



## **INSTITUT AGRONOMIQUE ET VETERINAIRE HASSAN II**

Département : Cartographie et Photogrammétrie

SPÉCIALITÉ : SCIENCES GÉOMATIQUES ET INGÉNIERIE TOPOGRAPHIQUE

### **PROJET DE BASE DE DONNÉES SPATIALES**

# **ANALYSE AGRICOLE ET TERRITORIALE PAR RÉGION AU MAROC**

SOUS DIRECTIONS DU :

**Professeur Mr HAJJI Hichame**

REALISE PAR :

**Mlle SIDQI SAFAA - 55**

**Mlle AMGHOUZ GHITA - 12**

Années universitaires 2025-2026

## *Sommaire :*

Introduction.....	3
Problématique.....	3
Sources de données et étapes de préparation.....	4
Résultats des requêtes.....	15
Indexation Spatiale Rtree et Rtree* .....	26
Duckdb.....	35
Hébergement du projet dans GitHub.....	39
Discussion critique.....	41
Conclusion.....	42
Références.....	42

## **I. Introduction :**

L'agriculture constitue un pilier fondamental de l'économie marocaine, jouant un rôle clé en tant que source de revenus et d'emplois, en particulier dans les zones rurales. Toutefois, la diversité des territoires et la dispersion des données agricoles, routières et hydrographiques rendent complexe toute tentative d'analyse globale et cohérente du pays.

Dans ce contexte, la création d'une base de données spatiale apparaît comme un levier stratégique. Elle permet d'intégrer, de structurer et d'exploiter efficacement des informations issues de multiples sources, qu'elles soient gouvernementales ou ouvertes.

Ce projet s'inscrit dans cette logique. Il a pour objectif la conception d'un système d'information géographique capable de croiser des indicateurs agricoles régionaux avec les infrastructures de transport et les éléments naturels (tels que les cours d'eau ou les limites administratives). Une telle approche vise à offrir une meilleure compréhension des dynamiques agricoles et territoriales du Maroc, en appui à l'analyse, la planification et la prise de décision.

## **II. Problématique :**

Ce projet vise à concevoir et mettre en œuvre une base de données spatiale intégrée, capable de répondre aux besoins d'analyse et de compréhension des dynamiques territoriales au Maroc. Pour cela, la base devra :

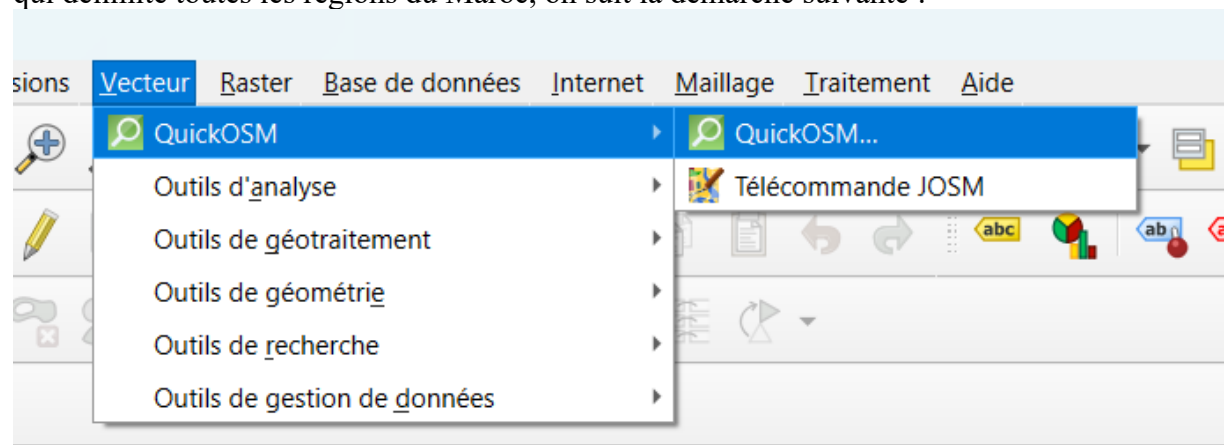
- Centraliser et harmoniser des données hétérogènes issues de sources variées (agricoles, routières, hydrographiques), souvent dispersées et de formats différents ;
- Reposer sur une architecture robuste, basée sur PostGIS, permettant une structuration cohérente de l'information géographique et une gestion performante grâce à l'indexation spatiale ;
- Fournir un cadre analytique avancé pour effectuer des traitements spatiaux complexes, tels que l'analyse de la densité du réseau routier, l'évaluation de l'accessibilité des zones agricoles ou encore l'étude des interactions entre les systèmes d'irrigation et les infrastructures de transport ;
- Et, plus largement, favoriser une lecture croisée et territorialisée des données, en révélant les relations spatiales entre les composantes physiques, humaines et infrastructurelles du territoire marocain.

## **III. Sources de données et étapes de préparation :**

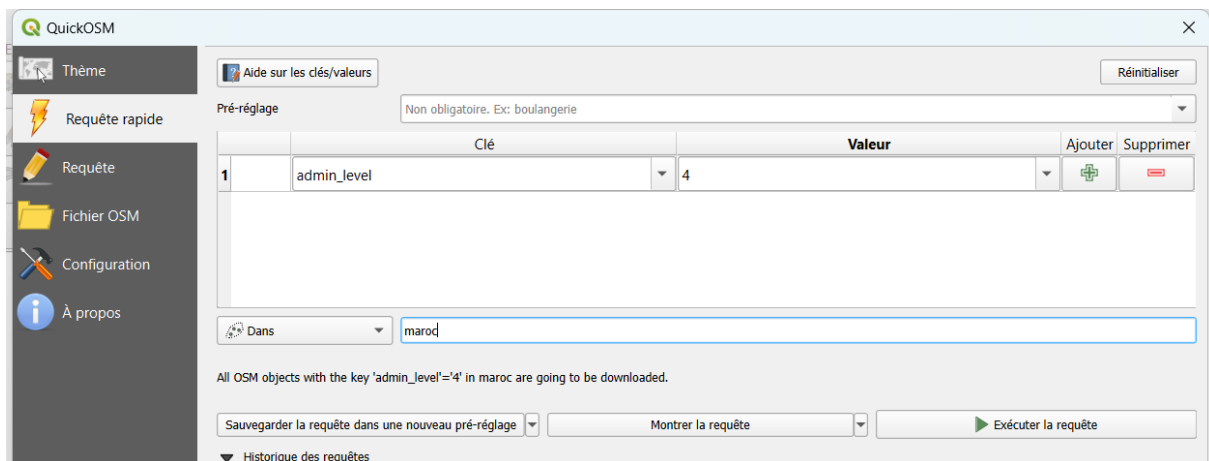
Pour initier la création de la base de données, il est nécessaire de commencer par la mise en place de ces couches dans QGIS :

- une couche dédiée aux régions administratives et aux données agricoles.
- une représentant le réseau routier et les autoroutes.
- une relative aux cours d'eau du territoire marocain.
- une représentant les établissements de formation.

L'extension OSM (openstreetmap) nous permet d'ajouter à QGIS une couche déjà prête qui délimite toutes les régions du Maroc, on suit la démarche suivante :



- Une couche des régions administratives :



- Une couche des données agricoles :



agriculture\_region — Total des entités: 12, Filtrées: 12, Sélectionnées: 0

	id	nom-region	SAU	sup_irriga	supgoutte	chaptelbov	chaptel-ov	cheptelcap
1	1	Tanger-tet	729148	66174	32337	356180	800000	470000
2	2	oriental	889450	181388	40236	3200000	960000	123400
3	3	fes-meknes	1235521	193542	82759	426370	2989999	423900
4	4	rabat-sale	942978	208000	83000	603649	1936253	158925
5	5	bnimlal-kh	994463	226293	40975	2770000	378000	967000
6	6	casa-sttat	1263042	168238	56990	2560344	768490	88100
7	7	Mkech-safi	2055977	345032	105600	471000	3800000	793000
8	8	draa-tafil	270910	201922	36868	84518	1451000	650800
9	9	souss-masa	453445	174862	108192	149800	1356000	1128000
10	10	guelm-oued	164099	36602	3000	214833	242784	33080
11	11	Layoun-sak	136000	5543	1051	302000	206000	105000
12	12	Dakhla-wad	100000	1152	1083	40000	40000	30000

- Une couche du réseau routier :



QuickOSM

Thème

Requête rapide

Requête

Fichier OSM

Configuration

À propos

Aide sur les clés/valeurs

Réinitialiser

Pré-réglage

Non obligatoire. Ex: boulangerie

	Clé	Valeur	Ajouter	Supprimer
1	highway	primary	+	-

Dans

maroc

QuickOSM

Thème

Requête rapide

Requête

Fichier OSM

Configuration

À propos

Aide sur les clés/valeurs

Réinitialiser

Pré-réglage

Non obligatoire. Ex: boulangerie

	Clé	Valeur	Ajouter	Supprimer
1	highway	secondary	+	-

Dans

maroc

QuickOSM

Thème

Requête rapide

Requête

Fichier OSM

Configuration

À propos

Aide sur les clés/valeurs

Réinitialiser

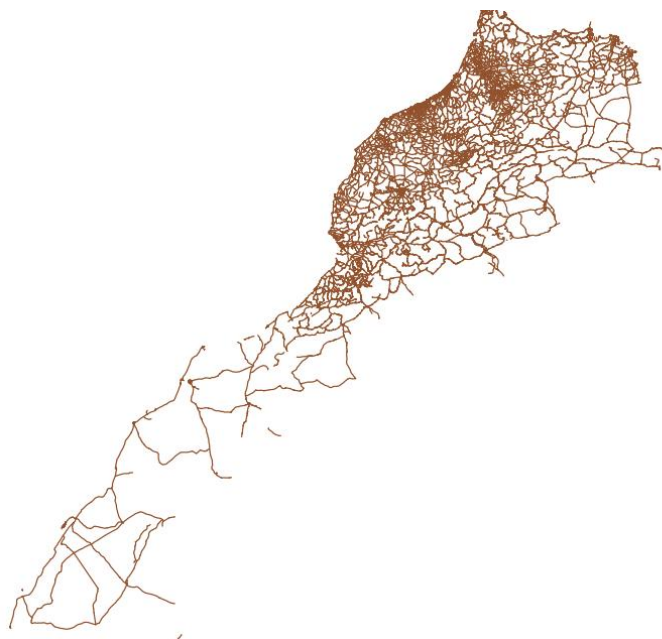
Pré-réglage

Non obligatoire. Ex: boulangerie

	Clé	Valeur	Ajouter	Supprimer
1	highway	tertiary	+	-

Dans

maroc



routemaroc — Total des entités: 52712, Filtrées: 52712, Sélectionnées: 0

	full_id	osm_id	osm_type	highway	motor_veh	parking_r	parking_1	magillary	turn_lanes	intermitte	parking_la	sidewalk_l	divider	parking_2	covered
1	w4004875	4004875	way	primary	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL
2	w4006273	4006273	way	primary	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL
3	w4006292	4006292	way	primary	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL
4	w4006323	4006323	way	primary	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL
5	w4010071	4010071	way	primary	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL
6	w4019871	4019871	way	primary	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL
7	w4019941	4019941	way	primary	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL
8	w4049957	4049957	way	primary	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL
9	w4049976	4049976	way	primary	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL
10	w4050019	4050019	way	primary	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL
11	w4050114	4050114	way	primary	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL
12	w4050179	4050179	way	primary	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL
13	w4050188	4050188	way	primary	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL
14	w4050238	4050238	way	primary	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL
15	w4050262	4050262	way	primary	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL
16	w4060987	4060987	way	primary	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL
17	w4061048	4061048	way	primary	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL
18	w4061167	4061167	way	primary	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL
19	w4061206	4061206	way	primary	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL
20	w4071259	4071259	way	primary	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL
21	w4071526	4071526	way	primary	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL
22	w4071557	4071557	way	primary	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL
23	w4071811	4071811	way	primary	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL

- Une couche des autoroutes :

QuickOSM

Thème

Aide sur les clés/valeurs

Réinitialiser

Requête rapide

Pré-réglage: Non obligatoire. Ex: boulangerie

	Clé	Valeur	Ajouter	Supprimer
1	highway	motorway		

Dans: maroc



motorway — Total des entités: 1183, Filtrées: 1183, Sélectionnées: 0

	full_id	osm_id	osm_type	highway	foot	bicycle	motor_veh	turn_lanes	destinatio	hgv_lanes	network	access	maxspeed_h	covered	ref_fr
1	w4589762	4589762	way	motorway	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL
2	w31510130	31510130	way	motorway	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL
3	w31510168	31510168	way	motorway	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL
4	w31510183	31510183	way	motorway	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL
5	w35399311	35399311	way	motorway	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL
6	w36866897	36866897	way	motorway	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL
7	w40517871	40517871	way	motorway	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL
8	w40517882	40517882	way	motorway	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL
9	w40520064	40520064	way	motorway	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL
10	w40520068	40520068	way	motorway	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL
11	w40520168	40520168	way	motorway	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL
12	w40520316	40520316	way	motorway	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL
13	w40520341	40520341	way	motorway	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL
14	w40520342	40520342	way	motorway	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL
15	w40520413	40520413	way	motorway	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL
16	w40520417	40520417	way	motorway	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL
17	w40520434	40520434	way	motorway	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL
18	w40520558	40520558	way	motorway	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL
19	w40521855	40521855	way	motorway	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL
20	w40521856	40521856	way	motorway	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL
21	w40530791	40530791	way	motorway	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL
22	w40530792	40530792	way	motorway	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL
23	w40530974	40530974	way	motorway	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL

- Une couche des cours d'eau :

QuickOSM

Thème Aide sur les clés/valeurs Réinitialiser

Requête rapide

Pré-réglage Non obligatoire. Ex: boulangerie

	Clé	Valeur	Ajouter	Supprimer
1	waterway	river	+	-

Dans marod



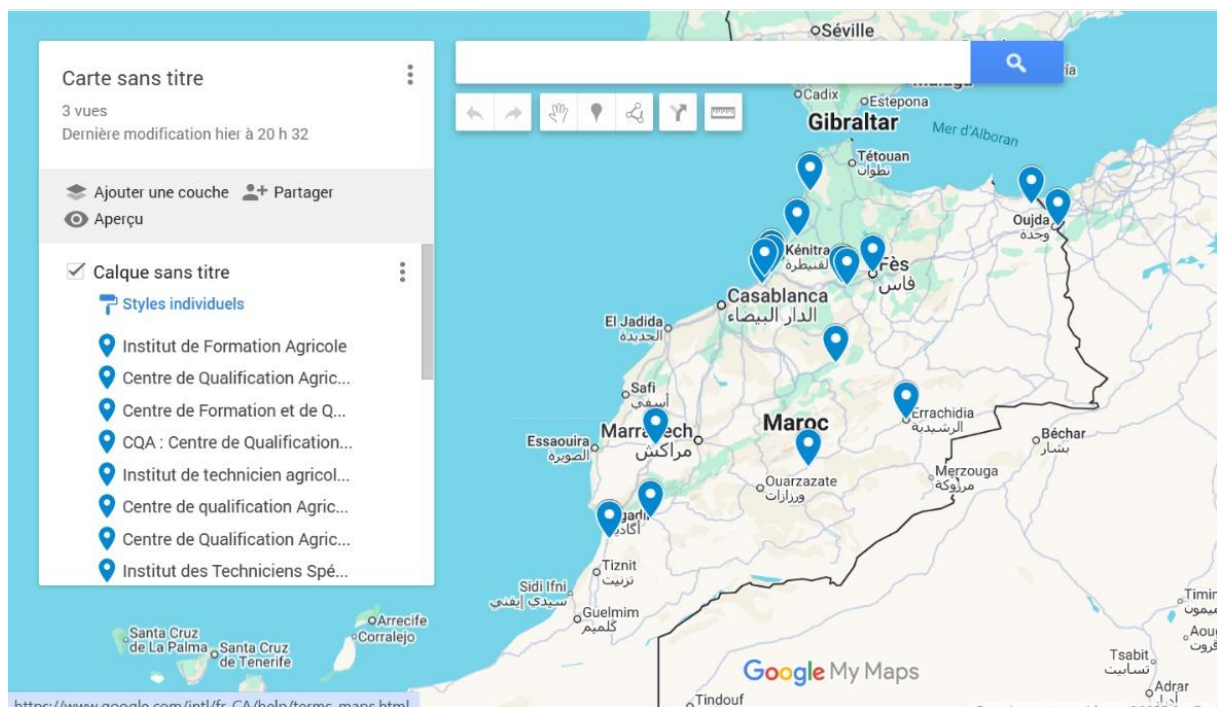


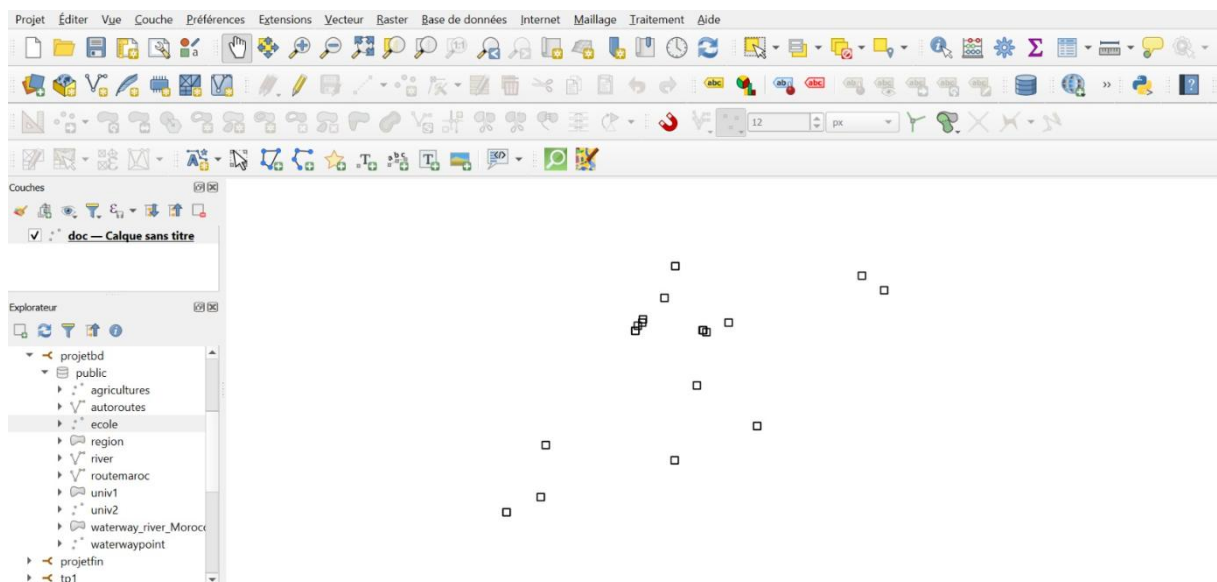
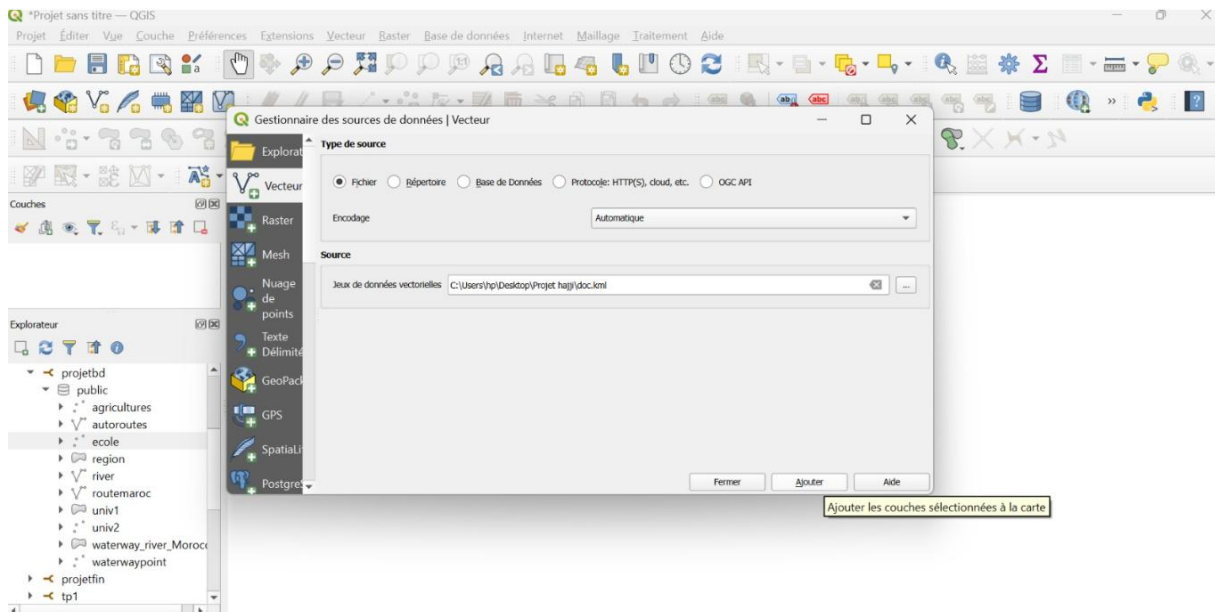
waterway\_river\_maroc — Total des entités: 6314, Filtrées: 6314, Sélectionnées: 0

	full_id	osm_id	osm_type	waterway	substance	man_made	ford	highway	flood_pron	name_kab	bridge	short_name	short_na_1	service	level
1	w24275636	24275636	way	river	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL
2	w24276397	24276397	way	river	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL
3	w30129684	30129684	way	river	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL
4	w30147337	30147337	way	river	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL
5	w30148306	30148306	way	river	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL
6	w31498508	31498508	way	river	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL
7	w31498579	31498579	way	river	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL
8	w34699486	34699486	way	river	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL
9	w37087883	37087883	way	river	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL
10	w38945296	38945296	way	river	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL
11	w38945417	38945417	way	river	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL
12	w40070603	40070603	way	river	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL
13	w41408380	41408380	way	river	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL
14	w41436242	41436242	way	river	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL
15	w41439780	41439780	way	river	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL
16	w41593849	41593849	way	river	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL
17	w43263293	43263293	way	river	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL
18	w47290009	47290009	way	river	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL
19	w47290011	47290011	way	river	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL
20	w47323618	47323618	way	river	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL
21	w47324251	47324251	way	river	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL
22	w47324264	47324264	way	river	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL
23	w47324268	47324268	way	river	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL	NULL

- Une couche des établissements de formation :

Cette couche a été extraite depuis Google Maps, puis exportée au format KML. Ce fichier a ensuite été importé dans QGIS, permettant d'ajouter la couche des établissements scolaires à la base de données spatiale du projet.





#### IV. Schéma de base de données et justification :

##### ➤ Se connecter à la base PostGIS :

- Menu "Base de données" > "DB Manager"
- Dans DB Manager, fais un clic droit sur "PostgreSQL" > Ajouter une connexion
- Renseigne les informations : nom de la base, hôte, , utilisateur, mot de passe.

##### ➤ Lancer l'importation via DB Manager

- Une fois connecté, dans DB Manager, clique sur "Importer la couche" .
- Choisis la couche QGIS à importer.

- Sélectionne la base de données PostGIS et le schéma de destination.

➤ **Configurer les options d'importation :**

- Donne un nom à la nouvelle table.
- Vérifie que le champ "Géométrie" est bien détecté.
- Coche "Créer un index spatial".

❖ **Une couche des régions administratives :**

Query Query History

```
1 create index idx_region_geom
2 on public.region
3 using GIST(geom);
4
```

❖ **Une couche des données agricoles :**

Importer une couche vecteur

Source: agricultures

☐ Importer uniquement les entités sélectionnées

Table en sortie

Schéma: public

Table: agriculture\_region

Options

☐ Clé primaire: id

☒ Colonne de géométrie: geom

☐ SCR source: EPSG:26191 - Merchich / Nord Maroc

☐ SCR cible: EPSG:26191 - Merchich / Nord Maroc

☐ Encodage: Automatique

☐ Remplacer la table de destination (si existante)

☐ Ne pas promouvoir en multi-partie

☐ Convertir les noms de champ en minuscule

☒ Créer un index spatial

☐ Commentaire

OK Annuler

## Query Query History

```

1 create index idx_agricultures_geom
2 on public.agricultures
3 using GIST(geom);
4

```

### ❖ Une couche du réseau routier :

Importer une couche vecteur

Source: routemaroc

☐ Importer uniquement les entités sélectionnées

Table en sortie

Schéma: public

Table: routemaroc

Options

☐ Clé primaire: id

☒ Colonne de géométrie: geom

☐ SCR source: EPSG:4326 - WGS 84

☐ SCR cible: EPSG:4326 - WGS 84

☐ Encodage: Automatique

☐ Remplacer la table de destination (si existante)

☐ Ne pas promouvoir en multi-partie

☐ Convertir les noms de champ en minuscule

☒ Créer un index spatial

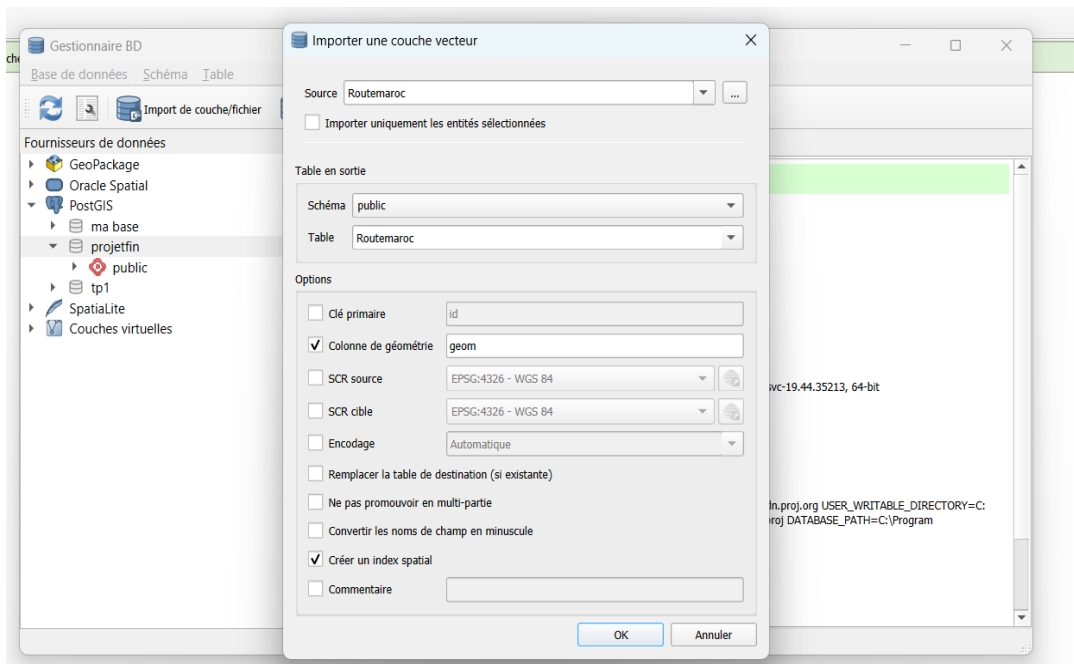
☐ Commentaire

OK Annuler

## Query Query History

```
1 create index idx_routemaroc_geom
2 on public.routemaroc
3 using GIST(geom);
4
```

### ❖ Une couche des autoroutes :



## Query Query History

```
1 create index idx_autoroutes_geom
2 on public.autorotes
3 using GIST(geom);
4
```

❖ Une couche des cours d'eau :

Importer une couche vecteur

Source: river

☐ Importer uniquement les entités sélectionnées

Table en sortie

Schéma: public

Table: river

Options

☐ Clé primaire: id

☒ Colonne de géométrie: geom

☐ SCR source: EPSG:26191 - Merchich / Nord Maroc

☐ SCR cible: EPSG:26191 - Merchich / Nord Maroc

☐ Encodage: Automatique

☐ Remplacer la table de destination (si existante)

☐ Ne pas promouvoir en multi-partie

☐ Convertir les noms de champ en minuscule

☒ Créer un index spatial

☐ Commentaire:

OK Annuler

Query Query History

```
1 create index idx_river_geom
2 on public.river
3 using GIST(geom);
4
```

❖ Une couche des établissements de formation :



Importer une couche vecteur

Source: ecole

☐ Importer uniquement les entités sélectionnées

Table en sortie

Schéma: public

Table: ecole

Options

☐ Clé primaire: id

☒ Colonne de géométrie: geom

☐ SCR source: EPSG:26191 - Merchich / Nord Maroc

☐ SCR cible: EPSG:26191 - Merchich / Nord Maroc

☐ Encodage: Automatique

☐ Remplacer la table de destination (si existante)

☐ Ne pas promouvoir en multi-partie

☐ Convertir les noms de champ en minuscule

☒ Créer un index spatial

☐ Commentaire:

OK Annuler

Query	Query History
1	create index idx_ecole_geom
2	on public.ecole
3	using GIST(geom);
4	

## V. Résultats des requêtes :

### 1- Longueur totale du réseau routier par région :

- **Objectif**

Déterminer la longueur cumulée des routes présentes dans chaque région du Maroc, afin d'évaluer le développement et la répartition du réseau routier sur le territoire national.

- **Étapes de réalisation**

1. **Projeter les données** dans un système métrique approprié (ex. : EPSG:26191 – Maroc Nord) pour obtenir des mesures fiables en mètres.

```

UPDATE region
SET geom = ST_SetSRID(geom, 4326)
WHERE ST_SRID(geom) = 0 ;
UPDATE autouroute
SET geom = ST_SetSRID(geom, 4326)
WHERE ST_SRID(geom) = 0;
UPDATE river
SET geom = ST_SetSRID(geom, 4326)
WHERE ST_SRID(geom) = 0;
Update routemaroc
SET geom = ST_SetSRID(geom, 4326)
WHERE ST_SRID(geom) = 0;

```

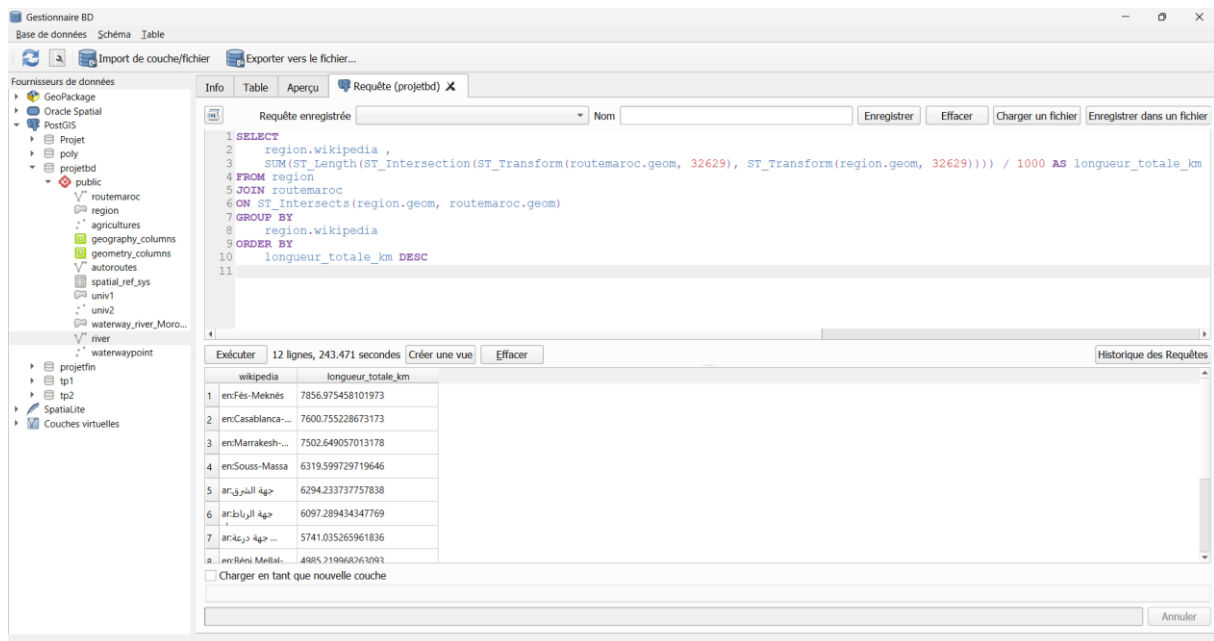
2. **Effectuer une intersection spatiale** entre les routes et les régions pour découper les routes à l'intérieur de chaque région.
3. **Calculer la longueur** de chaque tronçon de route (champ ST\_Length).
4. **Agréger les résultats par région** en additionnant les longueurs des tronçons
5. **Exprimer les résultats en kilomètres** (conversion des mètres : /1000).

**Requête QGIS :**

```

SELECT
    r.wikipedia ,
    SUM(ST_Length(ST_Intersection(ST_Transform(rt.geom, 32629),
    ST_Transform(r.geom, 32629)))) / 1000 AS longueur_totale_km
FROM
    region r
JOIN
    routemaroc rt
ON
    ST_Intersects(r.geom, rt.geom)
GROUP BY
    r.wikipedia
ORDER BY longueur_totale_km DESC

```



Et voici le résultat :

	wikipedia	longueur_totale_km
1	en:Fès-Meknès	7856.975458101973
2	en:Casablanca-...	7600.755228673173
3	en:Marrakesh-...	7502.649057013178
4	en:Souss-Massa	6319.599729719646
5	ar:جهة الشرق	6294.233737757838
6	ar:جهة الرباط	6097.289434347769
7	ar:جهة درعة ...	5741.035265961836
8	en:Béni Mellal-...	4985.219968263093
9	ar:جهة طنجة ...	3377.6924984903762
10	ar:جهة كلميم واد...	2787.384090588789
11	en:Dakhla-Oue...	2656.9469319667137
12	ar:جهة العيون ...	2478.2345190076257

## 2. Densité routière (km de routes par 100 km<sup>2</sup>) pour chaque région

### Objectif

Évaluer la densité du réseau routier afin de mesurer le niveau d'équipement en infrastructures de transport dans chaque région.

### Étapes de réalisation

1. Calculer la superficie de chaque région en km<sup>2</sup> (ST\_Area(r.geom)/1e6).
2. Utiliser les résultats de la requête précédente (longueur totale des routes par région).

3. **Diviser la longueur totale des routes par la superficie**, puis multiplier par 100 pour obtenir la densité par 100 km<sup>2</sup>.

### Requête QGIS :

```
SELECT
    region.wikipedia AS region,
    ROUND(CAST(SUM(ST_Length(ST_Intersection(ST_Transform(routemaroc.geom,
32629),ST_Transform(region.geom, 32629)))) / 1000 AS numeric),2 ) AS longueur_km,
    ROUND(CAST(((SUM(ST_Length(ST_Intersection(ST_Transform(routemaroc.geom,
32629),ST_Transform(region.geom, 32629)))) / 1000)/
        ((SELECT ST_Area(ST_Transform(r1.geom, 32629))/ 10e6
FROM region r1
WHERE r1.wikipedia = region.wikipedia)) * 100) AS numeric ),2 ) AS
densite_routiere_km_par_100km2
FROM region
JOIN routemaroc
ON ST_Intersects(region.geom,routemaroc.geom)
GROUP BY
    region.wikipedia
ORDER BY
    densite_routiere_km_par_100km2 DESC;
```

The screenshot shows the QGIS database manager interface. On the left, a tree view shows the database structure, including a 'public' schema with a 'routemaroc' table. The main window displays a SQL query in the 'Requête enregistrée' tab. The query is the same as the one provided in the text. Below the query, the 'Exécuter' button is visible, along with a status bar indicating '12 lignes, 342.302 secondes'. The results are shown in a table with three columns: 'region', 'longueur\_km', and 'densite\_routiere\_km\_par\_100km2'. The results are ordered by 'densite\_routiere\_km\_par\_100km2' in descending order.

region	longueur_km	densite_routiere_km_par_100km2
enCasablanca...	7600.76	376.04
arالرباط	6097.29	343.61
arAoulab	3377.69	208.63
enFes-Meknes	7856.98	202.22
enMarrakesh...	7502.65	192.45
enBéni Mellal...	4985.22	181.56
enSouss-Massa	6319.6	117.64

Et voici le résultat :

	region	longueur_km	densite_routiere_km_par_100km2
1	en:Casablanca-Settat	7600.76	376.04
2	ar:جهة الرباط سلا القنيطرة	6097.29	343.61
3	ar:جهة طنجة تطوان الحسيمة	3377.69	208.63
4	en:Fès-Meknès	7856.98	202.22
5	en:Marrakesh-Safi	7502.65	192.45
6	en:Béni Mellal-Khénifra	4985.22	181.56
7	en:Souss-Massa	6319.6	117.64
8	ar:جهة الشرق	6294.23	94.33
9	ar:جهة درعة تافيلالت	5741.04	66.26
10	ar:جهة كلميم واد نون	2787.38	62.45
11	en:Dakhla-Oued Ed-Dahab	2656.95	20.52
12	ar:جهة العيون الساقية الحمراء	2478.23	17.16

### 3. Établissements de formation situés à moins de 5 km d'une autoroute :

#### Objectif

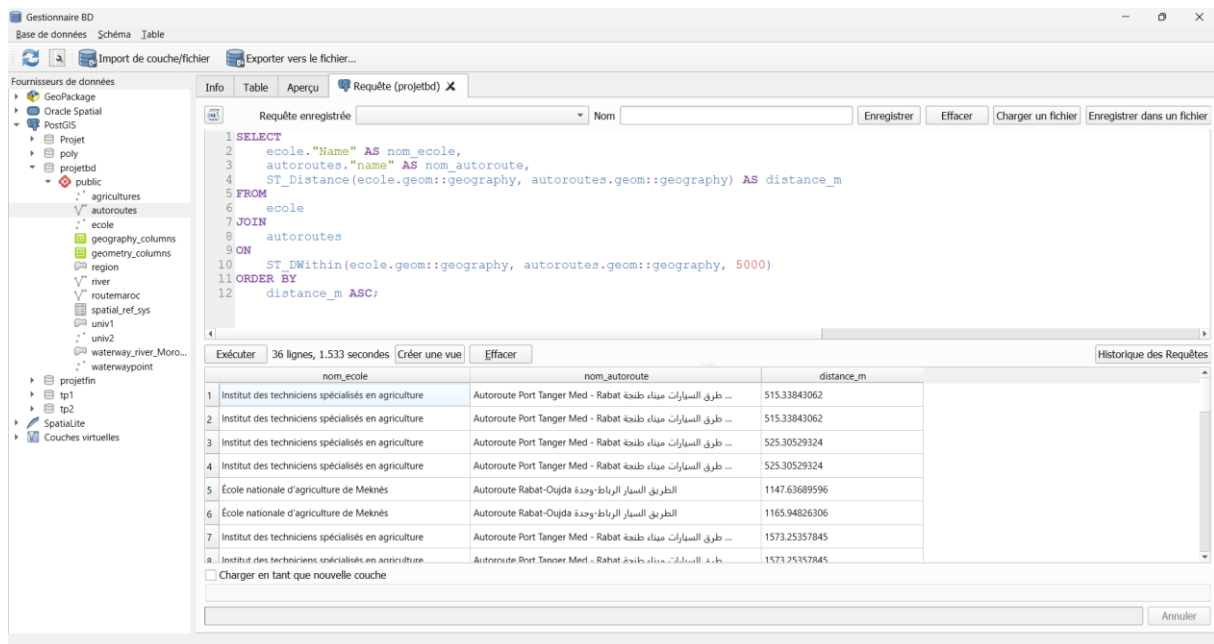
Identifier les établissements de formation ayant un accès rapide aux grands axes routiers, afin d'évaluer leur accessibilité territoriale.

#### Étapes de réalisation

1. **Effectuer une sélection spatiale** ou un **joint spatial** pour extraire les établissements situés à l'intérieur de cette zone tampon.
2. **Lister les établissements concernés** avec leur nom, localisation et région d'appartenance.

#### Requête QGIS :

```
SELECT
    ecole."Name" AS nom_ecole,
    autoroutes."name" AS nom_autoroute,
    ST_Distance(ecole.geom::geography, autoroutes.geom::geography) AS distance_m
FROM ecole
JOIN autoroutes
ON
    ST_DWithin(ecole.geom::geography, autoroutes.geom::geography, 5000)
ORDER BY
    distance_m ASC;
```



Et voici le résultat suivant :

	nom_ecole	nom_autoroute	distance_m
1	Institut des techniciens spécialisés en agriculture	Autoroute Port Tanger Med - Rabat طريق السيارات ميناء طنجة ...	515.33843062
2	Institut des techniciens spécialisés en agriculture	Autoroute Port Tanger Med - Rabat طريق السيارات ميناء طنجة ...	515.33843062
3	Institut des techniciens spécialisés en agriculture	Autoroute Port Tanger Med - Rabat طريق السيارات ميناء طنجة ...	525.30529324
4	Institut des techniciens spécialisés en agriculture	Autoroute Port Tanger Med - Rabat طريق السيارات ميناء طنجة ...	525.30529324
5	École nationale d'agriculture de Meknès	Autoroute Rabat-Oujda الطريق السيار الرباط-وجدة	1147.63689596
6	École nationale d'agriculture de Meknès	Autoroute Rabat-Oujda الطريق السيار الرباط-وجدة	1165.94826306
7	Institut des techniciens spécialisés en agriculture	Autoroute Port Tanger Med - Rabat طريق السيارات ميناء طنجة ...	1573.25357845
8	Institut des techniciens spécialisés en agriculture	Autoroute Port Tanger Med - Rabat طريق السيارات ميناء طنجة ...	1573.25357845
9	Institut des techniciens spécialisés en agriculture	Autoroute Port Tanger Med - Rabat طريق السيارات ميناء طنجة ...	1578.86282551
10	Institut des techniciens spécialisés en agriculture	Autoroute Port Tanger Med - Rabat طريق السيارات ميناء طنجة ...	1578.86282551
11	Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan-II	Autoroute Rabat - Safi الطريق السيار الرباط - آسفي	1757.64953081
12	Institut des techniciens spécialisés en agriculture	Autoroute Port Tanger Med - Rabat طريق السيارات ميناء طنجة ...	1763.94865144
13	Institut des techniciens spécialisés en agriculture	Autoroute Port Tanger Med - Rabat طريق السيارات ميناء طنجة ...	1763.94865144
14	Institut Agronomique et Vétérinaire Hassan-II	Autoroute Rabat - Safi الطريق السيار الرباط - آسفي	1768.23219065
15	Institut des techniciens spécialisés en agriculture	Autoroute Port Tanger Med - Rabat طريق السيارات ميناء طنجة ...	1769.54494368
16	Institut des techniciens spécialisés en agriculture	Autoroute Port Tanger Med - Rabat طريق السيارات ميناء طنجة ...	1769.54494368
17	Institut des Techniciens spécialisés en Agriculture	Périphérique de Rabat الطريق الدائري الرباط	1865.45253556
18	Institut des Techniciens spécialisés en Agriculture	Périphérique de Rabat الطريق الدائري الرباط	1865.45253556
19	Institut des Techniciens spécialisés en Agriculture	Périphérique de Rabat الطريق الدائري الرباط	1886.17407304

## 4. Longueur des cours d'eau traversant les régions les plus agricoles (selon la SAU)

### Objectif

Mesurer la longueur totale des cours d'eau dans les régions possédant la plus grande **Superficie Agricole Utile (SAU)**, pour analyser le lien entre la ressource hydrique et le potentiel agricole.

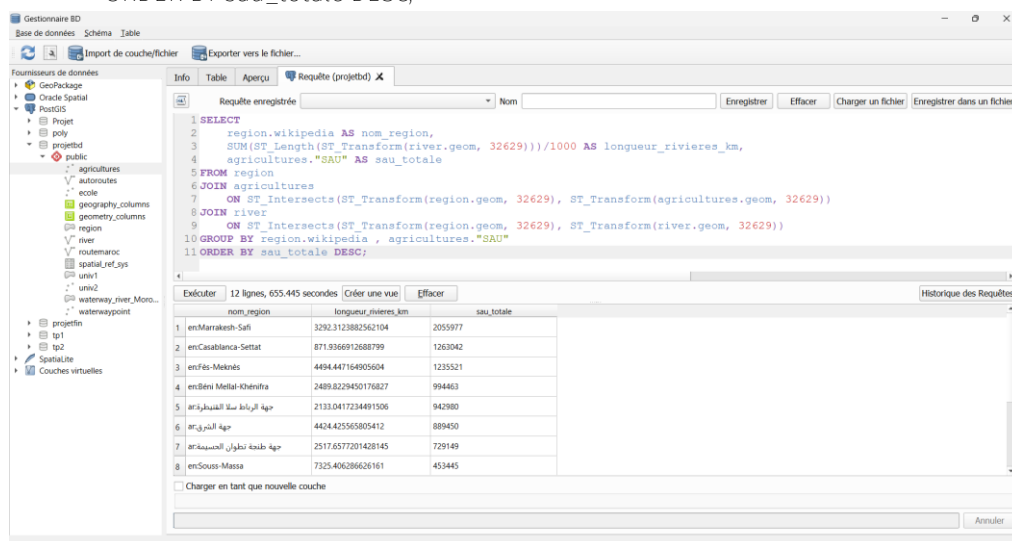
### Étapes de réalisation

1. **Identifier les régions les plus agricoles**, c'est-à-dire celles ayant une SAU supérieure à la moyenne nationale.
2. **Effectuer une intersection spatiale** entre les cours d'eau et ces régions sélectionnées.
3. **Calculer la longueur totale des tronçons de cours d'eau par région agricole.**



## Requête QGIS :

```
SELECT
  region.wikipedia AS nom_region,
  SUM(ST_Length(ST_Transform(river.geom, 32629)))/1000 AS longueur_rivieres_km,
  agricultures."SAU" AS sau_totale
FROM region
JOIN agricultures
  ON ST_Intersects(ST_Transform(region.geom, 32629), ST_Transform(agricultures.geom, 32629))
JOIN river
  ON ST_Intersects(ST_Transform(region.geom, 32629), ST_Transform(river.geom, 32629))
GROUP BY region.wikipedia , agricultures."SAU"
ORDER BY sau_totale DESC;
```



Et voici le resultat :

	nom_region	longueur_rivieres_km	sau_totale
1	en:Marrakesh-Safi	3292.3123882562104	2055977
2	en:Casablanca-Settat	871.9366912688799	1263042
3	en:Fès-Meknès	4494.447164905604	1235521
4	en:Béni Mellal-Khénifra	2489.8229450176827	994463
5	ar:جهة الرباط سلا القنيطرة	2133.0417234491506	942980
6	ar:جهة الشرق	4424.425565805412	889450
7	ar:جهة طنجة تطوان الحسيمة	2517.6577201428145	729149
8	en:Souss-Massa	7325.406286626161	453445
9	ar:جهة درعة تافيلالت	12112.246464067428	270910
10	ar:جهة كلميم واد نون	2152.255522281581	164099
11	ar:جهة العيون الساقية الحمراء	9847.410462749878	136000
12	en:Dakhla-Oued Ed-Dahab	1167.4144542743206	100000

## 5. Analyse croisée entre superficie irrigable et densité routière

### Objectif

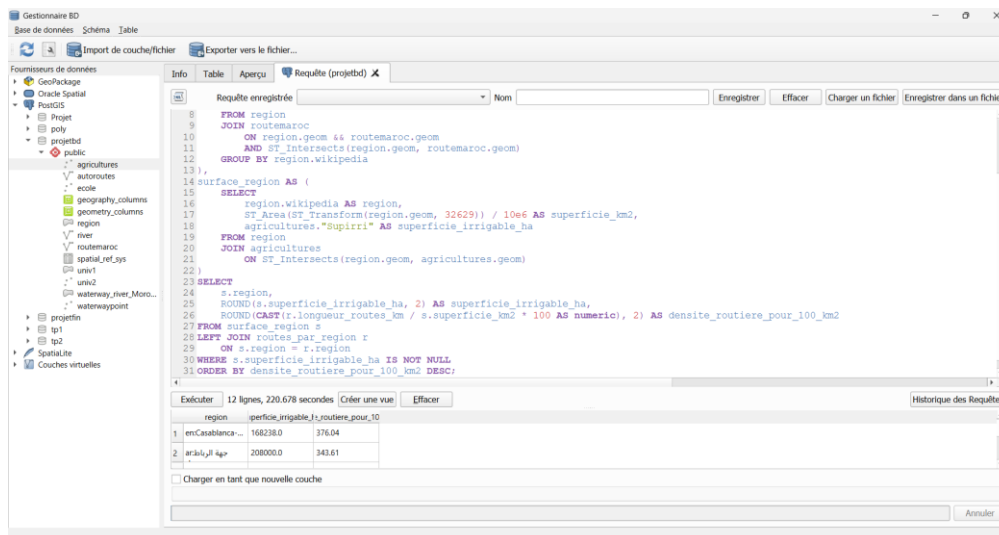
Comparer le potentiel agricole (superficie irrigable) avec la densité du réseau routier afin de comprendre la relation entre accessibilité et développement agricole.

### Étapes de réalisation

1. **Combiner les indicateurs** issus des requêtes précédentes :
  - Superficie irrigable par région (donnée attributaire).
  - Densité routière calculée précédemment.
2. **Joindre les deux indicateurs** sur le champ commun nom\_region.
3. **Analyser la corrélation** entre ces variables (par exemple, via un nuage de points ou une classification thématique).

### Requête QGIS :

```
WITH routes_par_region AS (  
  SELECT  
    region.wikipedia AS region,  
    SUM(ST_Length(ST_Intersection(  
      ST_Transform(routemaroc.geom, 32629),  
      ST_Transform(region.geom, 32629) ))) / 1000 AS longueur_routes_km  
  FROM region  
  JOIN routemaroc  
    ON region.geom && routemaroc.geom  
    AND ST_Intersects(region.geom, routemaroc.geom)  
  GROUP BY region.wikipedia),  
surface_region AS (  
  SELECT  
    region.wikipedia AS region,  
    ST_Area(ST_Transform(region.geom, 32629)) / 10e6 AS superficie_km2,  
    agricultures."Supirri" AS superficie_irrigable_ha  
  FROM region  
  JOIN agricultures  
    ON ST_Intersects(region.geom, agricultures.geom))  
SELECT  
  s.region,  
  ROUND(s.superficie_irrigable_ha, 2) AS superficie_irrigable_ha,  
  ROUND(CAST(r.longueur_routes_km / s.superficie_km2 * 100 AS numeric), 2) AS  
densite_routiere_pour_100_km2  
FROM surface_region s  
LEFT JOIN routes_par_region r  
  ON s.region = r.region  
WHERE s.superficie_irrigable_ha IS NOT NULL  
ORDER BY densite_routiere_pour_100_km2 DESC;
```



Et voici le resultat :

	region	superficie_irrigable_ha	densite_routiere_pour_100_km2
1	en:Casablanca-Settat	168238.0	376.04
2	ar:جهة الرباط سلا القنيطرة	208000.0	343.61
3	ar:جهة طنجة تطوان الحسيمة	66174.0	208.63
4	en:Fès-Meknès	193542.0	202.22
5	en:Marrakesh-Safi	345032.0	192.45
6	en:Béni Mellal-Khénifra	226293.0	181.56
7	en:Souss-Massa	174862.0	117.64
8	ar:جهة الشرق	181388.0	94.33
9	ar:جهة درعة تافيلالت	201922.0	66.26
10	ar:جهة كلميم واد نون	36602.0	62.45
11	en:Dakhla-Oued Ed-Dahab	1152.0	20.52
12	ar:جهة العيون الساقية الحمراء	5543.0	17.16

## 6-Nombre de cours d'eau par région

### Objectif

Identifier le **nombre total de cours d'eau (rivières, oueds, fleuves, etc.)** présents dans chaque région du Maroc. Cette information permet d'évaluer la densité du réseau hydrographique et son importance pour la gestion de l'eau et l'aménagement du territoire.

### Étapes de réalisation

1. **Vérifier le système de coordonnées** pour s'assurer qu'il est identique pour les deux couches.
2. **Effectuer une intersection spatiale** entre les cours d'eau et les régions pour déterminer quels cours d'eau traversent quelles régions.
3. **Compter le nombre distinct de cours d'eau** (identifiés par leur ID) dans chaque région.

4. **Classer les résultats par ordre décroissant** pour identifier les régions les plus riches en réseau hydrographique.

#### Requête SQL :

```
SELECT
  reg.wikipedia AS nom_region,
  COUNT(DISTINCT w.id) AS nb_cours_eau
FROM
  region reg
JOIN
  river w
ON
  ST_Intersects(reg.geom, w.geom)
GROUP BY
  reg.wikipedia
ORDER BY
  nb_cours_eau DESC;
```

	name character varying (254)	nb_cours_eau bigint
1	Drâa-Tafilalet ⵎⴰⵔⴰⵏⵜ ⵜⴰⵎⴰⵙⴰⵢⵜ ⵜⴰⵖⴰⵏⵉⵜ	1979
2	Souss-Massa ⵓⵙⵙⴰⵎⴰⵙⴰ ⵜⴰⵖⴰⵏⵉⵜ	1459
3	Laâyoune-Sakia El Hamra ⵍⵎⴰⵙⴰⵢⵜ ⵜⴰⵖⴰⵏⵉⵜ ⵜⴰⵙⴰⵎⴰⵙⴰⵢⵜ	562
4	Marrakech-Safi ⵎⴰⵔⴰⵎⴰⵔⴰⵏ ⵜⴰⵖⴰⵏⵉⵜ ⵜⴰⵙⴰⵎⴰⵙⴰⵢⵜ	506
5	Oriental ⵜⴰⵖⴰⵏⵉⵜ ⵜⴰⵙⴰⵎⴰⵙⴰⵢⵜ	445
6	Fès-Meknès ⵍⵎⴰⵙⴰⵢⵜ ⵜⴰⵖⴰⵏⵉⵜ ⵜⴰⵙⴰⵎⴰⵙⴰⵢⵜ	404
7	Tanger-Tétouan-Al Hoceïma ⵜⴰⵖⴰⵏⵉⵜ ⵜⴰⵙⴰⵎⴰⵙⴰⵢⵜ ⵜⴰⵖⴰⵏⵉⵜ	256
8	Guelmim-Oued Noun ⵍⵎⴰⵙⴰⵢⵜ ⵜⴰⵖⴰⵏⵉⵜ ⵜⴰⵙⴰⵎⴰⵙⴰⵢⵜ	242
9	Béni Mellal-Khénifra ⵍⵎⴰⵙⴰⵢⵜ ⵜⴰⵖⴰⵏⵉⵜ ⵜⴰⵙⴰⵎⴰⵙⴰⵢⵜ	228
10	Casablanca-Settat ⵜⴰⵖⴰⵏⵉⵜ ⵜⴰⵙⴰⵎⴰⵙⴰⵢⵜ ⵜⴰⵖⴰⵏⵉⵜ	193
11	Rabat-Salé-Kénitra ⵍⵎⴰⵙⴰⵢⵜ ⵜⴰⵖⴰⵏⵉⵜ ⵜⴰⵙⴰⵎⴰⵙⴰⵢⵜ	152
12	Dakhla-Oued Ed-Dahab ⵍⵎⴰⵙⴰⵢⵜ ⵜⴰⵖⴰⵏⵉⵜ ⵜⴰⵙⴰⵎⴰⵙⴰⵢⵜ	90

## 7. Nombre d'universités par région

### Objectif

Déterminer la **répartition des universités** sur le territoire national selon les régions. Cette requête permet de visualiser la concentration des établissements universitaires et d'analyser l'équité territoriale en matière d'accès à l'enseignement supérieur.

### Étapes de réalisation

1. **Effectuer une jointure spatiale** à l'aide de la fonction ST\_Within() pour identifier les universités situées à l'intérieur des limites régionales.
2. **Utiliser une jointure externe gauche (LEFT JOIN)** afin de conserver toutes les régions, même celles ne contenant aucune université.
3. **Compter le nombre d'universités par région** à l'aide de COUNT().
4. **Classer les résultats** du plus grand au plus petit nombre d'universités.

#### Requête SQL :

```

SELECT
  reg.wikipedia AS nom_region,
  COUNT(uni.id) AS nombre_universites
FROM
  region reg
LEFT JOIN
  ecole uni
ON
  ST_Within(uni.geom, reg.geom)
GROUP BY
  reg.wikipedia
ORDER BY
  nombre_universites DESC;

```

	name character varying (254)	nb_autoroutes bigint
1	Casablanca-Settat الدار البيضاء-سطات	381
2	Rabat-Salé-Kénitra الرباط-سلا-القنيطرة	211
3	Tanger-Tétouan-Al Hoceïma تطوان الحسيمة	186
4	Marrakech-Safi مراكش-أسفي	140
5	Oriental الشرقية	103
6	Fès-Meknès فاس-مكناس	103
7	Souss-Massa سوس-ماسة	51
8	Béni Mellal-Khénifra بني ملال-خنيفرة	24

## 8. Nombre d'autoroutes par région

### Objectif

Déterminer combien d'**autoroutes** traversent ou passent dans chaque région. Cette analyse aide à comprendre la distribution des infrastructures routières majeures et leur rôle dans la connectivité interrégionale.

### Étapes de réalisation

1. **Effectuer une jointure spatiale** via ST\_Intersects() pour repérer les tronçons d'autoroutes qui traversent les limites régionales.
2. **Compter le nombre distinct d'autoroutes** (selon leur identifiant id) présentes dans chaque région.
3. **Grouper et trier les résultats** par région pour obtenir un classement du réseau autoroutier.

### Requête SQL :

```

SELECT
  reg.wikipedia AS nom_region,
  COUNT(DISTINCT m.id) AS nb_autoroutes
FROM
  region reg
JOIN
  autoroutes m

```

```

ON
  ST_Intersects(m.geom, reg.geom)
GROUP BY
  reg.wikipedia
ORDER BY
  nb_autoroutes DESC;

```

	name character varying (254)	nombre_universites bigint
1	Rabat-Salé-Kénitra ⵕⵕⵉⵎⵓⵏⵓⵔ ⵕⵕⵉⵎⵓⵏⵓⵔ ⵕⵕⵉⵎⵓⵏⵓⵔ	6
2	Fès-Meknès ⵕⵕⵉⵎⵓⵏⵓⵔ ⵕⵕⵉⵎⵓⵏⵓⵔ	5
3	Souss-Massa ⵕⵕⵉⵎⵓⵏⵓⵔ ⵕⵕⵉⵎⵓⵏⵓⵔ	3
4	Oriental ⵕⵕⵉⵎⵓⵏⵓⵔ ⵕⵕⵉⵎⵓⵏⵓⵔ	2
5	Tanger-Tétouan-Al Hoceïma ⵕⵕⵉⵎⵓⵏⵓⵔ ⵕⵕⵉⵎⵓⵏⵓⵔ ⵕⵕⵉⵎⵓⵏⵓⵔ	2
6	Drâa-Tafilalet ⵕⵕⵉⵎⵓⵏⵓⵔ ⵕⵕⵉⵎⵓⵏⵓⵔ	2
7	Béni Mellal-Khénifra ⵕⵕⵉⵎⵓⵏⵓⵔ ⵕⵕⵉⵎⵓⵏⵓⵔ	1
8	Marrakech-Safi ⵕⵕⵉⵎⵓⵏⵓⵔ ⵕⵕⵉⵎⵓⵏⵓⵔ	1
9	Laâyoune-Sakia El Hamra ⵕⵕⵉⵎⵓⵏⵓⵔ ⵕⵕⵉⵎⵓⵏⵓⵔ	0
10	Guelmim-Oued Noun ⵕⵕⵉⵎⵓⵏⵓⵔ ⵕⵕⵉⵎⵓⵏⵓⵔ	0
11	Dakhla-Oued Ed-Dahab ⵕⵕⵉⵎⵓⵏⵓⵔ ⵕⵕⵉⵎⵓⵏⵓⵔ	0
12	Casablanca-Settat ⵕⵕⵉⵎⵓⵏⵓⵔ ⵕⵕⵉⵎⵓⵏⵓⵔ	0

## VI. Indexation Spatiale Rtree et Rtree\* :

### A- R-tree :

Un R-Tree est une structure de données spécialisée dans l'indexation d'informations multidimensionnelles comme les coordonnées géographiques, les polygones ou les rectangles. Largement utilisé dans les bases de données spatiales, il est conçu pour optimiser les requêtes spatiales complexes. Son organisation hiérarchique permet un accès rapide et une gestion efficace des objets géographiques.

Le R-Tree est une structure de données arborescente conçue pour l'indexation spatiale. Chaque nœud de l'arbre contient plusieurs entrées, et chaque entrée est associée à un rectangle de délimitation appelé MBR (Minimum Bounding Rectangle). Ces rectangles englobent soit des points de données, soit des nœuds enfants, permettant ainsi une organisation hiérarchique efficace.

- Rôle des MBR

Le MBR représente l'extension maximale d'un objet bidimensionnel (point, ligne, polygone) dans un système de coordonnées (x, y), défini par:

- min(x), max(x)
- min(y), max(y)

Ces rectangles sont utilisés pour:

- Réduire l'espace de recherche lors des requêtes spatiales
- Offrir une approximation rapide de la position d'un objet
- Faciliter l'affichage et l'indexation spatiale



### Étape a: Première insertion (création du premier nœud) :

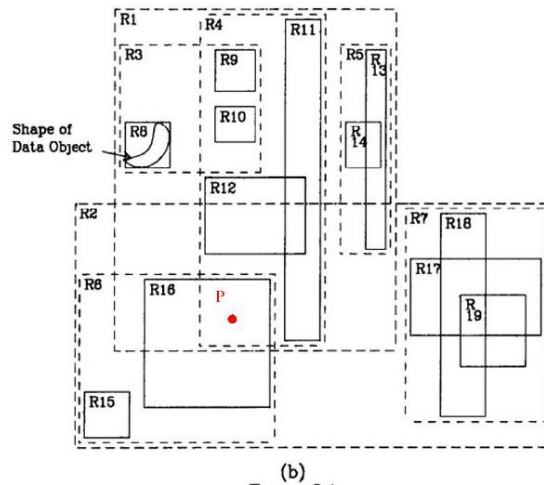
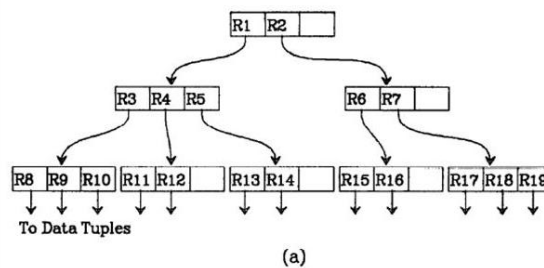
La construction d'un R-Tree commence par l'insertion d'un premier objet:

1. Création du nœud racine: Un nœud initial est créé pour accueillir la première entrée.
2. Calcul du MBR: Le MBR de l'objet inséré est calculé et stocké dans ce nœud.
3. Structure minimale: À ce stade, l'arbre est constitué d'un seul nœud contenant un seul MBR.

#### → Principe d'insertion

L'insertion dans un R-Tree suit un processus dynamique:

- Le parcours commence au nœud racine.
- À chaque niveau, le nœud enfant dont le MBR peut accueillir l'objet avec le moins d'expansion est sélectionné.
- Si un nœud dépasse sa capacité maximale, il est divisé.
- Les MBR des nœuds parents sont mis à jour pour refléter les nouvelles limites.



### b. Ajout d'objets jusqu'à atteindre la capacité maximale ( $M = 4$ ) :

Lors de l'insertion successive de nouveaux objets spatiaux, le R-Tree doit choisir le meilleur emplacement pour chaque objet afin de maintenir une structure efficace. Ce choix repose sur deux principes fondamentaux:

- Minimisation de l'augmentation de surface:

Pour chaque nœud candidat, on calcule combien la surface de son MBR devra s'agrandir pour inclure le nouvel objet.

- Réduction du recouvrement :

On privilégie les insertions qui évitent de faire se chevaucher les MBRs, ce qui améliore l'efficacité des requêtes.

Exemple : Si un objet peut être inséré dans deux nœuds:

- Dans le nœud A, l'aire du MBR augmenterait de 4 unités<sup>2</sup>
- Dans le nœud B, l'aire augmenterait de 12 unités<sup>2</sup>

Le R-Tree choisira le nœud A, car il minimise l'expansion de surface.

➤ **Ce mécanisme:**

- Réduit l'espace vide dans les MBRs
- Diminue les zones de recouvrement
- Accélère les recherches spatiales futures

**c. Capacité maximale: contrôle du nombre d'entrées dans un nœud :**

Chaque nœud du R-Tree a une capacité maximale M, qui définit le nombre d'entrées (MBRs) qu'il peut contenir. Cette contrainte est essentielle pour garantir:

- Un arbre équilibré
- Des performances de recherche optimales
- Une structure compacte et bien organisée

**Exemple:**

Si  $M = 4$ , un nœud peut contenir jusqu'à 4 MBRs. Lorsqu'un cinquième objet doit être inséré, le nœud dépasse sa capacité.

Cela déclenche une opération de division (split):

- Le nœud est scindé en deux
- Les MBRs sont redistribués
- Le MBR du parent est mis à jour ou un nouveau niveau est créé si nécessaire

➤ **Avantages du contrôle de capacité:**

- Réduction du chevauchement entre MBRs
- Limitation de l'espace vide
- Maintien d'une hiérarchie efficace pour les requêtes spatiales

**d- Déclenchement d'un Split: Division d'un Nœud Surchargé :**

- Pourquoi un split?

Lorsqu'un nœud dépasse sa capacité maximale  $M$ , le R-Tree déclenche une opération de split (division). Cette opération vise à:

- Répartir les entrées en deux nouveaux nœuds
- Minimiser le chevauchement entre les MBRs
- Réduire l'aire totale couverte par les rectangles
- Maintenir une structure hiérarchique équilibrée

#### ➤ Méthodes de division :

Plusieurs stratégies peuvent être utilisées pour répartir les entrées:

- Split linéaire: basé sur une séparation simple selon les coordonnées
- Split quadratique: optimise la répartition en minimisant le recouvrement
- Heuristiques avancées: utilisent des critères comme la surface totale ou l'expansion minimale des MBRs

#### **Exemple de répartition**

Si un nœud contient 5 rectangles et que  $M = 4$ , l'insertion d'un nouvel objet ( $M+1 = 5$ ) déclenche un split:

- Deux nouveaux nœuds sont créés
- Par exemple: l'un avec 2 rectangles, l'autre avec 3 rectangles
- Les MBRs des deux nœuds sont recalculés pour refléter leur contenu
- Le nœud parent est mis à jour pour intégrer les nouveaux MBRs

- Processus détaillé avec contrainte minimale ( $m = 2$ )

Lorsque la valeur minimale  $m$  d'entrées par nœud est fixée (ex.  $m = 2$ ), le split doit respecter cette contrainte:

#### 1. Sélection des noyaux:

On identifie les deux entrées les plus éloignées spatialement. Elles deviennent les centres des deux nouveaux nœuds.

#### 2. Répartition des autres entrées:

Chaque entrée restante est attribuée au nœud dont le MBR nécessite le plus faible agrandissement.

#### 3. Respect de la contrainte $m$ :

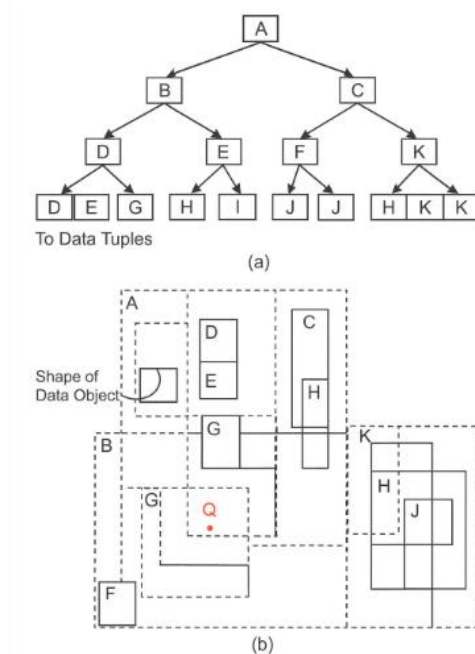
Si un nœud risque d'avoir moins de  $m$  entrées, certaines sont déplacées pour garantir la validité de la structure.

#### **Résultat du split :**

- Les entrées sont réparties de manière optimale

- Les MBRs sont réduits et peu chevauchants
- L'arbre conserve son efficacité pour les requêtes spatiales

e. Création d'un nouveau niveau : extension de la racine



- Lorsqu'un nœud plein est divisé (split) et qu'il s'agit de la racine, aucun nœud parent n'existe pour relier les deux nouveaux sous-nœuds.
- Dans ce cas, une nouvelle racine est créée pour englober les deux MBRs (Minimum Bounding Rectangles) issus du split.
- Cela permet à l'arbre de s'agrandir verticalement, en ajoutant un niveau supplémentaire, tout en maintenant sa structure équilibrée.
- Cette propriété distingue le R-Tree d'une simple liste, car il garde sa hiérarchie même après un split de la racine.

f. Insertion continue et mise à jour dynamique des MBRs :

- À chaque nouvelle insertion, le R-Tree :

1. Choisit le nœud optimal pour insérer le nouvel objet.
2. Met à jour dynamiquement les MBRs afin d'inclure l'objet.
3. Effectue un split si le nœud dépasse la capacité.
4. Propage les modifications vers les nœuds parents.

- Les nœuds internes contiennent uniquement les MBRs des sous-nœuds, tandis que les feuilles contiennent les MBRs des objets spatiaux.
- Le schéma illustre cette hiérarchie claire entre MBRs des objets (niveau feuille) et MBRs englobants (niveaux internes).

### g. Minimisation du recouvrement : optimisation des recherches

- Un objectif central du R-Tree est de réduire le chevauchement entre les MBRs.
- Moins les MBRs se recouvrent, moins l'algorithme doit explorer de branches lors d'une requête spatiale.
- Sur les schémas, les MBRs sont construits de manière à limiter les zones de chevauchement, améliorant ainsi l'efficacité des recherches.

### ➤ Exemple de cas de régions :

Chaque région du Maroc possède une géométrie précise, généralement représentée par un polygone défini à partir de ses coordonnées GPS (longitude et latitude). Par exemple, la région de Casablanca-Settat est délimitée par l'ensemble des points formant ses frontières.

Pour simplifier les traitements spatiaux, on calcule pour chaque région son rectangle englobant minimal, appelé MBR (Minimum Bounding Rectangle). Ce MBR est le plus petit rectangle capable de contenir entièrement le polygone de la région. Il est obtenu en déterminant :

- la longitude minimale et maximale,
  - la latitude minimale et maximale
- parmi toutes les coordonnées du polygone.

Ainsi, chaque MBR est défini par les valeurs  $x_{min}$ ,  $y_{min}$ ,  $x_{max}$  et  $y_{max}$ , ce qui permet de le représenter sous forme de rectangle sur une carte.

Ces MBRs sont ensuite insérés dans une structure de données spatiale appelée R-tree. Dans ce type d'arbre :

- Chaque feuille contient le MBR d'une région.
- Les nœuds internes regroupent plusieurs MBRs enfants et forment à leur tour un rectangle englobant couvrant l'ensemble de ces enfants.

### 1. Étapes pratiques

Pour chaque région, le processus de préparation des données spatiales suit les étapes suivantes :

1. Collecte du polygone représentant la région, à partir d'une source géographique.
2. Calcul du MBR (Minimum Bounding Rectangle) à partir des coordonnées GPS du polygone.
3. Insertion du MBR dans un R-tree, structure conçue pour optimiser les recherches spatiales.

À chaque insertion, le R-tree ajuste dynamiquement ses nœuds internes pour conserver une structure équilibrée et efficace.

### 2. Exemple avec trois régions

Prenons trois régions du Maroc : Casablanca-Settat, Rabat-Salé-Kénitra et Marrakech-Safi. Chacune est représentée par un polygone formé des coordonnées GPS de ses frontières.

- **Casablanca-Settat :**

Après traitement de ses coordonnées, on obtient le MBR suivant :

- $x_{min} = -7.7$
- $y_{min} = 33.3$
- $x_{max} = -7.2$
- $y_{max} = 33.9$

- **Rabat-Salé-Kénitra :**

MBR calculé à partir de son polygone :

- $x_{min} = -6.9$
- $y_{min} = 33.3$
- $x_{max} = -6.4$
- $y_{max} = 34.2$

- **Marrakech-Safi :**

MBR obtenu :

- $x_{min} = -8.5$
- $y_{min} = 31.2$
- $x_{max} = -7.5$
- $y_{max} = 32.7$

### **3. Insertion dans un R-tree :**

Une fois ces MBRs calculés :

- Chacun devient une feuille du R-tree.
- L'arbre crée alors un nœud interne qui englobe ces trois feuilles. Ce nœud est représenté par le MBR le plus petit possible contenant les trois rectangles précédents.

Le MBR de ce nœud interne est donc défini par :

- $x_{min} = -8.5$  (le plus petit de tous les  $x_{min}$ )
- $y_{min} = 31.2$
- $x_{max} = -6.4$  (le plus grand de tous les  $x_{max}$ )
- $y_{max} = 34.2$

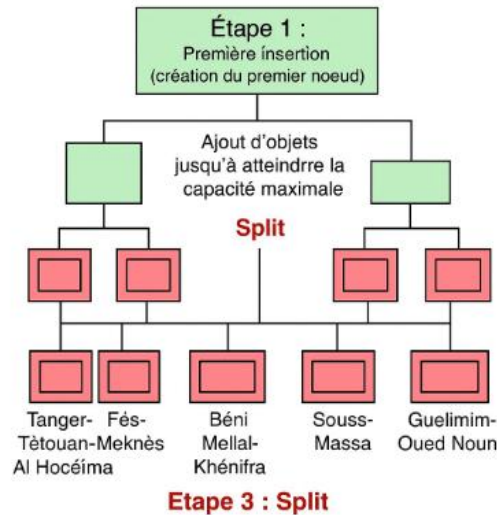
### **4. Avantage pour la recherche spatiale :**

Lors d'une requête (par exemple, localiser un point sur la carte), le R-tree permet :

- De commencer par vérifier le MBR du nœud interne.
- Puis de descendre uniquement dans les MBRs enfants susceptibles de contenir ce point.

Cela permet d'éviter des vérifications inutiles sur toutes les régions, et d'accélérer significativement les recherches.





## **B-R\*-tree :**

Le R-tree\* est une variante améliorée du R-tree classique, conçue pour optimiser la structure de l'arbre et améliorer les performances des requêtes spatiales. Il repose sur deux stratégies clés:

- Réinsertion intelligente
- Minimisation du recouvrement

### **1. Réinsertion (Reinsertion Strategy) :**

- **Principe :**

Lorsqu'un nœud atteint sa capacité maximale, le R\*-tree ne procède pas immédiatement à une division (split). À la place:

- Certains MBRs (Minimum Bounding Rectangles) sont retirés du nœud saturé
- Ces MBRs sont réinsérés dans l'arbre à partir du niveau racine

- **Objectif :**

- Redistribuer les rectangles dans des nœuds plus appropriés
- Réduire le chevauchement entre les MBRs
- Éviter l'étalement excessif des rectangles dans l'arbre

- **Exemple :**

Un MBR initialement inséré dans un nœud dense peut être déplacé vers un nœud moins chargé, ce qui améliore la compacité de l'arbre.

### **2. Minimisation du Recouvrement (Overlap Minimization) :**

- **Principe**

À chaque insertion ou split, le R\*-tree choisit la meilleure répartition des MBRs en fonction de:

- L'aire totale des rectangles
- Le chevauchement entre les MBRs

- **Objectif :**

- Limiter les zones de recouvrement entre les nœuds internes
- Améliorer la précision des recherches spatiales
- Réduire le nombre de rectangles touchés par une requête

➤ **Prenons le même exemple des 3 régions :**

**Étape 1: Insertion initiale :**

- Les MBRs Casablanca-Settat et Rabat-Salé-Kénitra sont insérés dans le premier nœud feuille.
- Le nœud atteint sa capacité maximale lors de l'insertion de Marrakech-Safi.

**Étape 2: Réinsertion :**

- Au lieu de déclencher un split immédiat, le R\*-tree retire temporairement un MBR (ex.: Casablanca-Settat).
- Ce MBR est réinséré depuis la racine, en choisissant le nœud qui minimise l'accroissement du recouvrement.

**Étape 3: Répartition optimisée :**

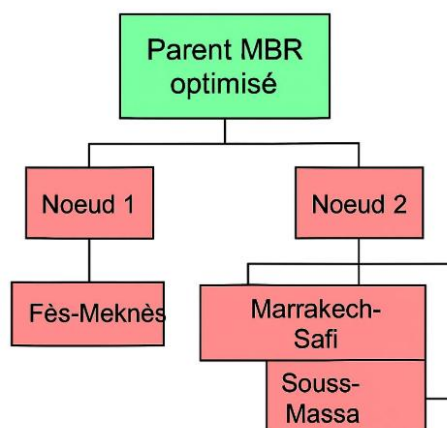
Après réinsertion, les MBRs sont répartis comme suit:

- Nœud 1: Fes-Mekens
- Nœud 2: Souss-Massa et Marrakech-Safi

Le rectangle du nœud parent devient plus compact, avec:

- Moins de chevauchement
- Meilleure organisation spatiale
- Performances accrues pour les requêtes

R\*-tree avec réinsertion et minimisation du recouvrement



- **Montrez comment les stratégies de réinsertion et de minimisation du recouvrement donnent une structure différente ?**

### **Différence principale entre R-tree et R-tree\***

La distinction essentielle entre un R-tree classique et un R-tree\* réside dans la manière dont les MBRs (Minimum Bounding Rectangles) sont organisés au sein de l'arbre.

#### **1. R-tree classique :**

- Les MBRs sont insérés et répartis sans stratégie de réinsertion.
- Lorsqu'un nœud est plein, un split basique est effectué selon la capacité.
- Cela peut entraîner :
  - des nœuds internes très étendus,
  - un chevauchement important entre les rectangles.

#### **2. R\*-tree optimisé :**

- Utilise des stratégies avancées :
  - Réinsertion des MBRs pour les répartir plus judicieusement,
  - Minimisation du recouvrement à chaque insertion et division.
- Résultat :
  - des nœuds internes plus compacts,
  - moins de superposition entre les rectangles.

#### **3. Avantage pour les recherches spatiales**

- Grâce à cette structure optimisée, le R-tree est plus performant\* :
  - Lors d'une recherche, un point touche moins de MBRs à chaque niveau,
  - Ce qui permet des recherches plus rapides et plus précises.

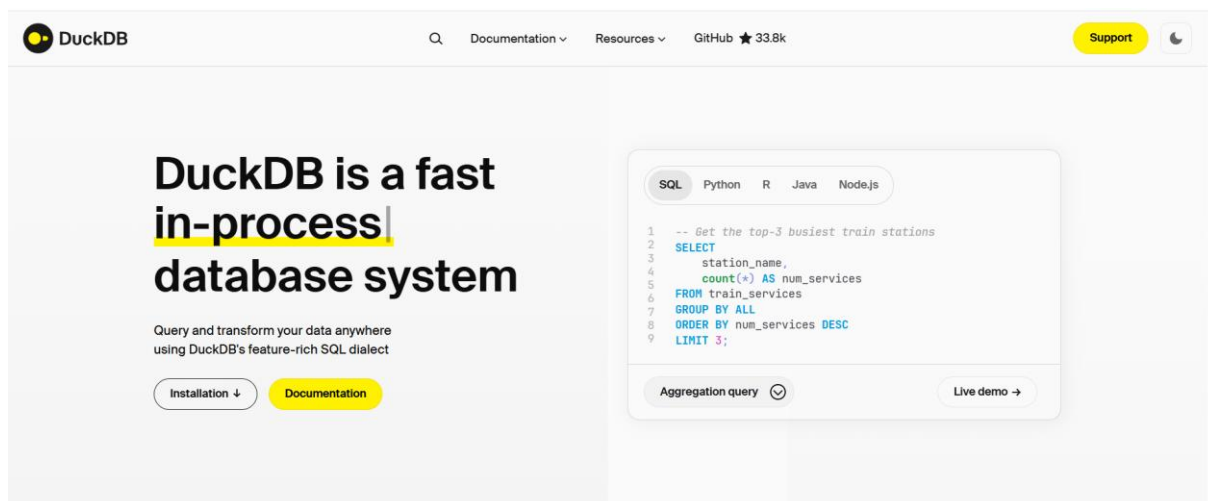
## **VII. Comment intégrer duckdb dans le projet pour remplacer postgis :**

### **a- Définition simple :**

**DuckDB** est une base de données relationnelle (comme PostgreSQL, MySQL ou SQLite), mais elle est conçue spécialement pour l'analyse de données, c'est-à-dire pour faire des requêtes rapides sur de gros fichiers (CSV, Parquet, etc.), sans avoir besoin d'un serveur.

En résumé :

DuckDB = une base de données ultra rapide, légère et locale, idéale pour l'analyse.



### b- La différence entre PostGIS et DuckDB

Critère	PostgreSQL/PostGIS	DuckDB
Type de SGBD	Serveur relationnel (client/serveur)	SGBD embarqué (in-process, comme SQLite)
Support spatial	Très complet (PostGIS : fonctions géométriques, index GiST, R-tree, etc.)	Via extensions (notamment spatial / geo ou spatialite de DuckDB Labs)
Index spatiaux	Oui (GiST, SP-GiST, R-tree, R*-tree natifs)	En cours de développement : pas d'index spatiaux persistants complets, mais optimisations mémoire et algos vectorisés
Performances analytiques	Correctes mais dépend de la configuration serveur	Excellentes pour les requêtes analytiques sur fichiers volumineux (parquet, CSV, geoParquet)
Connectivité SIG (QGIS, etc.)	Native via DB Manager	Possible via plugin OGR / DuckDB ou accès direct aux fichiers
Installation et maintenance	Lourde (serveur, base, rôles, connexions)	Légère (un seul fichier .duckdb, aucun serveur requis)

### c- Conclusion :

DuckDB n'est pas (encore) un remplaçant complet de PostGIS pour des traitements géospatiaux complexes, mais il est idéal pour la phase d'analyse exploratoire et la manipulation rapide de données spatiales.

Il peut donc parfaitement remplacer PostGIS dans ton projet si tu reformules légèrement les objectifs : moins d'indexation géométrique réelle, plus d'analyses spatiales vectorisées et intégrées en mémoire.

## 2. Architecture du projet adaptée à DuckDB :

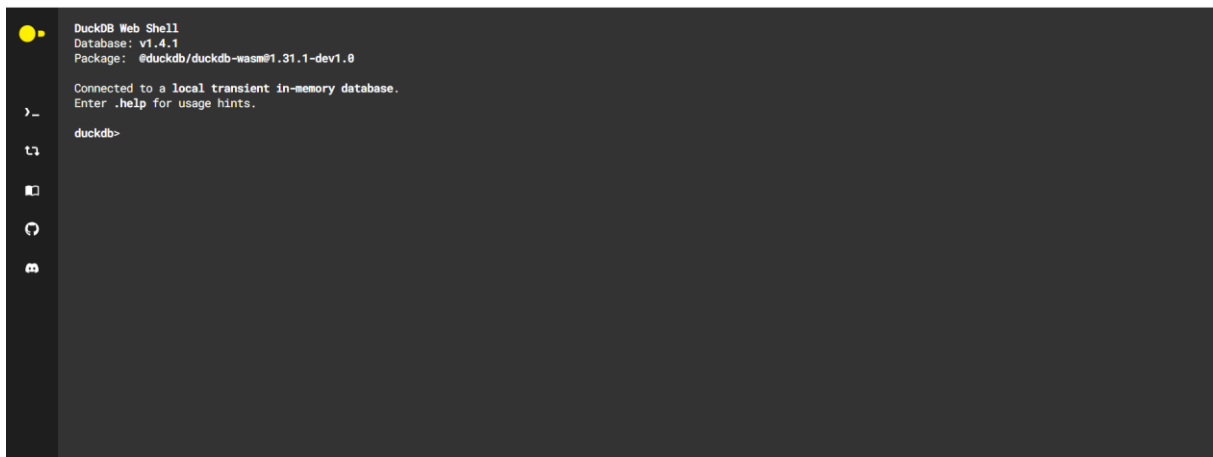
## Objectif général

Créer une **base de données spatiale analytique** sur les régions agricoles du Maroc, stockée et requêtable localement (fichier .duckdb), intégrant :

- Données régionales (attributs),
- Données géospatiales (fichiers GeoJSON / GeoParquet / Shapefile convertis),
- Analyses croisées (agriculture ↔ routes ↔ hydrographie).

## Composants techniques

- **DuckDB 0.9+**
- **Extension spatial** (à activer via `INSTALL spatial`; `LOAD spatial`;) )
- **Formats de données :**
  - GeoParquet
  - CSV pour les indicateurs agricoles
  - GeoJSON pour les couches OSM ou HydroSHEDS
- **Visualisation :** QGIS (ou Python + geopandas)



## 3. Étapes du projet avec DuckDB :

### Collecte et préparation des données

- Même principe que dans le projet PostGIS :
  - Télécharger les couches : regions.geojson, routes.geojson, autoroutes.geojson, cours\_eau.geojson
  - Extraire les indicateurs du site du ministère (SAU, irrigable, etc.) dans un fichier CSV indicateurs.csv
  - Convertir les géométries en GeoParquet pour compatibilité optimale avec DuckDB :

### Implémentation et chargement dans DuckDB

Dans DuckDB (via DBeaver, DuckDB CLI ou Python) :  
`INSTALL spatial`;

```

LOAD spatial;
CREATE TABLE region AS SELECT * FROM st_read('regions.parquet');
CREATE TABLE routes AS SELECT * FROM st_read('routes.parquet');
CREATE TABLE autoroutes AS SELECT * FROM st_read('autoroutes.parquet');
CREATE TABLE cours_eau AS SELECT * FROM st_read('cours_eau.parquet');
CREATE TABLE indicateurs AS SELECT * FROM read_csv_auto('indicateurs.csv');

```

- **Puis joindre les indicateurs :**

```

ALTER TABLE region ADD COLUMN id_region INTEGER;
UPDATE region SET id_region = row_number() OVER ();
CREATE TABLE region_agri AS
SELECT r.*, i.SAU, i.irrigable, i.cheptel
FROM region r
LEFT JOIN indicateurs i
ON r.nom_region = i.region;

```

#### **4- Requêtes spatiales (équivalentes PostGIS)**

DuckDB supporte plusieurs fonctions de la norme OGC :

- ST\_Intersects, ST\_Within, ST\_Union, ST\_Length, ST\_Area, ST\_Distance, etc.

Exemples adaptés :

##### **► Longueur totale du réseau routier par région**

```

SELECT r.nom_region, SUM(ST_Length(ST_Intersection(r.geom, rt.geom))) / 1000 AS
longueur_routes_km
FROM region r
JOIN routes rt ON ST_Intersects(r.geom, rt.geom)
GROUP BY r.nom_region;

```

##### **► Densité routière**

```

SELECT nom_region,
       longueur_routes_km / (ST_Area(geom)/1e6) AS densite_km_100km2
FROM (
  SELECT r.nom_region, ST_Area(r.geom) AS surface_m2,
         SUM(ST_Length(ST_Intersection(r.geom, rt.geom))) AS longueur_routes_km
  FROM region r
  JOIN routes rt ON ST_Intersects(r.geom, rt.geom)
  GROUP BY r.nom_region, r.geom);

```

##### **► Établissements à moins de 5 km d'une autoroute**

```

SELECT e.nom, r.nom_region
FROM etab_formation e
JOIN autoroutes a ON ST_Distance(e.geom, a.geom) <= 5000

```

JOIN region r ON ST\_Intersects(e.geom, r.geom);

#### **4. Partie “Indexation spatiale” (R-tree / R\*-tree) :**

DuckDB ne gère pas encore d'index spatiaux physiques comme PostGIS (GiST).

Mais on peut :

- Décrire **comment DuckDB, en pratique, utiliserait un index en mémoire** pour accélérer les requêtes spatiales :

En interne, l'extension spatial vectorise les calculs de géométrie pour réduire le coût CPU :

Contrairement à PostGIS qui implémente un index GiST basé sur R-tree, DuckDB stocke les géométries sous forme de colonnes vectorisées.

Les opérations spatiales sont optimisées via des filtres de bounding boxes calculées à la volée.

La logique conceptuelle d'un R-tree (insertion, MBR, split) reste applicable : chaque région est représentée par son MBR, et les jointures spatiales utilisent une approche de *bounding box filtering* avant la vérification géométrique fine.”

#### **5. Analyse et visualisation des résultats :**

- DuckDB permet d'exporter directement les résultats sous forme GeoParquet :
- COPY (SELECT \* FROM region\_routes) TO 'region\_routes.parquet' (FORMAT PARQUET);
- Tu peux ensuite **ouvrir ce fichier dans QGIS** pour visualiser les longueurs, densités, ou corrélations (par exemple densité routière vs SAU).

#### **Avantages de DuckDB :**

- Légèreté (pas de serveur)
- Rapidité analytique (jointures massives, fichiers Parquet)
- Parfaite intégration Python/pandas
- Idéal pour projet académique reproductible

#### **Limites :**

- Absence d'index spatiaux persistants
- Support encore jeune de certaines fonctions géospatiales complexes
- Pas de gestion avancée des projections (CRS)
- Non concurrentiel (une seule instance à la fois)

## **VIII. Hébergement du projet dans github :**

### **Créer un dépôt sur GitHub**

- Sur [github.com](https://github.com)
- On Clique **New repository**
- Donne un nom clair (ex : Analyse\_Agricole\_Spatiale\_Maroc)

- Option : coche **Add a README**
- Clique **Create repository**

**Create a new repository**

Repositories contain a project's files and version history. Have a project elsewhere? [Import a repository](#).  
Required fields are marked with an asterisk (\*).

1 **General**

Owner \* safaasidqi / Repository name \* Analyse agricole et territoriale par région au Maroc

✓ Your new repository will be created as `Analyse-agricole-et-territoriale-par-r-gion-au-Maroc`.  
The repository name can only contain ASCII letters, digits, and the characters `.`, `-`, and `_`.

Great repository names are short and memorable. How about `refactored-fishstick`?

Description

0 / 350 characters

2 **Configuration**

Choose visibility \* Public

Choose who can see and commit to this repository

- Organise-le avec des sous-dossiers :

**Analyse-agricole-et-territoriale-par-r-gion-au-Maroc** /

Drag files here to add them to your repository  
Or [choose your files](#)

**Commit changes**

Add files via upload

Add an optional extended description...

**Analyse-agricole-et-territoriale-par-r-gion-au-Maroc** Public Pin Watch 0 Fork 0 Star 0

main 1 Branch 0 Tags Go to file Add file Code

File	Commit	Time
<span>safaasidqi</span> Update README.md	11e7267	3 hours ago
Dossier route maroc.txt	Add files via upload	4 hours ago
README.md	Update README.md	3 hours ago
agricultures.shp	Project files	5 hours ago
autoroutes.shp	Project files	5 hours ago
coursdeau.shp	Project files	5 hours ago
region.shp	Project files	5 hours ago
river.shp	Project files	5 hours ago

**About**

Analyse agricole et territoriale — projet de base de données spatiales

[Readme](#)

[Activity](#)

[0 stars](#)

[0 watching](#)

[0 forks](#)

**Releases**

No releases published  
[Create a new release](#)

**Packages**



Et voici le lien pour le projet : <https://github.com/safaasidqi/Analyse-agricole-et-territoriale-par-r-gion-au-Maroc.git>

## IX. Discussion critique : limites, difficultés et perspectives

La réalisation de cette base de données spatiale a mis en évidence plusieurs **limites et défis** liés à la nature des données, à leur disponibilité et à leur intégration dans un même environnement géospatial.

Tout d'abord, la **qualité et l'homogénéité des données agricoles** publiées par le Ministère de l'Agriculture posent certaines contraintes. Les informations régionales ne sont pas fournies sous un format structuré (base de données ou fichiers tabulaires), mais plutôt sous forme de **pages web** ou de **documents descriptifs**. Cette présentation rend leur extraction partiellement manuelle, avec des risques d'erreurs de transcription, d'incohérences d'unités ou de pertes de précision lors de la conversion. De plus, certains indicateurs, comme la répartition des filières agricoles ou la superficie irrigable, ne sont pas mis à jour de manière uniforme entre les régions, ce qui limite la fiabilité des comparaisons spatiales.

Sur le plan **spatial et technique**, les difficultés résident principalement dans la **diversité des sources et des formats** : les couches des routes, cours d'eau ou limites administratives proviennent de référentiels différents (OpenStreetMap, HydroSHEDS, portails gouvernementaux). Cette hétérogénéité nécessite un important travail de **nettoyage, reprojection et harmonisation** pour assurer la cohérence géographique. Certaines couches contiennent des imprécisions topologiques (chevauchements, trous, géométries invalides) ou des attributs manquants, obligeant à une correction manuelle avant leur intégration.

L'**implémentation dans PostgreSQL/PostGIS** a également présenté des défis d'ordre technique. La gestion des index spatiaux GiST et la vérification de leurs performances demandent une bonne compréhension des mécanismes d'indexation, tandis que le volume de données et les jointures spatiales peuvent entraîner un **temps de traitement long** si l'optimisation n'est pas bien configurée. À cela s'ajoute la difficulté d'établir des **relations croisées pertinentes** entre les indicateurs agricoles, les infrastructures et l'hydrographie, tout en maintenant une cohérence sémantique et spatiale.

Malgré ces contraintes, ce projet a permis de prendre conscience de la **valeur stratégique des données spatiales** pour la planification agricole et territoriale. Il a aussi mis en évidence le besoin d'une **infrastructure de données géographiques nationale plus intégrée et ouverte**, où les informations seraient normalisées, documentées et facilement exploitables à des fins d'analyse.

- **Perspectives :**

Pour dépasser ces limites, plusieurs pistes d'amélioration peuvent être envisagées. Il serait d'abord utile que les institutions publiques adoptent des **standards ouverts d'échange de données** (comme le GeoJSON, le GPKG ou les API géospatiales), afin de faciliter la réutilisation et la mise à jour automatique des indicateurs. L'intégration future d'**outils d'analyse avancée** (comme la télédétection, l'intelligence artificielle ou le machine learning spatial) permettrait également d'affiner la compréhension des dynamiques agricoles et des relations entre accessibilité, ressources hydriques et productivité. Enfin, une collaboration renforcée entre les acteurs institutionnels, académiques et locaux contribuerait à la **création d'une véritable base de connaissances territoriale**, vivante et évolutive, au service du développement durable des régions marocaines.

## X. Conclusion :

Ce projet de base de données spatiale a constitué bien plus qu'un simple exercice technique : il a représenté une **expérience d'intégration, d'analyse et de réflexion sur la donnée géographique** au service du territoire. En combinant des informations agricoles, infrastructurelles et hydrographiques dans un même cadre analytique, il a permis d'illustrer la puissance des outils SIG et des bases de données spatiales pour éclairer les décisions publiques.

Les obstacles rencontrés — manque d'harmonisation, complexité des sources, limites techniques — ont été autant de **leçons formatrices**, soulignant la nécessité de structurer davantage la production et la diffusion de données géospatiales au Maroc. En définitive, ce travail ouvre la voie à une **meilleure valorisation de l'information spatiale**, où la donnée devient un véritable levier d'intelligence territoriale, au service d'une agriculture plus équitable, plus efficace et plus durable.

## XI. Références :

<https://www.openstreetmap.org/>

<https://www.agriculture.gov.ma/fr/region/rabat-sale-kenitra>

<https://www.google.com/maps/d/u/0/edit?hl=fr-CA&mid=1RriOGPrIVFH40lEYfgvMsWKXApoW88&ll=32.57457137973845%2C-5.706694200000005&z=6>

[https://en.wikipedia.org/wiki/R\\*-tree](https://en.wikipedia.org/wiki/R*-tree)

<https://www.geofabrik.de/data/shapefiles.html>

[https://docs.qgis.org/3.40/fr/docs/user\\_manual/index.html](https://docs.qgis.org/3.40/fr/docs/user_manual/index.html)

<https://postgis.net/docs/postgis-fr.html>

<https://github.com/safaasidqi/Analyse-agricole-et-territoriale-par-r-gion-au-Maroc.git>

<https://duckdb.org/>

<https://github.com/>