

Département de géomatique appliquée
Faculté des lettres et sciences humaines
Université de Sherbrooke

Développement d'un tableau de bord analytique pour l'analyse des particules PM_{2.5} de la
Ville de Sherbrooke à partir d'un réseau multicapteurs

Par

Florian Delecroix

Travail présenté à

Mickaël Germain

Dans le cadre du cours

GAE 724

Essai en géomatique appliquée

Sherbrooke

Septembre 2023

Résumé

Les pollutions atmosphériques, notamment les particules fines en lien avec la santé humaine, sont devenues des sujets de plus en plus d'actualité à la suite de la crise du Covid ainsi que les feux de forêts au Canada en 2023. Ces derniers ont provoqué un nuage de poussière traversant le Canada et les États-Unis. Ces particules fines et plus particulièrement les particules de taille inférieure à 2.5 µm ont des impacts notoires sur la santé, et plus particulièrement elles peuvent provoquer des troubles respiratoires et cardiaques.

Face à cette préoccupation, le problème des particules fines est devenu un problème de santé publique majeur. Les administrations publiques cherchent désormais des outils permettant de mesurer et de représenter ces particules fines à différentes échelles telles que la ville, la région ou la province.

La télédétection ainsi que la cartographie, et plus particulièrement la cartographie en ligne interactive, sont de bons outils de récolte et d'affichage des données. Ils permettent de transférer de l'information pour différents types d'utilisateurs ayant un différent niveau de connaissance. Dans ce contexte, un tableau de bord analytique web est un outil adéquat permettant la visualisation rapide et accessible de l'information souhaitée par le public ou les autorités compétentes.

Pour ce projet, les données utilisées proviennent de capteurs terrestres de la société TERA acquises durant l'année 2022 à différents endroits de la Ville de Sherbrooke ainsi que sur les bus de la société de transport. Les données des particules fines, de la température ainsi que des oxydes d'azote ont été extraites sur la plateforme du groupe TERA, puis nettoyées et normalisées avant d'être stockées dans une base de données relationnelle PostgreSQL.

Le tableau de bord analytique développé s'appuie sur une librairie libre et ouverte nommée Gradio. Le produit final est un tableau de bord permettant de discriminer l'information en fonction de valeurs et de périodes spécifiques. Un histogramme y représente également la plage de valeurs sélectionnées. Il est possible d'afficher les données relatives au PM₁, PM_{2.5}, PM₁₀, NO₂ et à la température. Ce tableau de bord est hébergé sur la plateforme HuggingFace pour une consultation aisée.

Remerciements

Je tiens à remercier Monsieur Mickaël Germain pour avoir accepté d'être mon directeur d'essai et pour son accompagnement durant la réalisation de cet essai.

Je remercie mes amis Gigi, Henry et Florian pour leur aide et soutien durant la durée de cet essai.

Enfin je tiens à remercier ma famille et mes amis pour leur écoute et soutien durant cette période.

Table des matières

Table des matières.....	I
Table des figures.....	III
Table des tableaux.....	III
Liste des abréviations	IV
I. Introduction.....	1
I.1. Mise en contexte	1
I.2. Problématique	3
I.3. Objectifs.....	5
II. Cadre théorique.....	6
II.1. Pollution atmosphérique et particules fines	6
II.1.a. La gestion de la qualité de l'air au Canada.....	6
II.1.b. Les particules fines PM _{2.5}	7
II.1.c. Origine des PM _{2.5}	8
II.2. Infrastructure du système	11
II.2.a. Système de gestion de base de données ou SGBD	11
II.2.b. Cartographie web et tableau de bord interactif	12
III. Matériel et Méthodes.....	13
III.1. Site d'étude	13
III.2. Données.....	14
III.2.a. Origine des données.....	14
III.2.b. Description des données	15
III.3. Méthodologie.....	17
IV. Résultats	22
IV.1. Modèles conceptuel et logique de la base de données.....	22

IV.2.	Modèle physique de la base de données.....	23
IV.3.	Cartographie web.....	25
IV.4.	Requête et interpolation spatiale	26
IV.5.	Tableau de bord interactif.....	28
V.	Interprétation et discussion des résultats.....	30
VI.	Conclusion	31
VII.	Recommandations.....	32
VIII.	Références	33

Table des figures

Figure 1 : Évolution des émissions atmosphériques pour les différents polluants atmosphériques entre 1990 et 2019 au Canada. Figure extraite de Environnement et Changement Climatiques Canada, 2021. Inventaire des émissions de polluants atmosphériques.....	7
Figure 2 : Sources des émissions des particules fines en 2019 au Canada. Figure extraite de Environnement et Changement Climatiques Canada, 2021. Inventaire des émissions de polluants atmosphériques.....	8
Figure 3 : Sources des émissions des particules fines entre 1990 et 2019 au Canada. Figure extraite de Environnement et Changement Climatiques Canada, 2021. Inventaire des émissions de polluants atmosphériques.....	9
Figure 4 : Infographie du gouvernement du Canada concernant les particules fines. Figure extraite de Santé Canada, 2019	10
Figure 5 : Émissions de particules fines entre 2000 et 2019 par province ou territoire (source : Environnement et Changement Climatique Canada, 2021. Inventaire des émissions de polluants atmosphériques).....	11
Figure 6 : Carte de localisation de la ville de Sherbrooke et de ses quartiers	Erreur ! Signet non défini.
Figure 7 : Photo de l'installation du capteur fixe au carrefour de l'Estrie en juillet 2022 ...	14
Figure 8 : Diagramme méthodologique	17
Figure 9: Modèles conceptuel logique des tables Capteur Fixe (a) et Capteur Mobile (b) .	22
Figure 10: Modèle physique de la table Capteur fixe	23
Figure 11: Modèle physique de la table Capteur Mobile.....	24
Figure 12 : Code d'appel à la base de données SQL.....	26
Figure 13 : Création des jeux de données via le package Pandas	26
Figure 14 : Création des graphiques représentant les données sur le dashboard	27
Figure 15: Premier schéma de réalisation du dashboard	28
Figure 16: Tableau de bord analytique, version finale.....	29

Table des tableaux

Tableau 1: Format des données des capteurs fixes	15
Tableau 2: Format des données des capteurs mobiles.....	16
Tableau 3 : Caractéristiques des différentes bibliothèques cartographiques	19
Tableau 4 : Caractéristiques des différentes solutions cartographiques.....	20
Tableau 5: Aide à la décision de la solution choisie	21

Table des annexes

Annexe 1: Version finale du tableau de bord analytique.....	I
---	---

Liste des abréviations

CCME

Conseil Canadien des Ministres de l'Environnement

CSV

Comma-Separated Values

GDB

Fichier Geodatabase

GML

Geography Markup Language

GPX

GPS eXchange Format

KML

Keyhole Markup Language

SGQA

Système de Gestion de la Qualité de l'Air

SHP

Fichier Shapefile

WFS

Web Feature Services

WMS

Web Map Service

I. Introduction

I.1. Mise en contexte

La pollution atmosphérique résulte de la libération de substances nocives dans l'air. Ces substances peuvent provenir de diverses sources et activités, telles que les émissions des véhicules, les usines, les centrales électriques, la combustion de combustibles fossiles, les activités industrielles et agricoles, etc. (Brusseau *et al.*, 2019). Lorsque ces substances sont libérées dans l'air, elles se mélangent avec d'autres gaz et particules, créant ainsi une pollution atmosphérique lorsque la concentration dépasse un certain seuil (Brusseau *et al.*, 2019).

Depuis de nombreuses années, la pollution atmosphérique est un enjeu croissant, notamment en ce qui concerne l'impact sur la santé humaine globale et plus spécifiquement dans les zones urbaines. De nombreux articles scientifiques, tels que ceux d'Eilstein (2010), Wanner (1993) ou encore Dockery *et al.* (1993), ont mis en évidence l'impact de la pollution atmosphérique sur la santé publique à travers différentes maladies. Brusseau *et al.* (2019) ont détaillé dans leur article les différents types de pollution atmosphérique et leurs effets°:

(1) Le monoxyde de carbone (CO) provient de la combustion incomplète d'une énergie fossile, et la cause principale est le transport (automobiles et camions). La concentration de ce polluant est en diminution, aux États-Unis, grâce au développement de nouvelles technologies permettant une meilleure efficacité des moteurs. Les conséquences se retournent sur la santé humaine. Lorsque inhalé, « le CO réduit la capacité de l'hémoglobine du sang à fixer l'oxygène ».

(2) Les hydrocarbures (HCs) sont produits naturellement par la décomposition de matières organiques de certaines espèces végétales, telles que les pins (*Pinus sp.*). Néanmoins, une

grande partie des hydrocarbures provient des activités anthropiques, telles que la combustion de carburant durant le transport ou l'évaporation de gasoil.

(3) Les oxydes d'azote (NO_x) proviennent de la combustion de carburant à haute température dans les automobiles. La présence de NO_x dans l'eau peut provoquer des pluies acides impactant fortement les plantes et l'agriculture. De plus, ils affectent la santé humaine, notamment le cœur et les poumons. Ogen (2020) a montré qu'une exposition à long terme au dioxyde d'azote (NO_2) était l'un des facteurs aggravants par rapport à la mortalité liée au covid-19.

(4) Les particules fines (PMs) comprennent trois catégories de particules suspendues dans un gaz, classé en fonction de leur taille : les particules de diamètre de 10 μm ou moins (PM_{10}), celle de 2.5 μm ou moins ($\text{PM}_{2.5}$) et celle de 1 μm ou moins (PM_1). Ce type comprend les aérosols, les particules de poussières ou encore certains métaux (le fer ou le cuivre par exemple). Les conséquences d'une trop grande concentration de particules fines se retrouvent sur la santé humaine, principalement le système respiratoire. Ces particules proviennent souvent des transports ou de l'agriculture.

Concernant les $\text{PM}_{2.5}$, Santé Canada (2021) les décrits comme « un mélange de fumée, de suie, d'aérosols ou de matière biologique comme les moisissures, les bactéries, les pollens et les pellicules animales ». De plus, leur faible diamètre peut causer de nombreux problèmes de santé (irritation des yeux, du nez, de la gorge ainsi que des poumons, une diminution des capacités respiratoires), mais aussi une aggravation des maladies déjà présentes dans l'organisme d'une personne (maladie pulmonaire ou cardiovasculaire). Un exemple récent est l'augmentation de la vulnérabilité des populations les plus à risque à la pandémie du Covid-19 à la suite d'une exposition prolongée au $\text{PM}_{2.5}$ (Mendy *et al.*, 2021).

Les effets des $\text{PM}_{2.5}$ sur la santé humaine sont connus et font l'objet d'études de plus en plus approfondies (Fann et Risley, 2013; Lippmann, 2014; Mendy *et al.*, 2021; Zheng *et al.*, 2015). Le suivi de ces particules est devenu aujourd'hui un enjeu majeur pour la santé

publique et la qualité environnementale, particulièrement en milieu urbain. En effet, les villes sont souvent le lieu de concentration de nombreuses activités économiques, industrielles et résidentielles, entraînant une pollution de l'air plus importante due au regroupement des activités et transports, ce qui provoque des conséquences néfastes pour la santé humaine.

Le suivi régulier de la qualité de l'air permet d'évaluer les niveaux de pollution et de prendre des mesures pour la réduire, aidant à diminuer les maladies respiratoires, cardiovasculaires et autres problèmes de santé associés à l'exposition à long terme aux PM_{2.5}. De plus, les résultats du suivi de la qualité de l'air peuvent aider les autorités locales à élaborer des politiques environnementales et sanitaires appropriées pour réduire les émissions de polluants atmosphériques dans les zones urbaines et améliorer la qualité de vie des habitants, tout en informant ces derniers directement à l'aide de différents outils. Aujourd'hui, la démocratisation d'internet et des outils de représentations de données permet d'informer les populations sur de nombreuses thématiques. Ainsi, un tableau de bord analytique permettant de représenter des données géolocalisées extraites de capteurs en temps réel pour informer la population est désormais possible.

1.2. Problématique

Le groupe SA Groupe TERA (<https://groupe-tera.com/>) est spécialisé dans la gestion de la pollution atmosphérique. Sa déclinaison en Amérique du Nord, la compagnie TERA Amérique du Nord (TAN), collabore avec l'Université de Sherbrooke afin de développer une méthode innovante pour la cartographie de la qualité de l'air à l'aide de capteurs terrestres et de données satellitaires. Le réseau de mesure de qualité de l'air de TAN est constitué de capteurs miniatures de type « PM Sensor » qui peuvent être déployés par dizaines, voire par centaines, de manière fixe ou mobile, afin de mesurer les particules PM₁₀, PM_{2.5} et PM₁. Les mesures effectuées sont recueillies automatiquement à travers les moyens de communication sans fil. Comme pour tout réseau de mesure terrestre, la densité spatiale des points de mesure est limitée, notamment en considérant la taille des territoires à couvrir dans le contexte géographique nord-américain.

Afin de produire des cartes de qualité de l'air avec des résolutions spatiales adéquates, les mesures des capteurs de TAN doivent être interpolées et extrapolées pour couvrir l'ensemble du territoire concerné. Cette opération d'interpolation/extrapolation ne peut pas se baser uniquement sur les mesures au sol en raison d'une distribution spatiale des particules atmosphériques qui n'est pas linéaire. L'utilisation de données satellitaires sensibles aux particules ciblées (aérosols, PM_x) peut servir à réaliser cette opération de manière plus précise et plus fiable, notamment en fusionnant les données satellitaires et les données extraites des mesures du réseau de capteurs « PM Sensor ». Plusieurs capteurs de télédétection satellitaires (ex. : MODIS, AVHRR, MISR, VIIRS, POLDER, Sentinel-3) acquièrent quotidiennement des données avec une large couverture spatiale et des résolutions spatiale, spectrale et radiométrique adéquates pour les besoins de ce projet.

La fusion des différentes sources d'information peut servir à produire des cartes plus précises de qualité de l'air. Les données complémentaires de mesures et de prévisions météorologiques (pluviométrie, vent, ensoleillement, etc.) seront également utiles dans le développement d'un modèle de prévision de la qualité de l'air. L'occupation du sol ainsi que la géolocalisation des sources de pollution seront utilisées comme intrants au modèle développé. Des mesures de qualité de l'air réalisées par des stations référence du « réseau de surveillance de la qualité de l'air du Québec » seront utilisées afin de valider les estimations issues de ce projet.

Cet essai s'inscrit dans un projet de recherche à l'Université de Sherbrooke, réalisé dans le cadre d'un doctorat. Il vise le développement d'un système de suivi de la qualité de l'air pour la Ville de Sherbrooke et la mise en place d'un système d'alerte aux citoyens lorsque le niveau des particules $PM_{2.5}$ dépasse un seuil critique pour des risques de santé.

Plus spécifiquement, cet essai porte sur la réalisation d'un tableau de bord web pour analyser les particules $PM_{2.5}$ de la Ville de Sherbrooke à partir d'un réseau multicapteurs. En effet, à la suite de la collaboration avec le groupe Tera et la Ville de Sherbrooke, différents types de capteurs ont été installés à travers la zone urbaine : des capteurs fixes ont été placés au campus principal de l'Université de Sherbrooke, au carrefour de l'Estrie, ainsi que sur le campus de l'Université Bishop. Des capteurs mobiles sont installés sur différents bus de la société de transport de la ville de Sherbrooke. Enfin, des capteurs

citoyens devaient être distribués au sein de la population afin d'obtenir une variété de données, cette étape a été retardée pour la fin 2023.

I.3.Objectifs

L'objectif principal de cet essai est de valoriser les données relatives à différents indices de pollution atmosphérique (NO₂, PM₁, PM_{2.5} et PM₁₀) récupérées par différents types de capteurs autonomes de la société Ecomesure, partenaire du groupe Tera. Ceci sera réalisé au moyen d'un système de gestion de base de données (SGBD) et d'une cartographie web interactive intégrée à un tableau de bord analytique et actualisable en temps réel.

Les objectifs secondaires sont les suivants :

- Création des modèles conceptuel, physique et logique du SGBD
- Création et alimentation de la base de données
- Réalisation de l'architecture de la cartographie web interactive
- Intégration d'un tableau de bord analytique

II. Cadre théorique

II.1. Pollution atmosphérique et particules fines

II.1.a. La gestion de la qualité de l'air au Canada

Afin de protéger les populations et de mieux comprendre le phénomène de la pollution atmosphérique, les différents ministres provinciaux de l'environnement du Canada (excepté le Québec), regroupés au sein du Conseil Canadien des Ministres de l'Environnement ou CCME (<https://ccme.ca/fr>), ont créé en 2012, le Système de Gestion de la Qualité de l'Air ou SGQA. Concernant la non-ratification par le Québec, le CCME explique que « bien que le Québec souscrive aux objectifs généraux du SGQA, il ne mettra pas le Système en œuvre puisque ce dernier prévoit des exigences fédérales pour les émissions industrielles qui font double emploi avec la réglementation du Québec. Toutefois, le Québec collabore avec les autres gouvernements à l'élaboration d'autres éléments du Système, notamment les zones et les bassins atmosphériques. ». L'objectif principal du SGQA est de réduire les émissions et les concentrations ambiantes des divers polluants atmosphériques préoccupants, tels que l'ozone troposphérique (O₃), le dioxyde d'azote (NO₂), le dioxyde de soufre (SO₂), les composés organiques volatils (COV) et les particules fines (PM_x).

Malgré la baisse globale des émissions de polluants atmosphériques au Canada depuis 1990, les émissions des particules fines ont connu la réduction la plus modeste. Le graphique de la figure 1 fourni par Environnement et Changement Climatiques Canada montre l'évolution des émissions atmosphériques pour les différents polluants atmosphériques entre 1990 et 2019 au Canada. Le suivi des particules fines semble donc important.

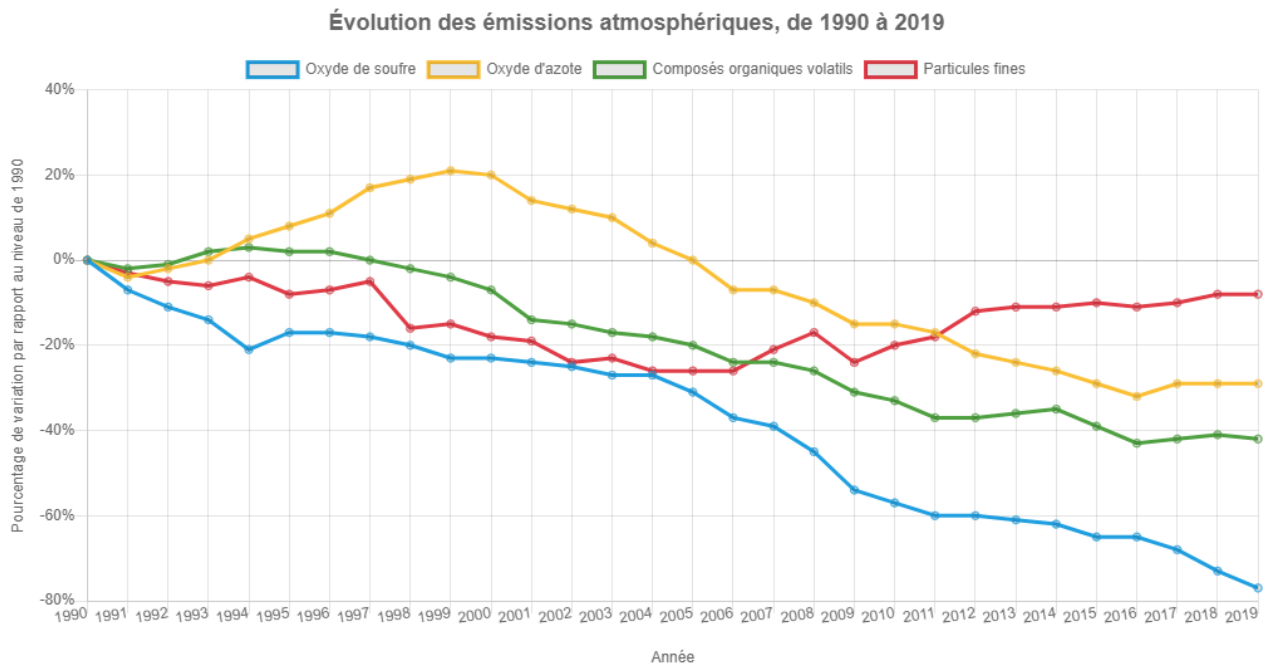


Figure 1 : Évolution des émissions atmosphériques pour les différents polluants atmosphériques entre 1990 et 2019 au Canada. Figure extraite de Environnement et Changement Climatiques Canada, 2021. Inventaire des émissions de polluants atmosphériques

II.1.b. Les particules fines PM_{2.5}

Selon le CCME, les matières particulaires, ou PM_x, sont des particules de forme liquide ou solide en suspension dans l'air. Les PM_{2.5} correspondent aux matières particulaires dont le diamètre est inférieur à 2.5 micromètres (µm). Ji *et al.* (2018) montrent qu'il existe de nombreuses variables socio-économiques en rapport avec le niveau de pollution des PM_{2.5}. Ces chercheurs démontrent que durant la période de leur étude (2001 à 2010), l'augmentation du niveau de PM_{2.5} est en lien avec le niveau de revenu : plus le niveau de revenu est élevé, plus le niveau de pollution l'est aussi. Il en va de même pour le secteur des services, notamment le transport et la restauration qui sont de gros émetteurs de particules fines. Ji *et al.* (2018) expliquent qu'il est difficile d'obtenir des réductions d'émissions, car ce secteur est éparpillé dans tout le système urbain tout en étant dépendant des demandes (concernant le transport) rendant les mesures de contrôles complexes à mettre en place sans affecter l'économie. Par rapport à l'urbanisation, ces chercheurs expliquent que ce secteur influence négativement le niveau de PM_{2.5} dans l'atmosphère une fois les constructions terminées et lorsque le point d'urbanisation maximum est atteint. Cet effet négatif est attribué aux différentes politiques de protection

de l'environnement, aux nouvelles normes de constructions et des matériaux ainsi qu'au contrôle des émissions de pollution.

II.1.c. Origine des PM_{2.5}

L'origine des particules fines est multiple. La figure n°2 représente la source des émissions de particules fines en 2019 au Canada, selon Environnement et Changement climatique Canada. Le total de tonnes émises en 2019 est de 206 438 et l'origine de ces émissions sont (par ordre décroissant) : la combustion de bois -résidentiel (38.38 %), l'extraction de minerais et l'industrie minérale (16.87 %), le transport et les équipements mobiles (16.47 %), autres sources (11.40 %), la fabrication (7.84 %), l'industrie pétrolière et gazière (6.13 %), les feux prescrits et incendies de structures (1.57 %) et enfin la production d'électricité (service public) à 1.34 %. Les particules fines peuvent aussi avoir pour origine des sources à ciel ouvert telles que les poussières de routes ou provenir d'origine naturelle telle que les feux de forêt, mais ces origines ne sont pas prises en compte dans ces statistiques.

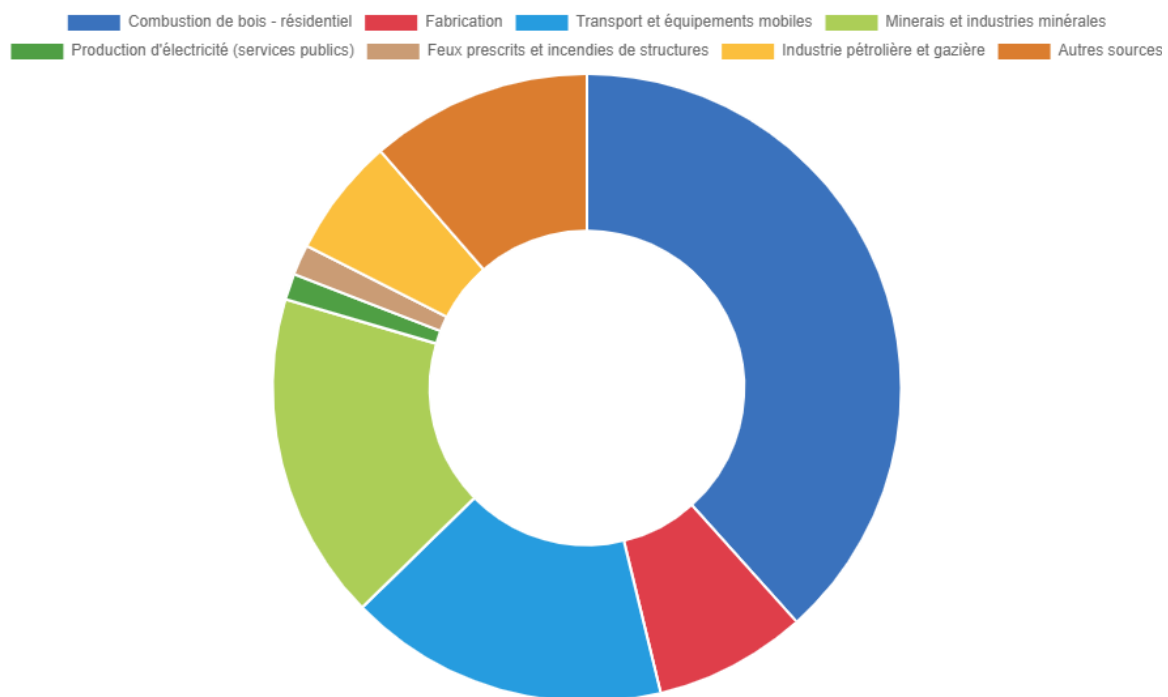


Figure 2 : Sources des émissions des particules fines en 2019 au Canada. Figure extraite de Environnement et Changement Climatiques Canada, 2021. Inventaire des émissions de polluants atmosphériques

Émissions par source, Canada, de 1990 à 2019

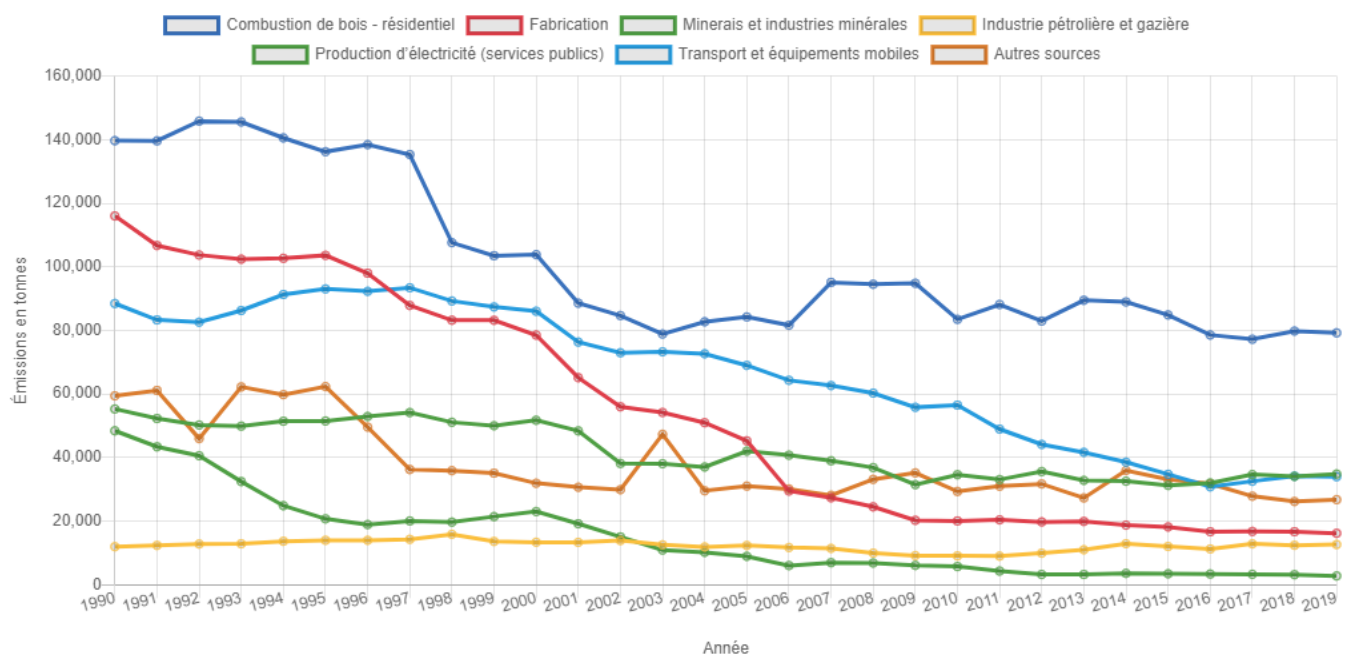


Figure 3 : Sources des émissions des particules fines entre 1990 et 2019 au Canada. Figure extraite de Environnement et Changement Climatiques Canada, 2021. Inventaire des émissions de polluants atmosphériques

Bien que les émissions de particules fines par sources aient significativement diminué, comme le montre la figure n°3, la figure n°1 indique quant à elle, une faible baisse des émissions globales. Cette diminution limitée est inquiétante compte tenu des conséquences à long terme des particules fines sur la santé humaine. Selon le CCME, les particules fines affectent principalement le cœur ainsi que les poumons. Une exposition à long terme peut provoquer des crises d'asthme, des bronchites chroniques ou encore des crises cardiaques. Toujours d'après le CCME, « l'exposition aux PM_{2.5} est aussi associée à un nombre accru de visites à l'urgence et d'hospitalisations dues à des troubles respiratoires et cardiaques ainsi qu'à un risque accru de décès prématurés. Les enfants et les personnes souffrant déjà de maladies cardiaques ou respiratoires sont plus sensibles aux effets des PM_{2.5}. ». Le gouvernement du Canada a élaboré une infographie (figure n°4) à destination du grand public, afin d'informer la population sur ce polluant et ses conséquences sur la santé.

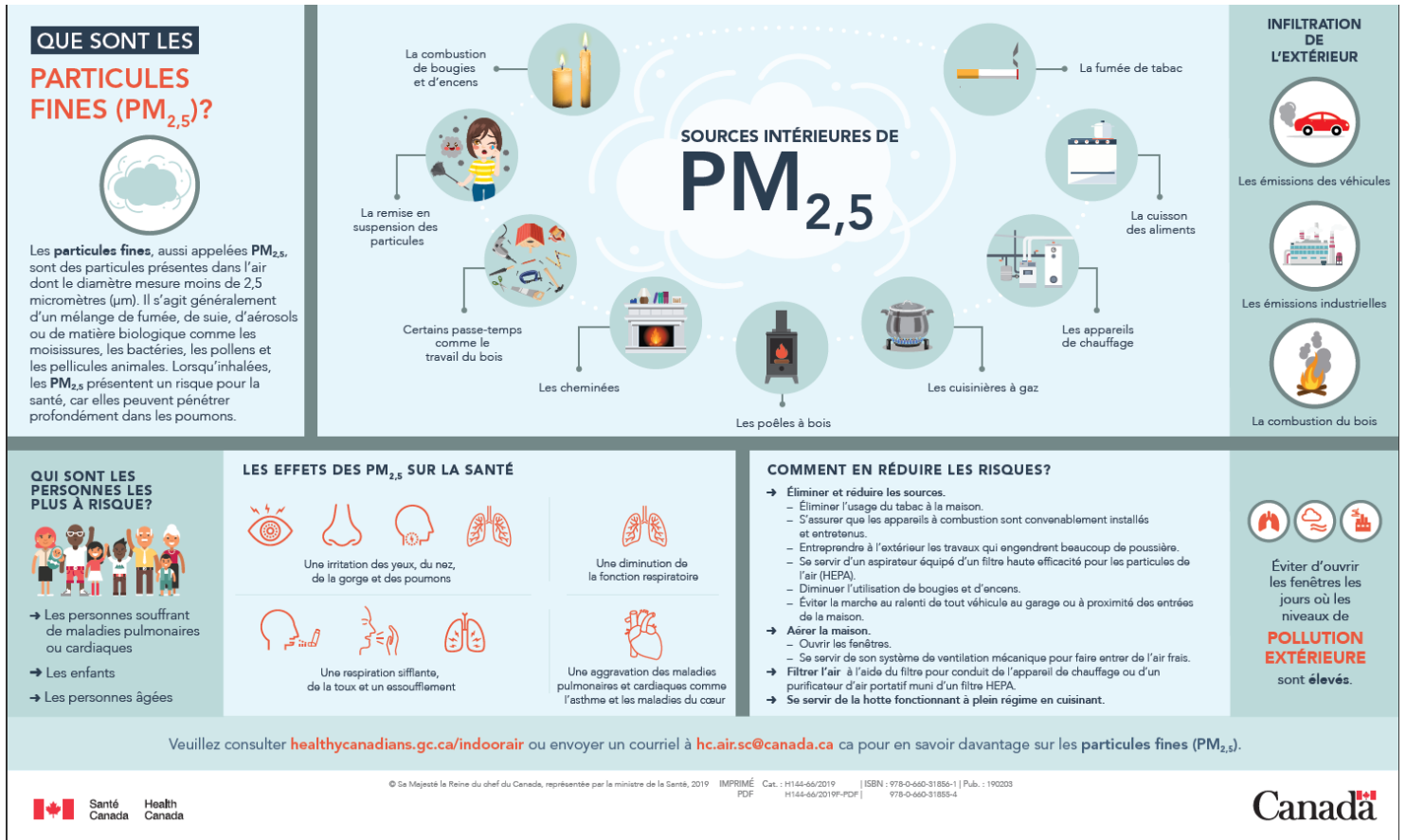


Figure 4 : Infographie du gouvernement du Canada concernant les particules fines. Figure extraite de Santé Canada, 2019

Il est donc important d'évaluer et de surveiller les concentrations de PM_{2,5} dans l'atmosphère à différentes échelles. La figure n°5 présente les émissions par région entre 2000 et 2019. Le Québec et l'Ontario sont les deux provinces présentant les plus importantes émissions. C'est donc dans ces régions que l'impact sur la santé des populations est le plus marqué. De plus, ce suivi est important étant donné qu'une grande partie de la population réside dans les villes de Montréal, Toronto et Ottawa.

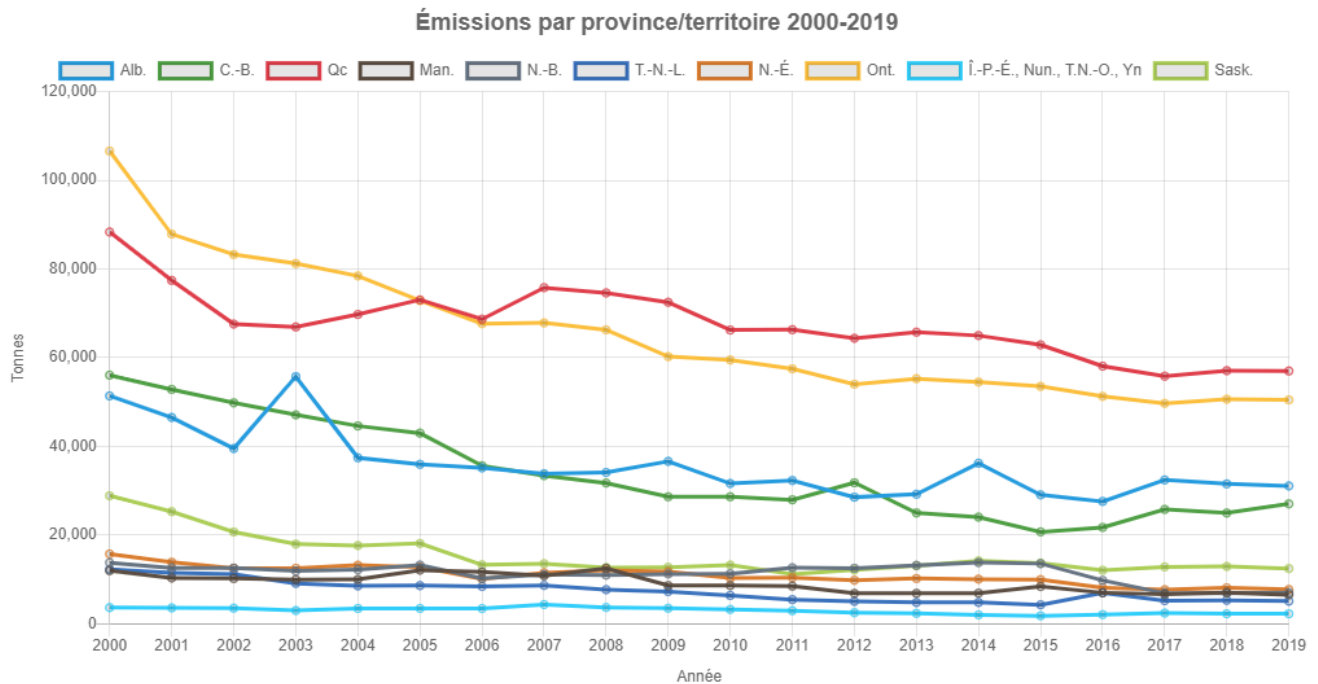


Figure 5 : Émissions de particules fines entre 2000 et 2019 par province ou territoire. Figure extraite de Environnement et Changement Climatique Canada, 2021. Inventaire des émissions de polluants atmosphériques

II.2. Infrastructure du système

Pour concevoir un tableau de bord analytique permettant de visualiser la pollution atmosphérique, en particulier les $PM_{2.5}$, il est nécessaire d'établir les différentes composantes de ce tableau de bord. Il est donc important de choisir le système de gestion de base de données ou SGBD adapté au besoin ainsi que l'interface client permettant aux utilisateurs d'utiliser et consulter le produit.

II.2.a. Système de gestion de base de données ou SGBD

Premièrement, une base de données est définie comme « un ensemble structuré de fichiers permettant de stocker et d'accéder aisément à des données » (Jaramillo, 2020). De plus ces données « sont organisées en vue d'une utilisation plus facile par différentes applications » (Jaramillo, 2020). Deuxièmement, un système de gestion de base de données permet l'utilisation, la manipulation et l'analyse des données stockées par le biais de requêtes utilisant un langage spécifique, le langage le plus utilisé est le langage SQL (Structured Query Language). Différentes plateformes sont disponibles pour le stockage de ces données : Oracle database, MySQL, MongoDB, BigQuery ou encore PostgreSQL. Ces plateformes se distinguent par le type de base de données qu'elles gèrent et par leur accessibilité.

II.2.b. Cartographie web et tableau de bord interactif

Le tableau de bord interactif, ou Dashboard en anglais, est une interface logicielle ou web dit « côté client » ou « front-end ». Cela correspond à ce que l'utilisateur va voir et interagir pour accéder à l'information organisée par le développeur. Un tableau de bord analytique peut prendre diverses formes, et celui abordé dans ce mémoire cherche à combiner une représentation cartographique ainsi qu'une représentation graphique et temporelle des données. Différentes plateformes proposent des méthodes de construction de Dashboard : Tableau, FreeBoard, ArcGis DashBoard, MapBox, Google DashBoard ou encore DASH par exemple. Ces différents fournisseurs se différencient par le type de base de données ainsi que par leur accessibilité.

Les tableaux de bords analytiques sont une forme rapide et pratique pour transmettre une ou de multiples informations. Ceux-ci sont d'ailleurs de plus en plus utilisés et notamment grâce aux sciences citoyennes. Un bon exemple est le tableau de bord créé par l'université John Hopkins concernant la pandémie du covid-19 (<http://tinyurl.com/3devx92c>). De nombreux exemples peuvent être trouvés dans la galerie de ArcGis, les exemples suivants ont été créés par les membres de la communauté utilisant ArcGis Dashboard. Il est possible de retrouver un dashboard concernant le développement économique de l'Afrique de l'Ouest (<http://tinyurl.com/2ywb6d8s>), l'état de santé des océans (<http://tinyurl.com/y7wt53vt>) ou encore les feux actifs en direct et dans le monde (<http://tinyurl.com/upppbib6>). Il est important de noter que ces exemples utilisent une solution propriétaire et prête à l'emploi.

III. Matériel et Méthodes

III.1. Site d'étude

Le site d'étude de ce mémoire est la Ville de Sherbrooke, située dans la région de l'Estrie et dans la province du Québec. Sa superficie est de 366 km² et compte 175 000 habitants en 2023 selon la Ville de Sherbrooke, (<https://www.sherbrooke.ca/fr/vie-municipale/portrait/statistiques>).

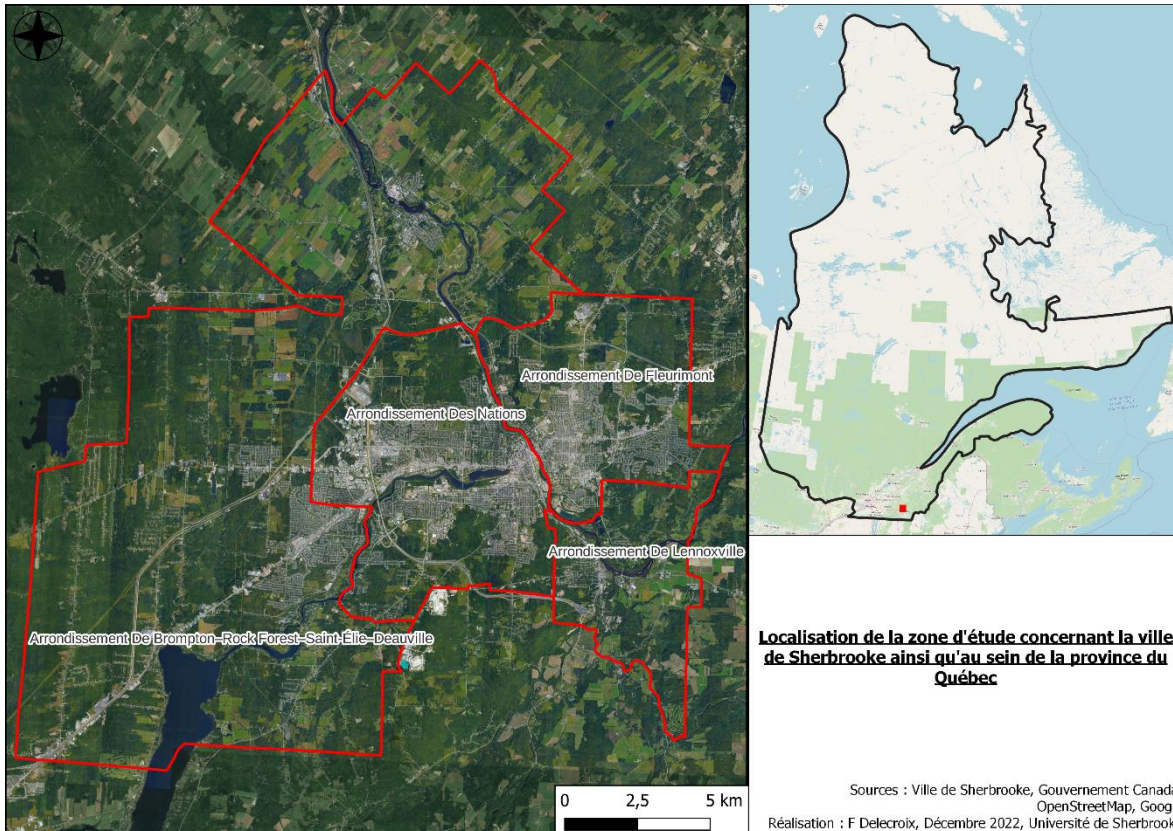


Figure 6 : Carte de localisation de la ville de Sherbrooke et de ses quartiers

III.2. Données

III.2.a. Origine des données

Les données proviennent de capteurs de la compagnie TERA. Deux types de capteurs sont utilisés. Premièrement les capteurs fixes qui sont situés au Carrefour de l'Estrie (45.40, -71.95), à l'Université de Sherbrooke (45.37, -71.93) et à l'Université Bishop à Lennoxville (45.36, -71.84). Les données ont été récoltées entre mars et novembre 2022. Le capteur du Carrefour de l'Estrie a été installé en juillet 2022.

Chaque capteur enregistre une donnée toutes les minutes.



Figure 7 : Photo de l'installation du capteur fixe au carrefour de l'Estrie en juillet 2022

Deuxièmement, des capteurs mobiles ont été installés sur des bus de la Société de transport de Sherbrooke, la STS. En raison de la taille des jeux de données, la semaine ayant enregistré la moyenne de température la plus élevée a été sélectionnée. Les données couvrent la période du 18 au 24 juillet 2022. Chaque capteur enregistre une donnée toutes les 10 secondes.

III.2.b. Description des données

Deux jeux de données ont été utilisés dans le cadre de ce mémoire : un pour les données provenant des capteurs fixes et un pour les données des capteurs mobiles.

Le jeu de données relatif aux capteurs fixes comporte 867 865 entrées entre mars et novembre 2022. Au total, 18 159 données ont été supprimées, car elles correspondaient à des valeurs « NA » ou considérées comme aberrantes. En effet, les données étaient anormalement hautes (supérieures à 200 ou 300 ppm) et ne correspondaient qu'à un seul capteur et à une plage horaire précise d'une journée. Par ailleurs, ces capteurs mesurent une donnée toutes les minutes.

Le format des données suit le modèle présenté au tableau n°1 :

Tableau 1: Format des données des capteurs fixes

Date (UTC)	Date (Canada)	Température	RH	Pressure	NO2	PM ₁	PM _{2,5}	PM ₁₀	Latitude	Longitude	Senser
Timestamp		Double ²									Integer
Information de date de la prise des mesures		Informations relevées par le capteur							Position du capteur		Identifiant du capteur

Le jeu de données des capteurs mobiles comporte 161 002 entrées entre le 18 et le 24 juillet 2022. Seulement une semaine a été valorisée étant donné la fréquence d'acquisition toutes les 10 secondes. Prendre une période temporelle plus importante aurait pu provoquer des problèmes liés à la taille du jeu de données. La semaine du 18 au 24 juillet a été sélectionnée, car elle correspond à la température moyenne la plus chaude de l'été 2022, avec une moyenne de température de 29.34°C.

Le format des données suit le modèle présenté au tableau n°2 :

Tableau 2: Format des données des capteurs mobiles

Date (UTC)	Date (Canada)	Température	RH	Pressure	NO2	PM ₁	PM _{2.5}	PM ₁₀	Latitude	Longitude	Senser
Timestamp		Double ²									Integer
Information de date de la prise des mesures		Informations relevées par le capteur							Position du capteur		Identifiant du capteur

III.3. Méthodologie

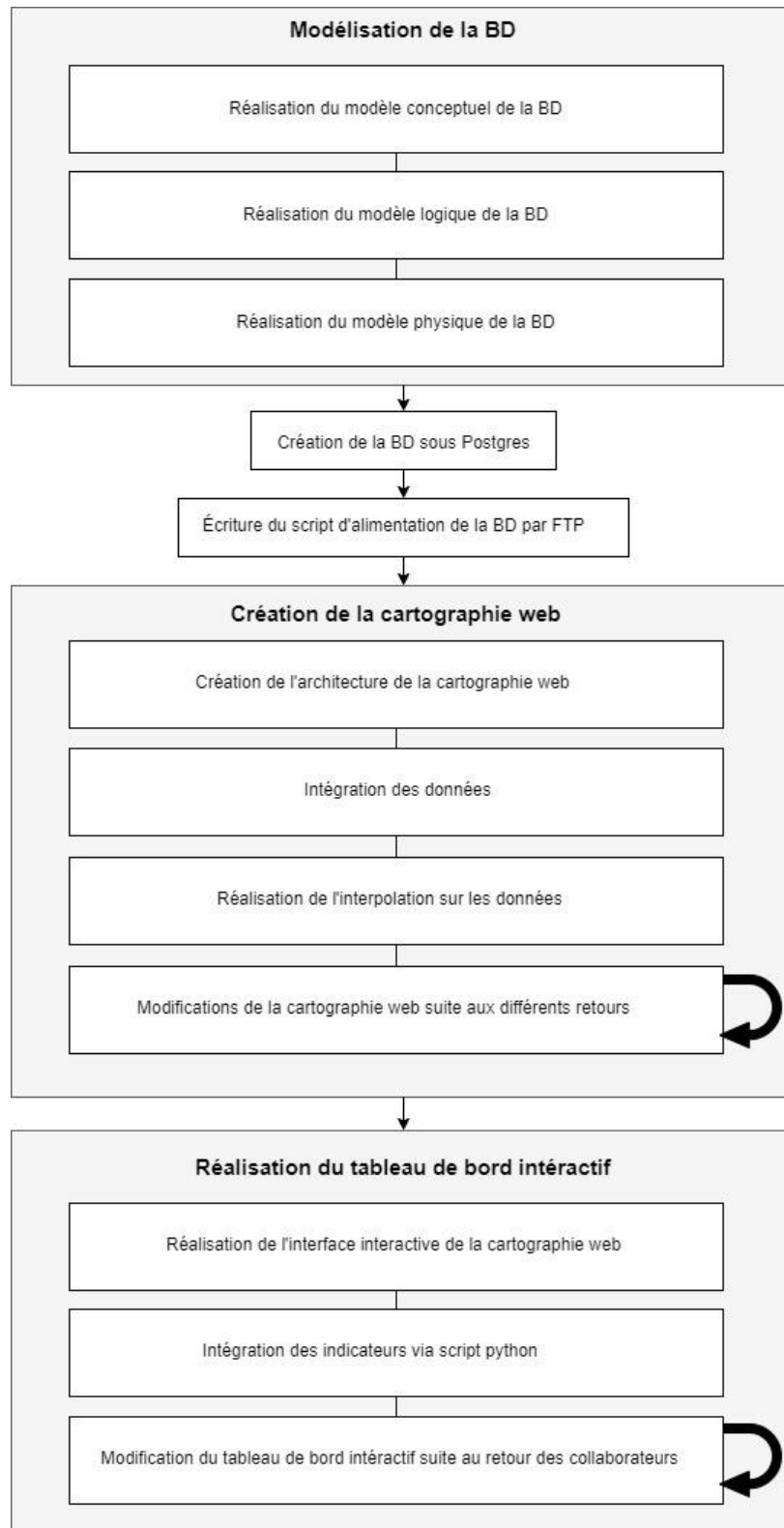


Figure 8 : Diagramme méthodologique

La réalisation de ce projet suit les différentes étapes de la méthodologie présentée à la figure n°8.

La collecte des données s'est effectuée par étapes à partir du site de notre partenaire, Tera. Concernant les données fixes, elles ont été extraites de la base de données d'Ecomesure (<https://i-comesure.com/fr/>) pour chaque mois et chaque capteur. Pour les données des capteurs mobiles, seule la semaine préalablement sélectionnée a été téléchargée pour les différents capteurs.

Une fois les jeux de données récupérés, ils ont été traités pour ne conserver que les informations pertinentes et souhaitées. Ces données ont également été normalisées. Après la création de ces jeux de données, la démarche suivante consistait à les importer sur le SGBD retenu, en l'occurrence PostgreSQL, choisi pour sa capacité à traiter un volume conséquent de données, et pour l'extension PostGIS dédiée aux données géolocalisées ainsi que la possibilité d'interroger les données directement depuis le logiciel pgAdmin4.

La suite du travail visait à rendre les informations accessibles via un navigateur web. Cet accès prend la forme d'un tableau de bord analytique facilitant la lecture et la compréhension rapide par l'utilisateur. Une volonté de rendre ce tableau de bord accessible au grand public doit être prise en compte. Diverses options ont été évaluées (voir tableaux n°3, 4 et 5) en fonction de différents critères, l'un des principaux étant que la plateforme ou la méthode de réalisation soit libre et ouverte (Open Source). Initialement, la bibliothèque DASH utilisant Python avait été privilégiée. Cependant, face à d'importantes contraintes rencontrées au début du développement du tableau de bord, la bibliothèque Gradio a été finalement retenue.

Le tableau de bord analytique doit inclure, au minimum, une cartographie représentant les niveaux de pollution atmosphérique sur Sherbrooke, ainsi que plusieurs indicateurs relatifs à cette pollution. L'ajout d'une barre interactive permettant de sélectionner une date est également pertinent. Cette cartographie doit représenter la pollution atmosphérique en se basant sur une interpolation des données des capteurs fixes et mobiles, permettant ainsi d'avoir une vision de la qualité de l'air sur l'ensemble de la ville, et pas uniquement aux emplacements des capteurs.

Tableau 3 : Caractéristiques des différentes bibliothèques cartographiques

Librairie	Langage	Type de licence	Type de données	Référence
Leaflet	JS	Open Source	SHP, WMS, WFS, GeoJSON, GPX, KML	https://leafletjs.com/
OpenLayer	JS	Open Source	WMS, WFS, GeoJSON, KML, GML	https://openlayers.org/
MapBox	JS	Propriétaire	SHP, WMS, GeoJSON, KML, CSV, GeoTIFF	https://www.mapbox.com/
ArcGIS	JS	Propriétaire	SHP, GeoJSON, GML, KML, GDB; GeoTIFF, WMS, WFS	https://www.arcgis.com/index.html
Google Maps	JS	Propriétaire	KML, GeoJSON	https://developers.google.com/maps/documentation/javascript/overview?hl=fr

Tableau 4 : Caractéristiques des différentes solutions cartographiques

Nom	Langage	Possibilité de développement	Type de données	Taille des données	API ou Infonuagique	Licence	Développeur
FreeBoard	HTML, JS et CSS	Importante	JSON	Pas de restrictions	Infonuagique	Propriétaire	Bug Labs
DASH	Python	Importante	GeoJSON	Pas de restrictions	API	Open source	Plotly
Mapstore	Prêt à l'emploi	Limité	Services Web (WFS, WMS...)	Pas de restrictions	Infonuagique	Open source	GeoSolutions
ArcGis Dashboard	Prêt à l'emploi	Limité	Service web, vecteurs et rasters	Pas de restrictions	Infonuagique	Propriétaire	ESRI
Looker Studio	Prêt à l'emploi, JavaScript	Limité	Multiples, lié aux outils Google	Pas de restrictions	Infonuagique	Propriétaire*	Google
Gradio	Python	Importante	Multiple	Pas de restrictions	Deux possibles	Open source	Gradio

Propriétaire* : Version gratuite disponible sous certaines conditions (voir les sites web des compagnies concernées)

Tableau 5: Aide à la décision de la solution choisie

Nom	Accès Serveur	Utilisation	Accès à la documentation	Open-Source	Facilité de codage	Possibilité de génération de modèle spatial
FreeBoard	+	-	+	-	-	-
DASH	-	+	++	+	+	+
Mapstore	-	-	+	-	NA	-
ArcGis Dashboard	+	+	+	-	NA	-
Looker Studio	+	+	+	-	NA	-
<u>Gradio</u>	<u>±</u>	<u>++</u>	<u>++</u>	<u>±</u>	<u>++</u>	<u>±</u>

Le choix de développement du tableau de bord analytique s’est porté sur l’utilisation de la bibliothèque Gradio après avoir testé la bibliothèque Dash. Dash s’est montré prometteur de par ses options et sa documentation disponible, mais des limitations d’options de création lors du développement du tableau de bord ainsi qu’une difficulté à combiner les différents packages sous le langage python, à provoquer un changement de la solution utilisée. Gradio offre une très bonne documentation ainsi qu’une facilité d’utilisation et de développement. De plus, il est possible de stocker le projet du tableau de bord sur une plateforme de partage (HugginFace) et également d’exécuter le code sur la plateforme Google Colab. Les deux options retenues et testées sont libres et ouvertes et permettent la génération de modèles spatiaux comme les interpolations spatiales.

IV. Résultats

IV.1. Modèles conceptuel et logique de la base de données



Figure 9: Modèles conceptuel logique des tables Capteur Fixe (a) et Capteur Mobile (b)

Les modèles conceptuel et logique permettent de définir le schéma de la base de données, ainsi que sa structure logique pour gérer les informations à conserver pour le projet. Les informations relatives aux dates permettent d'observer des tendances, la température, le RH et la pression sont des informations générales de l'atmosphère. Les mesures de NO₂, PM₁, PM_{2.5} et PM₁₀ sont les mesures récoltées par les capteurs. La latitude et la longitude localisent le capteur. En ce qui concerne l'identification des capteurs, la colonne « Senser » assure cette fonction pour les capteurs fixes et pour les capteurs mobiles.

IV.2. Modèle physique de la base de données

Capteur Fixe	
PK	id INTEGER NOT NULL
	geom GEOMETRY Date (UTC) TIMESTAMP WITHOUT TIMEZONE Date (Canada/Central) TIMESTAMP WITHOUT TIMEZONE Temperature FLOAT RH FLOAT Pressure FLOAT NO2 FLOAT PM1 FLOAT PM2.5 FLOAT PM10 FLOAT Longitude FLOAT Latitude FLOAT Senser INTEGER

```

-- Table: public.capteurs_fixe
-- DROP TABLE IF EXISTS public.capteurs_fixe;

CREATE TABLE IF NOT EXISTS public.capteurs_fixe
(
    id integer NOT NULL DEFAULT nextval('capteurs_fixe_id_seq'::regclass),
    geom geometry(Point,4326),
    "Date (UTC)" date,
    "Date (Canada/Central)" date,
    "Temperature" double precision,
    "RH" double precision,
    "Pressure" double precision,
    "NO2" double precision,
    "PM 1" double precision,
    "PM 2.5" double precision,
    "PM 10" double precision,
    "Longitude" double precision,
    "Latitude" double precision,
    "Senser" integer,
    CONSTRAINT capteurs_fixe_pkey PRIMARY KEY (id)
)
WITH (
    OIDS = FALSE
)
TABLESPACE pg_default;

ALTER TABLE IF EXISTS public.capteurs_fixe
OWNER to florian;

```

Figure 10: Modèle physique de la table Capteur fixe

Capteur Mobile	
PK	id INTEGER NOT NULL
	geom GEOMETRY
	Date (UTC) TIMESTAMP WITHOUT TIMEZONE
	Date (Canada/Central) TIMESTAMP WITHOUT TIMEZONE
	Temperature FLOAT
	RH FLOAT
	Pressure FLOAT
	NO2 FLOAT
	PM1 FLOAT
	PM2.5 FLOAT
	PM10 FLOAT
	Longitude FLOAT
	Latitude FLOAT
	Senser INTEGER

```
-- Table: public.capteurs_mobile
-- DROP TABLE IF EXISTS public.capteurs_mobile;
CREATE TABLE IF NOT EXISTS public.capteurs_mobile
(
    id integer NOT NULL DEFAULT nextval('"Capteurs_mobile_id_seq"'::regclass),
    geom geometry(Point,4326),
    "Date (UTC)" timestamp without time zone,
    "Date (Canada/Central)" timestamp without time zone,
    "Temperature" double precision,
    "RH" double precision,
    "Pressure" double precision,
    "NO2" double precision,
    "PM 1" double precision,
    "PM 2.5" double precision,
    "PM 10" double precision,
    "Longitude" double precision,
    "Latitude" double precision,
    "Senser" integer,
    CONSTRAINT "Capteurs_mobile_pkey" PRIMARY KEY (id)
)
WITH (
    OIDS = FALSE
)
TABLESPACE pg_default;
ALTER TABLE IF EXISTS public.capteurs_mobile
OWNER to florian;
```

Figure 11: Modèle physique de la table Capteur Mobile

Les modèles physiques permettent de définir le type des données de chaque colonne de la base de données. Le format est important car le langage python peut effectuer des opérations spécifiques en fonction du type de données. Les formats de type « timestamp » et « date » permettent de d'ordonner temporellement les données avec plus ou moins de précision. Les formats numériques comme « integer » ou « double precision » représentent des données de type numérique, entier ou décimaux. Enfin, les données de type « geometry » informent sur la position géographique de l'élément.

IV.3. Cartographie web

Le tableau de bord analytique utilise la bibliothèque OpenLayers pour construire une cartographie dynamique sur une page web. OpenLayers est un logiciel libre et ouvert qui permet d'afficher à la fois des données vectorielles et matricielles. Parmi les avantages d'OpenLayers, on peut citer :

- 1) Flexibilité : OpenLayers supporte une grande variété de sources de données, ce qui le rend adapté à de nombreux cas d'utilisation.
- 2) Interactivité : grâce à sa capacité à intégrer divers contrôles tels que la navigation à la souris, le zoom et les pop-ups, OpenLayers offre une expérience utilisateur riche.
- 3) Personnalisable : le logiciel peut être facilement personnalisé pour répondre aux besoins spécifiques de chaque projet.
- 4) Interopérabilité : OpenLayers peut fonctionner avec d'autres bibliothèques et standards du web, permettant ainsi une intégration transparente.
- 5) Évolutif et pérennité : étant libre et ouvert, OpenLayers bénéficie d'une communauté active qui travaille continuellement à son amélioration et à l'ajout de nouvelles fonctionnalités.
- 6) Performance : la bibliothèque est optimisée pour afficher rapidement des données complexes sur des cartes, offrant ainsi une expérience fluide aux utilisateurs.

IV.4. Requête et interpolation spatiale

La récupération des données s'effectue directement dans le code sur la plateforme Google Collab. La première étape est de faire la connexion à la base de données PostgreSQL. La bibliothèque sqlalchemy est utilisée afin de pouvoir créer la connexion vers la base de données.

```
# Postgres username, password, and database name
POSTGRES_ADDRESS = 'igeomedia.com' ## INSERT YOUR DB ADDRESS IF IT'S NOT ON PANOPLY
POSTGRES_PORT = '5432'
POSTGRES_USERNAME = 'florian' ## CHANGE THIS TO YOUR PANOPLY/POSTGRES USERNAME
POSTGRES_PASSWORD = 'florian$2022' ## CHANGE THIS TO YOUR PANOPLY/POSTGRES PASSWORD
POSTGRES_DBNAME = 'florian' ## CHANGE THIS TO YOUR DATABASE NAME
# A long string that contains the necessary Postgres login information
postgres_str = ('postgresql://{username}:{password}@{ipaddress}:{port}/{dbname}'
                .format(username=POSTGRES_USERNAME,
                        password=POSTGRES_PASSWORD,
                        ipaddress=POSTGRES_ADDRESS,
                        port=POSTGRES_PORT,
                        dbname=POSTGRES_DBNAME))
# Create the connection
connection = create_engine(postgres_str)
```

Figure 12 : Code d'appel à la base de données SQL

Une fois la connexion effectuée, les jeux de données sont appelés et stockés dans des variables, à partir de la bibliothèque Pandas.

```
query = "SELECT * FROM public.capteurs_fixe;"
cf = pd.read_sql_query(con=connection.connect(),
                      sql=sql_text(query))

query2 = "SELECT * FROM public.capteurs_mobile;"
cm = pd.read_sql_query(con=connection.connect(),
                      sql=sql_text(query2))
cm = cm.sort_values('Date (UTC)', ascending=True)
```

Figure 13 : Création des jeux de données via le package Pandas

Afin de créer des graphiques, la bibliothèque numpy est utilisée. Le code de la figure n°14 permet d'afficher un graphique pour chaque type d'information de pollution atmosphérique (contenu dans la base de données) soit les PM_{2.5}, PM₁, PM₁₀ et NO₂. De plus, une condition est utilisée afin de restreindre la période temporelle des graphiques lors de l'utilisation du tableau de bord.

```
import numpy as np
from PIL import Image
import io

def plot_timeseries_dateUTC(df, value_colname, start_date=None, end_date=None, figsize=(10, 1.3), mpl_palette_name='Dark2'):
    from matplotlib import pyplot as plt
    import seaborn as sns
    palette = list(sns.palettes.mpl_palette(mpl_palette_name))
    if start_date and end_date:
        df = df[(df['Date (UTC)'] > start_date) & (df['Date (UTC)'] < end_date)]
    elif start_date:
        df = df[(df['Date (UTC)'] > start_date)]
    elif end_date:
        df = df[(df['Date (UTC)'] < end_date)]

    fig, ax = plt.subplots(figsize=figsize, layout='constrained')
    xs = df['Date (UTC)']
    ys = df[value_colname]
    plt.plot(xs, ys, color=palette[0])
    sns.despine(fig=fig, ax=ax)
    plt.xlabel('Date (UTC)')
    plt.ylabel(value_colname)
    #img_buf = io.BytesIO()
    #plt.savefig(img_buf, format='png')
    #return Image.open(img_buf)
    return plt

plot_timeseries_dateUTC(cm, 'Temperature', start_date = "2022-07-21")
```

Figure 14 : Création des graphiques représentant les données sur le dashboard

IV.5. Tableau de bord interactif

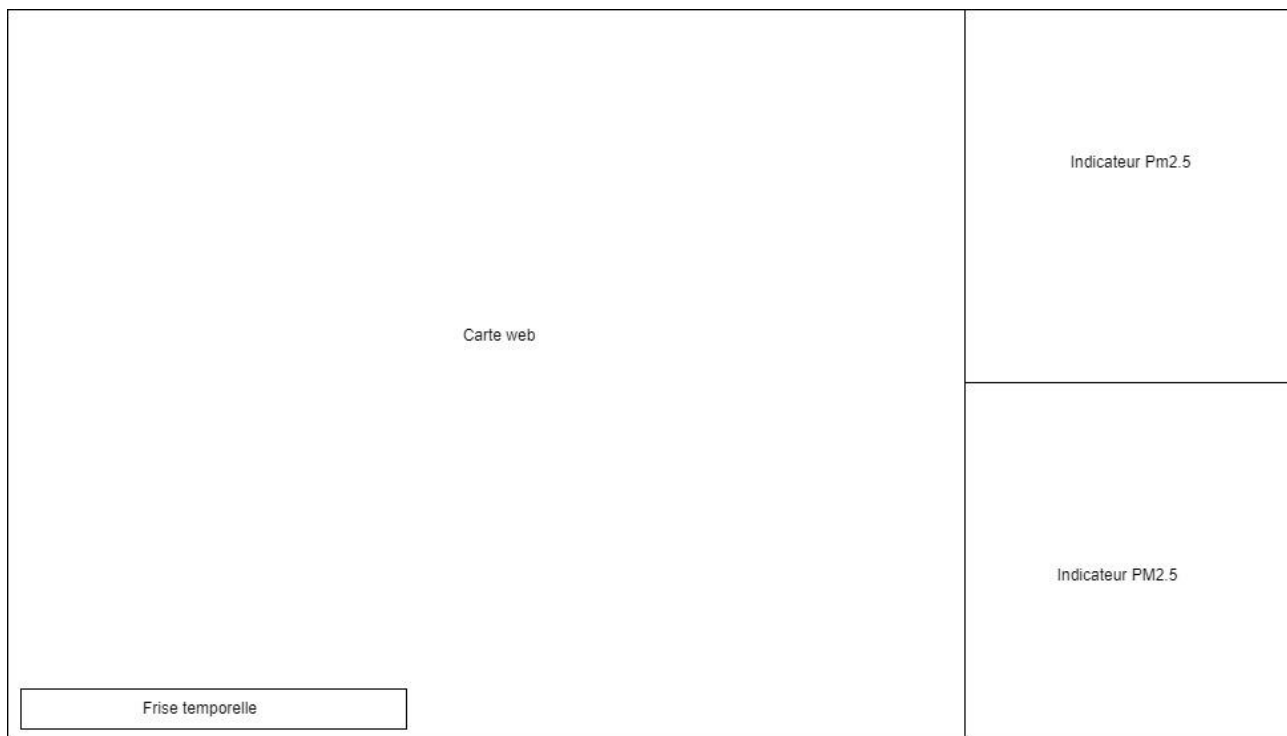


Figure 15: Premier schéma de réalisation du dashboard

L'idée initiale lors de la création du premier patron (figure n°15) était de mettre en avant la cartographie de Sherbrooke avec l'interpolation spatiale des $PM_{2.5}$ afin de fournir une information claire et rapide à l'utilisateur. Deux indicateurs de pollution relatifs aux $PM_{2.5}$ semblaient être pertinents pour enrichir l'information offerte à l'utilisateur. C'est crucial afin de s'assurer que l'information soit bien interprétée, quelle que soit l'expertise de l'utilisateur.

L'utilisation de Gradio pour la réalisation du tableau de bord a influencé sa conception. En effet, certaines fonctionnalités ont ouvert des perspectives nouvelles, tandis que d'autres ont restreint notre capacité à réaliser certaines idées initiales lors de la programmation du tableau de bord analytique.

Le tableau de bord final permet de discriminer les valeurs des différents indices de pollution atmosphérique ainsi que la période temporelle. La carte affiche les mesures par des points représentant les capteurs localisés sur les bus de la Société de Transport de Sherbrooke. Il est aussi possible de sélectionner quelle donnée de pollution atmosphérique à afficher sur le tableau de bord analytique (figure n°16). Une version agrandie du tableau de bord est disponible en Annexe n°1.

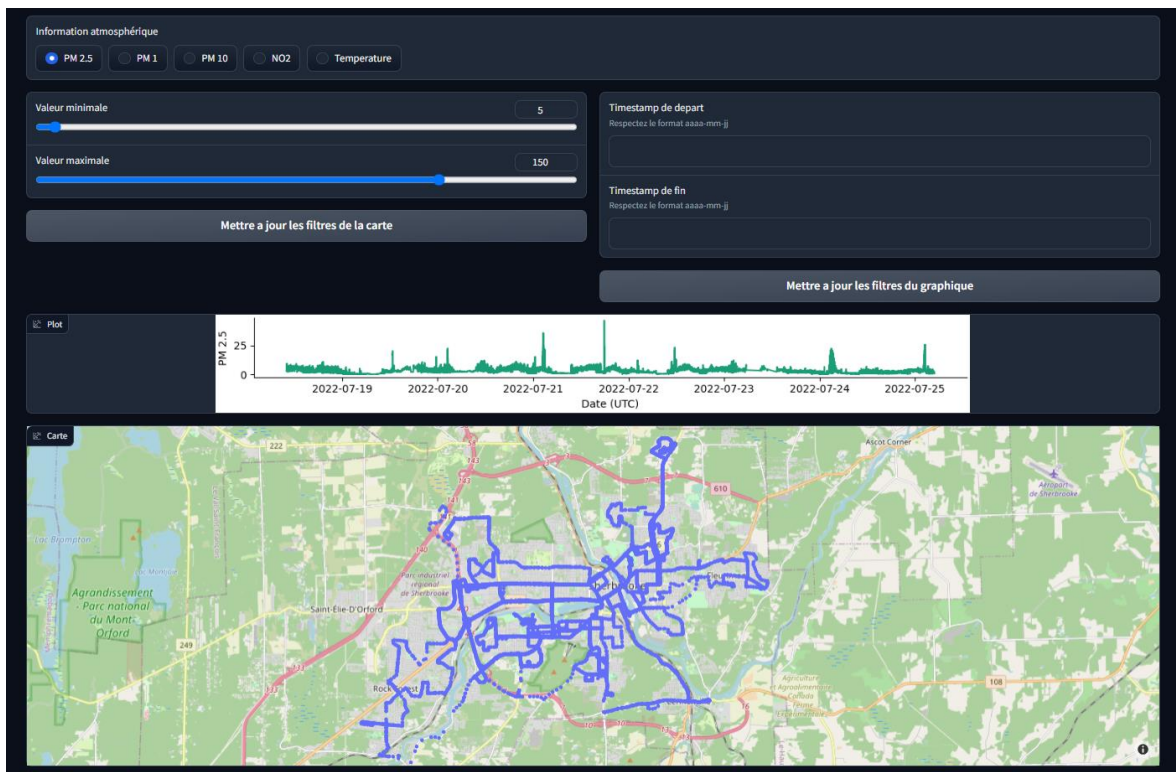


Figure 16: Tableau de bord analytique, version finale

V. Interprétation et discussion des résultats

Le développement du tableau de bord analytique s'est révélé plus ardu que prévu. En effet, la volonté d'avoir une solution libre et ouverte a été une contrainte en termes de temps et de volume de travail. En effet, il a fallu explorer et tester différentes solutions pour déterminer laquelle répondait le mieux à nos besoins et attentes. Un prototype a été élaboré avec DASH de Plotly. Cependant, la mise en œuvre en utilisant le code Python s'est avérée plus compliquée que prévu, au regard de mes compétences. De surcroît, le rendu obtenu avant de changer de librairie ne répondait pas à nos aspirations, notamment en matière d'interface et d'expérience utilisateur.

Le passage à Gradio, toujours une solution libre et ouverte, a été plutôt facile et la documentation de base pour la création d'un tableau de bord analytique est claire et accessible. De plus, utiliser Gradio conjointement avec Google Colab s'est révélé fort agréable et efficace. Un lien temporaire se génère aisément pour visualiser le rendu et, une fois le tableau de bord achevé, celui-ci est hébergé sur une plateforme de stockage appelée HuggingFace, rendant l'interface accessible à quiconque détient le lien.

Le tableau de bord contient différentes options de sélection pour les utilisateurs, notamment le choix des données de pollution à afficher en fonction de celles disponibles dans la base de données. Celle-ci intègre les valeurs relatives aux particules fines (PM_{10} , $PM_{2.5}$ et $PM_{1.0}$), les oxydes d'azote (NO_2) ainsi que la température. De plus, l'utilisateur peut choisir les valeurs minimales et maximales des données à afficher sur la carte et si besoin, les dates de début et de fin des relevées. La carte, ainsi que l'histogramme des données, s'actualise dès que l'utilisateur valide ses choix.

Quant aux données, elles proviennent d'une plateforme propriétaire de l'entreprise TERA, qui fournit les capteurs. Après acquisition, une étape de nettoyage et de normalisation des données s'est avérée essentielle. Certaines informations, sans pertinence pour notre projet, auraient alourdi inutilement la base de données. Nous avons également intégré un identifiant pour chaque capteur afin de pouvoir les distinguer individuellement dans les données, et potentiellement plus tard, sur le tableau de bord.

Les usages potentiels de ce tableau de bord par des institutions gouvernementales, des centres de recherche ou le grand public sont vastes et significatifs, en particulier compte tenu de l'importance croissante accordée à cette question environnementale. Les incendies de forêt survenus au Canada à l'été 2023 ont accentué la sensibilité du public aux particules fines et à leurs impacts sur la santé. Les attentes en matière de gestion et de réduction de ces particules ont considérablement augmenté.

La cartographie web interactive est l'un des outils les plus pertinents pour informer la population en cas de risque. Grâce à des codes couleurs intuitifs et une légende limpide, elle offre une compréhension rapide et simple des enjeux.

VI. Conclusion

La réalisation de cet essai a permis d'utiliser de nouveaux outils disponibles pour la création de tableaux de bord analytiques. En effet, le développement de l'importance des solutions libres et ouvertes dans les dernières années a provoqué l'apparition de nouvelles solutions. La bibliothèque Dash s'est montrée très intéressante, mais également très complexe dans son utilisation, ce qui a été un frein durant cet essai. À l'inverse, la bibliothèque Gradio a permis de créer une solution reflétant nos objectifs grâce à une documentation facilement accessible et claire.

De plus, durant le processus de développement, il a été très intéressant de se mettre à la place de l'utilisateur final afin d'adapter le fonctionnement de tableau de bord. En effet, il est essentiel que ce dernier soit intuitif et que l'information affichée soit aisément compréhensible, quelles que soient les connaissances de l'utilisateur. Nous avons procédé à plusieurs itérations de développement pour affiner certaines fonctionnalités et les rendre plus pertinentes et claires pour l'utilisateur.

Enfin, le tableau de bord proposé valorise des données provenant de capteurs terrestres situés à différents points statiques de la Ville de Sherbrooke ainsi que sur les bus de la STS. Ces capteurs miniatures sont de nouveaux outils de collectes de données et ce travail permet de mettre en valeur les capacités et possibilités de cette nouvelle technologie.

VII. Recommandations

Ce travail constitue une première version et offre de nombreuses pistes d'amélioration. Il serait pertinent d'ajouter une légende et une colorimétrie adaptative en fonction des données représentées sur la carte. L'incorporation d'indices liés à la pollution atmosphérique, en lien avec les données mises en avant dans cette étude, enrichirait également la compréhension des utilisateurs sur les enjeux de la pollution de l'air.

De surcroît, cette étude se focalise uniquement sur les données des capteurs mobiles. Il serait judicieux d'intégrer également les données des capteurs fixes pour accroître la précision des informations dévoilées.

Notons également que le tableau de bord s'appuie sur des données de 2022. L'intégration de données couvrant plusieurs années, voire en temps réel, constituerait une avancée significative.

Enfin, une perspective d'étude complémentaire consisterait à explorer comment valoriser davantage les données relatives aux autres éléments. Ce travail s'est principalement centré sur les particules fines, rendant le tableau de bord moins adapté à la représentation des autres composés.

VIII. Références

- Brusseau, M. L., Matthias, A. D., Comrie, A. C. et Musil, S. A. (2019) Chapter 17 - Atmospheric Pollution. *In* Mark L. Brusseau, I. L. Pepper, et C. P. Gerba (dir.), Environmental and Pollution Science (Third Edition) (p. 293-309). Academic Press.
- Canada, S. (2012) Document de conseils sur les particules fines (PM_{2,5}) dans l'air intérieur résidentiel. recherche;lignes directrices.
- Canada, S. (2021) Infographie : Que sont les particules fines (PM_{2,5})? documents promotionnels.
- Dockery, D., Pope, C., Xu, X., Spengler, J., Ware, J., Fay, M., Ferris, B. et Speizer, F. (1994) An Association Between Air Pollution and Mortality in Six U.S. Cities. *The New England journal of medicine*, vol. 329, p. 1753-9.
- Eilstein, D. (2010) Exposition prolongée à la pollution atmosphérique et mortalité par pathologies respiratoires. *Revue Française d'Allergologie*, vol. 50, n°2, p. 51-61.
- Environnement et Changement climatique Canada, (2021). Inventaire des émissions de polluants atmosphériques [consulté le 08/03/2023] (<https://open.canada.ca/data/fr/dataset/fa1c88a8-bf78-4fcb-9c1e-2a5534b92131>)
- Fann, N. et Risley, D. (2013) The public health context for PM_{2.5} and ozone air quality trends. *Air Quality, Atmosphere & Health*, vol. 6, n°1, p. 1-11.
- Jaramillo, A (2021). Concepts de Programmation. Département de Géomatique Appliquée – Université de Sherbrooke. [Cours]
- Ji, X., Yao, Y. et Long, X. (2018) What causes PM_{2.5} pollution? Cross-economy empirical analysis from socioeconomic perspective. *Energy Policy*, vol. 119, p. 458-472.

- Lippmann, M. (2014) Toxicological and epidemiological studies of cardiovascular effects of ambient air fine particulate matter (PM_{2.5}) and its chemical components: Coherence and public health implications. *Critical Reviews in Toxicology*, vol. 44, n°4, p. 299-347.
- Mendy, A., Wu, X., Keller, J. L., Fassler, C. S., Apewokin, S., Mersha, T. B., Xie, C. et Pinney, S. M. (2021) Long-term exposure to fine particulate matter and hospitalization in COVID-19 patients. *Respiratory Medicine*, vol. 178, p. 106313.
- Milà, C., Salmon, M., Sanchez, M., Ambrós, A., Bhogadi, S., Sreekanth, V., Nieuwenhuijsen, M., Kinra, S., Marshall, J. D. et Tonne, C. (2018) When, Where, and What? Characterizing Personal PM_{2.5} Exposure in Periurban India by Integrating GPS, Wearable Camera, and Ambient and Personal Monitoring Data. *Environmental Science & Technology*, vol. 52, n°22, p. 13481-13490.
- Ogen, Y. (2020) Assessing nitrogen dioxide (NO₂) levels as a contributing factor to coronavirus (COVID-19) fatality. *Science of The Total Environment*, vol. 726, p. 138605.
- Van, D. A., Martin, R. V., Brauer, M., Kahn, R., Levy, R., Verduzco, C. et Villeneuve, P. J. (2010) Global Estimates of Ambient Fine Particulate Matter Concentrations from Satellite-Based Aerosol Optical Depth: Development and Application. *Environmental Health Perspectives*, vol. 118, n°6, p. 847-855.
- Ville de Sherbrooke. (2023). Statistique – Renseignements généraux [consulté le 09/03/2023] (<https://www.sherbrooke.ca/fr/vie-municipale/portrait/statistiques>)
- Wanner, H. U. (1993) Effects of atmospheric pollution on human health. *Experientia*, vol. 49, n°9, p. 754-758.
- Zheng, S., Pozzer, A., Cao, C. X. et Lelieveld, J. (2015) Long-term (2001–2012) concentrations of fine particulate matter (PM_{2.5}) and the impact on human health in Beijing, China. *Atmospheric Chemistry and Physics*, vol. 15, n°10, p. 5715-5725.

Annexe 1: Version finale du tableau de bord analytique

