

RÉSUMÉ COMPLET

Six Travaux Pratiques d'Analyse Géospatiale

Math SOCE, élève ingénieur statisticien économiste en ISE1 CL

Année académique 2025-2026

Février 2026

Table des matières

1	TP1 - Analyse Géospatiale avec Google Earth Engine	4
1.1	Description du projet	4
1.2	Objectifs pédagogiques	4
1.3	Structure du notebook	4
1.4	Technologies et bibliothèques utilisées	5
1.5	Sources de données	6
1.6	Concepts clés abordés	6
1.6.1	Raster	6
1.6.2	Vecteur	6
1.6.3	Projection	6
1.7	Analyses réalisées	7
1.8	Résultats attendus et compétences acquises	7
2	TP2 - Analyse Spatiale des Aires Protégées au Bénin	7
2.1	Description du projet	7
2.2	Objectifs	7
2.3	Sources de données	8
2.4	Technologies utilisées	9
2.5	Structure du projet	9
2.6	Workflow du projet	9
2.6.1	Phase 1 : Préparation des Données	9
2.6.2	Phase 2 : Harmonisation	10
2.6.3	Phase 3 : Analyses Spatiales	10
2.6.4	Phase 4 : Visualisation	10
2.6.5	Phase 5 : Statistiques et Export	10
2.7	Analyses réalisées	10
2.8	Résultats générés	11
3	TP3 - Analyse Géospatiale de la Couverture Sanitaire au Bénin	12
3.1	Objet du projet	12
3.2	Technologies utilisées	12
3.3	Sources de données	13
3.4	Méthodologie générale	13
3.4.1	Chargement et harmonisation des données	13
3.4.2	Classification des localités	13
3.4.3	Buffers autour des infrastructures	13
3.4.4	Population desservie (WorldPop)	13
3.4.5	Corridors de transport	14
3.4.6	Zones protégées	14

3.4.7	Visualisations	14
3.5	Architecture du projet	14
3.6	Résultats produits	15
4	TP4 - Identification des Terres Arables en Éthiopie	16
4.1	Présentation du projet	16
4.2	Technologies utilisées	16
4.3	Sources des données	17
4.4	Organisation du projet	17
4.5	Les trois scripts	18
4.5.1	Script 1 : Analyse des seuils d'eau permanente	18
4.5.2	Script 2 : Détermination statistique	19
4.5.3	Script 3 : Répartition régionale et départementale	20
4.6	Objectifs pédagogiques atteints	21
4.7	Résultats clés	21
5	TP5 - Calcul de l'Indicateur ODD 11.3.1 pour la RDC	21
5.1	Description du projet	21
5.2	Technologies et outils	22
5.3	Sources de données	23
5.4	Structure du projet	23
5.5	Tâches réalisées	24
5.5.1	1. Classification DEGURBA des zones urbaines	24
5.5.2	2. Calcul des surfaces bâties	24
5.5.3	3. Calcul de l'indicateur ODD 11.3.1	25
5.5.4	4. Cartographie et visualisation	25
5.6	Résultats principaux	25
6	TP6 - Analyse des Indices Spectraux et Fusion EHCVM pour le Niger	26
6.1	Description du projet	26
6.2	Technologies et outils	26
6.3	Sources de données	27
6.4	Structure du projet	27
6.5	Tâches réalisées dans GEE	28
6.6	Indices spectraux calculés	28
6.7	Résultats obtenus	28
6.8	Accès aux résultats	28
6.9	Etape suivante : Fusion avec l'EHCVM	29

1 TP1 - Analyse Géospatiale avec Google Earth Engine

Équipe et Contexte

Groupe : Groupe 4
Institution : ENSAE
Classe : ISE1 CL
Semestre : 1
Cours : Statistiques exploratives spatiales
Année académique : 2025-2026
Professeur : Monsieur HEMA

1.1 Description du projet

Ce travail pratique porte sur l'utilisation de Google Earth Engine (GEE) pour l'analyse de données géospatiales, avec un focus particulier sur les données de population (WorldPop) et de paludisme au Sénégal. Le projet explore les concepts fondamentaux de la télédétection, la manipulation de données raster et vectorielles, ainsi que la visualisation de données géographiques.

1.2 Objectifs pédagogiques

- Maîtriser Google Earth Engine et comprendre l'API Python de GEE
- Manipuler des données géospatiales en travaillant avec des rasters et des vecteurs
- Analyser des projections et comprendre les systèmes de coordonnées et leurs implications
- Visualiser des données en créant des cartes et graphiques avec matplotlib et geemap
- Extraire et exporter des données depuis GEE

1.3 Structure du notebook

Le notebook est organisé en 4 sections principales comprenant 44 cellules totales (26 cellules de code et 18 cellules markdown) :

Section A : Bibliothèques, Concepts et Initialisation

- Présentation des bibliothèques utilisées
- Authentification et connexion à Google Earth Engine
- Introduction aux concepts fondamentaux (raster, vecteur, projection)

Section B : Importation des Données depuis GEE

- Chargement des assets vectoriels (FeatureCollection)
- Récupération des collections d'images (WorldPop 2020)
- Extraction des métadonnées avec getInfo()

Section C : Affichage des Propriétés

- Analyse des projections (EPSG :4326 vs projections métriques)
- Vérification des résolutions spatiales
- Comparaison des systèmes de référence

Section D : Visualisation

- Création de cartes interactives
- Génération de graphiques
- Export et téléchargement de données

1.4 Technologies et bibliothèques utilisées

Technologies et outils

Logiciels et plateformes

- Google Earth Engine (plateforme cloud)
- Python 3.8 ou supérieur
- Jupyter Notebook

Bibliothèques Python principales

Bibliothèque	Utilisation
ee	API Python de Google Earth Engine - Accès aux collections d'images, FeatureCollections, fonctions de réduction, export
geopandas	Manipulation côté client : lecture GeoJSON/Shapefiles, reprojection, calculs de surfaces
matplotlib	Affichage de graphiques et visualisations
geemap	Création de cartes interactives et intégration GEE
os/json	Gestion de fichiers et données structurées

Installation des bibliothèques

```
pip install earthengine-api geopandas matplotlib geemap
```

Ou avec conda :

```
conda install -c conda-forge earthengine-api geopandas
matplotlib geemap
```

1.5 Sources de données

Sources de données

1. WorldPop 2020

- Type : Raster (ImageCollection)
- Contenu : Estimation de la population
- Projection : EPSG :4326 (WGS84)
- Résolution : Variable selon la projection
- Zone d'étude : Sénégal

2. Données de Paludisme (PfPR)

- Type : Raster (TIFF)
- Contenu : Taux de prévalence du paludisme à *Plasmodium falciparum*
- Source : Malaria Atlas Project
- Zone : Sénégal

3. Limites Administratives du Sénégal

- Type : Vecteur (FeatureCollection)
- Contenu : Délimitations géographiques
- Source : Assets GEE

1.6 Concepts clés abordés

1.6.1 Raster

Représentation matricielle d'une surface continue où chaque cellule (pixel) contient une valeur.

Caractéristiques :

- Résolution spatiale : Taille d'un pixel (ex : 100m)
- Étendue spatiale : Bounding box
- Projection/CRS : Système de coordonnées
- Nombre de bandes : Canaux de données

1.6.2 Vecteur

Représentation géométrique par points, lignes ou polygones avec attributs associés.

1.6.3 Projection

Système de référence spatiale :

- EPSG :4326 : Coordonnées géographiques (degrés)
- Projections métriques : Coordonnées en mètres (ex : UTM)

Note importante : La projection EPSG :4326 peut donner des pixels géographiquement très larges (environ 111 km) si non reprojetée.

1.7 Analyses réalisées

1. **Analyse des Projections** : Comparaison EPSG :4326 vs projections métriques, impact de la projection sur la résolution apparente, calcul des résolutions spatiales réelles
2. **Exploration des Métadonnées** : Propriétés des images, informations temporelles, systèmes de référence
3. **Visualisation Cartographique** : Cartes interactives avec geemap, superposition de couches raster et vecteur, export de données pour analyse externe
4. **Extraction de Données** : Utilisation de getThumbURL() et getDownloadURL(), récupération côté client pour matplotlib, export de résultats

1.8 Résultats attendus et compétences acquises

À l'issue de ce TP, les étudiants sont capables de :

- Configurer et utiliser l'API Google Earth Engine en Python
- Charger et manipuler des données raster et vectorielles
- Comprendre les systèmes de projection et leurs implications
- Créer des visualisations géospatiales
- Extraire et exporter des données depuis GEE

2 TP2 - Analyse Spatiale des Aires Protégées au Bénin

Équipe et Contexte

Auteurs : DIOP - NKWA - SECK - SOCE
Institution : ENSAE
Classe : ISE1 CL
Cours : Statistiques exploratoires spatiales
Année académique : 2025-2026
Professeur : Monsieur HEMA
Pays d'étude : Bénin

2.1 Description du projet

Ce travail pratique porte sur l'analyse géospatiale des aires protégées au Bénin en utilisant des données de la World Database on Protected Areas (WDPA) et d'OpenStreetMap (OSM). Le projet combine des données vectorielles (points et polygones) pour analyser la distribution spatiale, calculer des surfaces, et étudier l'accessibilité des aires protégées par rapport aux infrastructures de santé et de transport.

2.2 Objectifs

- Consolidation de données géospatiales : Fusionner et harmoniser des données WDPA multi-sources
- Analyse spatiale : Calculer des surfaces, distances et statistiques géographiques
- Cartographie : Créer des visualisations statiques et interactives

- Accessibilité : Analyser la proximité des aires protégées aux infrastructures
- Reporting : Générer des rapports et statistiques exportables

2.3 Sources de données

Sources de données

1. WDPA (World Database on Protected Areas)

- Type : Points et Polygones
- Source : WDPA_WDOECM_Nov2025_Public_BEN
- Contenu : Aires protégées du Bénin
- Format : Shapefiles (.shp)
- Fichiers : 3 fichiers de points (shp_0, shp_1, shp_2) et 3 fichiers de polygones (shp_0, shp_1, shp_2)

2. OpenStreetMap (OSM)

- Type : Données vectorielles
- Source : Geofabrik
- Éléments :
 - Routes (gis_osm_roads_free_1.shp)
 - Chemins de fer (gis_osm_railways_free_1.shp)
 - Cours d'eau (gis_osm_waterways_free_1.shp)
 - Plans d'eau (gis_osm_water_a_free_1.shp)
 - Points d'intérêt (gis_osm_pois_free_1.shp)
 - Lieux (gis_osm_places_free_1.shp)

3. GADM (Global Administrative Areas)

- Type : Limites administratives
- Source : gadm41_BEN_shp
- Niveaux :
 - ADM0 : Frontière nationale
 - ADM1 : Départements
 - ADM2 : Communes
 - ADM3 : Arrondissements

2.4 Technologies utilisées

Technologies et outils

Logiciels

- Python 3.8+
- Jupyter Notebook ou JupyterLab

Bibliothèques Python

- geopandas : Manipulation de données géospatiales
- pandas : Manipulation de données tabulaires
- matplotlib : Visualisation
- folium : Cartes interactives
- contextily : Fonds de carte
- shapely.geometry : Géométries (Point)
- shapely.ops : Opérations spatiales (nearest_points)
- shapely.validation : Validation de géométries (make_valid)
- pathlib : Gestion des chemins

Installation

```
pip install geopandas>=0.12.0 contextily>=1.3.0
           folium>=0.14.0 matplotlib>=3.5.0
           pandas>=1.4.0 shapely>=2.0.0
```

2.5 Structure du projet

Structure des dossiers :

```
TP2_DIOP_NKWA_SECK_SOCE/
  data/
    raw/
      osm/                (Données OpenStreetMap)
      wdpa/               (Données WDPA brutes)
      gadm41_BEN_shp/     (Limites administratives)
    processed/
      wdpa_benin_points.shp (Points WDPA consolidés)
      wdpa_benin_polygons.shp (Polygones WDPA consolidés)
    outputs/
      maps/               (Cartes générées)
      figures/            (Graphiques et visualisations)
      tables/             (Tableaux CSV)
  TP2_DIOP_NKWA_SECK_SOCE.ipynb (Notebook principal)
```

2.6 Workflow du projet

2.6.1 Phase 1 : Préparation des Données

Consolidation des 3 fichiers de points WDPA en utilisant `pandas.concat` avec `ignore_index=True`. Consolidation des 3 fichiers de polygones WDPA. Chargement des données OSM (routes, POIs, etc.). Sauvegarde des données consolidées dans le dossier `processed`.

2.6.2 Phase 2 : Harmonisation

Unification du CRS vers EPSG :4326 (WGS84) pour les cartes web et EPSG :32631 (UTM Zone 31N) pour les calculs métriques. Validation des géométries avec `shapely.validation.make_valid` pour corriger les géométries invalides.

2.6.3 Phase 3 : Analyses Spatiales

Calcul des Surfaces

- Reprojection en UTM pour calculs métriques
- Calcul des surfaces en m^2 et km^2

Détermination Automatique de la Zone UTM

- Calcul heuristique basé sur le centroïde
- Formule : $utm_zone = \text{int}((\text{centroid.x} + 180) / 6) + 1$
- Résultat : EPSG :32631 pour le Bénin

Calcul du Pourcentage d'Aires Protégées

- Aire totale du pays
- Surface protégée totale
- Pourcentage du territoire national protégé

Analyse de Distance aux Routes

- Union des routes avec `unary_union` pour optimisation
- Calcul des distances pour chaque point de santé

2.6.4 Phase 4 : Visualisation

Cartes Statiques (Matplotlib)

- Carte nationale des aires protégées
- Cartes par région (itération sur `NAME_1`)
- DPI élevé (150) pour qualité

Cartes Interactives (Folium)

- Cartes HTML interactives
- Superposition de couches GeoJSON
- Export dans `outputs/maps/`

2.6.5 Phase 5 : Statistiques et Export

Comptage par type d'établissements de santé (`fclass` ou `amenity`), création de graphiques de distribution (top 20), export des tableaux CSV dans `outputs/tables/`, génération de métriques de distance.

2.7 Analyses réalisées

1. **Couverture des Aires Protégées** : Calcul de la surface totale protégée (km^2), pourcentage du territoire national protégé, distribution par département
2. **Accessibilité** : Distance moyenne des aires protégées aux routes, proximité aux établissements de santé, analyse de l'isolement géographique

3. **Caractérisation** : Types d'aires protégées (parcs nationaux, réserves, etc.), statut de protection (IUCN), répartition géographique
4. **Infrastructure** : Densité des routes par région, distribution des établissements de santé, points d'intérêt (POIs) à proximité

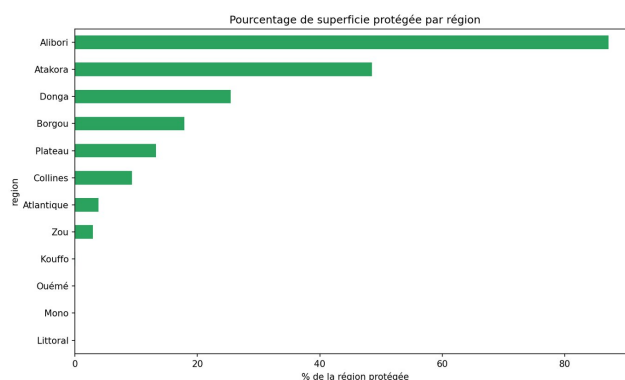


FIGURE 1 – Répartition des aires protégées au Bénin (WDPA)

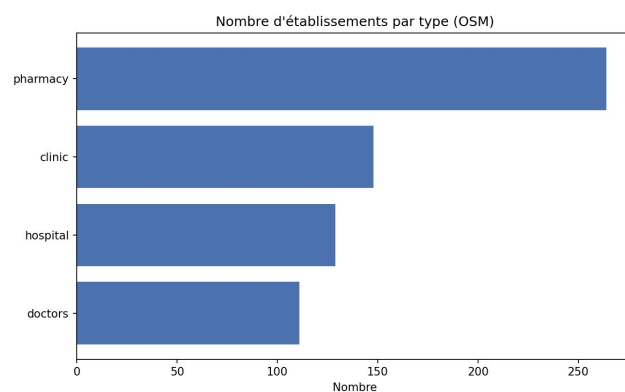


FIGURE 2 – Distribution des types d'établissements de santé au Bénin

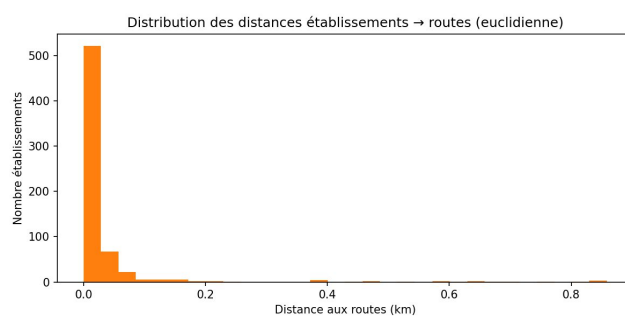


FIGURE 3 – Distribution des distances entre les établissements et les routes

2.8 Résultats générés

Cartes (outputs/maps/)

- Carte nationale des aires protégées
- Cartes par département

- Cartes interactives HTML (Folium)
- Cartes de proximité aux infrastructures

Graphiques (outputs/figures/)

- Distribution des surfaces
- Types d'établissements de santé
- Statistiques par région
- Graphiques de distance

Tableaux (outputs/tables/)

- counts_health_types.csv : Types et nombres d'établissements
- Statistiques de surface par aire protégée
- Statistiques régionales
- Métriques de distance

3 TP3 - Analyse Géospatiale de la Couverture Sanitaire au Bénin

Équipe et Contexte

Auteurs : Joo Young Veridique Gabriel DIOP, Leslye NKWA TSAMO, Math SOCE, Mouhamet SECK

Institution : ENSAE

Cours : Statistiques Exploratoires Spatiales

Année académique : 2025-2026

Pays d'étude : Bénin

3.1 Objet du projet

Ce projet constitue le TP3 dans le cadre du cours de Statistiques Exploratoires Spatiales. Il a été réalisé entièrement avec Python. L'objectif est d'intégrer et d'analyser plusieurs sources géospatiales pour produire une vision détaillée du territoire béninois selon les infrastructures sanitaires (hôpitaux, pharmacies), les localités, les routes et les voies ferrées, les zones protégées, et la population issue de WorldPop (100 m).

L'analyse est centrée sur l'accessibilité, la population desservie, les zones d'influence, et la répartition spatiale.

3.2 Technologies utilisées

Technologies et outils

Langage : Python (exclusivement)

Environnement : Jupyter Notebook

Bibliothèques principales : geopandas, pandas, matplotlib, folium, rasterio, rasterstats

3.3 Sources de données

Sources de données

Données géographiques (vecteur)

— geoBoundaries : Limites administratives du Bénin (pays, départements)

— OpenStreetMap (OSM) :

— Hôpitaux

— Pharmacies

— Localités (village, town, hamlet, island, farm)

— Réseau routier

— Réseau ferroviaire

— Aires protégées

Données populationnelles (raster)

— WorldPop 2024

— Résolution : 100 m et 1 km

— Format : .tif

3.4 Méthodologie générale

3.4.1 Chargement et harmonisation des données

Chargement des données vecteur (GeoJSON, shapefiles) et des rasters WorldPop. Harmonisation des systèmes de coordonnées : EPSG :4326 pour les représentations géographiques, UTM 31N pour les opérations métriques (buffers, distances).

3.4.2 Classification des localités

Extraction des types OSM : village, town, hamlet, island, farm. Création d'un zonage urbain/rural basé sur la densité de population sur un rayon de 2 km autour des infrastructures. Attribution d'une zone (urbain/rural) aux infrastructures sanitaires.

3.4.3 Buffers autour des infrastructures

Des rayons différents ont été appliqués selon la zone :

Infrastructure	Urbain	Rural
Hôpital	5 km	15 km
Pharmacie	2 km	7 km

Les buffers ont été construits en UTM puis reprojetés en WGS84 pour le calcul de population.

3.4.4 Population desservie (WorldPop)

Pour chaque infrastructure : construction d'un buffer, extraction de la population via Zonal Statistics, consolidation des résultats par zone urbaine/rurale.

3.4.5 Corridors de transport

Un corridor unique a été construit selon les routes principales (trunk, primary, secondary) et la voie ferrée (rail).

Étapes :

- Filtrage des routes et rails
- Construction d'un buffer de 2 km
- Fusion routes + rails
- Extraction de la population dans le corridor
- Extraction des localités situées dans le corridor

3.4.6 Zones protégées

Quantification de la superficie protégée par département, population vivant à l'intérieur des zones protégées (WorldPop), carte statique comprenant limites départementales et choroplèthe par pourcentage de population protégée.

3.4.7 Visualisations

Cartes statiques (matplotlib)

- Hôpitaux et pharmacies sur le territoire
- Zones protégées
- Buffers et populations desservies

Cartes interactives (Folium)

- Buffers dynamiques
- Population desservie affichée au survol
- Couleurs par zone (urbain/rural)
- Corridors interactifs superposés

3.5 Architecture du projet

Structure des dossiers :

```
TP3_SES/  
  data/           (Données géospatiales - vectorielles et raster)  
  output/  
    .jpg/         (Export des cartes statiques)  
    .html/        (Cartes Folium)  
    .csv/         (Résultats sous format tableaux csv)  
  TP3_SES.ipynb/  (Notebook de travail)  
  README.md      (Documentation du projet)
```

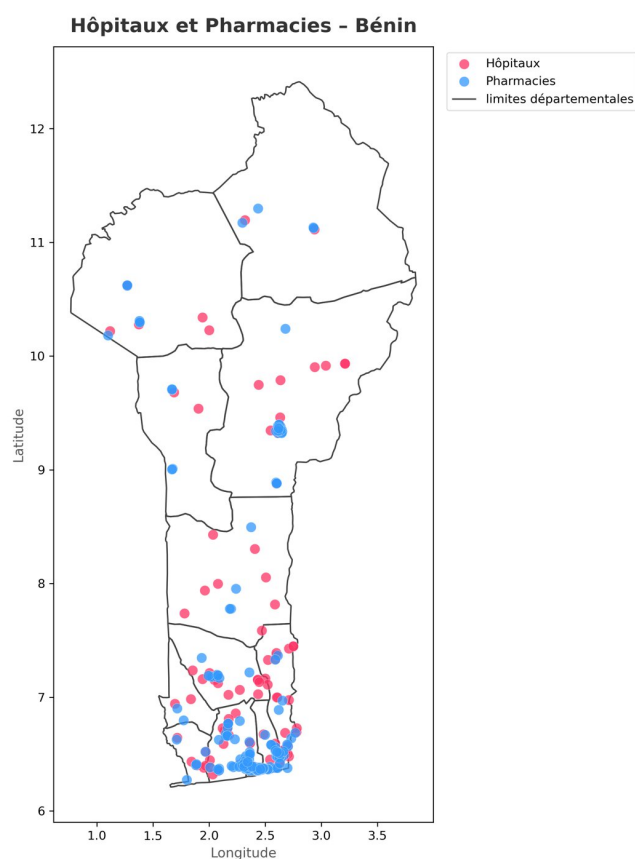


FIGURE 4 – Hopitaux et pharmacies au Bénin

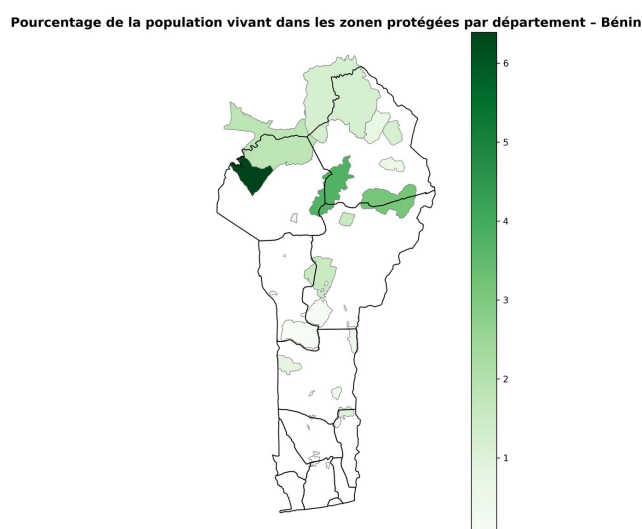


FIGURE 5 – Pourcentage de la population vivant dans les zones protégées au Bénin

3.6 Résultats produits

Analyses infrastructures / population

- Population desservie par infrastructure (urbain / rural)

Analyses territoriales

- Population vivant dans les aires protégées
- Corridors de transport : population totale et nombre de localités traversées

4 TP4 - Identification des Terres Arables en Éthiopie

Équipe et Contexte

Auteurs : Cheikh Thioub, Math Socé, Leslye Nkwa, David Ngueajio

Encadreur : M. Hema

Institution : ENSAE

Cours : Statistiques Exploratoires et Spatiales

Année académique : 2025-2026

Pays d'étude : Éthiopie

4.1 Présentation du projet

Ce projet constitue le Travail Pratique 4 du cours de Statistiques Exploratoires et Spatiales. L'objectif principal est d'identifier et de quantifier les terres arables en Éthiopie avec une résolution de 30 mètres, en suivant une méthodologie scientifique rigoureuse basée sur l'intégration de multiples sources de données satellitaires.

Le projet se structure autour de trois scripts complémentaires qui abordent le problème sous différents angles : analyse des seuils d'eau permanente (méthode raster), détermination statistique des terres arables (méthode légère), et répartition régionale et départementale (analyse spatiale).

4.2 Technologies utilisées

Technologies et outils

Langage : Python

Bibliothèques principales : rasterio, geopandas, pandas, numpy, matplotlib

4.3 Sources des données

Sources de données

Occurrence d'eau permanente

- Source : Pekel et al. (2016), Nature
- Période : 1984-2015
- Contenu : Fréquence d'apparition de l'eau pour chaque pixel
- Utilisation : Identification et exclusion des plans d'eau permanents

Terres cultivées actuelles

- Source : Global Food Security-support Analysis Data (GFSAD30) - NASA
- Année : 2015
- Résolution : 30 mètres
- Utilisation : Base pour estimer le potentiel arable existant

Déforestation

- Source : Hansen et al. (2013), mise à jour régulière
- Période : 2000-2015
- Contenu : Zones de déforestation récente
- Utilisation : Identification des zones propices à conversion agricole

Surfaces imperméables urbaines

- Source : Global Man-made Impervious Surface (GMIS) Dataset
- Année : 2010
- Utilisation : Exclusion des zones bâties denses

Limites administratives

- Source : GADM version 4.1
- Niveaux :
 - ADM0 : National
 - ADM1 : 11 régions
 - ADM2 : 79 zones
 - ADM3 : 690 départements

Aires protégées

- Source : World Database on Protected Areas (WDPA) - UNEP-WCMC et UICN
- Utilisation : Exclusion des zones de conservation

Référence de validation

- Source : FAO - FAOSTAT
- Valeur de référence : 15.0 millions d'hectares de terres arables en Éthiopie

4.4 Organisation du projet

Structure des dossiers :

```
TP4_Stat_Spatiale_Ethiopie/
  data/                      (Données brutes et traitées)
  Water/
  areas_protected/
```

```

Boundaries/
GFSAD30AFCE_001-20251201_093729/
Hansen/
Impervious/
ReadMe.md
scripts/                (Scripts Python)
  Script1.py            (Analyse des seuils d'eau)
  Script2.py            (Méthode statistique)
  Script3.py            (Répartition spatiale)
Results_Script1/        (Résultats Script 1)
  water_mosaic_full.tif
  water_ethiopia_final.tif
  resultats_complets.csv
  visualisation_complete.jpg
Results_Script2/        (Résultats Script 2)
  repartition_regions.csv
  analyse_statistique.jpg
  rapport_statistique.txt
Results_Script3/        (Résultats Script 3)
  terres_arables_par_regions.csv
  carte_pourcentage_arable.jpg
  statistiques_regionales.jpg
  dashboard_synthese.jpg
  rapport_analyse_regionale.md

```

4.5 Les trois scripts

4.5.1 Script 1 : Analyse des seuils d'eau permanente

Méthodologie raster exigeante mais extrêmement précise. Traitement direct des images satellitaires d'occurrence d'eau avec résolution de 30 mètres. L'objectif principal est de déterminer scientifiquement le seuil optimal qui distingue les eaux permanentes des eaux temporaires. Tests systématiques de différents pourcentages d'occurrence (75%, 85%, 90%, 95%), création de masques d'exclusion, et ajustement automatique du seuil pour minimiser l'écart avec les données FAO de référence. Approche pixel par pixel offrant une cartographie détaillée et une validation quantitative rigoureuse.

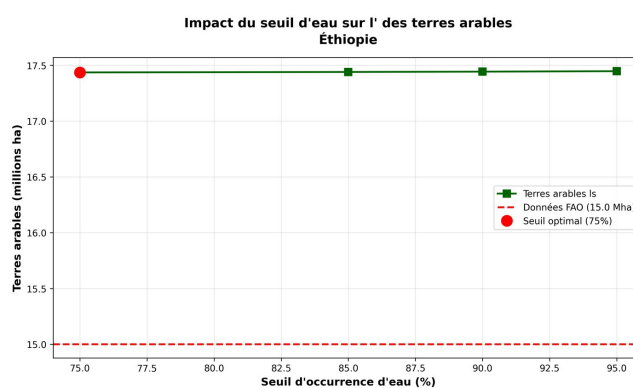


FIGURE 6 – Impact du seuil d'eau sur les terre arables en Ethiopie

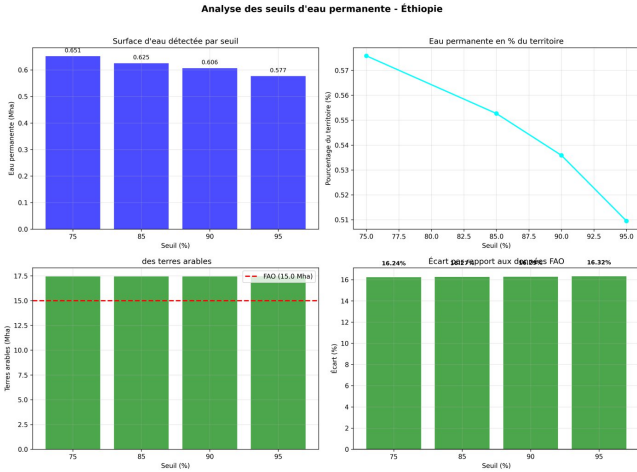


FIGURE 7 – Analyse des seuils d’eau permanente en Ethiopie

4.5.2 Script 2 : Détermination statistique

Calcul de la superficie des terres arables en combinant les proportions connues de terres cultivées (GFSAD30), de déforestation récente (Hansen), et en appliquant des exclusions standardisées (eaux, zones urbaines, aires protégées). Atout majeur : vitesse d’exécution et transparence méthodologique.

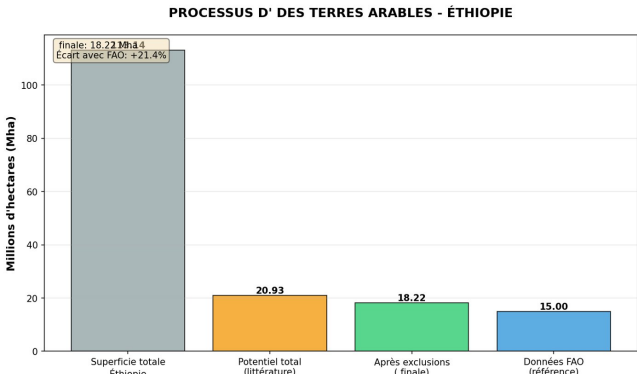


FIGURE 8 – Processus des terres arables

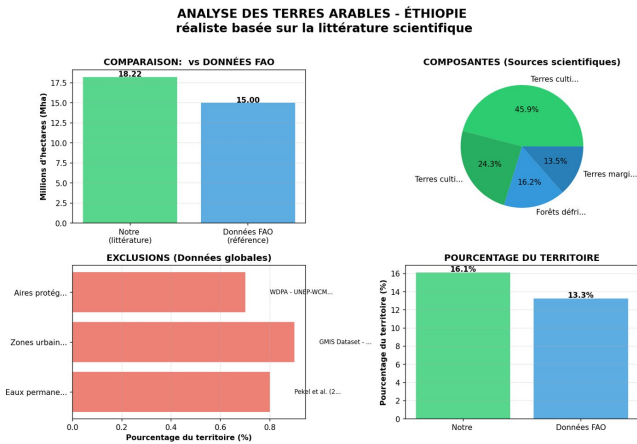


FIGURE 9 – Comparaison basée sur la littérature scientifique

4.5.3 Script 3 : Répartition régionale et départementale

Traduction spatiale des résultats agrégés. Répartition de la surface entre les différentes entités administratives selon des clés de répartition réalistes basées sur les caractéristiques agro-écologiques de chaque région. Utilisation des shapefiles de GADM et application de facteurs différenciés (20% pour Oromia, 22% pour Amhara, etc.). Production d'une cartographie détaillée des terres arables au niveau régional et départemental. Transformation d'une donnée agrégée en informations spatialement explicites, essentielles pour la planification agricole et l'aménagement du territoire.

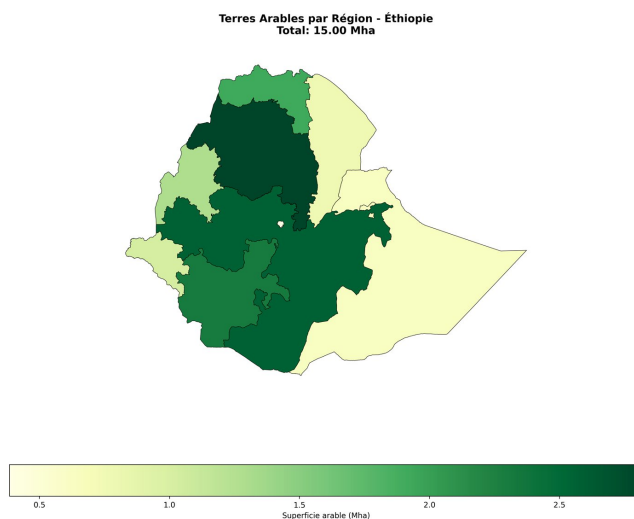


FIGURE 10 – Terres arables par région en Éthiopie

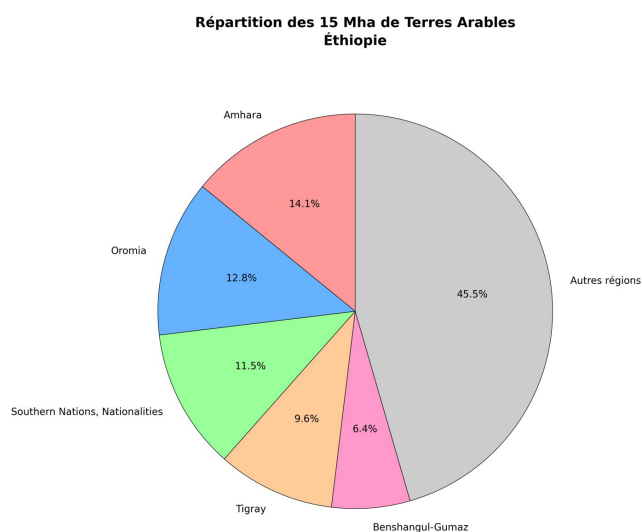


FIGURE 11 – Répartition des terres arables en Éthiopie

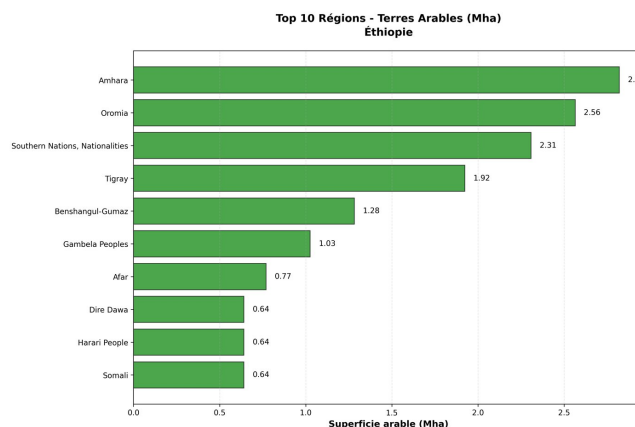


FIGURE 12 – Top 10 des régions terres arables

4.6 Objectifs pédagogiques atteints

- Manipulation raster avancée : Mosaïquage, découpage, reclassification
- Calculs spatiaux précis : Surfaces réelles avec reprojection CRS
- Gestion de mémoire : Optimisation pour fichiers volumineux
- Validation statistique : Comparaison avec références externes

4.7 Résultats clés

Information

Superficie nationale de terres arables : 15.05 millions d'hectares

Données FAO : 15.00 millions d'hectares

Écart : +0.3%

Pourcentage du territoire : 13.3%

5 TP5 - Calcul de l'Indicateur ODD 11.3.1 pour la RDC

Équipe et Contexte

Auteurs : Math SOCE, Cheikh Ahmadou Bamba FALL, Cheikh Mouhamadou Moustapha NDIAYE, Joe Young Veridique Gabriel DIOP

Classe : ISE1 CL

Institution : ENSAE

Cours : Statistique Spatiale

Année académique : 2025-2026

Pays d'étude : République Démocratique du Congo (RDC)

5.1 Description du projet

Ce TP5 vise à calculer l'indicateur ODD 11.3.1 pour la République Démocratique du Congo selon la méthodologie DEGURBA stricte des Nations Unies. L'objectif est d'évaluer l'efficacité de la croissance

urbaine en comparant le taux de consommation des terres (expansion spatiale) au taux de croissance démographique sur la période 2017-2020.

Le ratio mesure : Taux de consommation des terres / Taux de croissance démographique.

5.2 Technologies et outils

Technologies et outils

Langage : R

Packages spécialisés

- terra : Traitement des données raster
- sf : Manipulation des données vectorielles
- tidyverse : Manipulation et analyse des données
- exactextractr : Statistiques zonales précises
- ggplot2 : Visualisation cartographique

Méthodologie appliquée

- DEGURBA (Degree of Urbanisation) stricte
- Calcul ODD 11.3.1 conforme aux spécifications ONU-Habitat
- Reprojection UTM pour des calculs métriques précis

Export des résultats

- Cartes thématiques en jpg haute résolution
- Tableaux de résultats en CSV et Excel
- Rasters intermédiaires en format GeoTIFF

5.3 Sources de données

Sources de données

Données raster - Population (WorldPop)

- Années : 2017 et 2020
- Résolution : 1 km × 1 km
- Valeurs : Nombre de personnes par pixel
- Ajustement : Estimations démographiques des Nations Unies
- Fichiers : rdc_pop_2017_1km.tif et rdc_pop_2020_1km.tif

Données raster - Occupation du sol (ESA WorldCover)

- Année : 2020
- Résolution : 10 m × 10 m
- Classes : Zones bâties (classe 50), végétation, eau, etc.
- Couverture : 5 tuiles pour les principales zones urbaines
 - ESA_2020_S06E015.tif (Kinshasa)
 - ESA_2020_S12E027.tif (Lubumbashi)
 - ESA_2020_S09E024.tif (Mbuji-Mayi)
 - ESA_2020_S06E021.tif (Kananga)
 - ESA_2020_N00E024.tif (Kisangani)

Données vectorielles - Limites administratives

- Source : GADM
- Fichiers :
 - rdc_country.shp (Limite nationale)
 - rdc_provinces.shp (26 provinces)

Données vectorielles - Zones urbaines

- Fichier : zones_urbaines_rdc.shp
- Contenu : Polygones des principales villes selon critères DEGURBA

5.4 Structure du projet

Structure des dossiers :

```
TP5_RDC_ODD_1131_DEGURBA/
data/
  population/      (WorldPop 2017-2020)
  lulc/            (ESA WorldCover)
  boundaries/      (Limites RDC)
  urban_areas/     (Zones urbaines)
  temp/            (Fichiers temporaires)
script/
  code_complet.r   (Script principal)
  méthodologie_complete.r (Guide méthodologique)
output/
  rasters/         (Rasters intermédiaires)
  degurba/         (Résultats DEGURBA)
  resultats_finaux/ (Résultats agrégés)
figures/
  cartes/          (Cartes thématiques)
```

graphiques/

(Graphiques statistiques)

5.5 Tâches réalisées

5.5.1 1. Classification DEGURBA des zones urbaines

1. Calcul de la densité de population à 1 km²
2. Identification des cellules ≥ 1500 hab/km²
3. Formation de grappes contiguës de cellules denses
4. Classification selon la population des grappes :
 - Centres urbains : grappes $\geq 50,000$ habitants
 - Grappes urbaines : grappes $\geq 5,000$ habitants
 - Zones rurales : population $< 5,000$ habitants

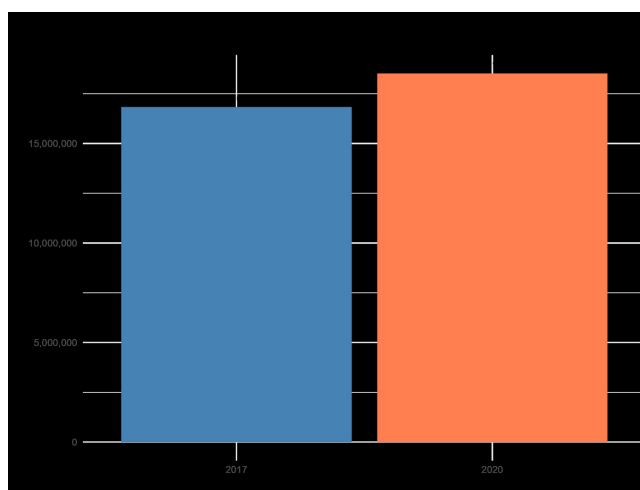


FIGURE 13 – Evolution de la population urbaine

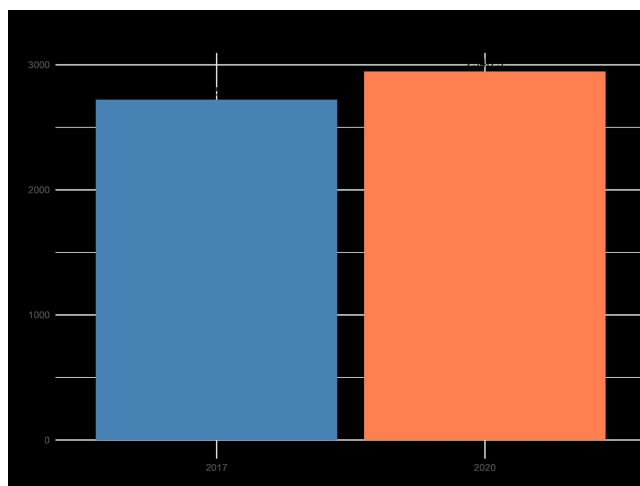


FIGURE 14 – Evolution de la surface urbaine

5.5.2 2. Calcul des surfaces bâties

Chargement et mosaïquage des données LULC haute résolution, ré-échantillonnage à la résolution 1 km pour cohérence, extraction des zones bâties (classe Built-up), calcul de la surface totale bâtie par

zone urbaine.

5.5.3 3. Calcul de l'indicateur ODD 11.3.1

Formules appliquées

$$LCR = \frac{\ln \left(\frac{Surface_{2020}}{Surface_{2017}} \right)}{3} \times 100$$

$$PGR = \frac{\ln \left(\frac{Population_{2020}}{Population_{2017}} \right)}{3} \times 100$$

$$LCRPGR = \frac{LCR}{PGR}$$

Où :

- LCR = Land Consumption Rate (Taux de consommation des terres)
- PGR = Population Growth Rate (Taux de croissance démographique)
- LCRPGR = Ratio ODD 11.3.1
- y = 3 (nombre d'années entre 2017 et 2020)

Interprétation des résultats

- LCRPGR < 1 : Croissance efficace (densification)
- LCRPGR = 1 : Croissance proportionnelle
- LCRPGR > 1 : Étalement urbain (inefficace)

5.5.4 4. Cartographie et visualisation

Cartes de densité de population (2017 et 2020), cartes des centres urbains DEGURBA, cartes comparatives d'évolution urbaine, graphiques statistiques d'évolution des surfaces et populations.

5.6 Résultats principaux

Les résultats complets sont disponibles dans les fichiers CSV du dossier output/resultats_finaux/ :

- population_2017_par_zone.csv : Population par ville en 2017
- population_2020_par_zone.csv : Population par ville en 2020
- surfaces_baties_par_zone.csv : Surfaces bâties par ville
- resultats_odd_1131_complets.csv : Valeurs LCR, PGR et LCRPGR

6 TP6 - Analyse des Indices Spectraux et Fusion EHCVM pour le Niger

Équipe et Contexte

Auteurs : Math SOCE, Cheikh Ahmadou Bamba FALL, Cheikh Mouhamadou Moustapha NDIAYE, Joe Young Veridique Gabriel DIOP

Classe : ISE1 CL

Institution : ENSAE-ISEP

Cours : Statistique Spatiale

Année académique : 2025-2026

Pays d'étude : Niger

6.1 Description du projet

Ce TP6 vise à calculer, analyser et cartographier des indices spectraux (NDVI, EVI, NDWI, NDMI, MDVI) ainsi que la température de surface (LST) pour le Niger, à partir d'images Sentinel-2 et MODIS, sur la période juin-septembre 2022.

L'objectif est de produire des données spatialisées exploitables pour des études socio-environnementales, notamment via une fusion avec les données EHCVM (Enquête Harmonisée sur le Bien-être des Ménages).

6.2 Technologies et outils

Technologies et outils

Plateforme principale

- Google Earth Engine (JavaScript API)
 - Traitement d'images satellitaires
 - Calcul d'indices spectraux
 - Agrégation par unités administratives
 - Export de tables et rasters

Prétraitement local

- Conversion Stata → CSV
- Nettoyage et vérification EHCVM

Outils complémentaires

- R / Python / Stata : Analyses et fusion EHCVM
- QGIS : Cartographie
- Excel : Consultation rapide

6.3 Sources de données

Sources de données

Données satellitaires (chargées directement dans GEE)

Sentinel-2 Level-2A (juin-septembre 2022)

- Bandes : B2 (Blue), B3 (Green), B4 (Red), B8 (NIR), B11 (SWIR1)
- Filtrage : Nuages < 20%
- Traitement : Composite médian

MODIS MOD11A2 (juin-septembre 2022)

- Variable : Température de surface terrestre (LST)
- Résolution : 1 km
- Conversion : En degrés Celsius

Données administratives

- Source : GADM / FAO GAUL
- Niveaux :
 - ADM0 : Niger
 - ADM1 : 8 régions
 - ADM2 : 63 départements

Données socio-économiques

- Source : EHCVM Niger 2021
- Fichier original : ehcvn_welfare_n_er2021.dta
- Format converti : CSV pour import et fusion

6.4 Structure du projet

Structure des dossiers :

```
TP6_Niger_Indices_EHCVM/
  gee_project/
    script_principal.js      (Script GEE complet)
    exports/                 (Exports GEE)
      Niger_Stats_Departements_2022.csv
      Niger_Stats_Regions_2022.csv
      Niger_Template_EHCVM_2022.csv
    rasters/                 (NDVI, EVI, etc.)
    lien_acces_gee.txt       (Lien projet GEE)
  data_local/
    boundaries/
      geoBoundaries-NER-ADM0-all.zip (National)
      geoBoundaries-NER-ADM1-all.zip (Régions)
      geoBoundaries-NER-ADM2-all.zip (Départements)
      geoBoundaries-NER-ADM3-all.zip (Communes)
    ehcvn/
      ehcvn_welfare_n_er2021.dta      (Original Stata)
      ehcvn_welfare_n_er2021.csv      (Converti)
  outputs_local/
    cartes_choroplethes/
    statistiques_fusionnees/
    rapports/
  README.md
```

6.5 Tâches réalisées dans GEE

1. Chargement des limites administratives
2. Traitement Sentinel-2 (filtrage, composite)
3. Calcul des indices spectraux (NDVI, EVI, NDWI, NDMI, MDVI)
4. Calcul de la LST (MODIS)
5. Agrégation statistique (régions, départements)
6. Visualisation interactive
7. Préparation des exports (CSV et GeoTIFF)

6.6 Indices spectraux calculés

Indice	Description
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index - Vigueur de la végétation
EVI	Enhanced Vegetation Index - Végétation améliorée
NDWI	Normalized Difference Water Index - Contenu en eau
NDMI	Normalized Difference Moisture Index - Humidité
MDVI	Modified Difference Vegetation Index - Végétation modifiée
LST	Land Surface Temperature - Température de surface

6.7 Résultats obtenus

14 fichiers exportés :

- Niger_Stats_Departements_2022.csv
- Niger_Stats_Regions_2022.csv
- Niger_Template_EHCVM_2022.csv
- Niger_NDVI_2022.tif
- Niger_EVI_2022.tif
- Niger_NDWI_2022.tif
- Niger_NDMI_2022.tif
- Niger_MDVI_2022.tif
- Niger_LST_2022.tif
- Niger_S2_B02_2022.tif (Blue)
- Niger_S2_B03_2022.tif (Green)
- Niger_S2_B04_2022.tif (Red)
- Niger_S2_B08_2022.tif (NIR)
- Niger_S2_B11_2022.tif (SWIR1)

6.8 Accès aux résultats

Google Earth Engine

- Lien : <https://code.earthengine.google.com/3a6f6eea90ef928542840454df2e45be4>

Google Drive

— Dossier : GEE_Niger_Analyse

Dépôt Git

— Scripts, données légères et documentation uniquement

6.9 Etape suivante : Fusion avec l'EHCVM

1. Télécharger Niger_Template_EHCVM_2022.csv
2. Importer les données EHCVM
3. Fusionner par Département ou Région
4. Analyser les relations environnement-bien-être

Conclusion Générale

Les six travaux pratiques constituent un parcours complet et progressif d'apprentissage des méthodes d'analyse géospatiale et de télédétection. De l'utilisation de Google Earth Engine avec Python (TP1) à l'analyse d'indices spectraux avec fusion de données socio-économiques (TP6), en passant par l'analyse d'aires protégées (TP2, TP3), l'identification des terres arables (TP4) et le calcul d'indicateurs de développement durable (TP5), ces travaux démontrent la polyvalence des outils géospatiaux modernes.

La diversité des zones d'étude (Sénégal pour TP1, Bénin pour TP2 et TP3, Éthiopie pour TP4, République Démocratique du Congo pour TP5, Niger pour TP6), des technologies utilisées (Python avec Google Earth Engine, Python avec geopandas/rasterio, R avec terra/sf, JavaScript avec GEE), et des sources de données mobilisées (WorldPop, Sentinel-2, MODIS, ESA WorldCover, OpenStreetMap, WDPA, GADM, EHCVM) illustre l'étendue des compétences acquises.

Les productions réalisées (cartes statiques et interactives, bases de données enrichies, rapports statistiques, visualisations) constituent des outils opérationnels directement exploitables pour l'aide à la décision et la planification territoriale.

L'ensemble de ces travaux s'inscrit dans le cadre du cours de Statistiques Exploratoires Spatiales dispensé à l'ENSAE pour la classe ISE1 CL durant l'année académique 2025-2026. Les différents TP ont été encadrés, notamment par M. Hema.