge et la bande 3 (560 nm) pour le vert.

Le fondement physique de cet indice repose sur le fait que les eaux turbides présentent une réflectance plus élevée dans le rouge en raison de la diffusion par les particules en suspension, contrairement aux eaux claires. L'interprétation des valeurs suit une classification en cinq catégories : les valeurs supérieures à 0,3 indiquent une eau très turbide avec forte charge sédimentaire, les valeurs entre 0,1 et 0,3 correspondent à une eau turbide de qualité dégradée, les valeurs entre -0,1 et 0,1 révèlent une eau modérément claire de qualité

acceptable, les valeurs entre -0,3 et -0,1 signalent une eau claire de bonne qualité, et les valeurs inférieures à -0,3 correspondent à du non-eau ou de la végétation, hors périmètre hydrique.

6.4 Indicateur 2 : NDVI - Végétation et biomasse

Le NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) est particulièrement pertinent dans le contexte sénégalais où l'agriculture et le pastoralisme occupent une place centrale dans l'économie. Cet indice permet d'évaluer la vigueur de la végétation et les contrastes agro-écologiques entre les différentes régions du pays. Il se calcule selon la formule : $NDVI = (B8 - B4) / (B8 + B4)$, où **B8** représente le proche infrarouge (NIR) et **B4** le rouge visible.

La méthodologie spécifique commence par un masquage rigoureux des nuages basé sur la bande SCL (Scene Classification Layer). Les pixels conservés incluent la végétation, le sol nu, l'eau, les nuages fins et les ombres, tandis que les pixels exclus comprennent les nuages opaques et les pixels saturés ou défectueux. Le NDVI est calculé pour chaque image Sentinel-2, puis une moyenne temporelle annuelle est établie sur l'ensemble de l'année 2018. L'agrégation départementale utilise la fonction `reduceRegions` avec la moyenne comme statistique, et une moyenne nationale est également calculée directement sur la mosaïque NDVI finale. Une harmonisation des noms administratifs est effectuée pour assurer la cohérence avec les bases EHCVM, suivie de l'intégration du NDVI moyen par département aux bases individu et welfare.

6.5 Indicateur 3 : NDBI - Urbanisation

Le NDBI (Normalized Difference Built-up Index) mesure l'intensité de l'urbanisation et des surfaces bâties à l'échelle départementale. Cet indicateur est crucial pour comprendre la dynamique d'artificialisation des terres et identifier les zones de forte pression urbaine. La formule utilisée est : $NDBI = (B11 - B8) / (B11 + B8)$, où **B11** représente l'infrarouge à ondes courtes (SWIR) et **B8** le proche infrarouge (NIR).

La méthodologie spécifique pour le NDBI comprend la sélection des images Sentinel-2 SR pour 2018, suivie d'un masquage basé sur la bande SCL qui conserve la végétation, l'eau et les nuages fins, tout en excluant les nuages opaques, les pixels défectueux, les ombres et les sols nus. Le NDBI est calculé pixel par pixel, puis une moyenne annuelle est établie et agrégée par département. La visualisation et la restitution incluent des cartes de l'urbanisation, des choroplèthes départementales, ainsi que des graphiques de comparaison et des analyses de régression permettant d'explorer les relations entre l'urbanisation et d'autres variables socio-économiques.

6.6 Indicateur 4 : BAI - Zones brûlées

Le BAI (Burned Area Index) vise à analyser et quantifier les zones brûlées au Sénégal à l'échelle départementale pour l'année 2018, afin de soutenir la gestion environnementale et agricole. Cet indicateur est particulièrement important dans le contexte des pratiques agricoles traditionnelles et des risques de feux de brousse. La méthodologie spécifique comprend la préparation des shapefiles départementaux et leur conversion en `FeatureCollection` pour Google Earth Engine, suivi d'un filtrage spatial et temporel des images Sentinel-2.

Le calcul du BAI s'effectue à partir des bandes rouge et NIR, et un masque est appliqué pour distinguer la végétation, les sols nus brûlés, l'eau et les zones urbaines. Les

résultats sont ensuite agrégés par département avec analyse statistique et visualisation. L'interprétation du **BAI** moyen, proposée par l'auteur en raison d'une littérature limitée sur les seuils standards, se décline en quatre catégories : les valeurs inférieures à 10 correspondent à du non-brûlé, les valeurs entre 10 et 50 indiquent de la végétation sèche, les valeurs entre 50 et 150 signalent des zones brûlées probables, et les valeurs supérieures à 150 confirment des zones brûlées.

6.7 Indicateur 5 : BSI - Sol nu

Le **BSI** (Bare Soil Index) permet d'identifier et de caractériser les surfaces minérales en les distinguant de la végétation et des plans d'eau. Le fondement physique de cet indice repose sur le fait que le sol nu présente une réflectance élevée dans le rouge et le **SWIR**, et plus faible dans le bleu et le **NIR**. Le **BSI** exploite cette opposition spectrale pour discriminer les surfaces selon la formule :
$$\text{BSI} = \frac{[(\text{SWIR} + \text{R}) - (\text{NIR} + \text{B})]}{[(\text{SWIR} + \text{R}) + (\text{NIR} + \text{B})]}$$
.

La méthodologie comprend la sélection des images Sentinel-2 pour 2018, le prétraitement et le masquage des pixels non valides, le calcul du **BSI** pixel par pixel, l'établissement d'une moyenne annuelle, l'agrégation à l'échelle départementale, et enfin la fusion avec les bases EHCVM. L'analyse spatiale attendue devrait révéler des valeurs plus faibles au sud, dans les zones plus humides et végétalisées, et des valeurs plus élevées au nord et à l'est, dans les zones plus sèches et sableuses. Il est important de noter que le **BSI** ne permet pas de distinguer parfaitement les sols nus naturels des surfaces artificialisées, et que l'interprétation doit être complétée par d'autres indices ou données d'occupation du sol.

6.8 Limites et perspectives

Malgré l'intérêt des résultats obtenus, ce projet présente plusieurs limites qu'il convient de souligner. Les images Sentinel-2, bien que de haute résolution spatiale, restent sensibles à la couverture nuageuse, particulièrement durant la saison des pluies. Malgré les procédures de masquage, certains pixels résiduels peuvent affecter les moyennes annuelles des indices, en particulier pour les zones humides et forestières. Sur le plan méthodologique, les indices spectraux utilisés reposent sur des signatures spectrales simplifiées et peuvent présenter des confusions entre certaines classes. Par exemple, les surfaces urbaines peuvent être confondues avec des sols nus pour le **BSI**, ou certaines zones sèches avec des zones brûlées pour le **BAI**. L'utilisation d'un indice isolé ne permet donc pas une discrimination parfaite des types de surfaces. Néanmoins, ce projet met en œuvre une approche intégrée combinant télédétection, analyse spatiale et données socio-économiques. La séparation méthodologique par indicateur garantit la rigueur scientifique, tandis que l'intégration finale permet une lecture multidimensionnelle du territoire sénégalais.

Conclusion

L'ensemble de ces six travaux pratiques a permis d'explorer de manière approfondie les multiples facettes de la statistique exploratoire spatiale et de ses applications concrètes aux problématiques de développement en Afrique subsaharienne. À travers des thématiques variées allant de la santé publique à l'environnement, en passant par l'aménagement du territoire et l'agriculture, nous avons pu constater la puissance et la polyvalence des outils géomatiques modernes.

La progression pédagogique suivie au cours de ces travaux a été particulièrement enrichissante. Nous avons débuté avec R et RStudio pour l'analyse du paludisme, puis nous sommes passés à Google Earth Engine avec JavaScript pour les analyses d'infrastructures et d'accessibilité, avant de combiner GEE et Python pour les analyses plus complexes d'occupation du sol et d'urbanisation, et enfin d'utiliser la télédétection pour caractériser l'environnement à travers les indices spectraux. Cette diversité d'outils et de langages a permis de développer une compétence technique polyvalente, essentielle pour tout professionnel de la géomatique.

Au-delà de l'acquisition de compétences techniques, ces travaux pratiques ont également permis de développer une compréhension fine des enjeux territoriaux contemporains en Afrique. Qu'il s'agisse de la lutte contre le paludisme, de la gestion des aires protégées, de l'amélioration de l'accessibilité aux services essentiels, de la sécurité alimentaire, de la maîtrise de l'étalement urbain ou de la caractérisation environnementale, toutes ces problématiques sont centrales pour le développement durable du continent.

Un aspect particulièrement notable de ces travaux est l'accent mis sur la production de livrables exploitables : cartes interactives, fichiers CSV exportables, tableaux de bord statistiques, graphiques analytiques. Cette orientation pratique garantit que les analyses produites ne restent pas de simples exercices académiques, mais peuvent réellement servir de support à la prise de décision et à la planification territoriale.

Les méthodologies développées dans ces travaux sont transposables à d'autres contextes géographiques et thématiques. Les compétences acquises en matière de traitement de données raster et vectorielles, de calcul d'indices spectraux, d'analyse de proximité, de statistiques zonales et de visualisation cartographique constituent un socle solide pour aborder

de nouvelles problématiques spatiales. La maîtrise de plateformes cloud comme Google Earth Engine ouvre également des perspectives considérables pour le traitement de données géospatiales à grande échelle.

En définitive, ces six travaux pratiques ont offert une formation complète et cohérente aux méthodes de la géomatique moderne, en combinant théorie et pratique, outils propriétaires et open source, analyses locales et régionales, données historiques et actuelles. Cette expérience collective a permis non seulement de développer des compétences techniques individuelles, mais aussi de renforcer nos capacités de travail en équipe, de documentation et de communication des résultats scientifiques. Les connaissances et savoir-faire acquis constituent un atout majeur pour notre future vie professionnelle dans les domaines de l'analyse spatiale, de la planification territoriale et de l'aide à la décision.

Nous tenons à remercier notre encadreur, **Monsieur Aboubacar HEMA**, pour son accompagnement et ses conseils tout au long de ce parcours d'apprentissage. Sa guidance a été déterminante dans la réussite de ces travaux et dans notre progression en statistique exploratoire spatiale. Nous remercions également nos camarades pour leur disponibilité et l'infaillible esprit d'équipe dont ils ont fait preuve.

Conclusion

- ❖ Cfs.ep (collectif formation société – éducation permanente) A propos de « Investment in human capital » de Theodore Schultz Schultz1 (1961) ;
- ❖ Léa Rochford. Contrepoint – Gary Becker et la notion de capital humain ;
- ❖ Georges Lane. Gary Becker et l'analyse économique des phénomènes sociaux ;
- ❖ BM. Le « Le projet sur le capital Humain », 2018 ;
- ❖ TOUHAMI ABDELKHALEK & DOROTHÉE BOCCANFUSO. « Indice du capital humain (HCI) De l'incertitude à la robustesse des comparaisons » ;
- ❖ CEDEAO. Rapport sur le développement du capital humain 2024 ;
- ❖ Sixième sommet Union européenne - Union africaine: une vision commune pour 2030 ;
- ❖ R.Palm « L'analyse des correspondances multiples et application ».

Annexes : Eléments d'interprétations des ACM

Annexe 1 : Education

- Contributions

MODALITES	CONTRIBUTION	
	Dimension 1	Dimension 2
ALFA_NON	11.1658820916078	0.0136164981550561
ALFA_OUI	9.02959113884693	0.0110113477891203
DIPLOME_AUCUN	6.40437009343979	0.00977762335515973
DIPLOME_CEPE	8.12869004663085	8.39190542010064
DIPLOME_BEPC	5.11318992889502	0.420964330079887
DIPLOME_BAC	1.58332788378224	9.06115568346597
DIPLOME_DEUG_DUT_BTS	0.245298021744192	4.66652277932514
DIPLOME_LICENCE	0.801319013623272	17.0235117018425
DIPLOME_MAITRISE	0.213585601586744	4.79746212299565
DIPLOME_MASTER/DEA/DESS	0.18533702901926	4.07868617975216
EDUC_HI_AUCUN	11.7859812637661	0.0192866714455709
EDUC_HI_MATERNELLE	0.000459365256028907	4.1027485801227e-05
EDUC_HI_SECOND. GL 1	8.6059187258223	8.55619872865709
EDUC_HI_SECOND. GL 2	4.42386734981651	0.0143190505895505
EDUC_HI_POSTSECONDAIRE	0.544079436892526	5.52381116402033
EDUC_HI_SUPERIEUR	1.93684090744706	35.4054424163716
SCOLARISATION_ACTUELLE_OUI	15.6114356163997	0.0255466747137015
SCOLARISATION_ACTUELLE_NON	11.7859812637672	0.0192866714455813

- Cosinus carré

MODALITES	COSINUS CARRE	
	Dimension 1	Dimension 2
ALFA_NON	0.658474438110157	0.000465403989249203
ALFA_OUI	0.658474438109393	0.000465403989248603
DIPLOME_AUCUN	0.749387798422131	0.000663104977179767
SCOLARISATION_ACTUELLE_OUI	0.893294179342426	0.00084723683107343
SCOLARISATION_ACTUELLE_NON	0.893294179342115	0.00084723683107343
EDUC_HI_AUCUN	0.89329417934203	0.000847236831072975
DIPLOME_CEPE	0.309523436692985	0.185204844523575
EDUC_HI_SECOND.GL1	0.331014657132142	0.190743450402972
EDUC_HI_SUPERIEUR	0.0651316446340638	0.690060086455037

Annexe 2 : Santé

- Contribution

MODALITES	CONTRIBUTION	
	Dim 1	Dim 2

HANDIG_OUI	16.2116760591622	1.70750818230671
HANDIT_OUI	13.7858255470064	4.83910142791047
DIFFICULTE_VISION_OUI_UN_PEU	3.78328090858991	8.65610155958902
DIFFICULTE_AUDITION_OUI_UN_PEU	4.44788678662441	6.18379496080994
DIFFICULTE_AUDITION_NE PEUT PAS DU TOUT	8.54942580496297	9.085000746368
DIFFICULTE_MARCHE_OUI_UN_PEU	2.91306707376293	9.15984639473481
DIFFICULTE_MARCHE_OUI_BEUCOUP	8.4591014669701	0.0735781663957657
DIFFICULTE_MARCHE_NE PEUT PAS DU TOUT	2.8885106262255	5.97602271334837
DIFFICULTE_MEMOIRE_OUI_UN_PEU	4.49422779996401	6.82887708487335
DIFFICULTE_MEMOIRE_OUI_BEAU	5.65077688874418	1.25724490038925
DIFFICULTE_VISION_OUI_UN_PEU COUP		
DIFFICULTE_MEMOIRE_NE PEUT PAS DU TOUT	1.72178927459416	11.6472906319005
DIFFICULTE_TACHES_OUI_UN_PEU	4.65447460183247	3.3326512791502
DIFFICULTE_TACHES_OUI_BEUCOUP	5.31576813120928	1.47155056991286
DIFFICULTE_TACHES_NE PEUT PAS DU TOUT	2.17907830165041	9.47875221469605
DIFFICULTE_COMMUNICATION_OUI_BEUCOUP	4.04199171286486	3.92864633946266
DIFFICULTE_COMMUNICATION_NE PEUT PAS DU TOUT	1.20249006419921	12.6823164052047

- Cosinus carrés

COSINUS CARRES

MODALITES	Dim 1	Dim 2
HANDIG_NON	0.691570924243636	0.0380836827944317
HANDIG_OUI	0.691570924243487	0.0380836827944228
HANDIT_NON	0.63642720505125	0.116801392243482
HANDIT_OUI	0.636427205050813	0.116801392243625
DIFFICULTE_VISION_NON_AUCUNE	0.34807166123867	0.122543002664742
DIFFICULTE_MARCHE_NON_AUCUNE	0.504591747195104	0.083529843832396
DIFFICULTE_MEMOIRE_NON_AUCUNE	0.435474711108689	0.0196274582697868
DIFFICULTE_TACHES_NON_AUCUNE	0.480858699003165	0.000726371865399034