

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 | 1 | 2020-12-14 | 0 | 0 | | | | |
| 0 | 0 | 1 | 2021-02-22 | 0 | 0 | | | | |
| 0 | 0 | 1 | nan | 0 | 0 | | | | |
| 0 | 0 | 1 | nan | 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 interactive : 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 différent critères de sélection : par opérateurs, technologie ou région.

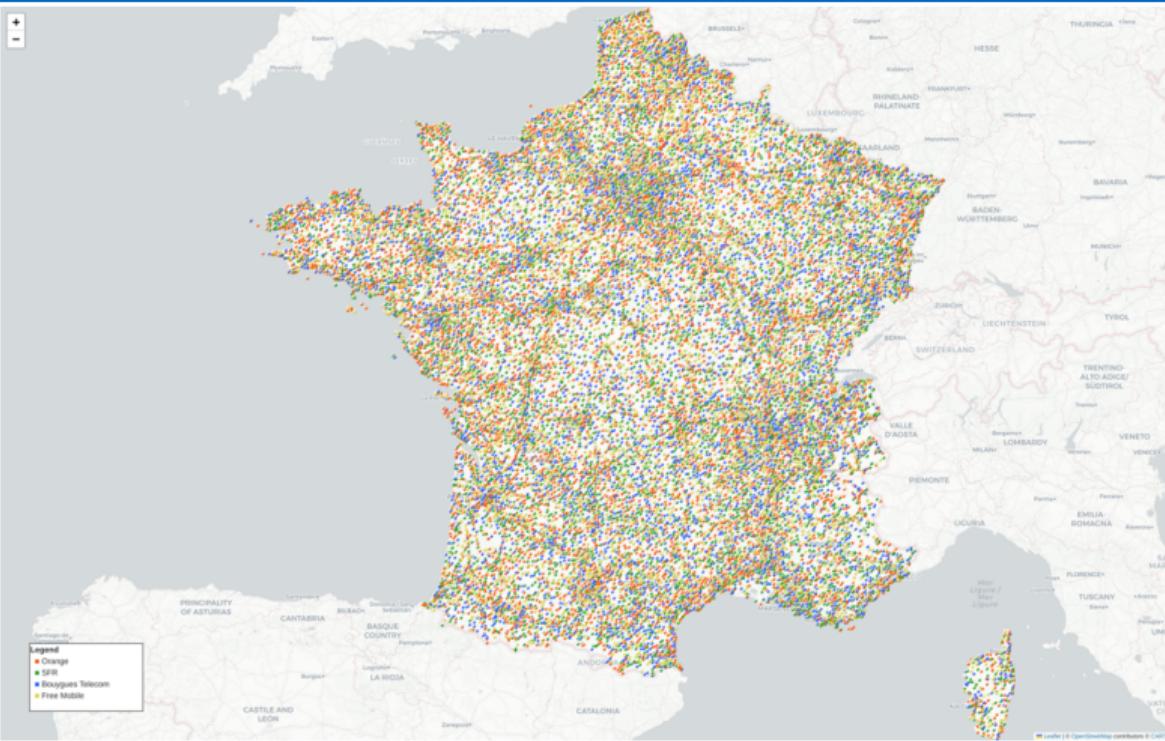


Figure 1 – Les opérateurs dans toute la France

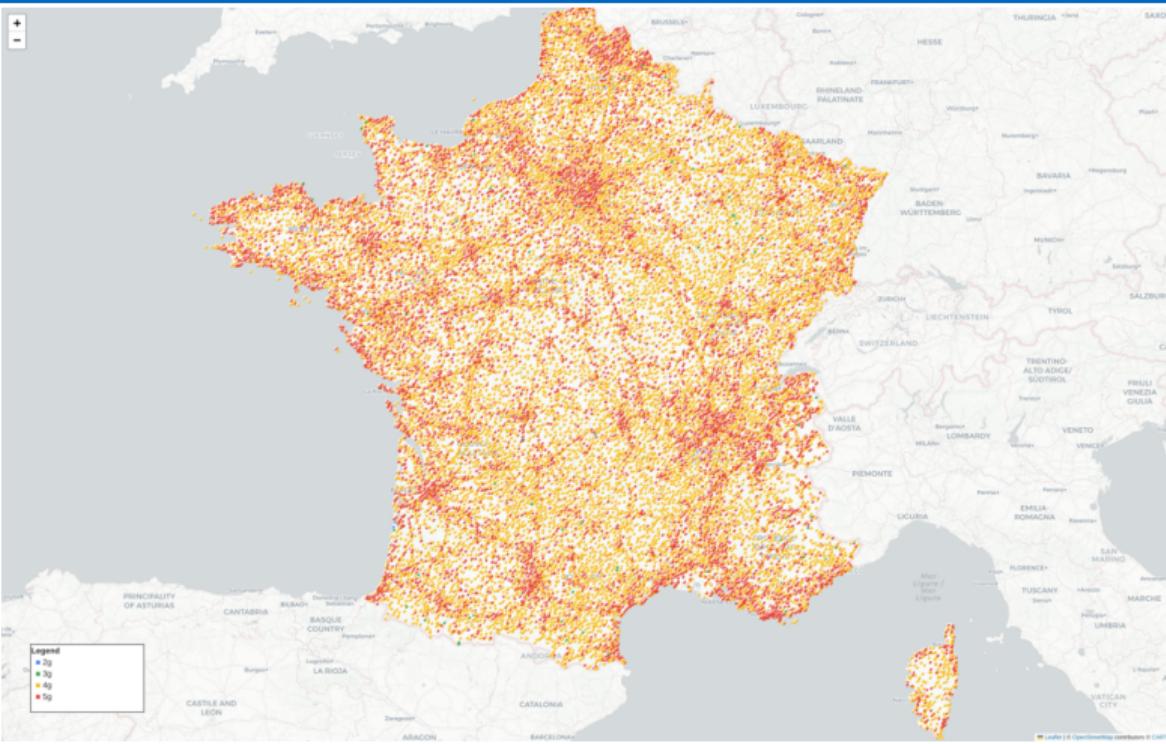


Figure 2 – Les technologies dans toute la France

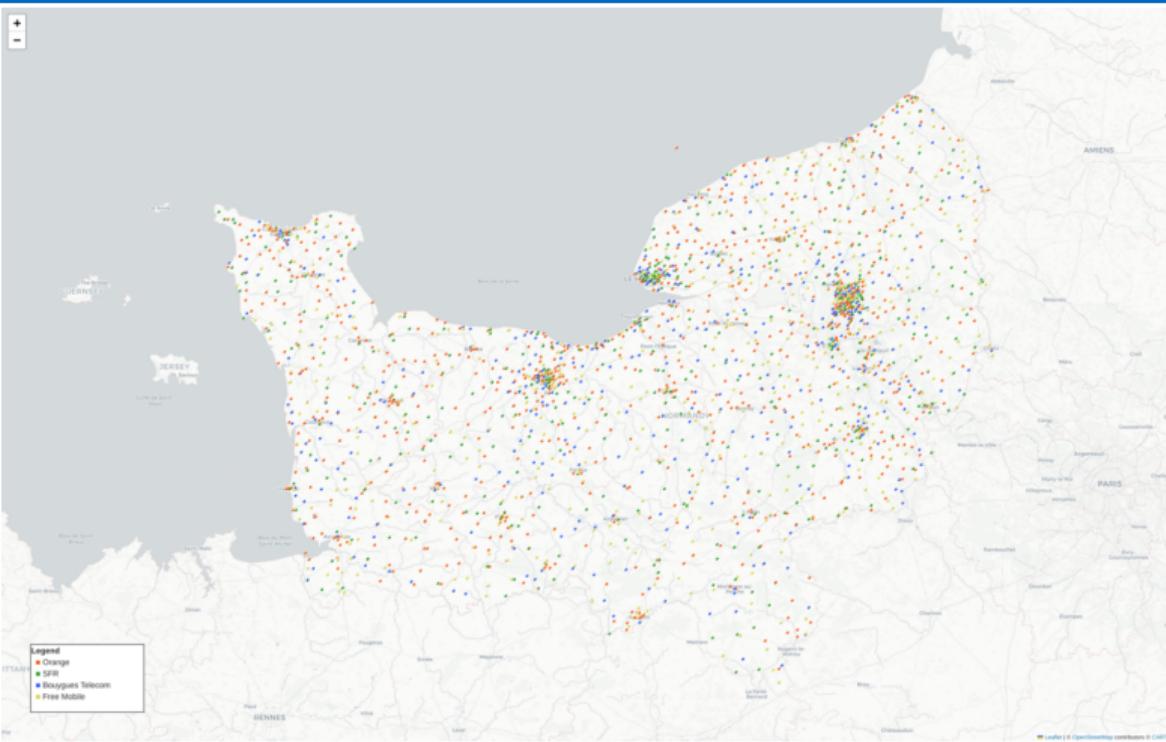


Figure 3 – Les opérateurs en Normandie

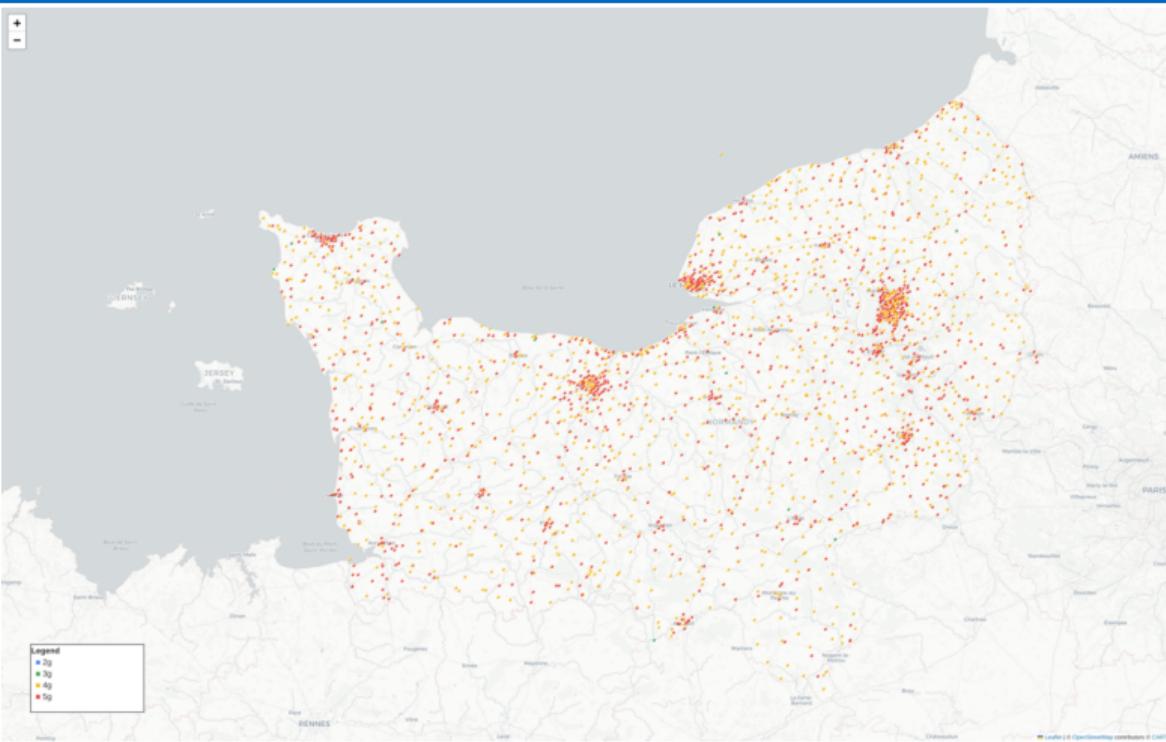


Figure 4 – Les technologies en Normandie

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 :

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

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 $p_i \notin C$:

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

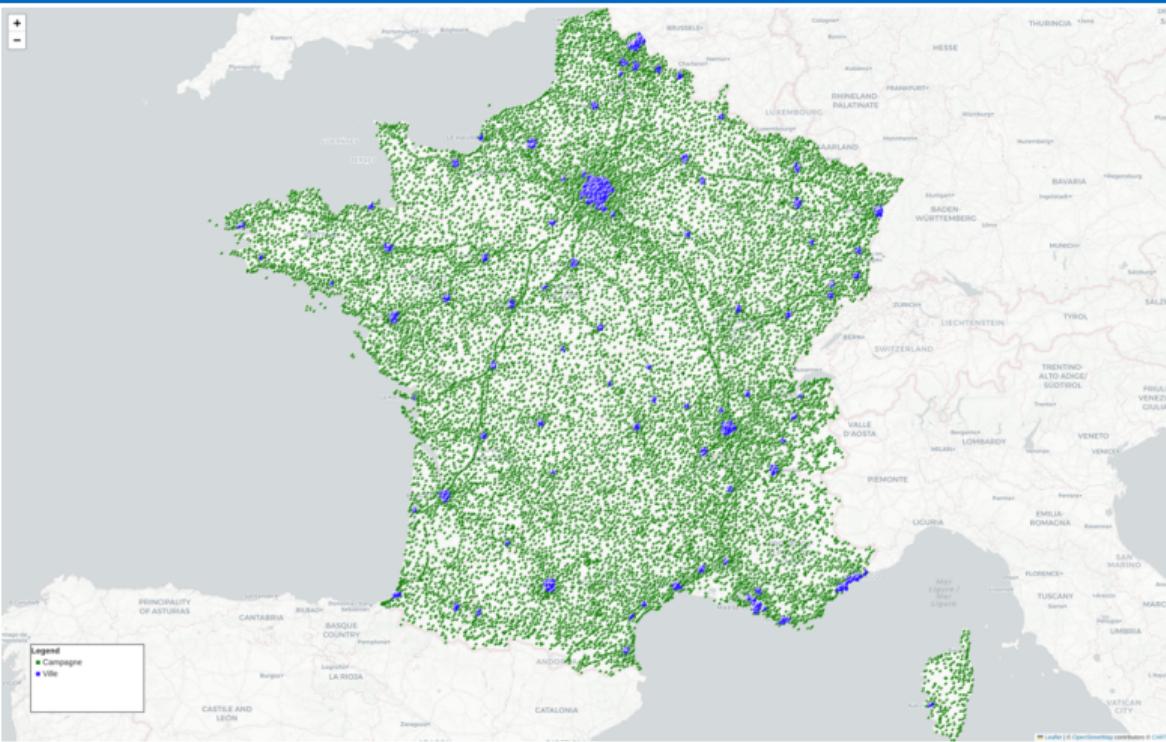


Figure 5 – Les villes détectées en France pour l'opérateur Orange avec $\epsilon = 0.03$ et $n_{min} = 15$

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.

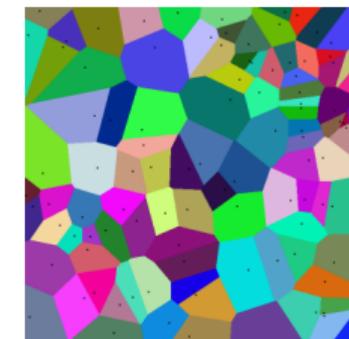


Figure 6 – Exemple de diagramme de Voronoï

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 ».

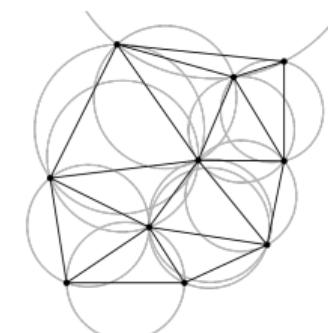


Figure 7 – Exemple de triangulation de Delaunay

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 $O(n \log(n))$.

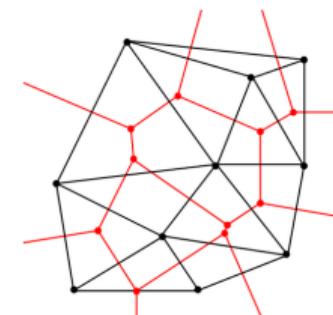


Figure 8 – Lien entre Delaunay et Voronoï

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 cadrant autour de chaque station (6 cadrants) ;
- 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 :

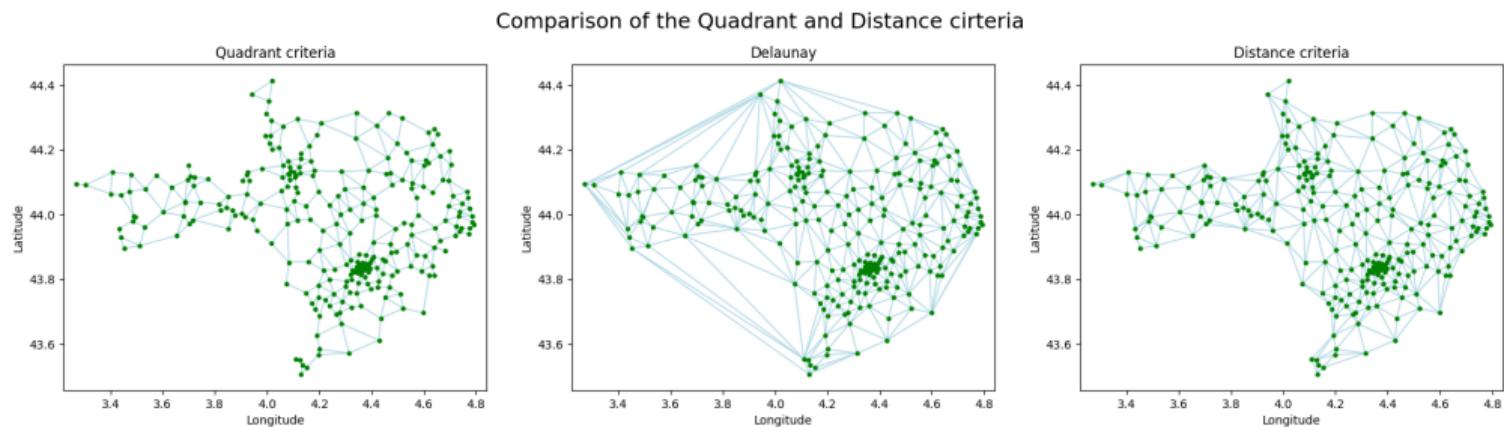


Figure 9 – Evolution de la triangulation de Delaunay en fonction de critères de filtrage

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) :

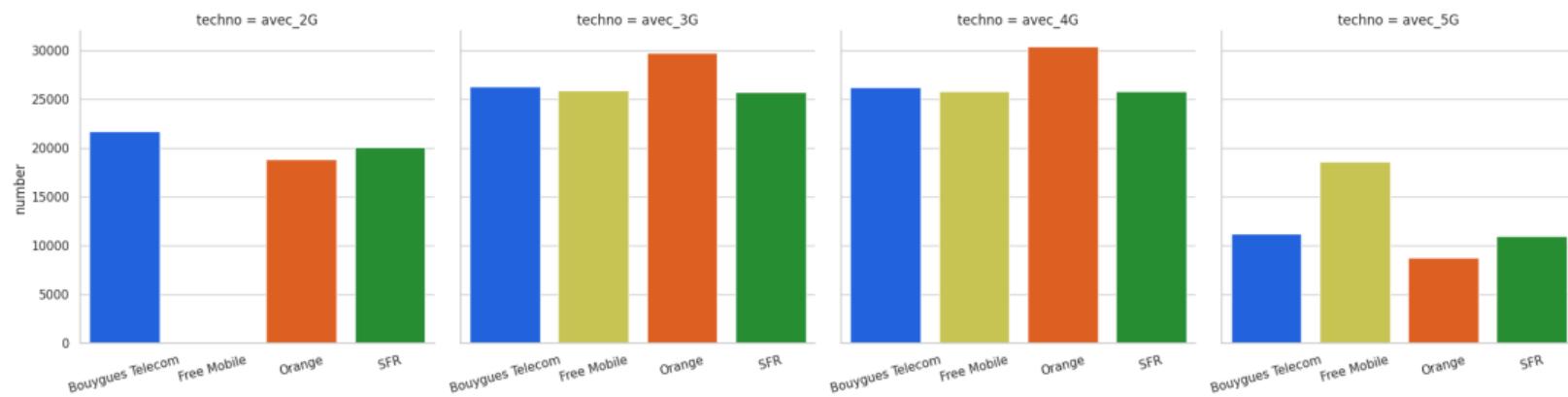


Figure 12 – Nombres de sites équipés d'au moins une technologie

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 :

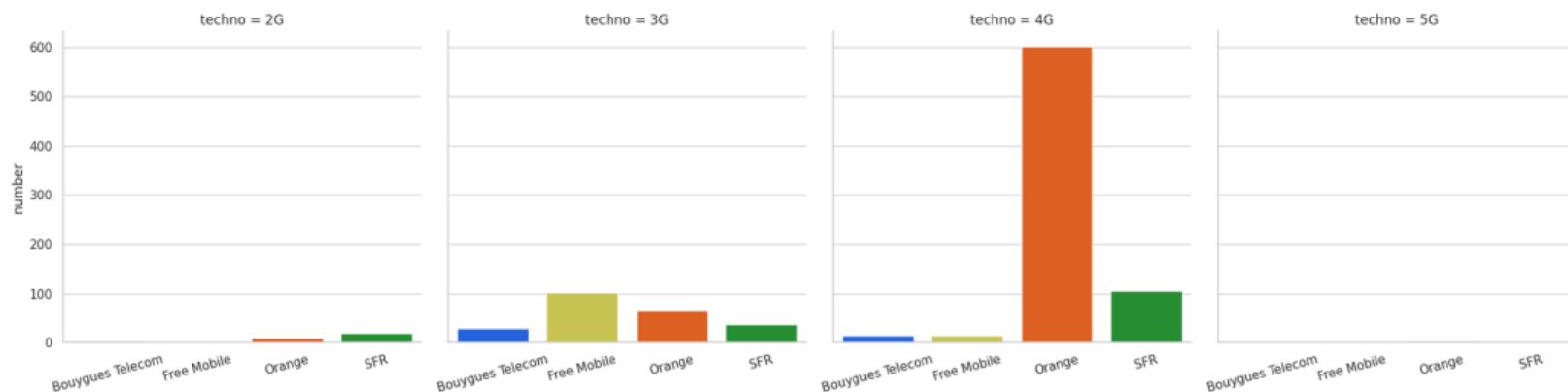


Figure 13 – Nombres de sites équipés d'une unique technologie

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

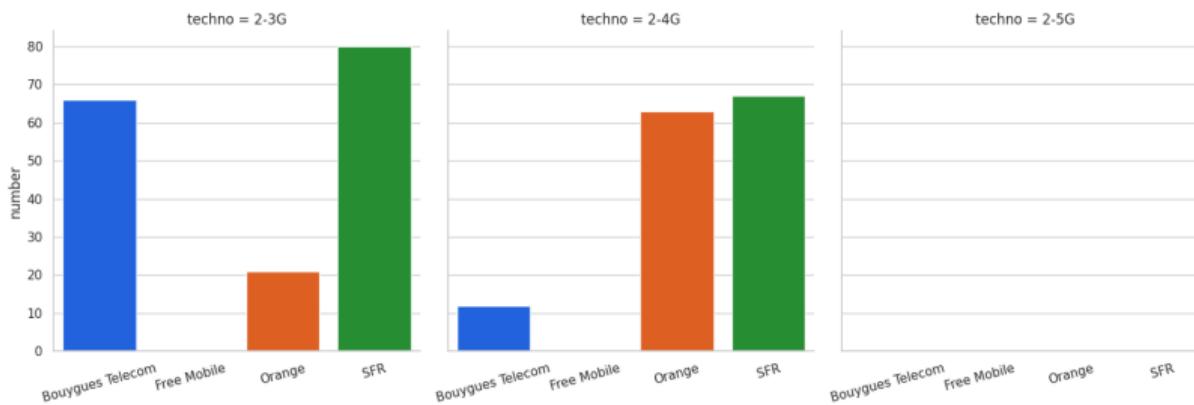


Figure 14 – Nombres de sites équipés de deux technologies

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

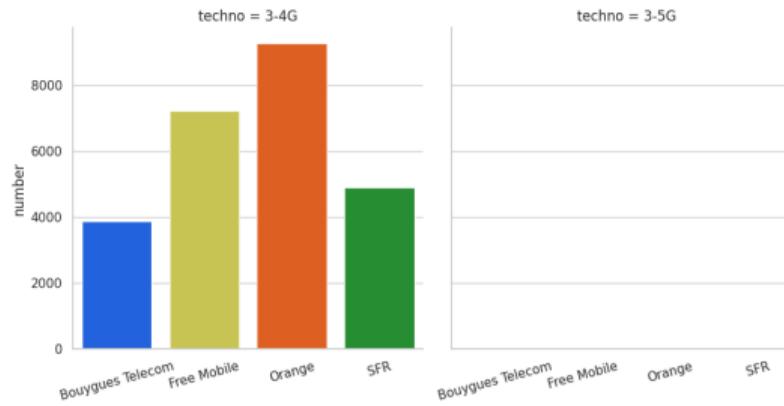


Figure 15 – Nombres de sites équipés de deux technologies (suite)

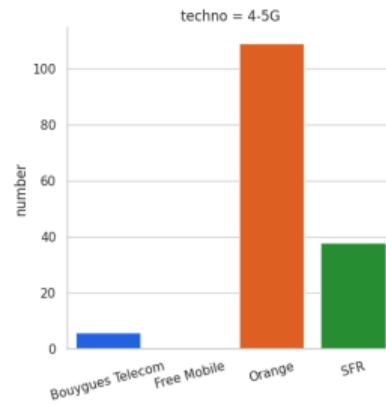


Figure 16 – Nombres de sites équipés de deux technologies (suite-bis)

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

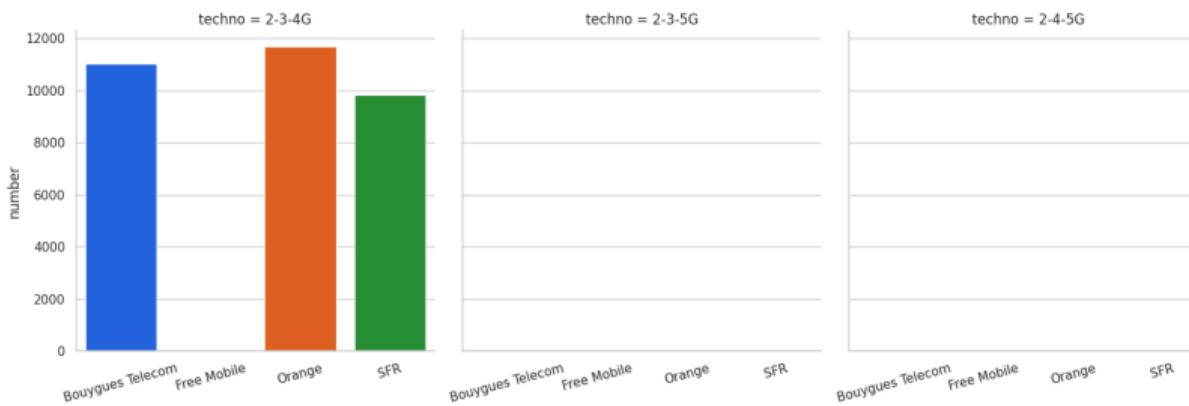


Figure 17 – Nombres de sites équipés de trois technologies

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

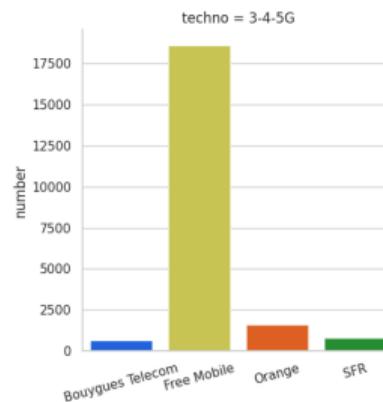


Figure 18 – Nombres de sites équipés de trois technologies (suite)

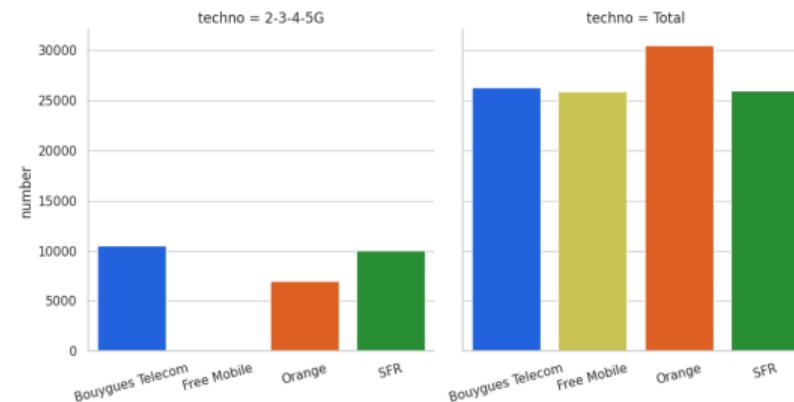


Figure 19 – Nombre de sites équipés de toutes les technologies et total

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

Affichage plus détaillé des cartes

Les stations de base par opérateur

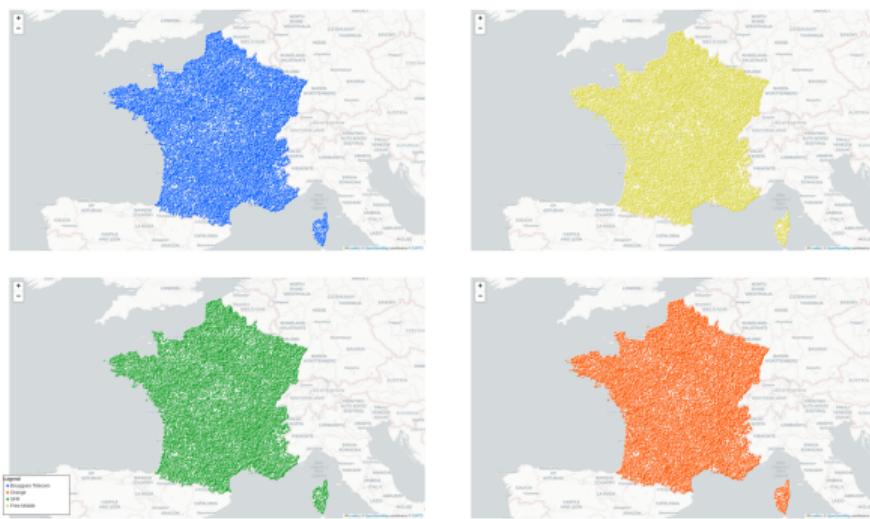


Figure 20 – Les stations de base par opérateurs

Les stations 2G

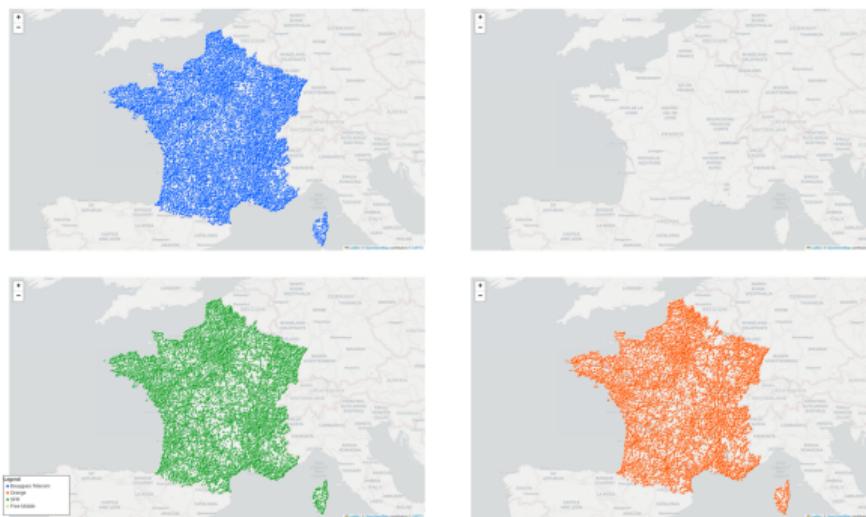


Figure 21 – Les stations 2G

Les stations 3G

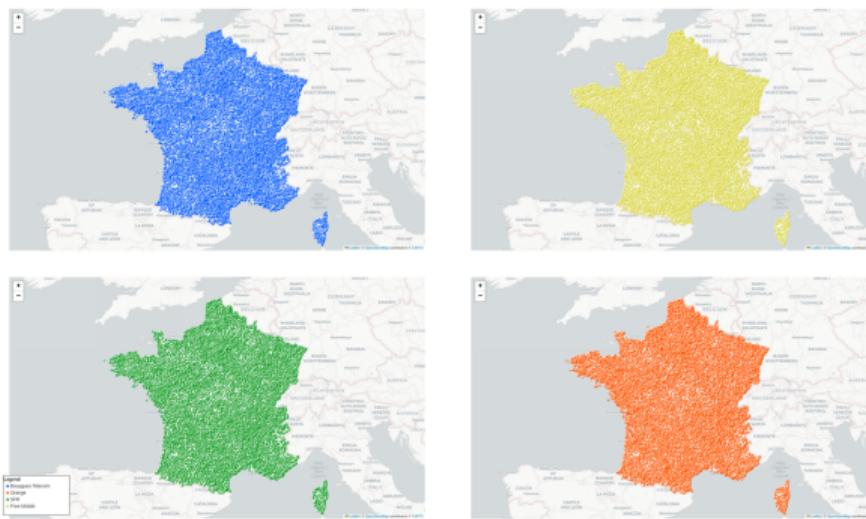


Figure 22 – Les stations 3G

Les stations 4G

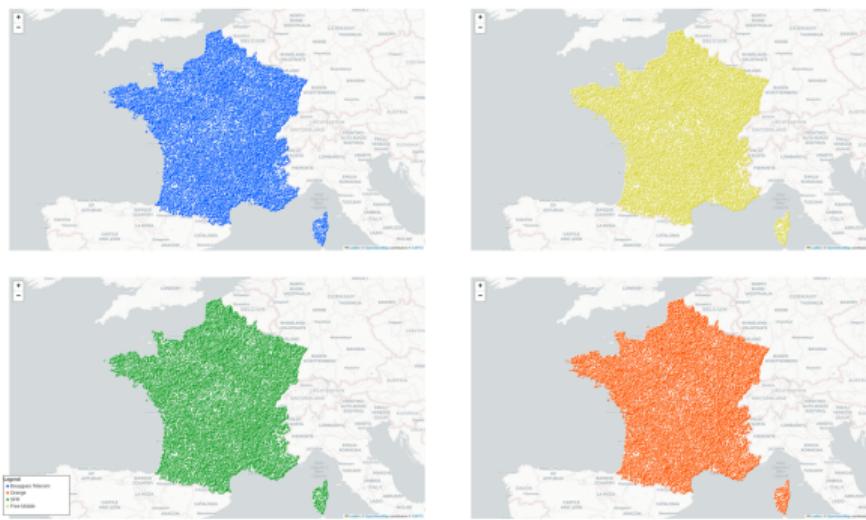


Figure 23 – Les stations 4G

Les stations 5G

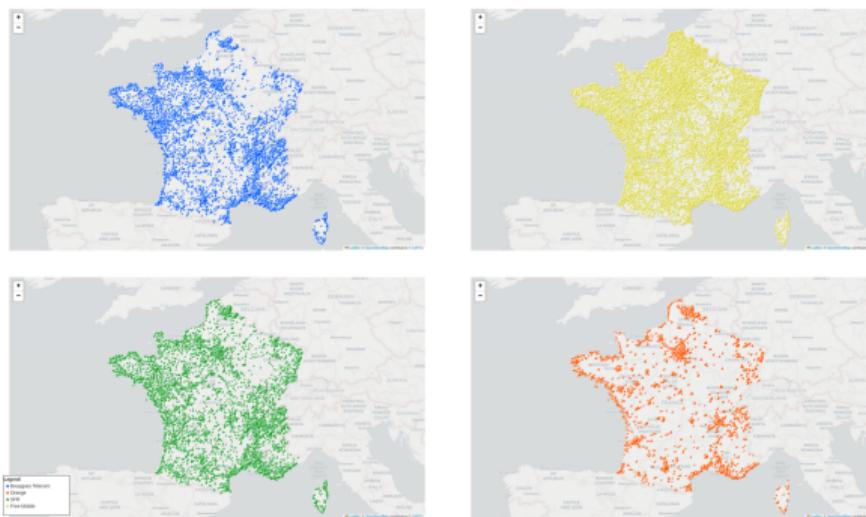


Figure 24 – Les stations 5G

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

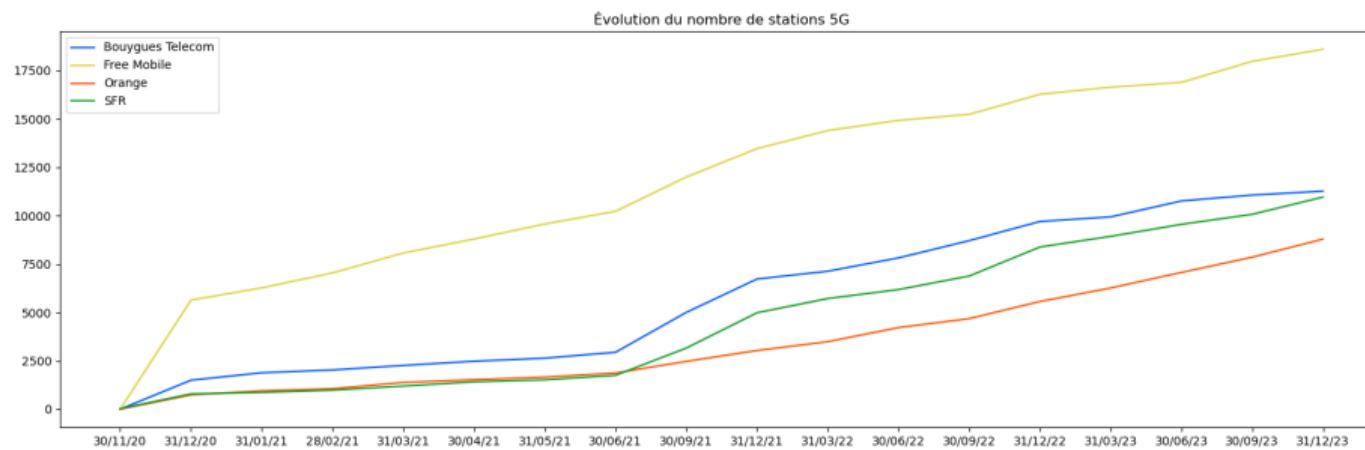


Figure 25 – Evolution du nombre de stations 5G en France

Compilation des jeux de données sites

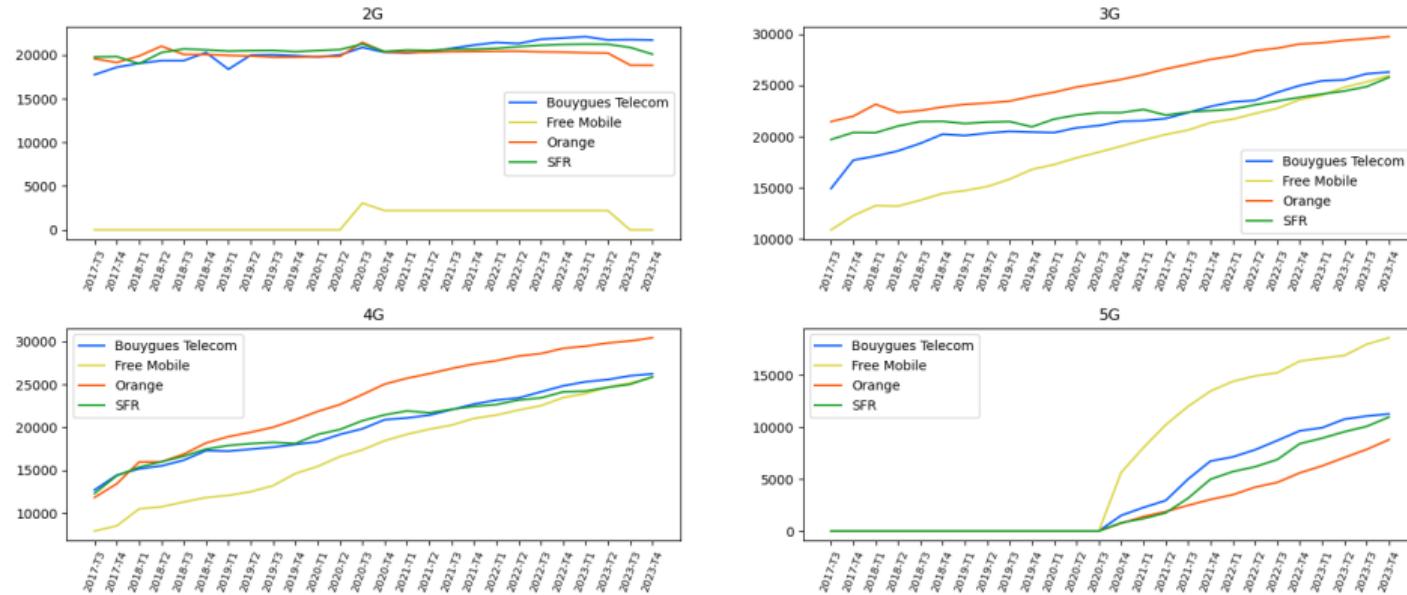


Figure 26 – Evolution du nombre de stations toutes technologies en France

Dispositif de couverture ciblée, éléments d'analyse

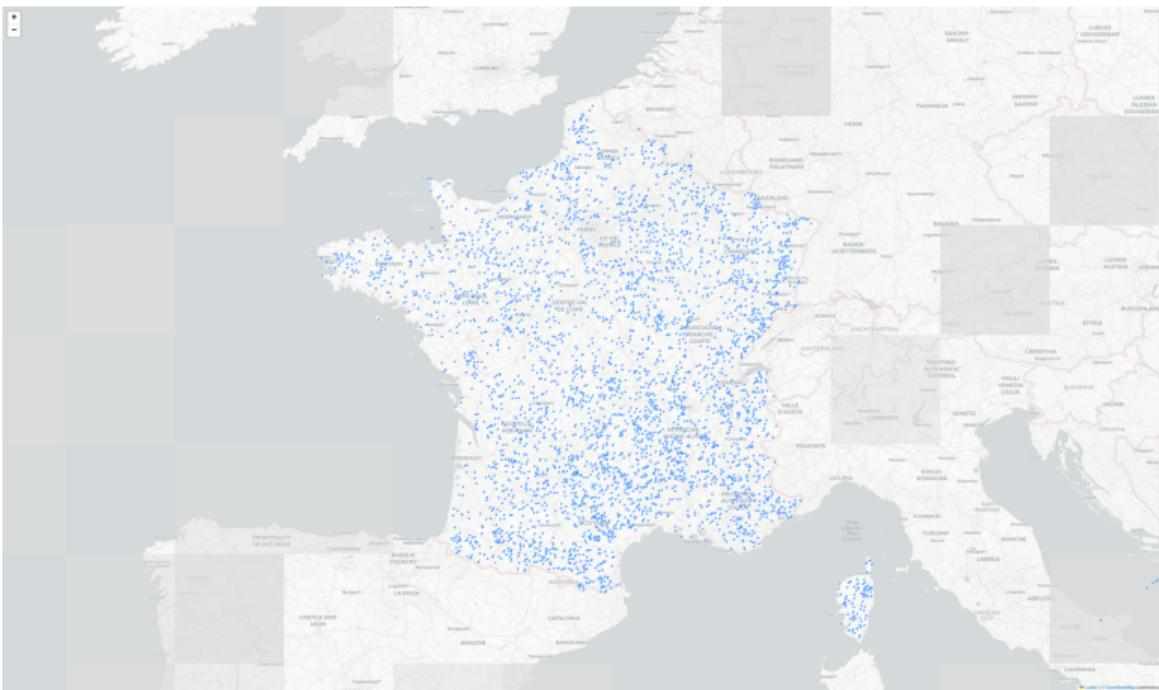
infos générales

- 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



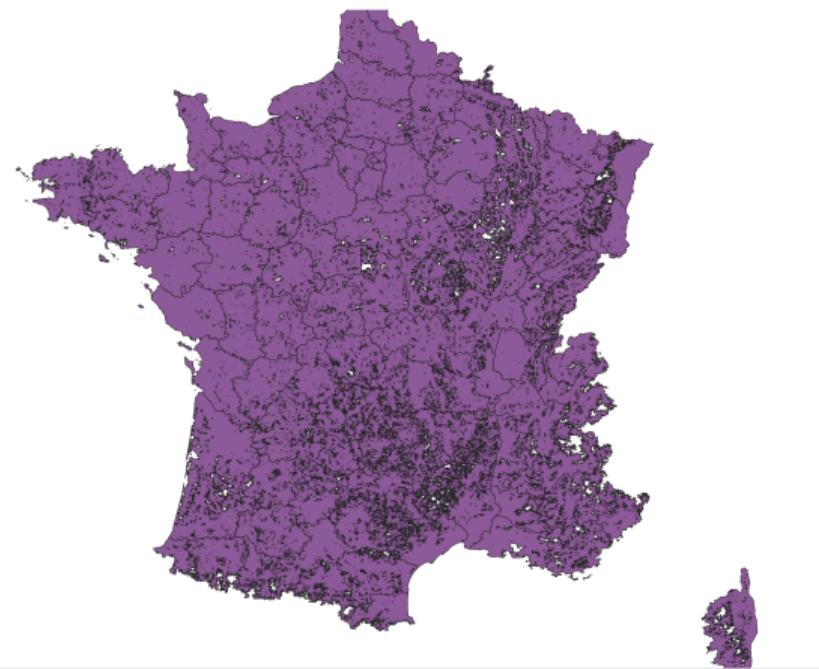
Couverture théorique

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

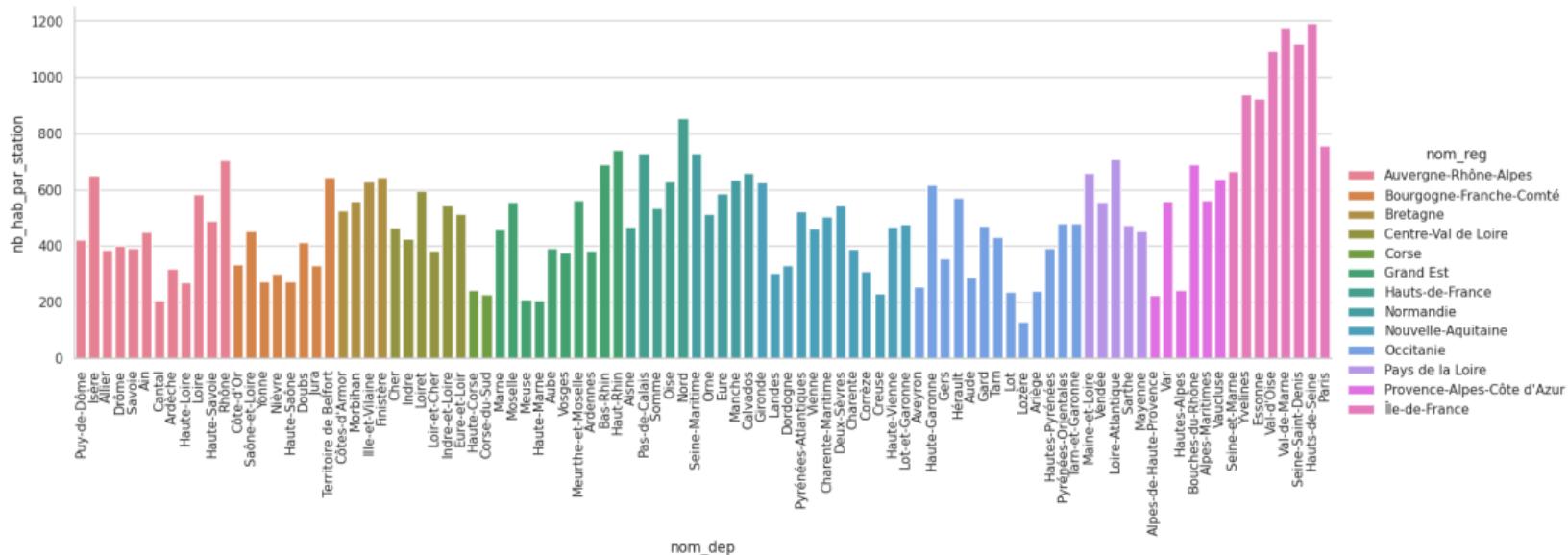


Figure 27 – Répartition du nombre d'habitants par station, en fonction du département

Densité de stations (1/2)

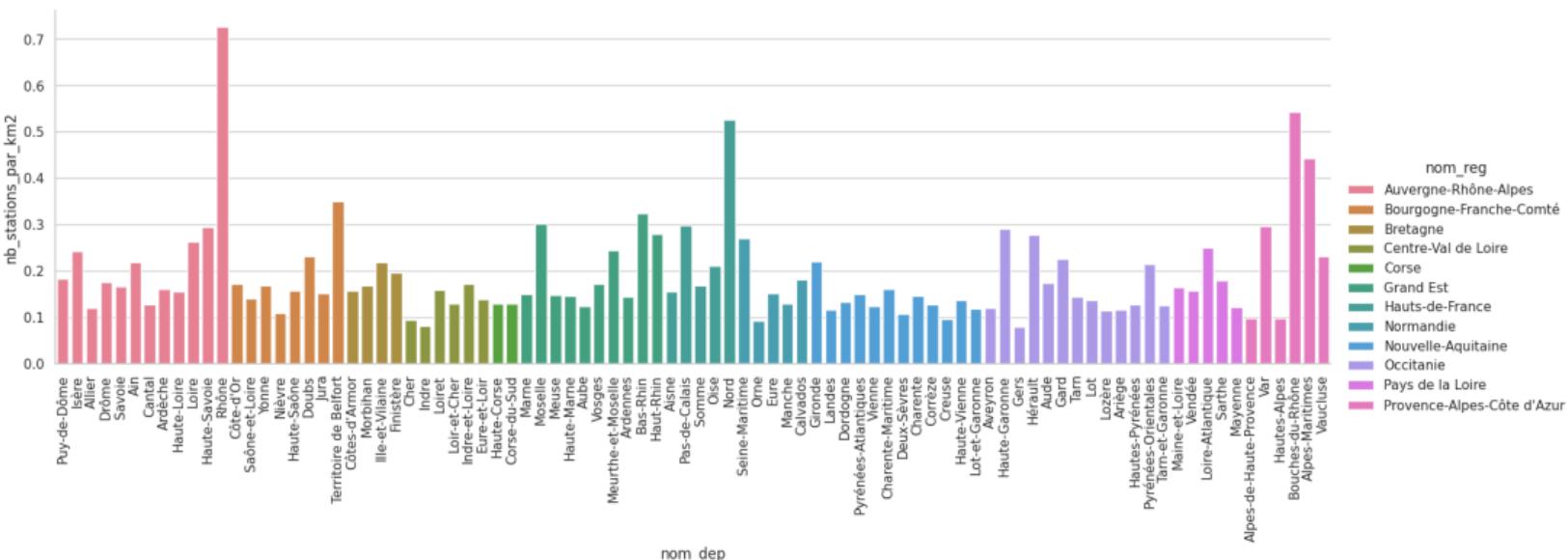


Figure 28 – Nombre de stations de base au km², sans l'Île-de-France

Densité de stations (2/2)

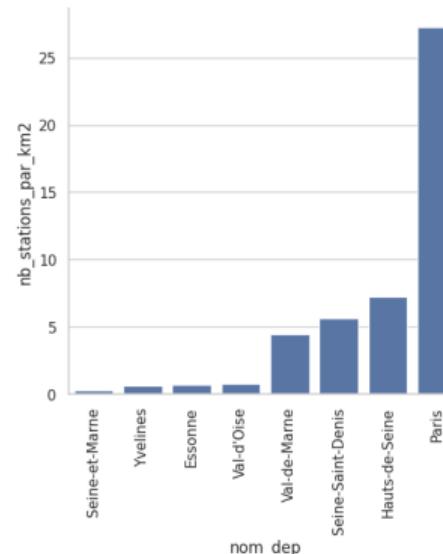


Figure 29 – Nombre de stations de base au km², sur l'Île-de-France

Fréquences d'émission des stations 5G

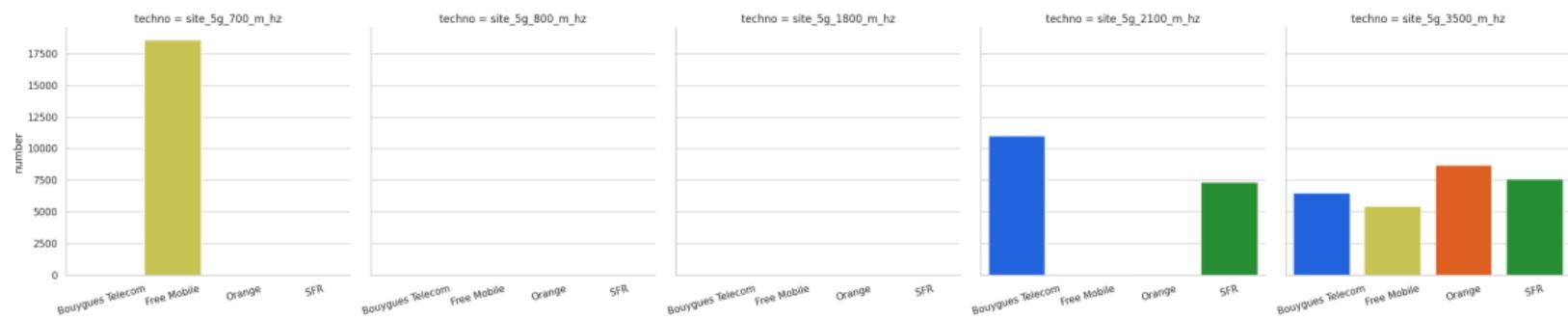


Figure 30 – Répartition des fréquences d'émission des stations 5G, en fonction des opérateurs

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

Détection automatique des villes

DBScan

Principe

- Méthode de référence de la classification à densité (détectio[n] 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.

Fonctionnement DBScan (1/2)

Etape 0 : Initialisation

Soient n points de \mathbb{R}^p , $\epsilon \in \mathbb{R}$ et $n_{min} \in \mathbb{N}$.
Ici, on prend $n_{min} = 3$ et $\epsilon = 2$

Etape 1 - Les voisins

Pour chaque point, on cherche tous les points à une distance inférieure à ϵ (dont lui même).
On les appellera les voisins.

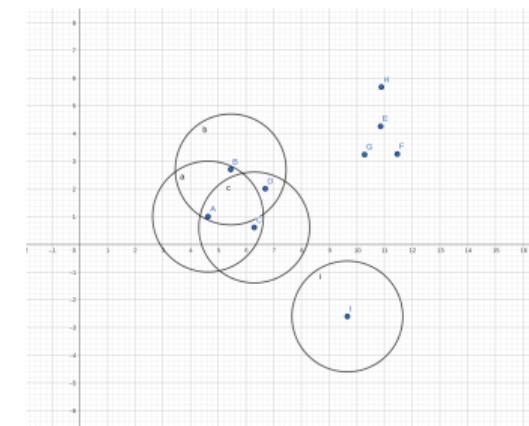


Figure 31 – DBScan : Détection des voisins

| Point | A | B | C | ... | I |
|-----------|-----------|-----------|-----------|-----|-----|
| N(Points) | {A, B, C} | {A, B, D} | {A, C, D} | | {I} |

Fonctionnement DBScan (2/2)

Etape 2 - Construction du graphe de voisinage des noyaux

- Les points ayant au moins n_{min} voisins sont considérés comme des noyaux. On construit alors un graphe dont les sommets sont les noyaux et il existe une arête entre deux noyaux si et seulement si ils sont voisins.
- Les composantes connexes de ce graphe sont les clusters. On rattache alors aux clusters les points voisins d'au moins un noyau de ce cluster, on les appelle points de bordure.
- Enfin, les sommets qui n'apparaissent pas dans le graphe sont considérés comme du bruit (pas de classe).

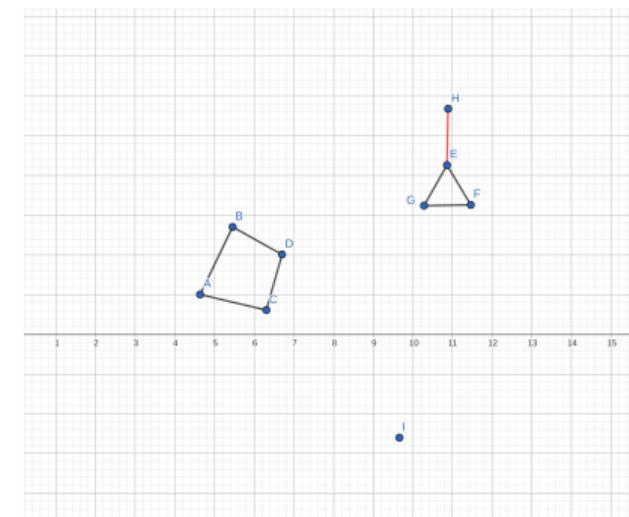


Figure 32 – DBScan : création des clusters

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 .

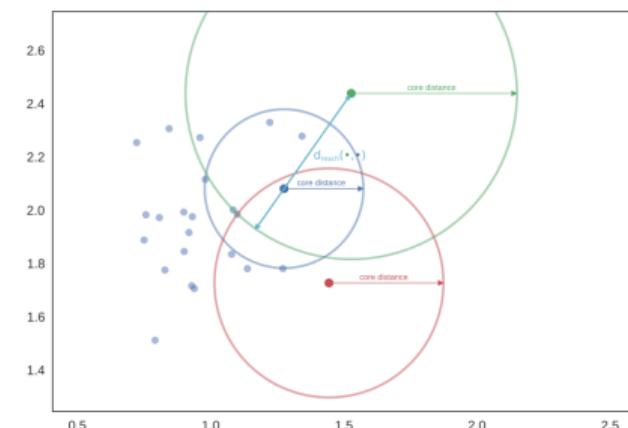


Figure 33 – Nouvelle métrique

Fonctionnement HDBScan³

Principe général

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

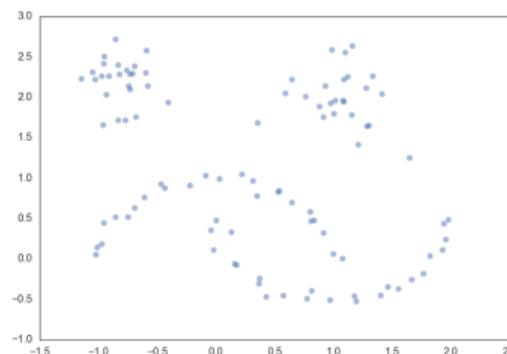


Figure 34 – Le jeu de donnée exemple²

-
2. http://link.springer.com/chapter/10.1007%2F978-3-642-37456-2_14
 2. https://hdbSCAN.readthedocs.io/en/latest/how_hdbSCAN_works.html

Fonctionnement HDBScan

Etape 1 - Construction de l'arbre couvrant de poids minimum

- Représenter les données par un graphe complet où chaque point est un sommet
- Valuer les arêtes par la métrique expliquée précédemment ;
- Trouver un arbre couvrant de poids minimum dans ce graphe ;

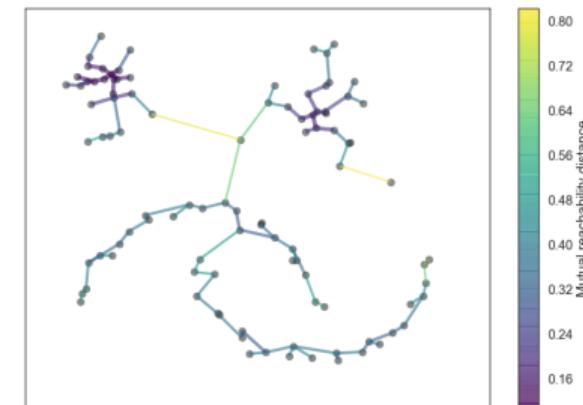


Figure 35 – Arbre couvrant de poids minimum

Fonctionnement HDBScan

Etape 2 - Création du dendrogramme

- Ne garder que les arêtes correspondant à un certain seuil que l'on fait varier.
- Observer l'évolution des classes (composantes connexes) en fonction de cette distance.
- Construire un dendrogramme à partir de ces informations.

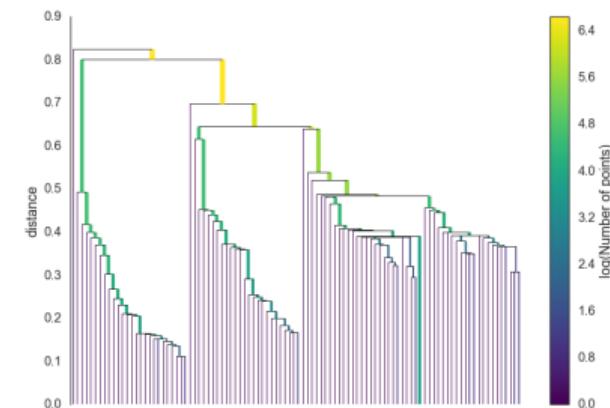


Figure 36 – Dendrogramme

Fonctionnement HDBScan

Etape 3 - Condensation du dendrogramme

On va chercher à condenser le dendrogramme précédent. Pour cela, on considère qu'au départ il n'y a qu'un cluster. On considère qu'un cluster n'est plus considéré comme tel quand il possède moins d'individu qu'un certain seuil (appelons le n_{min}). A chaque séparation dans le dendrogramme, il y'a trois cas de figure :

- Si les deux parties comportent au moins n_{min} individus, alors on considère que le cluster parent meurt et donne naissance à deux enfants.
- Si une seule des parties comporte au moins n_{min} individus, alors on considère que ce cluster est la continuation du précédent.
- Si les deux parties comportent moins de n_{min} individus, alors on considère que le cluster meurt.

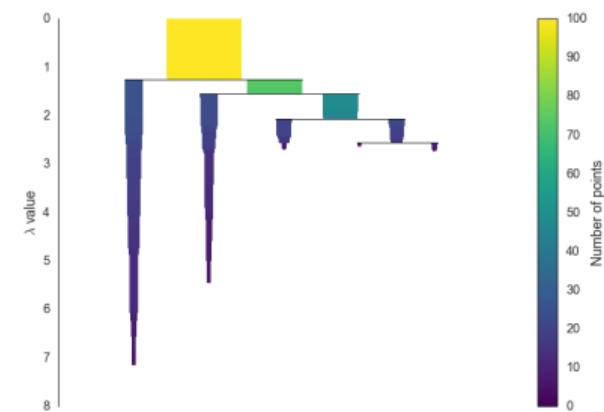


Figure 37 – Dendrogramme condensé

Fonctionnement HDBScan

Etape 4 - Selection des clusters

On va choisir les clusters que l'on veut grader au sein du dendrogramme condensé en choisissant les clusters les plus "durables". Graphiquement, cela revient à choisir les clusters dont l'aire est la plus importante dans le dendrogramme condensé. A la fin on souhaite une partition, donc qu'on ne peut sélectionner à la fois un cluster et son descendant.

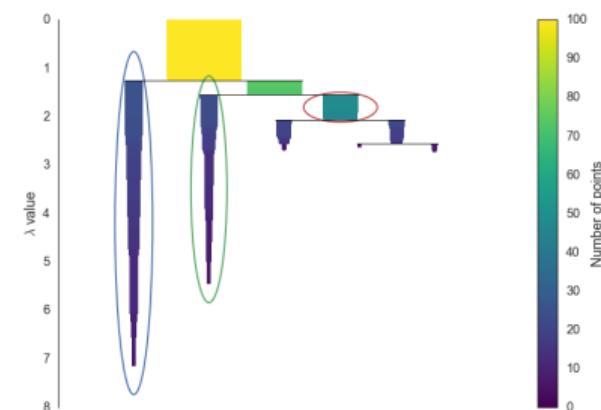


Figure 38 – Clusters choisis

Fonctionnement HDBScan

Etape 5 - Résultat

A la fin, on obtient les clusters ainsi qu'une probabilité pour chaque point qui caractérise la probabilité que le point appartienne à son cluster. Cette probabilité est déterminée en observant à quel moment le point se déconnecte de son cluster dans le dendrogramme.

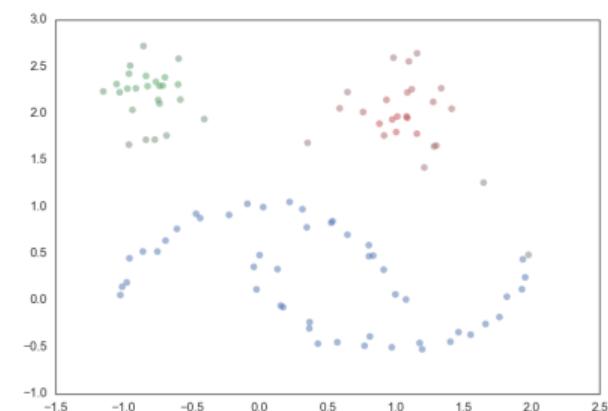


Figure 39 – Résultats sur le jeu de donnée d'exemple

HDBScan

Avantages

- Permet de prendre en compte les problèmes de classe à densité variable ;
- Introduit un modèle probabiliste.

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`⁴

- `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`.

3. <https://scikit-learn.org/stable/modules/generated/sklearn.cluster.HDBSCAN.html>

Résultats

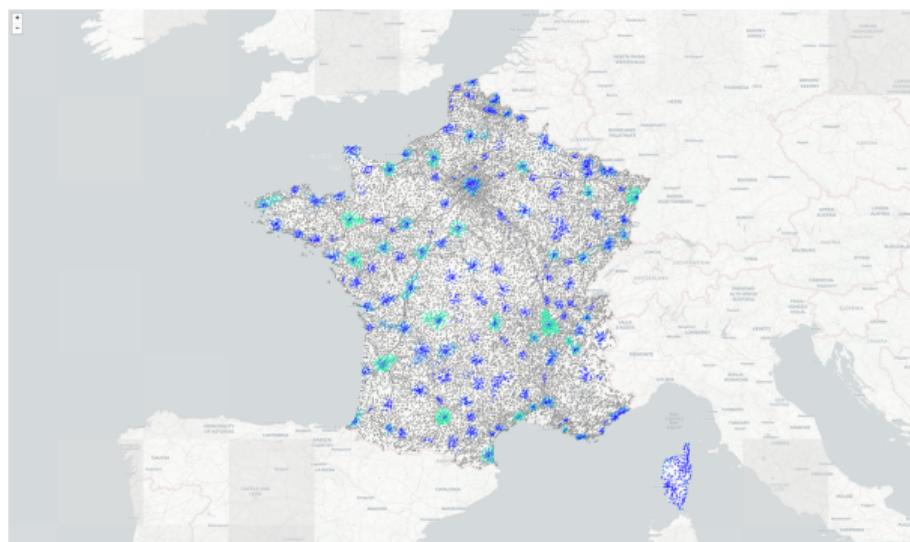


Figure 40 – Application d'HDBScan `min_cluster_size=5, min_samples=40`