

Étude théorique : stations de base du réseau téléphonique français

Progression du stage

Paul MÉHAUD, Brendan SÉVELLEC

České Vysoké Učení Technické v Praze

mai - août 2024

Déroulé de la présentation

Introduction

Données

Semaine du 07/05/24 au 14/05/24

Semaine du 14/05/24 au 21/05/24

Semaine du 21/05/24 au 28/05/24

Introduction

Contexte général

Objectifs

- Déterminer si les stations de base sont en zone urbaine ou rurale ;
- Chercher les stations de bases voisines les unes des autres pour aider à déterminer si les utilisateurs sont en mouvement.

Méthodes

- Approche par la théorie des graphes ;
- Approche par le machine learning.

Données

Données

Arcep

Autorité de régulation des communications électroniques, des postes et de la distribution de la presse.

Jeu de données

Le jeu de données 2023_T4_sites_Metropole.csv^a représente les stations de bases au trimestre 4 de 2023 avec leur position géographique (taille : 16,7 Mo).

a. <https://data.arcep.fr/mobile/sites/>

A retenir :

- 108 838 sites ;
- 29 attributs.

A quoi ressemble notre base ?

code_op	nom_op	num_site	id_site.partage	id_station_anfr	x	y	latitude	longitude	nom_reg
20801	Orange	00000001A1	nan	0802290015	687035	6985761	49,97028	2,81944	Hauts-de-France
20801	Orange	00000001B1	nan	0642290151	422853	6249263	43,28861	-0,41389	Nouvelle-Aquitaine
20801	Orange	00000001B2	nan	0332290026	416932	6422196	44,84112	-0,58333	Nouvelle-Aquitaine
20801	Orange	00000001B3	nan	0472290005	511106	6349234	44,21666	0,63556	Nouvelle-Aquitaine
20801	Orange	00000001C1	nan	0512290147	836824	6889450	49,09028	4,87333	Grand Est
nom_dep	insee_dep	nom_com	insee_com	site_2g	site_3g	site_4g	site_5g	mes_4g.trim	site_ZB
Somme	80	Curlu	80231	1	1	1	0	0	0
Pyrénées-Atlantiques	64	Jurançon	64284	1	1	1	1	0	0
Gironde	33	Bordeaux	33063	1	1	1	1	0	0
Lot-et-Garonne	47	Agen	47001	1	1	1	0	0	0
Marne	51	Sainte-Menehould	51507	1	1	1	0	0	0
site.DCC	site.strategique	site.capa_240mbps	date.ouverturecommerciale_5g	site.5g_700.m.hz	site.5g_.800.m.hz				
0	0	0	nan	0	0			0	0
0	0	1	2020-12-14	0	0			0	0
0	0	1	2021-02-22	0	0			0	0
0	0	1	nan	0	0			0	0
0	0	1	nan	0	0			0	0
		site.5g_1800.m.hz	site.5g_2100.m.hz	site.5g_3500.m.hz					
		0	0	0					
		0	1	0					
		0	0	1					
		0	0	0					
		0	0	0					

Table 1 – Premières valeurs de la base

Description (1/2)

Ce qui nous intéresse

1. *longitude, latitude* : coordonnées de chaque site ;
2. *nom_op* : nom commercial de l'opérateur ;
3. *nom_reg, nom_dep* et *nom_com* : nom de la région, du département et de la commune d'implantation du site ;
4. *site_xg* : équipement du site en technologie xG ($x \in \{2, \dots, 5\}$) ;
5. *num_site* : identifiant du site issu du SI de l'opérateur.

Description (2/2)

Ce qu'il faut retenir

1. Répartition équitable du nombre de sites en fonction de l'opérateur ($\simeq 27\,000$) ;
2. 99,6% des sites équipés en 4G ;
3. 6 stations en moyenne par commune.

La construction de cette base ne nous permet pas de faire de statistiques descriptives intéressantes.

Semaine du 07/05/24 au 14/05/24

Semaine du 07/05/24 au 14/05/24

Brendan

Affichage des données sur une carte

Détail

- Découverte d'une bibliothèque d'affichage de données géographiques interactives : Folium ;
- Affichage des données et colorisation selon plusieurs critères : technologies (2G, 3G, ...) ou opérateurs (Free, SFR, Bouygues Telecom ou Orange).

Problème

Le nombre de données à afficher est très important et rend la visualisation très saccadée.

Solution

Afficher seulement une partie des données à la fois selon différents critères de sélection : par opérateurs, technologie ou région.

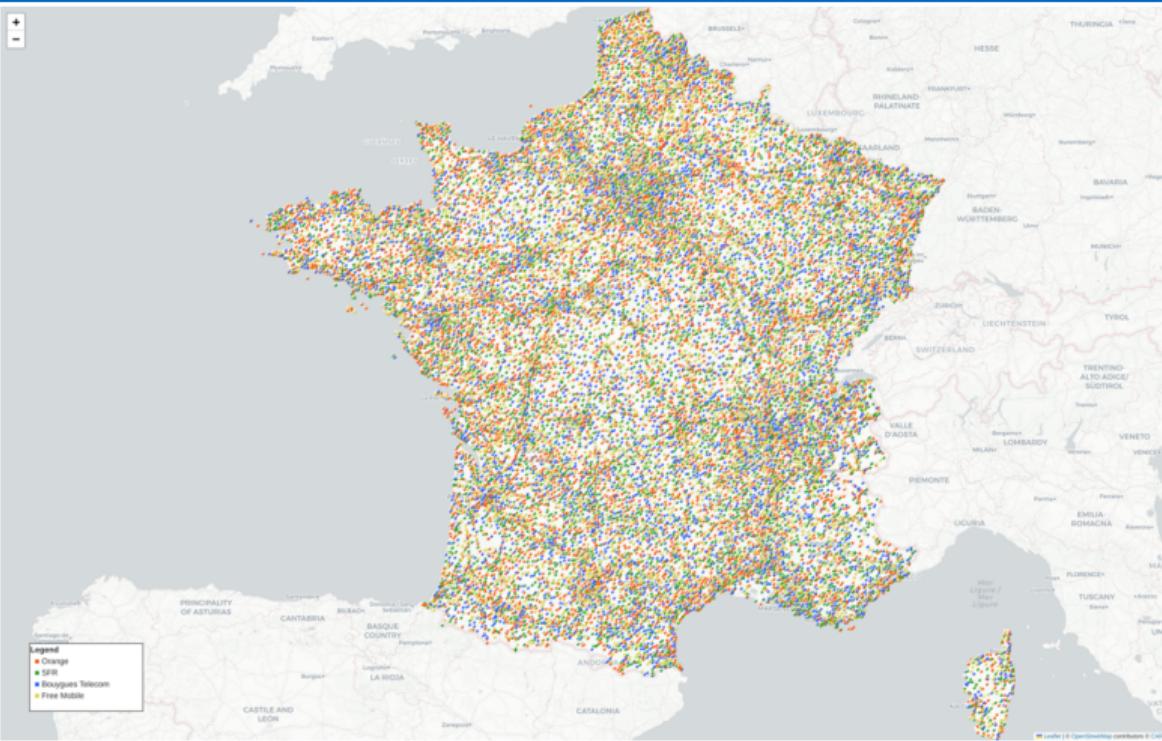


Figure 1 – Les opérateurs dans toute la France

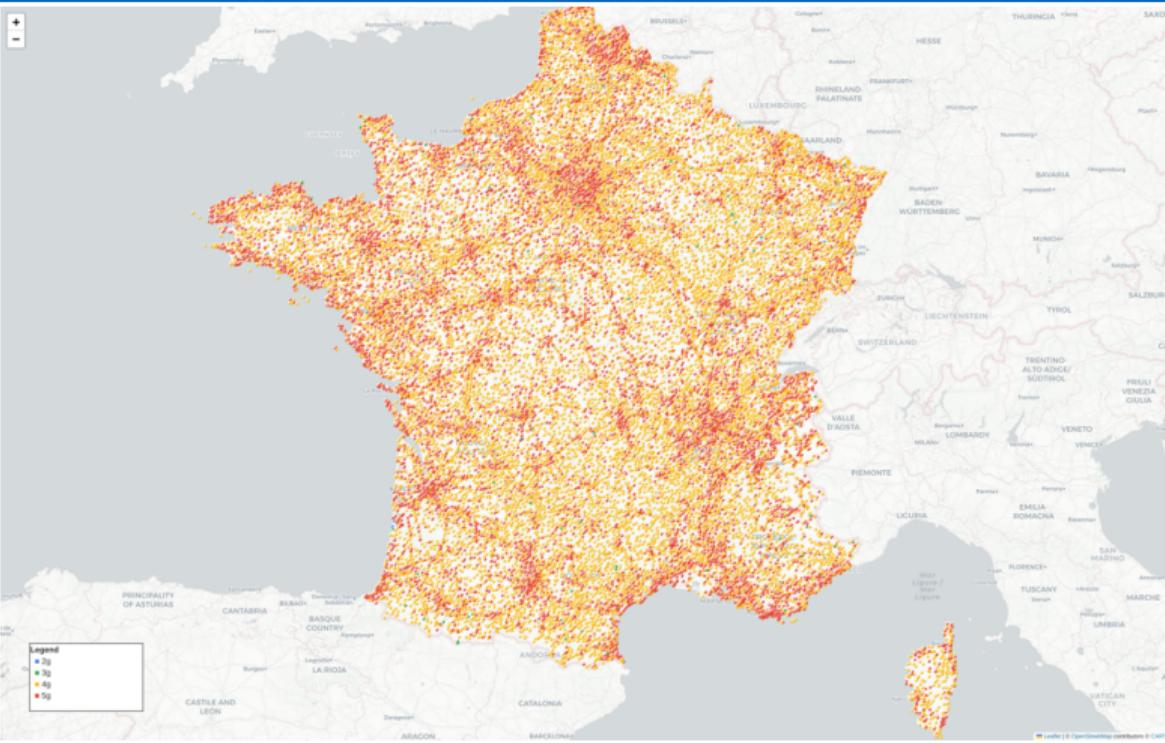


Figure 2 – Les technologies dans toute la France

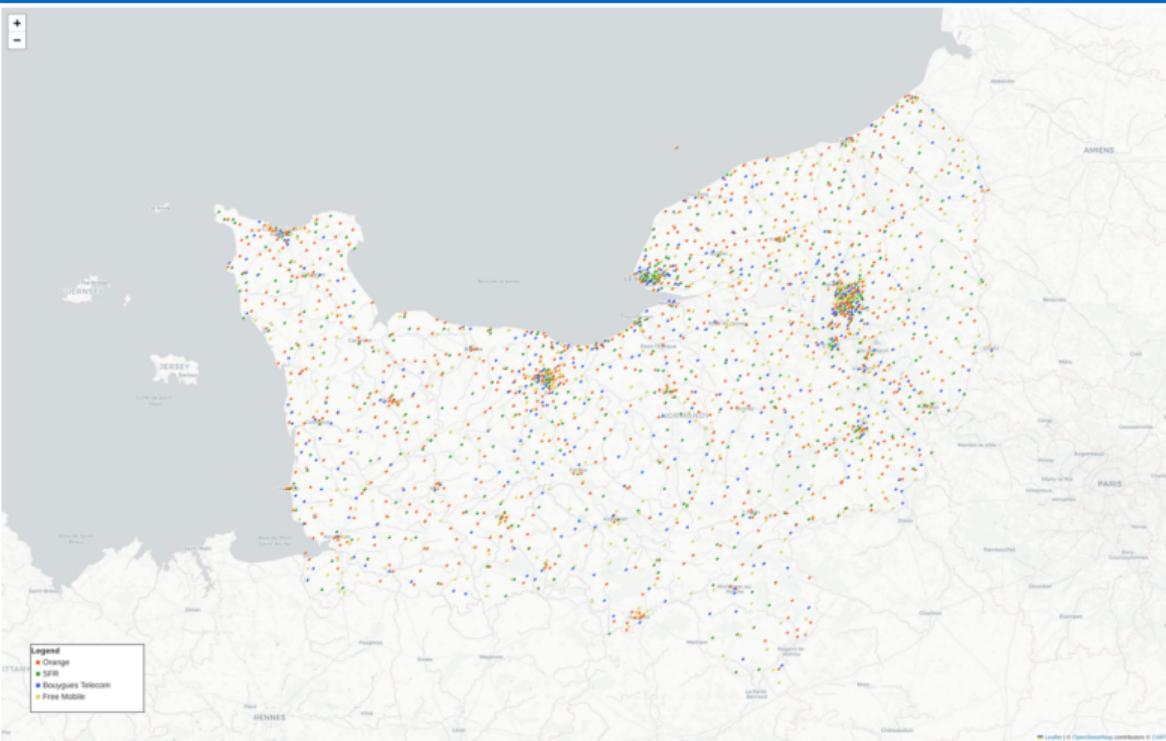


Figure 3 – Les opérateurs en Normandie

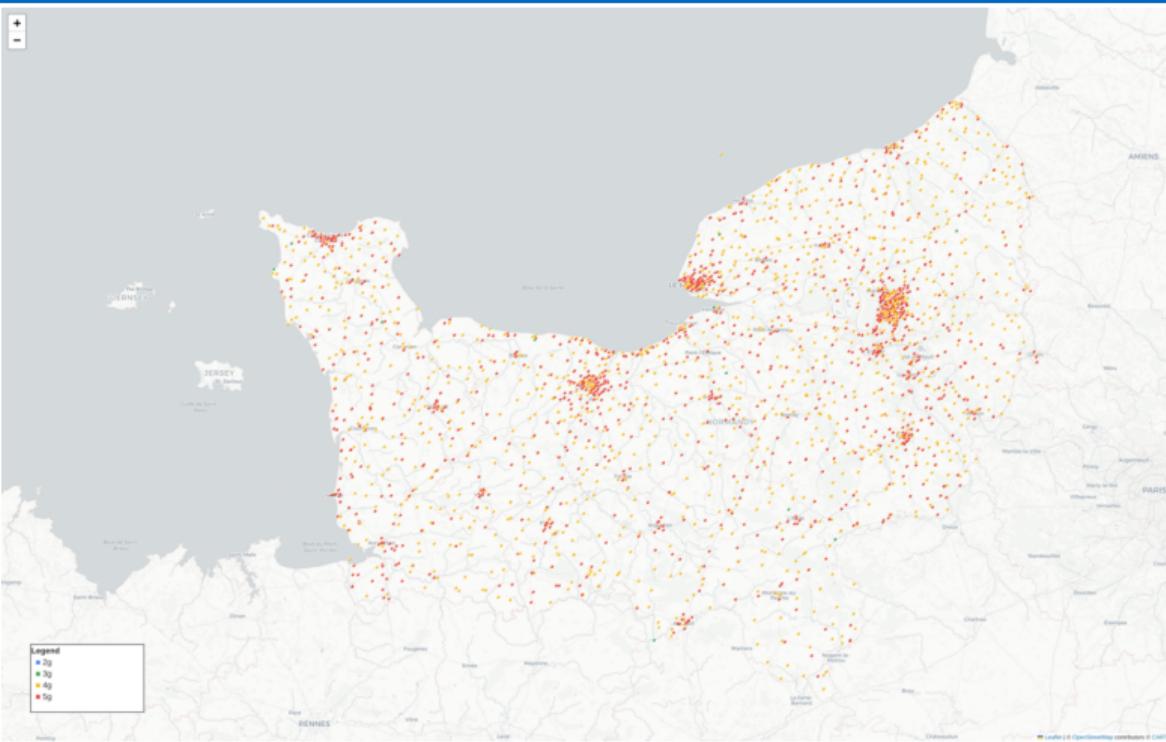


Figure 4 – Les technologies en Normandie

Détection des villes

Il est très clair que les stations de bases sont très regroupé au sein des villes. Il semble donc qu'il soit possible de détecter si les stations de bases sont en zone rurale ou urbaine à l'aide de la densité de stations de base

DBscan (1996)

L'algorithme DBscan (Density-Based spatial clustering of applications with noise) est un algorithme qui s'appuie sur la densité estimée des clusters pour effectuer le partitionnement.

Paramètres

- ε : dissimilarité maximum entre deux individus ;
- n_{\min} : cardinal minimum de chaque classe.

Théorie : l'algorithme

1. Pour chaque point p_j :

$$\begin{aligned} N(p_i) &\leftarrow \{p_j \mid j \in N = \{1, \dots, n\} \mid d(i, j) \leq \varepsilon\} \\ C &\leftarrow \{p_i \mid |N(p_i)| \geq n_{\min}\} \end{aligned}$$

2. Construire le graphe de voisinage $G = (X, U)$, avec

$$X = \{p_i \mid i \in N\} \text{ et } U = \{ij \mid i, j \in N, d(i, j) \leq \varepsilon\}$$

3. Trouver les composantes connexes des sommets de G (notées G_1, \dots, G_p);

4. Pour chaque $p_i \notin C$:

$$\begin{aligned} j^* &= \arg \min_{1, \dots, p} (d(p_i, C_k)) \\ \text{si } d(p_i, C_{j^*}) &\leq \varepsilon \text{ alors} \\ C_{j^*} &\leftarrow C_{j^*} \cup \{p_i\} \end{aligned}$$

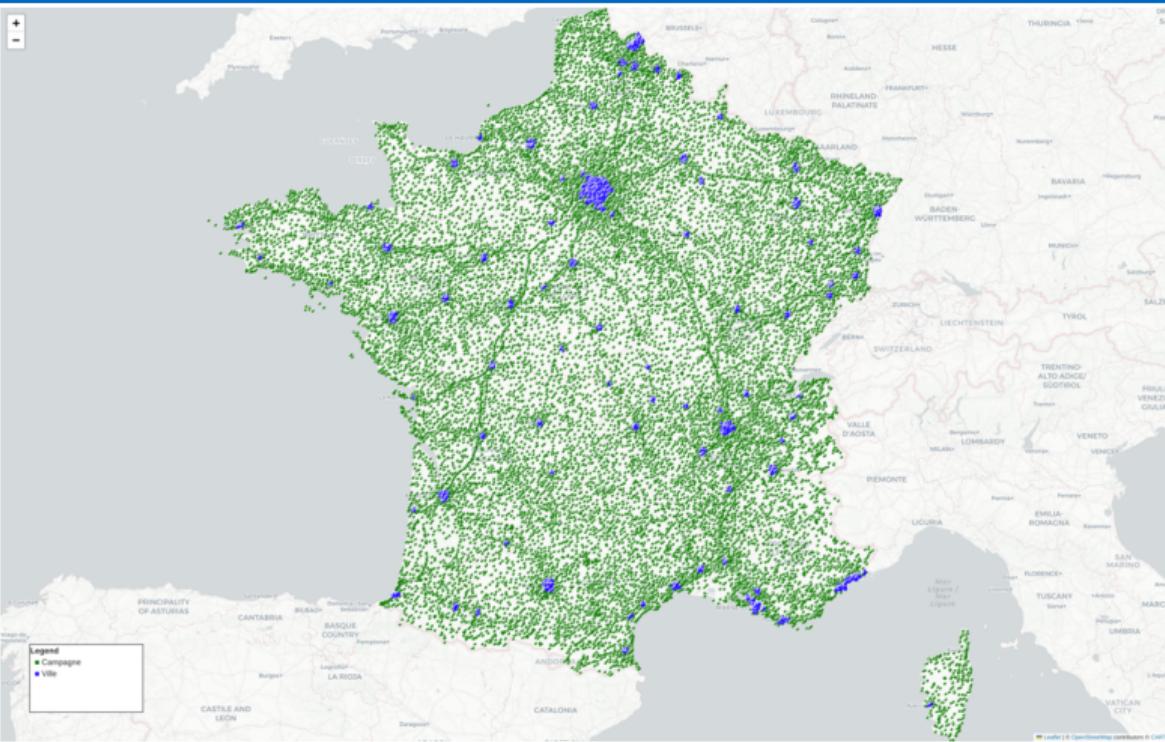


Figure 5 – Les villes détectées en France pour l'opérateur Orange avec $\epsilon = 0.03$ et $n_{min} = 15$

Diagramme de Voronoï

Définition

Le diagramme de Voronoï associé à un ensemble de points $(d_i)_{1 \leq i \leq n}$ est un pavage de l'espace tel que chaque pavé P_i représente l'ensemble des points plus proches de d_i que de n'importe quel d_j avec $j \neq i$ i.e.

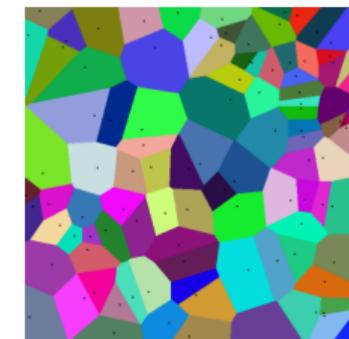


Figure 6 – Exemple de diagramme de Voronoï

Triangulation de Delaunay

Définition

La triangulation de Delaunay d'un ensemble P de points du plan est une triangulation $DT(P)$ telle qu'aucun point de P n'est à l'intérieur du cercle circonscrit d'un des triangles de $DT(P)$. Les triangulations de Delaunay maximisent le plus petit angle de l'ensemble des angles des triangles, évitant ainsi les triangles « allongés ».

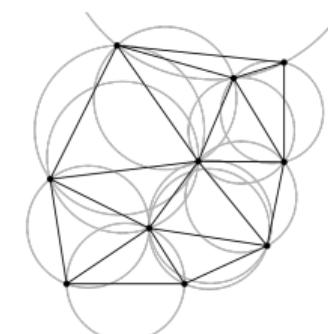


Figure 7 – Exemple de triangulation de Delaunay

Lien entre les 2

Propriétés

- La triangulation de Delaunay d'un ensemble discret P de points est le graphe dual du diagramme de Voronoï associé à P ;
- Il est donc très facile de passer de l'un à l'autre (en temps polynomial) ;
- il existe des algorithmes pour trouver une triangulation de Delaunay en $O(n \log(n))$.

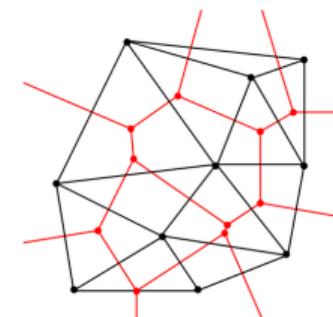


Figure 8 – Lien entre Delaunay et Voronoï

Retour au problème

Application à notre cas d'étude

Nous allons pouvoir utiliser ces notions en définissant :

- les voisins potentiels comme étant les triangles adjacents dans la triangulation de Delaunay
- les zones de couverture des antennes comme les pavés associé dans le diagramme de Voronoï

Semaine du 07/05/24 au 14/05/24

Paul

Résumé des épisodes précédents

Mon travail, pour la semaine qui vient de s'écouler, s'articule autour de trois axes majeurs :

- Découverte des données ;
- Documentation ;
- Reprise du travail de l'année précédente.

Documentation

La majeure partie du travail de la semaine écoulée a consisté à se former aux différents outils de Python afin de pouvoir effectuer sereinement le travail.

Outils utilisés

- `pandas.DataFrame` : gestion des données ;
- `scipy.spatial.Delaunay` : création de la triangulation de Delaunay ;
- `networkx.Graph` : création de graphes ;
- `matplotlib.pyplot` : affichage des résultats.

Reprise du travail précédent (1/3)

La première tâche consistait à essayer de faire fonctionner le code fourni. Résultat : il ne fonctionne pas...
Décision : refaire par moi-même. Cependant, j'ai gardé les idées.

Approche pour déterminer les voisins de stations de base

- Faire une triangulation de Delaunay (liste de voisins potentiels) ;
- Eliminer les voisins distants de plus de 15 km ;
- Garder le voisin le plus proche dans chaque quadrant autour de chaque station (6 quadrants) ;
- Garder le voisin le plus proche quand deux stations voisines sont séparées par un angle faible.

Reprise du travail précédent (2/3)

Ayant refait l'implantation moi-même, j'ai décidé d'utiliser les graphes au lieu de simplement les dataFrames : permettra de faciliter l'application de la théorie des graphes.

Apports de cette nouvelle représentation

- On travail directement sur le graphe de Delaunay ;
- Le traitement des voisins est beaucoup plus facile ;
- La représentation graphique est plus claire.

Reprise du travail précédent (3/3) : Résultats

Pour l'instant seul les deux premiers critères de filtrage sont fonctionnels. Voici ce que l'on obtient sur le département du Gard :

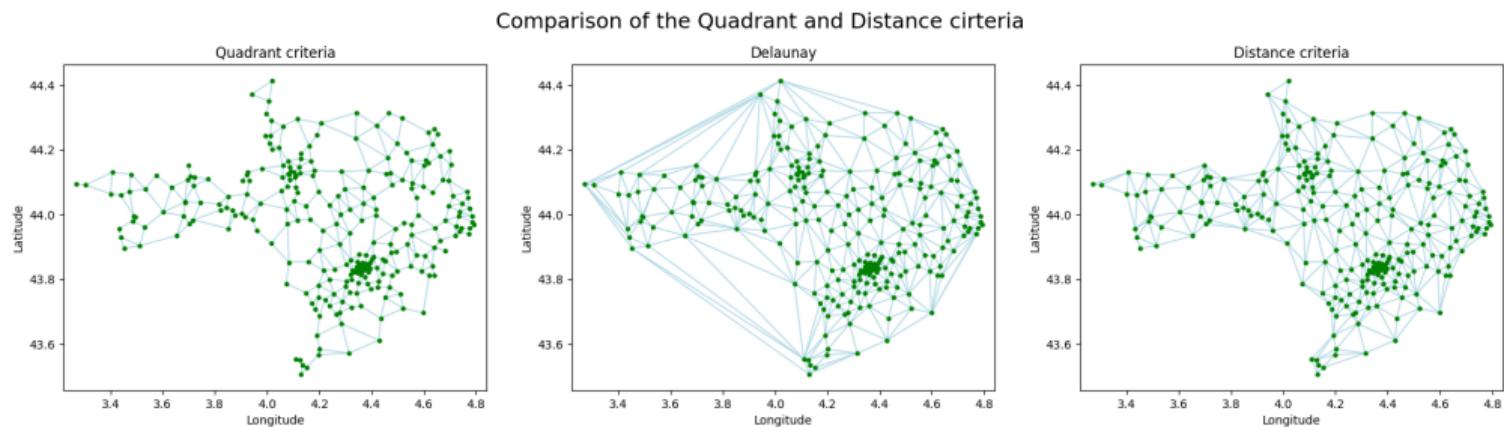


Figure 9 – Evolution de la triangulation de Delaunay en fonction de critères de filtrage

Perspectives d'amélioration et travail à venir

Améliorations

- Vérifier que l'algorithme du critère du quadrant donne les bons résultats ;
- Optimisation dudit algorithme.

Travail à venir

- Implanter une version fonctionnelle du critère de l'angle ;
- Se renseigner sur l'état de l'art de la théorie des graphes.

Semaine du 07/05/24 au 14/05/24

Brendan

Réalisation d'une interface graphique en Python

Contexte

- Beaucoup de cartes à tracer car beaucoup de paramètres ;
- Cartes gourmandes en ressources et pas adaptées à des notebooks Python ;
- Réalisation d'une application permettant de facilement tracer ces cartes au sein d'un navigateur web.

Semaine du 14/05/24 au 21/05/24

Semaine du 14/05/24 au 21/05/24

Le jeu de donnée

Le jeu de donnée

Arcep

L'autorité de régulation des communications électroniques, des postes et de la distribution de la presse (Arcep) est une autorité administrative indépendante française chargée de réguler les communications électroniques et postales et la distribution de la presse.

Mon Réseau Mobile

Mon Réseau Mobile est la plate-forme cartographique regroupant l'ensemble des données géographiques en lien avec les réseaux dits « mobiles » (2G, 3G, 4G, 5G) régulés par l'Arcep.

Nouvelle mise à jour

Une nouvelle mise à jour des données est prévue de **jeudi 20 juin 2024 à 17h40** : données du 1^{er} trimestre de 2024.

A cette adresse : <https://www.data.gouv.fr/fr/datasets/mon-reseau-mobile/#/discussions>, on peut poser nos questions sur le jeu de données.

Arborescence du jeu de données

Les fichiers de données sont rangés par trimestre de publication, zone (France métropolitaine/Outre-mer) et département le cas échéant :



Figure 10 – Architecture de la base de donnée

Fréquences de mises à jour

Fréquence de publication des données :

Fichiers	Fréquence de publication
Cartes de couverture théorique 2G, 2G3G, 3G	Semestrielle (T2, T4)
Cartes de couverture théorique 4G	Trimestrielle (T1, T2, T3, T4)
Sites fournissant un service mobile	Trimestrielle (T1, T2, T3, T4)
Mesures de qualité de service Arcep	Annuelle
Dispositif de couverture ciblée	Trimestrielle (T1, T2, T3, T4)
Mesure de crowdsourcing	Variable

Figure 11 – Fréquence de publication de mises à jour

Semaine du 14/05/24 au 21/05/24

Faisons parler les données

Quelques chiffres en vrac

Tout d'abord, remarquons que chaque station peut être identifiée à son num_site (seul deux stations n'en n'ont pas). Ensuite, voici ce que l'on a découvert :

Des chiffres sympathiques

- site_zb : 10 596 (Site issu du programme « zones blanches – centres-bourgs ») ;
- site_dcc : 10 627 (Site issu du « Dispositif de Couverture Ciblée ») ;
- site_strategique : 144 (Site issu du programme « France Mobile ») ;
- mes_4g_trim : 1 618 (Equipement du site en technologie 4g au cours du dernier trimestre (du 30/06/2022 au 30/09/2022)) ;
- id_site_partage : 5 453 (Sites mutualisés entre plusieurs opérateurs) ;
- site_capa_204mbps : 92 664 (Site dont la capacité maximum théorique est supérieure ou égale à 240 Mbs).

Quelques chiffres en vrac : précision sur les indicateurs

Ensuite, voici ce que l'on a découvert :

site_zb

Le premier programme, initié en 2003 et nommé « zones blanches – centres-bourgs » consistait à apporter des services de téléphonie mobile, SMS et internet mobile à très haut débit, dans plus de 3500 centres-bourgs de communes de France qui ne bénéficiaient d'aucune couverture mobile.¹

site_dcc

Le dispositif de couverture ciblée vise à assurer une couverture mobile de qualité dans des zones non ou mal couvertes, en construisant jusqu'à 5 000 nouveaux sites par opérateur, dont une partie sera mutualisée.²

1. <https://www.tactis.fr/zone-blanche-zone-grise/>

2. <https://agence-cohesion-territoires.gouv.fr/france-mobile-54>

Comparaison des différents équipements en terme de technologies (1/7)

Voici tout d'abord un graphique sur la présence d'une technologie en fonction de l'opérateur (une technologie présente sur un site n'exclue pas la présence d'une autre technologie) :

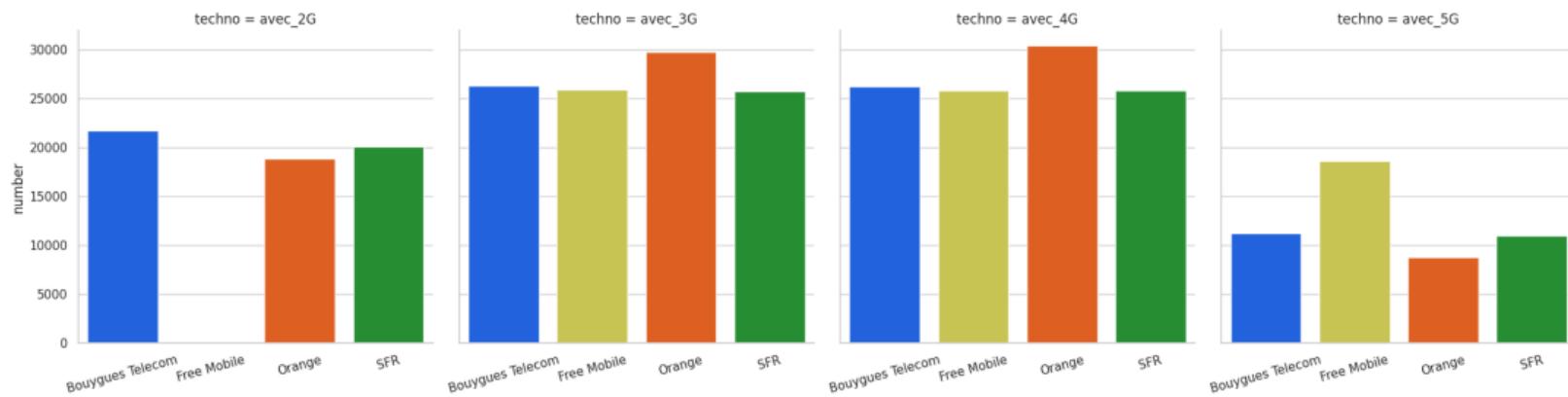


Figure 12 – Nombres de sites équipés d'au moins une technologie

Comparaison des différents équipements en terme de technologies (2/7)

Technologie	Bouygues Telecom	Free Mobile	Orange	SFR	Total
2G	4	0	10	20	34
3G	30	102	65	37	234
4G	15	15	602	106	738
5G	0	0	3	0	3
2-3G	66	0	21	80	167
2-4G	12	0	63	67	142
2-5G	0	0	0	0	0
3-4G	3889	7225	9288	4909	25311
3-5G	0	0	0	0	0
4-5G	6	0	109	38	153
2-3-4G	11044	0	11697	9831	32572
2-3-5G	0	0	1	0	1
2-4-5G	0	0	5	10	15
3-4-5G	681	18607	1638	835	21761
2-3-4-5G	10584	0	7038	10085	27707
Total	26331	25949	30540	26018	108838

Table 2 – Résumé des données de présence de technologie

Comparaison des différents équipements en terme de technologies (3/7)

Maintenant nous nous intéressons à la fréquence de présence de certaines technologies et pas d'autres :

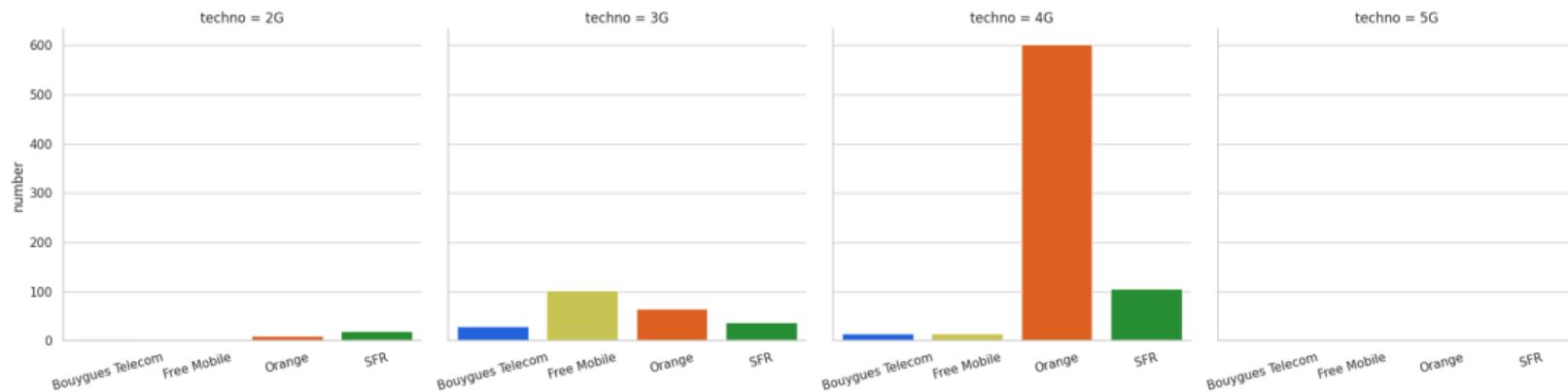


Figure 13 – Nombres de sites équipés d'une unique technologie

Comparaison des différents équipements en terme de technologies (4/7)

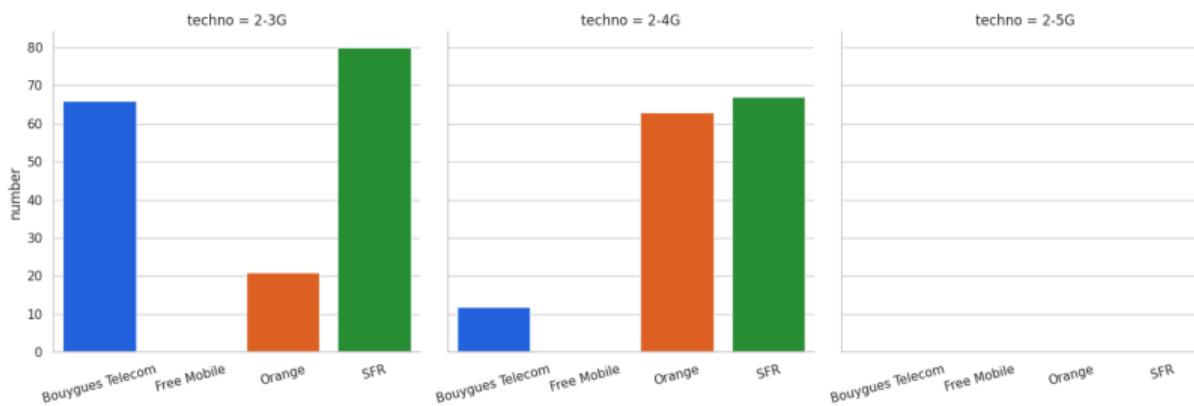


Figure 14 – Nombres de sites équipés de deux technologies

Comparaison des différents équipements en terme de technologies (5/7)

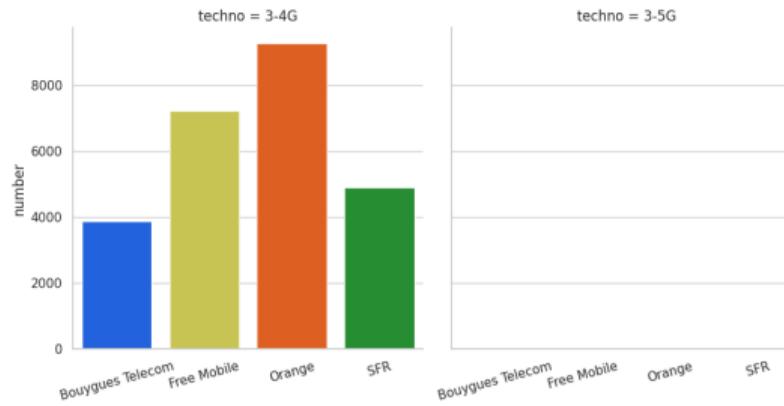


Figure 15 – Nombres de sites équipés de deux technologies (suite)

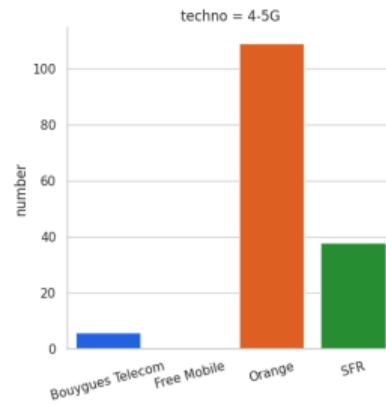


Figure 16 – Nombres de sites équipés de deux technologies (suite-bis)

Comparaison des différents équipements en terme de technologies (6/7)

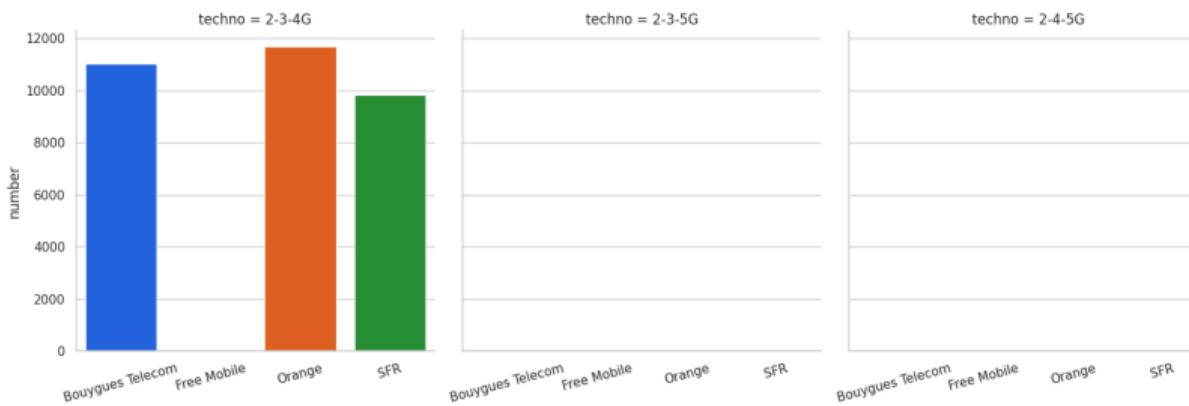


Figure 17 – Nombres de sites équipés de trois technologies

Comparaison des différents équipements en terme de technologies (7/7)

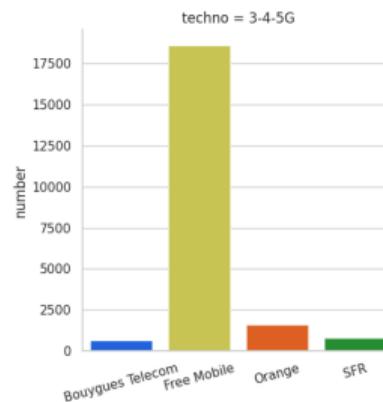


Figure 18 – Nombres de sites équipés de trois technologies (suite)

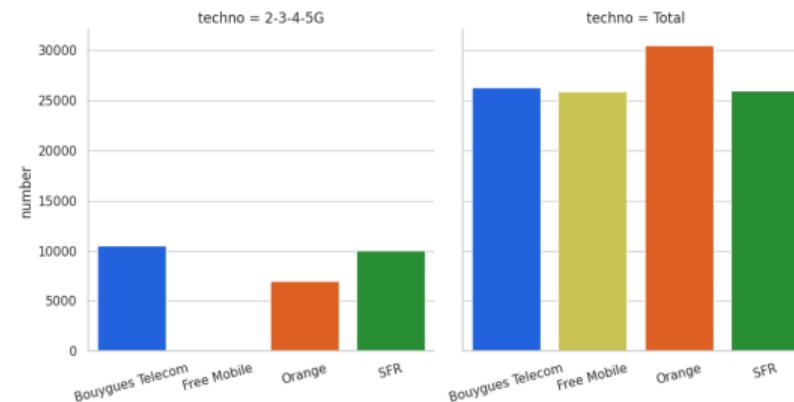


Figure 19 – Nombre de sites équipés de toutes les technologies et total

Semaine du 14/05/24 au 21/05/24

Affichage plus détaillé des cartes

Les stations de base par opérateur

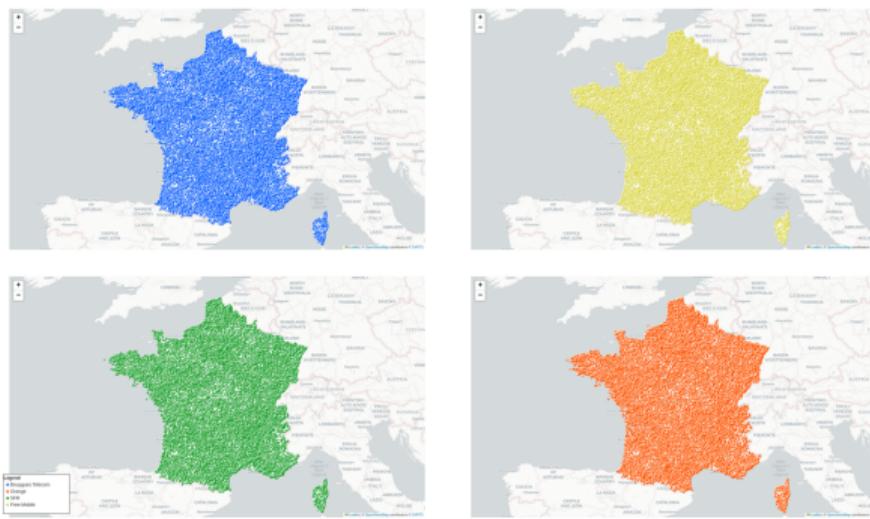


Figure 20 – Les stations de base par opérateurs

Les stations 2G

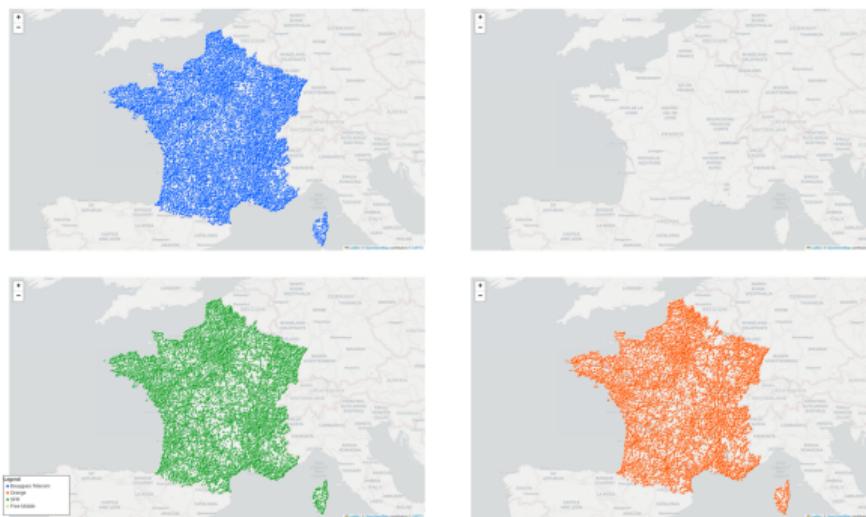


Figure 21 – Les stations 2G

Les stations 3G

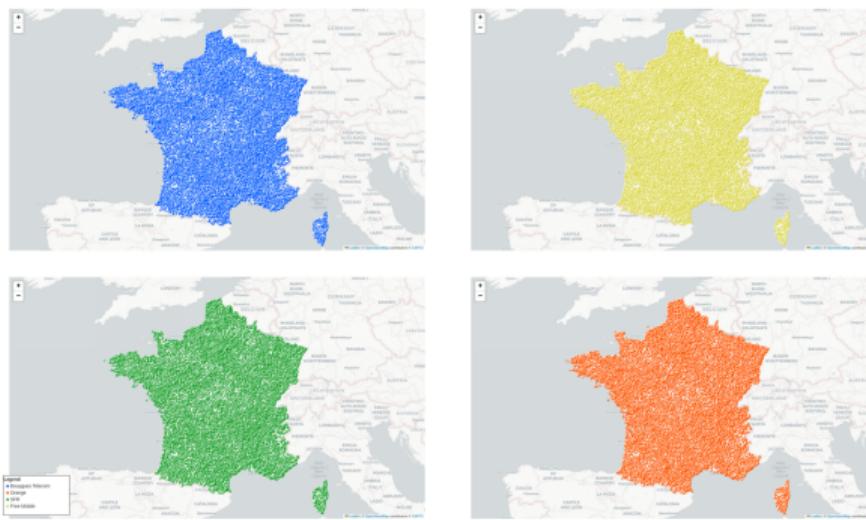


Figure 22 – Les stations 3G

Les stations 4G

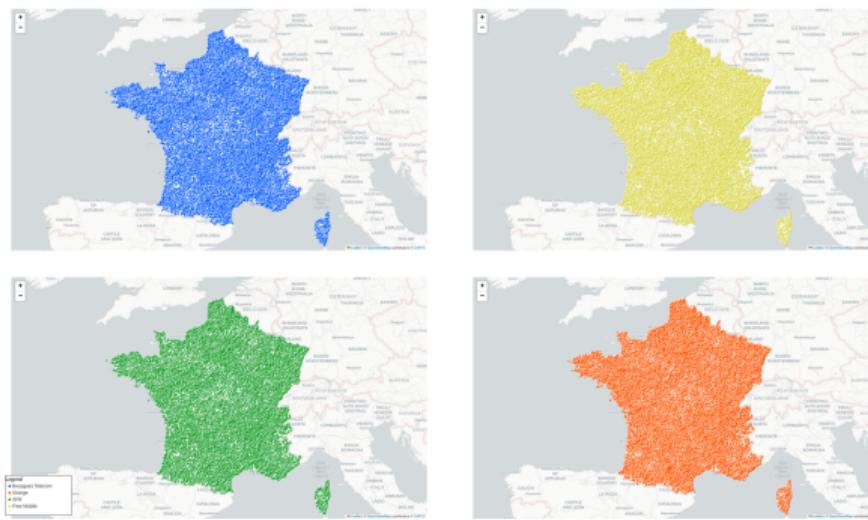


Figure 23 – Les stations 4G

Les stations 5G

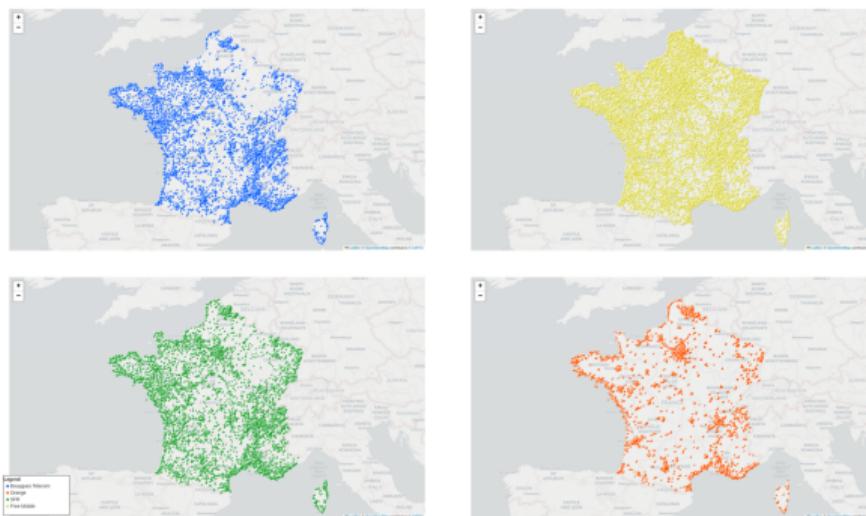


Figure 24 – Les stations 5G

Semaine du 14/05/24 au 21/05/24

Evolution du nombre de stations de base au cours du temps

2023_T4_sites_5G_historique_comptage

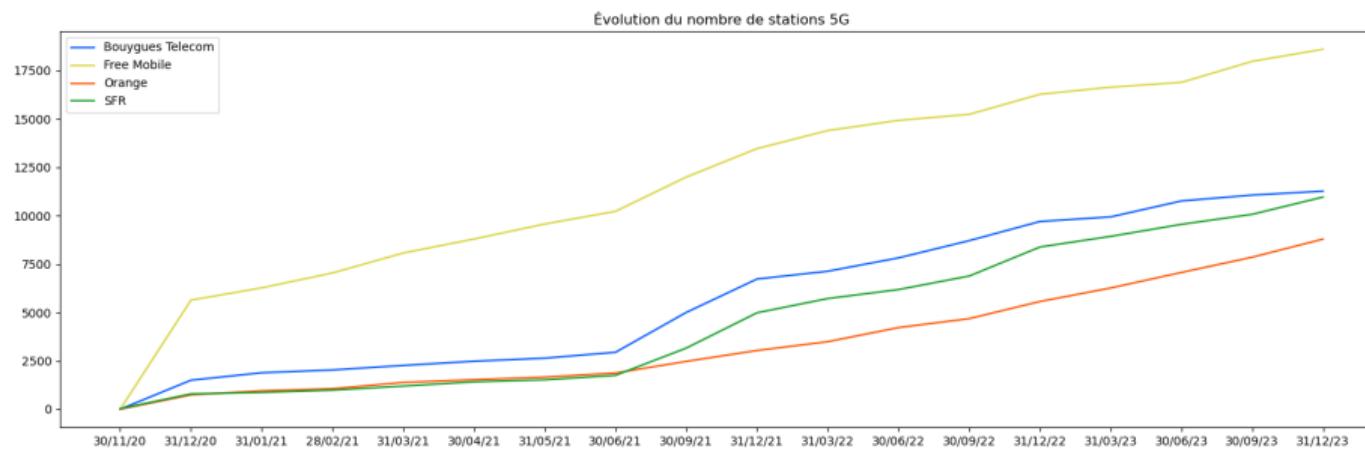


Figure 25 – Evolution du nombre de stations 5G en France

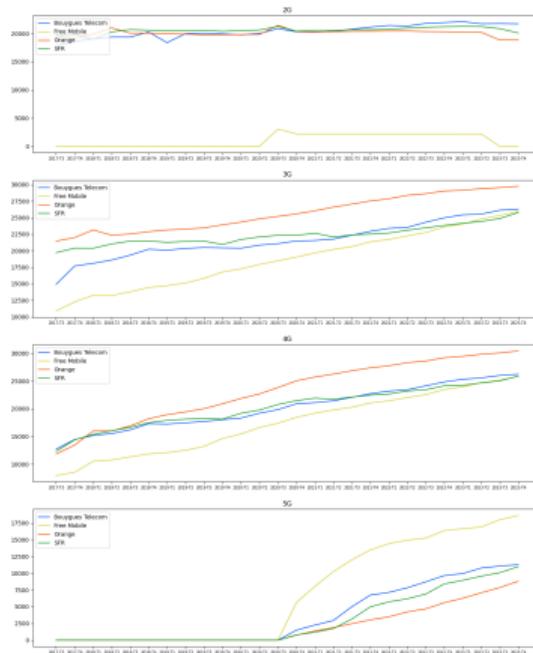


Figure 26 – Compilation des jeux de données sites

Semaine du 14/05/24 au 21/05/24| Evolution du nombre de stations de base au cours du temps| 56/74

Dispositif de couverture ciblée, éléments d'analyse

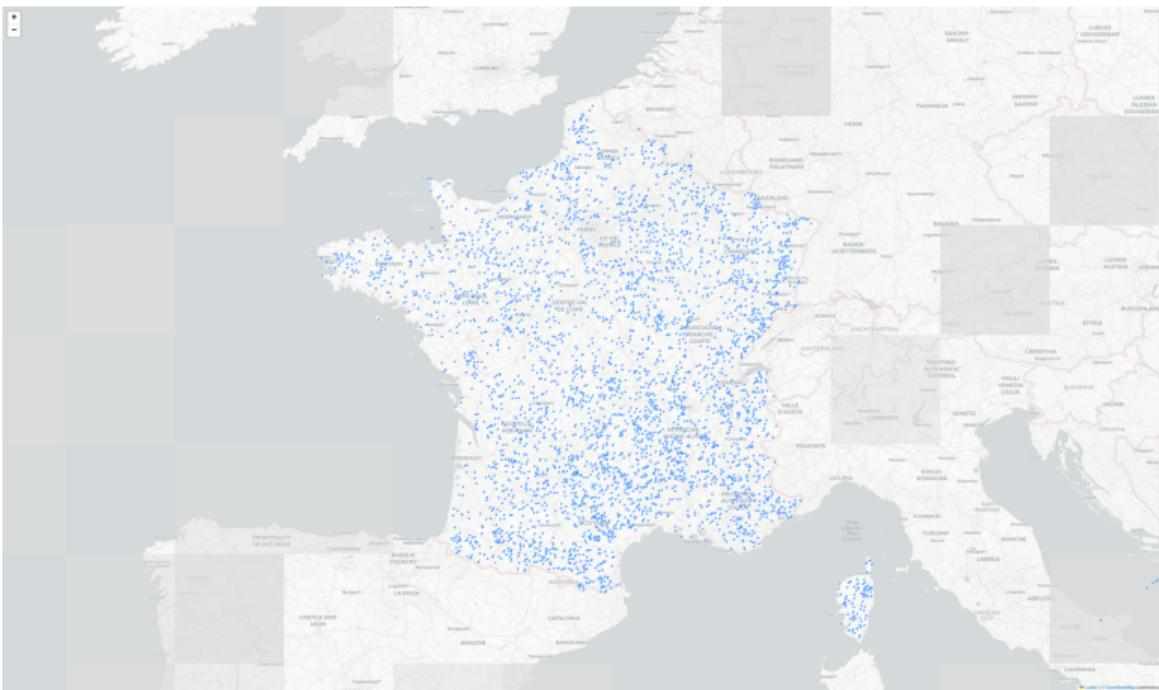
infos générales

- 4621 stations de bases potentielles ;
- 26 attributs.

anomalies

- 412 lignes de ce jeu de données ont les colonnes `x_lambert_93` ou `y_lambert_93` non renseigné ;
- Plusieurs points sont placés en dehors de la France.

Dispositif de couverture ciblée



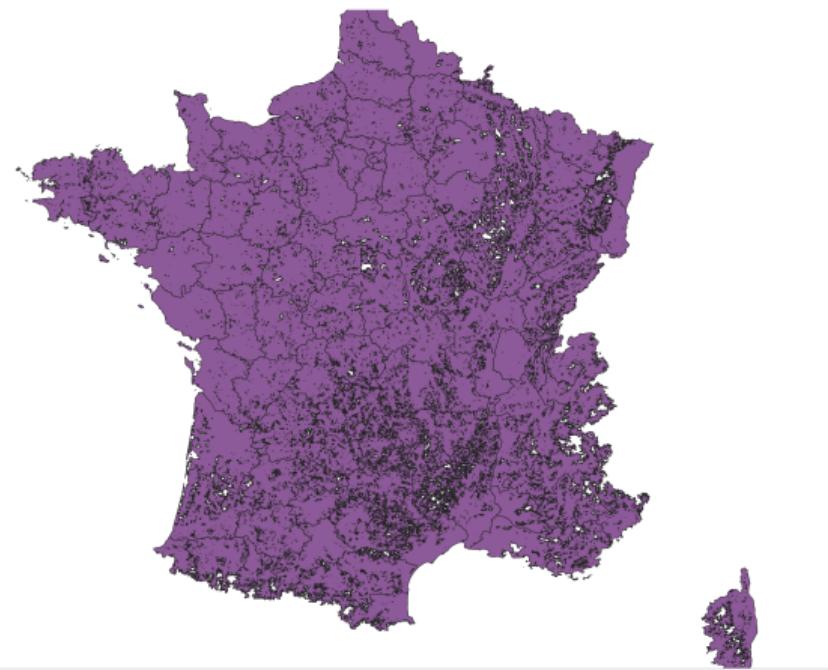
Couverture théorique

Informations

- format .gpkg (geopackage)
- ouverture à l'aide du logiciel libre QGIS

Utilité

- Aurait pu permettre de déterminer si 2 stations de base sont voisines (si leur couverture se chevauche)
- Non réalisable à l'aide de ce jeu de donnée : seule la couverture globale de chaque région est donnée



Semaine du 21/05/24 au 28/05/24

Semaine du 21/05/24 au 28/05/24

Statistiques stations de bases - départements

Méthodologie

On va utiliser une base de donnée complémentaire, reprise de celle trouvée l'année dernière.

Une nouvelle base de donnée¹

Cette base de donnée renseigne, par département, la **superficie** (en km²), la **population** et la **densité de population** au km².

A partir de cette base, on va donc pouvoir extraire le nombre d'habitants par stations (normalisé par la taille du département) et la densité de station par département.

Calcul du nombre d'habitants par stations

Soit λ le nombre que l'on cherche. Tout d'abord, on se donne γ , le rapport entre le nombre d'habitant et la surface du département, qui est donné par la densité de population. Ensuite, on calcule notre résultat comme suit :

$$\lambda = \text{nombre de stations du département} \div \gamma$$

1. <https://france.ousuisje.com/departements/classement/superficie.php>

Nombre d'habitants par stations

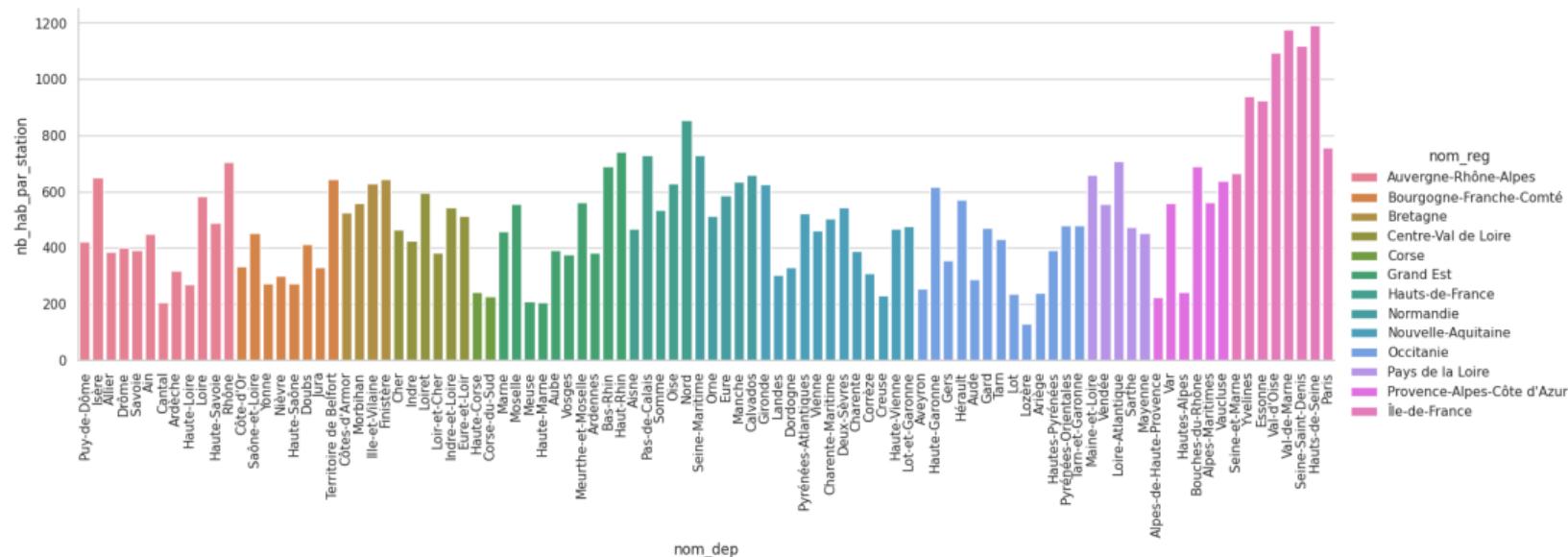


Figure 27 – Répartition du nombre d'habitants par station, en fonction du département

Densité de stations (1/2)

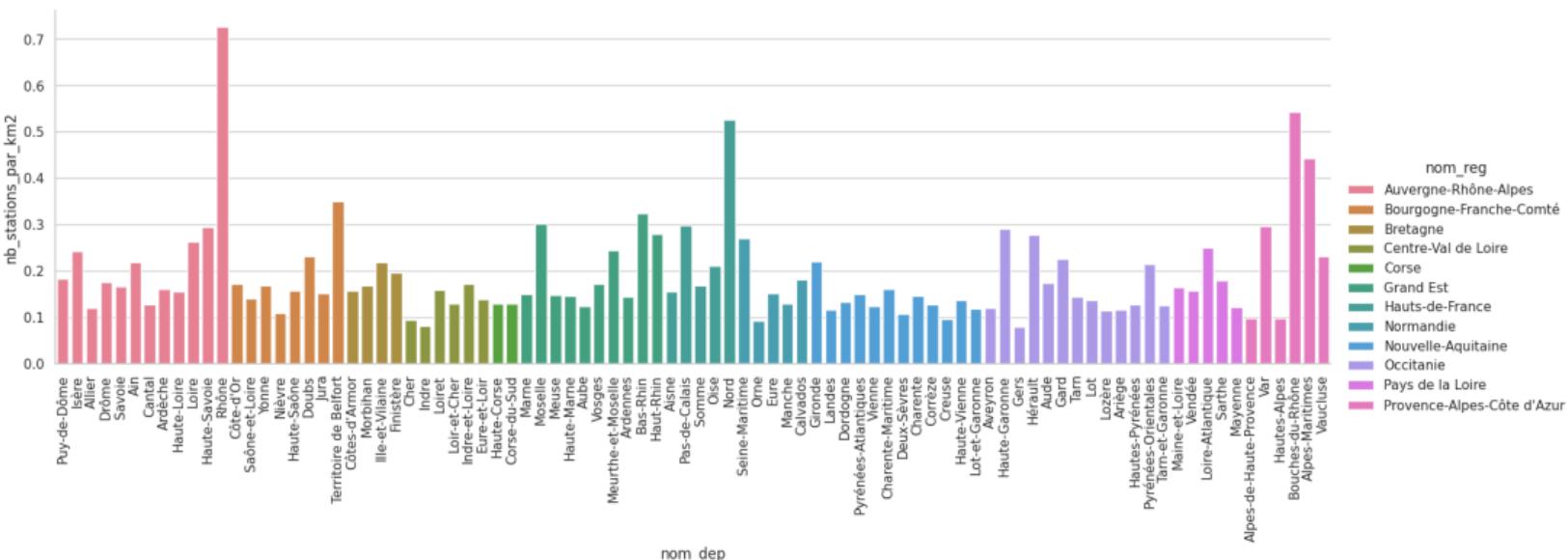


Figure 28 – Nombre de stations de base au km², sans l'Île-de-France

Densité de stations (2/2)

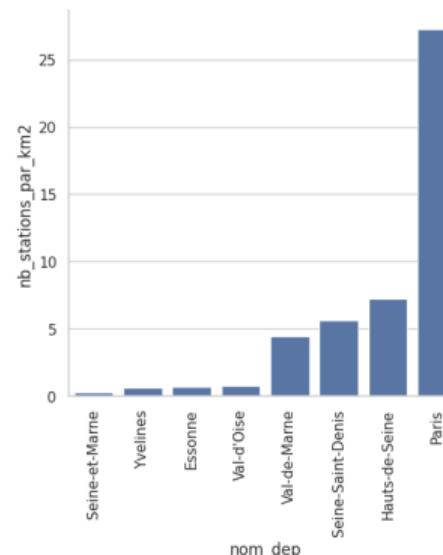


Figure 29 – Nombre de stations de base au km², sur l'Île-de-France

Fréquences d'émission des stations 5G

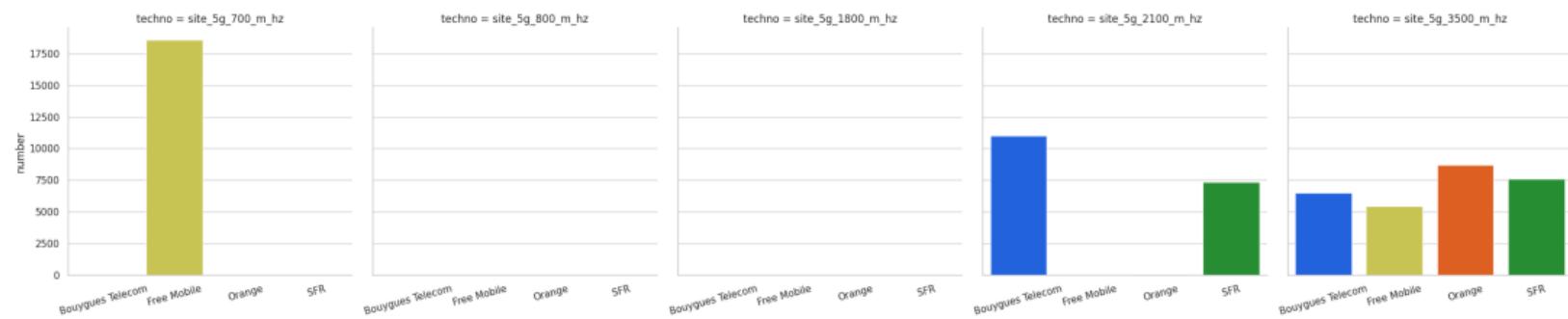


Figure 30 – Répartition des fréquences d'émission des stations 5G, en fonction des opérateurs

Semaine du 21/05/24 au 28/05/24

Détection automatique des villes

DBScan

Principe

- Méthode de référence de la classification à densité (déttection de clusters en se basant sur la concentration de points) ;
- Se base sur deux paramètres : ε et n_{min} qui caractérisent respectivement la distance maximale pour que deux points soient considérés « proches » et la quantité minimale de points proches pour qu'un cluster soit créé.

Inconvénients

- Le choix du paramètre ε est hasardeux ;
- Ne se comporte pas bien avec des jeux de données avec des clusters de densité variable (certains clusters avec des points plus rapprochés que d'autres) ;
- Réagit mal au bruit ;
- Est binaire : un point appartient ou n'appartient pas à un cluster, pas d'entre deux.

Changement de métrique

Une façon d'améliorer le problème de mauvaise prise en compte du bruit est de changer de métrique :

Core distance

La *core distance* d'un point du jeu de donnée est la distance entre ce point et son k -ième plus proche point (k à fixer).

Nouvelle métrique

La distance entre deux points x et y d'un jeu de donnée peut être définie comme la plus grande valeur entre les *core distances* de x et y et la distance euclidienne entre x et y .

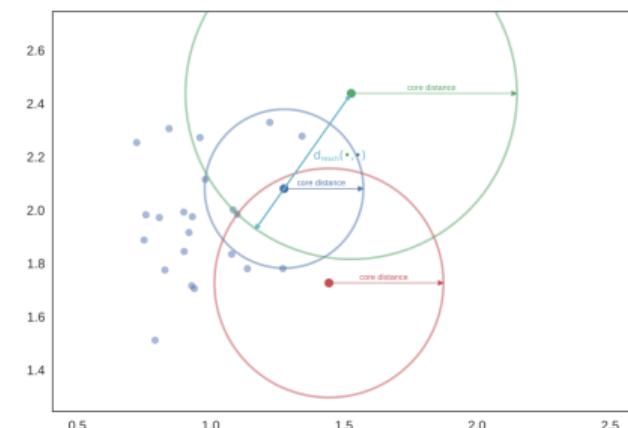


Figure 31 – Nouvelle métrique

HDBScan (1/2)

Principe général

Consiste à fusionner les méthodes de classification hiérarchique ascendante et DBScan pour permettre de s'affranchir du paramètre ε .

Étapes

- Représenter les données par un graphe complet où chaque point est un sommet, puis valuer les arêtes par la métrique expliquée précédemment ;
- Trouver un arbre couvrant de poids minimum dans ce graphe ;
- Regarder quelles sont les composantes connexes du graphe en ne gardant que les arêtes dont le poids est inférieur à un certain seuil ε que l'on augmente progressivement ;
- On obtient alors un dendrogramme (on obtient une partition pour chaque ε fixé) ;
- On observe la persistance des classes de ce dendrogramme en fonction de la variation de ε .

HDBScan (2/2)

Avantages

- Permet de prendre en compte les problèmes de classe à densité variable ;
- En étudiant à quelle moment chaque point se retrouve exclu de sa classe au sein du dendrogramme, on obtient pour chaque point une probabilité d'appartenance à sa classe.

Application à notre cas d'utilisation

- Appliqué de la même manière que DBScan : si un point est dans un cluster, alors on considère qu'il est en ville, sinon en campagne ;
- La probabilité discutée précédemment permet de rajouter une incertitude sur l'appartenance (ou non) d'une station de base à une ville.

Paramètres de `sklearn.cluster.HDBSCAN`

- `min_cluster_size=5` : groupings smaller than this size will be left as noise ;
- `min_samples=None` : The number of samples in a neighborhood for a point to be considered as a core point ;
- `cluster_selection_epsilon=0.0` : Clusters below this value will be merged ;
- `max_cluster_size=None` ;
- `metric='euclidean'` ;
- `metric_params=None` ;
- `alpha=1.0` : A distance scaling parameter ;
- `algorithm='auto'` : Exactly which algorithm to use for computing core distances ;
- `leaf_size=40` : Leaf size for trees responsible for fast nearest neighbour queries when a KDTree or a BallTree are used as core-distance algorithms ;
- `n_jobs=None` : Number of jobs to run in parallel to calculate distances ;
- `cluster_selection_method='eom'` : The method used to select clusters from the condensed tree ;
- `allow_single_cluster=False` : allow the result to be a single cluster ;
- `store_centers=None` ;
- `copy=False`.

Résultats

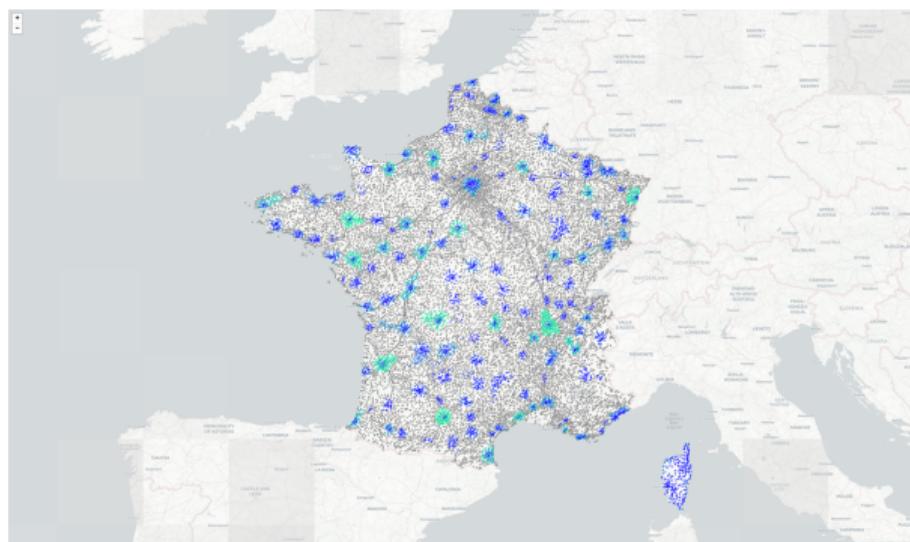


Figure 32 – Application d'HDBScan `min_cluster_size=5, min_samples=40`