

# Cybergeo : European Journal of Geography

GeOpenMod - Modèles et logiciels

2019

903

---

## Un atlas-web pour comparer l'exposition individuelle aux pollutions atmosphérique et sonore selon le mode de transport

PHILIPPE APPARICIO, JÉRÉMY GELB ET MARIE-ÈVE MATHIEU

---

### Résumés

Français English

Les bénéfices individuels et collectifs de l'utilisation du vélo en milieu urbain sont aujourd'hui bien connus. Individuellement, elle contribue à une meilleure santé physique et mentale ; collectivement, elle réduit les coûts de santé, la congestion routière, les pollutions atmosphérique et sonore.

Plusieurs études ont comparé récemment les niveaux d'exposition aux polluants atmosphériques et au bruit selon le mode de transport (automobile, vélo et transport en commun) dans plusieurs villes à travers le monde. À notre connaissance, les résultats de ces études n'ont jamais été diffusés sous forme d'application cartographique sur Internet. Cela favoriserait pourtant le transfert de connaissances tant auprès des planificateurs urbains que du grand public.

Par conséquent, l'objectif de cet article est de proposer une méthodologie basée sur des logiciels et librairies gratuits pour déployer un atlas interactif sur Internet sur *la comparaison de l'exposition individuelle aux pollutions atmosphérique et sonore à Montréal selon le mode de transport utilisé*.

Pour ce faire, la structuration des données primaires ainsi que l'architecture et les fonctionnalités de l'atlas sont largement discutées.

The individual and collective benefits of bicycling in urban environments are well known nowadays. On the individual level, cycling helps to improve people's physical and mental health, and, collectively, it reduces healthcare costs, traffic congestion, as well as air and noise pollution.

Several studies have recently compared the levels of exposure to air pollutants and noise according to the mode of transportation used (car, bicycle, or public transit) in a number of cities around the world. As far as we know, the results of these studies have never been disseminated in the form of a web-mapping application. This would however be a good way to encourage the transfer of knowledge to urban planners and the general public.

The aim of this article is therefore to suggest a methodology based on free software and libraries for deploying an interactive web atlas comparing individual exposure to air and noise pollutants in Montreal according to the mode of transportation used. To this end, the structuring of the primary data, the architecture, and the functionalities of the atlas are all extensively discussed.

---

## Entrées d'index

**Mots-clés** : atlas, cartographie, pollution atmosphérique, bruit, exposition, transport, Montréal

**Keywords** : atlas, cartography, air pollution, noise, exposition, transport, Montréal

---

## Texte intégral

Les auteurs tiennent à remercier les évaluateurs anonymes pour les commentaires et suggestions qui ont permis d'améliorer cet article. Cette étude a bénéficié du soutien financier de la Chaire de recherche du Canada en équité environnementale et la Ville (950-230813).

## Introduction

- 1 L'utilisation du vélo en heures de pointe comme moyen de transport pour se rendre au travail est de plus en plus fréquente dans les villes nord-américaines (Pucher *et al.*, 2011), qui accusent toutefois un retard important comparativement à leurs consœurs européennes (surtout néerlandaises). De plus, les planificateurs urbains considèrent aujourd'hui le vélo comme un moyen de transport actif permettant de réduire les gaz à effet de serre, la congestion routière et le bruit (Apparicio *et al.*, 2018 ; Macmillan *et al.*, 2014). Cela s'exprime d'ailleurs par la volonté d'étendre les réseaux cyclables à l'intérieur des villes, de même que par la mise en place de systèmes de partage de vélos (Houde *et al.*, 2018).
- 2 Les bénéfices individuels et collectifs de la pratique du vélo en ville sont aujourd'hui bien connus et largement documentés (Bigazzi *et al.*, 2014 ; Fishman *et al.*, 2015 ; Rojas-Rueda *et al.*, 2011). Individuellement, elle permet d'augmenter le niveau d'activité physique et d'améliorer ainsi la santé cardiovasculaire tout en réduisant les risques de maladies chroniques et de certains types de cancer, le surpoids et l'obésité (Bassett *et al.*, 2008 ; Oja *et al.*, 1998 ; Woodcock *et al.*, 2009). Collectivement, cela se traduit par une réduction des coûts de santé, mais aussi de la congestion routière, des pollutions atmosphérique et sonore (Hatzopoulou *et al.*, 2013 ; Rojas-Rueda *et al.*, 2011).
- 3 Malgré ces retombées positives, rouler à vélo en ville est également associé à des risques pour la santé dus à des niveaux d'exposition potentiellement élevés à la pollution atmosphérique, au bruit et au trafic routier. Dans une récente revue systématique, Cepeda *et al.* (2017) concluent que les automobilistes et les usagers des transports publics ont des niveaux d'exposition plus élevés que les cyclistes et les piétons. Toutefois, en raison de leurs niveaux de ventilation plus élevés, les cyclistes inhalent davantage de polluants atmosphériques que les automobilistes. Malgré tout, des travaux récents ont montré que les bénéfices de l'utilisation du vélo en ville surclassent largement les risques (De Hartog *et al.*, 2010 ; Rojas-Rueda *et al.*, 2011). Selon Tainio *et al.* (2016), les risques associés à l'inhalation de polluants atmosphériques dépasseraient les bénéfices liés à la pratique du vélo dans uniquement un pour cent des villes à travers le monde, présentant des niveaux extrêmes de concentration de polluants atmosphériques.
- 4 Les déplacements domicile-travail en heures de pointe constituent un microenvironnement fort intéressant à analyser en matière d'exposition aux polluants atmosphériques et au bruit routier compte tenu des niveaux élevés, communément appelés des pics de pollution, mesurés lors de ces périodes de la journée (Laumbach *et al.*,

2015). Dans une étude récemment publiée, Apparicio *et al.* (2018) ont comparé les temps de déplacement, les niveaux d'exposition au bruit et à la pollution atmosphérique et les niveaux d'inhalation de polluants à Montréal selon trois modes de transport : automobile, vélo et transport en commun. Cette étude a permis de mettre en lumière cinq principaux résultats. Premièrement, pour des trajets réalisés en heures de pointe de dix kilomètres en moyenne, il n'y a pas de différences significatives en termes de temps de déplacement entre les trois modes. Deuxièmement, les niveaux d'exposition au bruit sont significativement plus élevés pour les usagers du transport en commun, suivis par les cyclistes que pour les automobilistes (respectivement 73,95, 68,77 et 73,95 dB(A)). Troisièmement, l'exposition des cyclistes au dioxyde d'azote (NO<sub>2</sub>) n'est pas significativement plus élevée que celles des automobilistes. Quatrièmement, bien que leurs niveaux d'exposition soient comparables, les cyclistes inhalent 3,7 fois plus de NO<sub>2</sub> que les automobilistes, ce qui s'explique par des niveaux d'activité physique et donc de ventilation bien plus élevés. Cinquièmement, la dépense calorique – et les bénéfices pour la santé en découlant – est sans surprise bien plus élevée pour les cyclistes et les usagers du transport en commun que pour les automobilistes (respectivement 3,72 et 1,78 fois).

5 En résumé, les résultats de cette étude confirment que le vélo est une alternative très efficace à l'automobile, mais aussi au transport en commun pour des déplacements domicile-travail en heures de pointe. Comment s'assurer alors que ces résultats puissent avoir des retombées tant auprès des planificateurs urbains, des acteurs en santé publique, que du grand public, et ce, afin d'augmenter significativement l'utilisation du vélo lors des déplacements domicile-travail, comme dans plusieurs villes européennes ? Autrement dit, comment faciliter le transfert de connaissances découlant de cette étude vers l'ensemble des acteurs concernés et le grand public ? Pour ce faire, nous proposons une approche méthodologique afin de déployer un atlas interactif sur Internet intitulé « *comparaison de l'exposition individuelle aux pollutions atmosphérique et sonore à Montréal selon le mode de transport utilisé* » (<http://atlaspollutionmtl.ucs.inrs.ca/>).

6 Il est à noter que de nombreuses études ont comparé les niveaux d'exposition aux polluants atmosphériques selon différents modes de transport, et ce, dans différentes villes du monde : entre autres Sydney (Chertok *et al.*, 2004), Barcelone (De Nazelle *et al.*, 2012), New Delhi (Goël *et al.*, 2015), Athènes (Duci *et al.*, 2003), Stockholm (Lewne *et al.*, 2006), Shanghai (Liu *et al.*, 2015), Londres (Kaur *et al.*, 2005), Beijing (Huang *et al.*, 2012 ; Yan *et al.*, 2015), Foshan (Chine) (Wu *et al.*, 2013), Dublin (Nyhan *et al.*, 2014), Arnhem (Pays-Bas) (Zuurbier *et al.*, 2010) et Santiago (Chili) (Suárez *et al.*, 2014). Rares sont celles qui comparent simultanément les expositions à la pollution de l'air et au bruit selon le mode de transport (Boogaard *et al.*, 2009). Toutefois, à notre connaissance, les résultats de ces études – qu'elles se focalisent uniquement sur la pollution de l'air ou qu'elles incluent aussi le bruit – n'ont jamais été présentés sous forme d'atlas. Dans un premier temps, nous discuterons comment sont collectées et structurées les données primaires relatives à l'exposition à la pollution et au bruit selon les trois modes de transport (automobile, vélo et transport en commun). Dans un second temps, le déploiement de l'atlas – notamment l'architecture et les fonctions de cartographie interactive implémentées – sera décrit en détail. Finalement, dans une troisième section, deux exemples de cartes seront analysés afin de démontrer la pertinence d'utiliser l'application tant pour les citoyens que pour les planificateurs montréalais.

## Collecter et structurer des données primaires sur l'exposition à la pollution et au bruit

## Design de l'étude et instruments de collecte

- 7 La collecte de données a eu lieu en juin 2016, impliquant huit étudiants en maîtrise en études urbaines et un professeur responsable du projet. Trois équipes de trois personnes chacune ont été formées : la première voyageait à vélo, la seconde en transport en commun et la troisième en automobile (fenêtre baissée).
- 8 Les trajets ont été effectués durant les heures de pointe du matin et du soir, soit à partir d'un quartier périphérique de Montréal vers le centre-ville à 8 h et dans l'autre sens à 17 h. Plus précisément, les origines des trajets correspondent à l'intersection de deux rues résidentielles dans neuf arrondissements périphériques de Montréal (Ahuntsic-Cartierville, Le Sud-Ouest, Mercier-Hochelaga-Maisonneuve, Montréal-Nord, Rosemont-La Petite-Patrie, Verdun, Saint-Laurent, Saint-Léonard et Villeray-Saint-Michel-Parc-Extension). Les destinations sélectionnées au centre-ville sont soit des pôles d'enseignement supérieur (universités Concordia, INRS Urbanisation Culture Société, McGill et UQAM), soit des pôles d'emploi importants comme la Tour de la Bourse et le Complexe Guy-Favreau.
- 9 Les membres – automobiliste, cycliste et usager du transport commun – de chacune des trois équipes démarraient leur trajet en même temps (à la seconde près). Dix-huit trajets aller-retour d'environ dix kilomètres ont été préalablement définis à l'aide de Google Maps. Les participants disposaient d'un trajet Google Maps envoyé sur leur téléphone portable afin qu'ils réalisent le trajet le plus rapide en fonction de leur mode de transport. Au total, ce sont donc 108 trajets qui ont été effectués (18 x 2 allers-retours x 3 modes de transport).
- 10 La collecte est basée sur quatre instruments (figure 1). Deux d'entre eux sont attachés à un harnais porté par chaque participant : un appareil Aeroqual Series 500 avec un capteur de dioxyde d'azote et un capteur de température et d'humidité, un exposimètre acoustique Brüel & Kjær (type 4448). Chaque minute, ces deux appareils renvoient une mesure de pollution atmosphérique – étant ici le dioxyde d'azote ( $\text{NO}_2$ ) en  $\mu\text{g}/\text{m}^3$  – et le niveau moyen de bruit mesuré en décibels (dB(A)). Soulignons qu'au Québec, le transport routier est reconnu comme étant la principale source d'émission de plusieurs polluants atmosphériques, surtout les oxydes d'azote ( $\text{NO}_2$  et  $\text{NO}_x$ , 85 %) et le monoxyde de carbone ( $\text{CO}$ , 76 %) ; et comme la source secondaire d'autres polluants comme les matières particulaires ( $\text{PM}_{2,5}$  et  $\text{PM}_{10}$ , 17 %) (Gouvernement du Québec, 2018). Ce qui explique que nous ayons retenu un capteur de  $\text{NO}_2$ .
- 11 Une montre Garmin Forerunner 920 XT (figure 1.d) est utilisée afin d'obtenir la localisation géographique et la fréquence cardiaque du participant à chaque seconde. Finalement, uniquement pour ceux se déplaçant à vélo, une caméra d'action est positionnée sur le guidon du vélo tel qu'illustré à la figure 1.c. Cette caméra permet l'obtention d'une vidéo et d'une seconde trace GPS qui peuvent être utilisées pour améliorer la spatialisation des données (voir section suivante). Quelques heures avant le début des trajets, les horloges de ces quatre appareils sont synchronisées.

Figure 1 : Quatre outils de collecte



**Légende :** **a)** appareil Aeroqual (Series 500) avec un capteur de dioxyde d'azote et un capteur de température et d'humidité ; **b)** exposimètre acoustique Brüel & Kjær (type 4448) ; **c)** caméra d'action Garmin Virb XE ; **d)** montre multisport GPS Garmin Forerunner 920 XT.

- 12 Évaluer la dose de polluant atmosphérique inhalée chaque minute par les participants nécessite d'obtenir une mesure de la ventilation (nombre de litres d'air aspirés chaque minute). Pour ce faire, chaque participant a réalisé un test d'effort progressif et maximal au Laboratoire Activité Physique et Santé (LAPS) de l'Université de Montréal (une description détaillée du test est disponible dans Apparicio *et al.*, 2018). Les six participants se déplaçant en automobile ou en transport en commun ont fait le test sur un tapis roulant (Quinton Q65 Series 90 *treadmill*) ; ceux à bicyclette sur un vélo stationnaire (Corival bicycle ergometer). Durant le test physique, la fréquence cardiaque (nombre de battements cardiaques par minute) du participant est mesurée à partir de la montre Garmin Forerunner 920 XT. De plus, plusieurs paramètres métaboliques (débit respiratoire, ventilation minute, consommation d'oxygène et l'équivalent métabolique d'activité<sup>1</sup>) sont mesurés par calorimétrie indirecte à partir d'un appareil MOXUS (Model S-3A) (figure 2).

**Figure 2 : Test d'effort physique maximal sur vélo stationnaire**



Crédit photo : Laboratoire Activité Physique et Santé (LAPS)

- 13 Par la suite, pour chaque participant, des équations polynomiales sont construites entre la ventilation et le METs (variables dépendantes mesurées par l'appareil MOXUS) et la fréquence cardiaque (variable indépendante mesurée par la montre Garmin). Sans surprise, les relations de la fréquence cardiaque (FE) avec la ventilation (VE), et de la FE avec le METs sont très fortes puisque pour la quasi-totalité des équations, les valeurs de  $R^2$  obtenues sont supérieures à 0.9. Ces équations de régression sont utilisées pour estimer la ventilation et le METs durant les trajets réalisés par les 9 participants à partir de leurs fréquences cardiaques mesurées par la montre Garmin. Finalement, en multipliant simplement la ventilation estimée (VE, litres par minute) et la valeur de concentration du

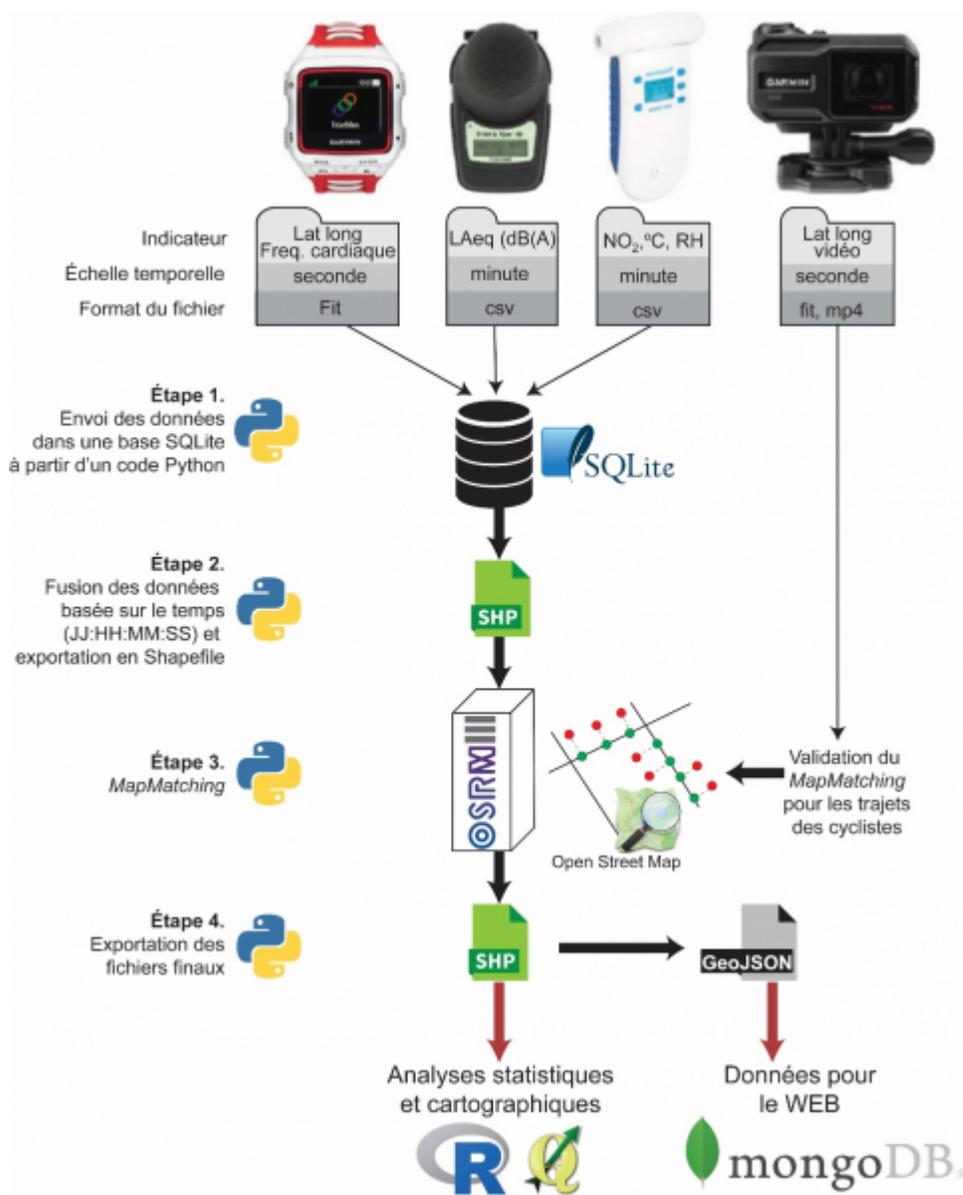
polluant NO<sub>2</sub> mesurée par le capteur Aeroqual (exprimée en µg/m<sup>3</sup>), il est possible d'estimer relativement précisément la dose inhalée (*I*) en microgramme de NO<sub>2</sub> à chaque minute :

$$I = (VE * 0.001) * NO_2$$

## Structuration des données collectées

- 14 La structuration des données est réalisée en quatre étapes, toutes codées en Python et schématisées à la figure 3.
- 15 Premièrement, pour chaque trajet, trois fichiers sont envoyés sous forme de tables SQL dans une base de données SQLite : 1. le fichier FIT de la montre Garmin comprenant les coordonnées latitude-longitude et la fréquence cardiaque du participant à chaque seconde ; 2. un fichier *csv* du sonomètre comprenant la mesure moyenne du bruit (Laeq-1min) exprimée en dB(A) ; 3. un fichier *csv* issu de l'appareil Aeroqual comprenant trois champs (la mesure de pollution NO<sub>2</sub>, la température en degrés Celsius et l'humidité en pourcentage) à chaque minute. Chacune de ces tables dispose d'une colonne *Time* qui contient pour chaque observation un *timestamp*, soit le moment où l'observation a été enregistrée (délai en secondes à partir du 1er janvier 1970 à minuit).
- 16 Deuxièmement, ces trois tables sont fusionnées dans une nouvelle table à partir des colonnes *Time*. Ainsi, cette table comprend l'ensemble des informations à chaque seconde du trajet (les coordonnées géographiques, la fréquence cardiaque, les mesures de pollution atmosphérique et de bruit). Cette table SQLite est exportée en dehors de la base de données au format *Shapefile*.
- 17 Troisièmement, un algorithme de *MapMatching* écrit en Python et basé sur l'utilisation de l'API OSMR (*Open Source Routing Matching*) (Luxen *et al.*, 2011) permet que chaque seconde du trajet soit rattachée au réseau routier d'OpenStreetMap (OSM) (Contributors Openstreetmap, 2017). Brièvement, OSMR est notamment basé sur un modèle de Markov caché (MMC) dont les segments routiers sont les états cachés et les points d'une trace GPS les observations. Il s'agit donc d'un algorithme probabiliste utilisant les informations telles que la vitesse de déplacement, l'orientation et la distance entre les points et les segments pour déterminer le chemin emprunté le plus vraisemblable (Luxen *et al.*, 2011). La validation du *MapMatching* est effectuée en comparant les fichiers de sortie avec la trace Google Map initiale. Pour les trajets à vélo, la vidéo et la seconde trace GPS enregistrées par la caméra d'action peuvent être aussi utilisées.
- 18 Quatrièmement, le résultat du *MapMatching* validé est exporté en *Shapefile* dans lequel on calcule deux champs pour la ventilation et le METs du participant à partir des équations polynomiales décrites dans la section précédente. À des fins d'analyses statistiques et spatiales, le *shapefile* du *MapMatching* validé est importé dans le logiciel libre R (Team R Core, 2017) tandis que pour la construction de l'atlas, il est exporté au format *GeoJSON* et intégré dans une base de données *mongoDB*.

**Figure 3 : Structuration des données primaires**



Source : Apparicio Ph., Gelb J.

## Déploiement de l'atlas

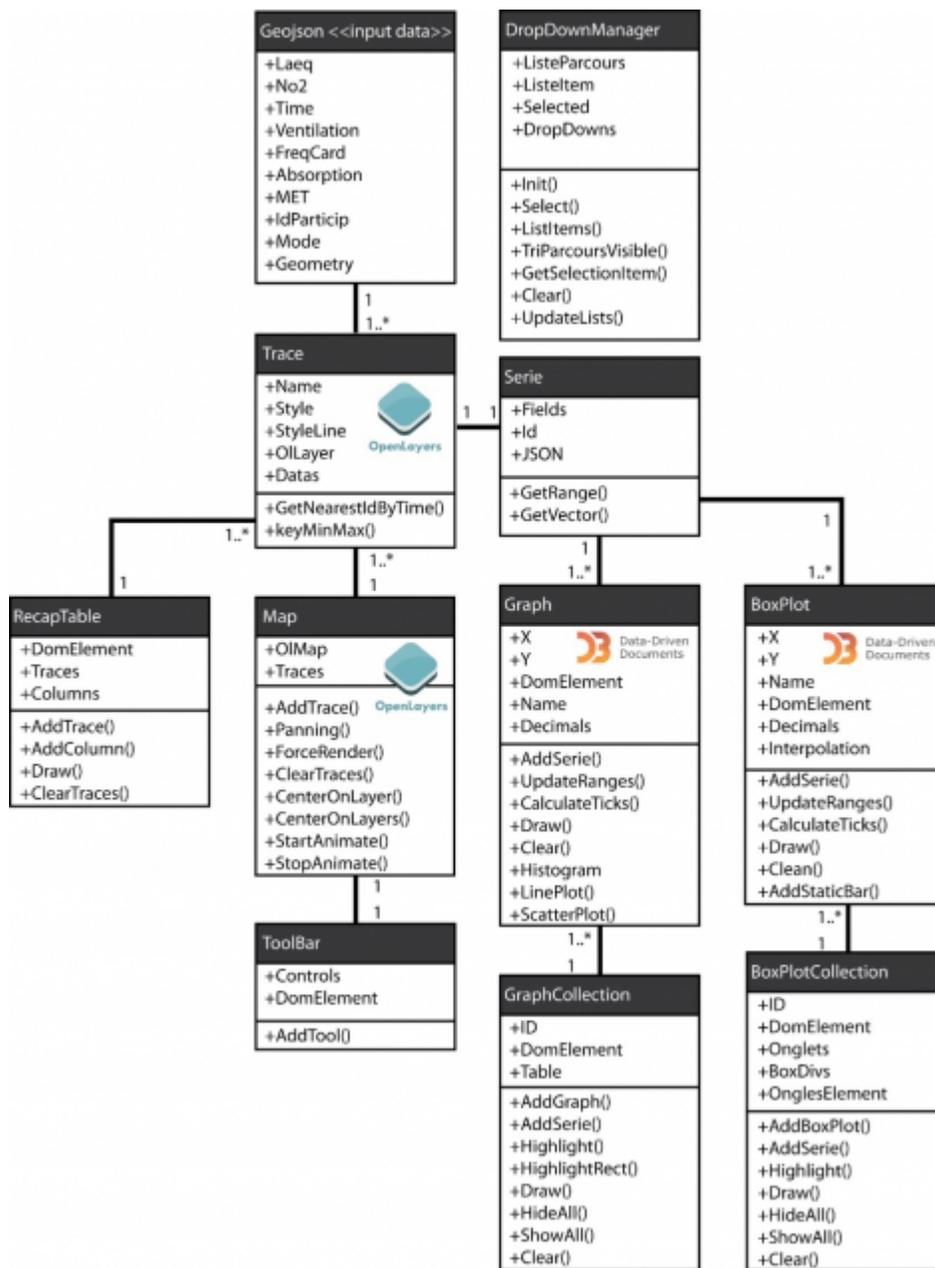
- 19 D'emblée, signalons que l'ensemble de l'application a été conçue et déployée à partir de logiciels et bibliothèques gratuits : 1. le système de base de données mongoDB (licence GNU AGPL) ; 2. la bibliothèque cartographique JavaScript *OpenLayers* (licence BSD) ; 3. la bibliothèque graphique JavaScript *Data-Driven Documents* (D3) qui permet de créer et manipuler des objets graphiques SVG (*Scalable Vector Graphics*), soit un standard W3C largement utilisé dans le domaine de la cartographie interactive et animée (Apparicio *et al.*, 2006 ; Danzart *et al.*, 2003 ; Peterson, 2003).

## Architecture de l'atlas

- 20 L'architecture côté serveur de l'atlas est constituée d'un serveur web et d'une base de données mongoDB. Nous avons retenu le système de base de données NoSQL en raison de sa grande flexibilité, de l'absence de besoin d'effectuer des opérations régulières sur les données et surtout parce que nos données en entrée sont au format *GeoJSON*.

- 21 À l'inverse, l'architecture côté client est plus complexe. Nous proposons ici une présentation légèrement simplifiée de son fonctionnement aux figures 4 et 5. L'utilisateur a accès aux différents trajets disponibles au travers d'un menu (*DropDownManager*) filtrant les trajets en fonction de l'équipe qui les a effectués, de la date, de la période (heure de pointe du matin ou du soir) et de l'arrondissement de départ. Une fois le trajet sélectionné par l'utilisateur, une requête est envoyée au serveur web qui interroge la base de données mongoDB, en extrait des données au format *GeoJSON* et les retourne au client. Ces données sont ensuite utilisées pour alimenter les quatre principales composantes de l'atlas : la carte (*Map*), les graphiques de lignes (*GraphCollection*), les boîtes à moustaches et diagrammes en violon (*BoxPlotCollection*) et le tableau synthèse (*RecapTable*). Chaque requête retourne ainsi trois jeux de données : un pour le cycliste, un pour l'automobiliste et un dernier pour l'utilisateur du transport en commun.
- 22 La construction de la carte est notamment basée sur la librairie JavaScript *OpenLayers* 3 (OL3), qui fait partie des bibliothèques de cartographie interactive sur le web les plus complètes à ce jour. Les données *GeoJSON* renvoyées par le serveur sont converties en objets appelés *Traces* comprenant un objet *VectorLayer* (provenant de OL3), et peuvent directement être ajoutées à la carte. Un style spécifique pour chaque mode de transport a été défini et s'applique au travers des *Traces* aux *VectorLayers*.
- 23 Les *GraphCollection* et *BoxPlotCollection* sont des objets constitués de sous-objets : *Graph* et *BoxPlot*. Nous avons choisi de les séparer afin de faciliter le développement, mais les deux ont un fonctionnement similaire. Un *Graph* et un *BoxPlot* disposent donc d'un ensemble de paramètres décrivant notamment les variables à utiliser sur l'ordonnée et l'abscisse, les valeurs des marqueurs à afficher, etc. Dans le cas des *Graph*, le temps est toujours utilisé pour l'axe des abscisses.
- 24 Des *Traces* mentionnées plus haut, nous extrayons des nouveaux objets appelés *Séries* (une *Série* par *Trace*), qui peut être conceptualisés comme un simple tableau de données sans information spatiale. Il est alors possible d'ajouter les trois *Séries* une à une à la *GraphCollection* et à la *BoxPlotCollection* qui se chargent de transmettre à leur *Graph* et *BoxPlot* respectifs, les données nécessaires pour dessiner les graphiques. Ces derniers sont dessinés dynamiquement dans des balises SVG (*Scalable Vector Graphics*) à l'aide de la librairie JavaScript *Data-Driven Documents* (D3).
- 25 Dans la même optique, les *Traces* sont ajoutées au dernier objet : *RecapTable*. Chaque *Trace* représente une ligne dans ce tableau récapitulatif. Il est ensuite possible de lui ajouter des colonnes servant à afficher des statistiques résumant les différentes variables des *Traces*.
- 26 Il est important de noter que les *Séries* et les *Traces* sont interreliées, ce qui permet dans un second temps de rendre l'atlas interactif. En effet, des événements au survol et au clic ont été ajoutés pour permettre d'effectuer des liens visuels entre les composantes *Map*, la *GraphCollection* et la *BoxPlotCollection*. Le fonctionnement de cette interactivité sera décrit plus longuement dans la prochaine section.
- 27 Lorsque l'utilisateur effectue une nouvelle requête pour afficher de nouveaux trajets, chacun des objets présentés ci-dessus est nettoyé (*Clear*) : les *Traces* et les *Séries* sont supprimées, les balises SVG vidées ainsi que le tableau récapitulatif et la *Map* OL3.

**Figure 4 : Diagramme UML de l'application cartographique**



Source : Aparicio Ph., Gelb J.

Figure 5 : Identification des objets du diagramme UML dans l'interface de l'atlas-Web



Source : Aparicio Ph., Gelb J.

## Description des fonctionnalités de l'application

- 28 À partir de la figure 6, nous proposons ici une courte section afin de décrire les éléments (représentés par des chiffres de 1 à 4) et fonctionnalités (identifiées par des lettres a à c) de l'atlas. Concernant l'interface de l'application, afin qu'elle soit la plus intuitive possible et rapide d'utilisation, nous avons largement privilégié l'utilisation d'icônes au détriment du texte, dont la description est disponible au tableau 1.
- 29 L'application est ainsi composée de quatre éléments : la carte (identifiée par le symbole ① à la figure 6), un résumé des trajets ②, cinq graphiques ③ et cinq diagrammes en violon ④. La carte ① comprend les trois trajets – en bleu pour l'automobiliste, vert pour le cycliste et rouge pour l'utilisateur du transport en commun – dont le début et la fin sont indiqués respectivement par les icônes de feux de circulation vert et rouge. En haut à droite de la carte ①, quatre fonctions classiques de navigation sur la carte (agrandissement, réduction, centrage de la carte et changement du fond de carte) sont disponibles.
- 30 Le résumé des trajets selon le mode de transport ② est réalisé à partir d'un tableau de trois lignes (une pour chaque mode de transport) et de six indicateurs en colonnes. Il permet ainsi à l'utilisateur de l'atlas d'établir un diagnostic comparatif sur les temps des trajets, les niveaux d'exposition et d'inhalation ainsi que sur le niveau d'activité selon les trois modes de transport. La première colonne renvoie à la durée des trois trajets. Dans l'exemple tiré de la capture d'écran, le cycliste est arrivé le premier (42"35) suivi de l'automobiliste (47"31) et de l'utilisateur du transport en commun (52"12). La seconde colonne comprend les valeurs moyennes d'exposition au bruit : l'automobiliste étant bien moins exposé au bruit que le cycliste et l'utilisateur du transport en commun (68,5 contre 71,1 et 77,4 dB(A)).

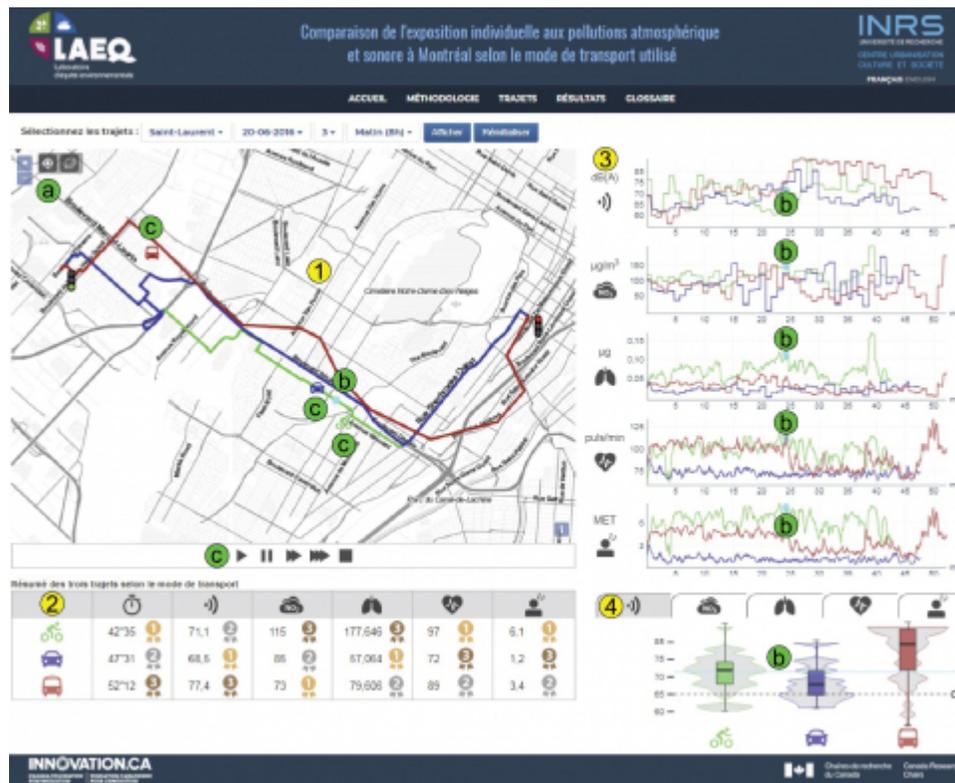
**Tableau 1 : Description des icônes utilisées dans l'application**

	<b>Mode de transport</b> Vélo	
	Automobile	
	Transport en commun	
	Début du trajet Fin du trajet	
<b>Fonction de navigation et d'habillage de la carte</b>		
	Agrandissement de la carte	
	Réduction de la carte	
	Centrage de la carte	
	Changement du fond de carte	
	<b>Indicateur</b> Durée du trajet	<b>Mesure</b> mm:ss
	Exposition au bruit	dB(A)
	Exposition au dioxyde d'azote	$\mu\text{g}/\text{m}^3$
	Inhalation du dioxyde d'azote	$\mu\text{g}$
	Fréquence cardiaque	Pulsations par minute
	Mesure de l'équivalent métabolique d'activité (METs)	0 à 18
<b>Rang du mode de transport pour les différents indicateurs</b>		
	Premier rang	
	Deuxième rang	
	Troisième rang	
<b>Fonction pour l'animation</b>		
	Lecture	
	Pause	
	Lecture accélérée	
	Lecture très accélérée	
	Arrêt de la lecture	

Source : Aparicio Ph., Gelb J.

- 31 Dans les troisième et quatrième colonnes sont reportées les valeurs moyennes d'exposition au dioxyde d'azote et les doses totales de  $\text{NO}_2$  inhalées par les trois participants le long de leur trajet respectif. Ici, le cycliste est celui qui est le plus exposé à ce polluant atmosphérique ( $115 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ) et qui en inhale le plus ( $177 \mu\text{g}$ ). Par contre, bien que l'utilisateur du transport en commun soit en moyenne moins exposé au  $\text{NO}_2$  que l'automobiliste ( $73$  contre  $85 \mu\text{g}/\text{m}^3$ ), il inhale plus de microgrammes de dioxyde d'azote sur l'ensemble du trajet ( $79$  contre  $57 \mu\text{g}$ ). Cela s'explique par deux raisons : son temps de parcours est plus long et son niveau de ventilation est plus élevé que l'automobiliste. Les deux dernières colonnes comprennent les moyennes de la fréquence cardiaque et du niveau d'activité mesuré par l'équivalent métabolique d'activité (METs). Sans surprise, le cycliste a la plus forte fréquence cardiaque et le niveau d'effort physique le plus élevé suivi par l'utilisateur du transport en commun.

Figure 6 : Interface de l'atlas-Web



Source : Aparicio Ph., Gelb J.

32 La collection des cinq graphiques ③ permet de visualiser et de comparer pour les trois participants, leurs niveaux d'exposition au bruit et à la pollution à chaque minute ainsi que leur inhalation de NO<sub>2</sub>, leur fréquence cardiaque et leur niveau d'activité physique à chaque seconde. De plus, afin d'analyser et comparer la variation de ces cinq indicateurs, nous avons ajouté des diagrammes en violon ④. Dans l'exemple à la figure 6, on constate que le niveau de bruit est clairement plus élevé pour l'utilisateur du transport en commun. Toutefois, la forme du diagramme en violon signale que la distribution est bimodale : plusieurs observations présentant un niveau de bruit inférieur à 65 dB(A) et d'autres largement supérieures à 75 dB(A). L'analyse de la courbe rouge dans le graphique démontre que durant les vingt premières minutes du trajet, les valeurs d'exposition au bruit oscillent autour de 65 dB(A) ; cette portion du trajet est réalisée à pied, du point de départ jusqu'à la station de métro la plus proche. À l'inverse, durant les vingt minutes suivantes, les valeurs sont souvent supérieures à 75 dB(A), correspondant à la section du trajet effectuée en métro. Les dernières minutes du trajet présentent de nouveau un niveau de bruit autour de 65 dB(A) ; cette section de la sortie du métro jusqu'à la destination finale étant aussi parcourue à pied.

33 Deux fonctionnalités de cartographie interactive sont aussi implémentées. Premièrement, si l'utilisateur survole le graphique ou la carte, le point survolé est mis en surbrillance (en bleu clair), tandis qu'une barre horizontale bleue apparaît sur les diagrammes en violon ④. Cette fonctionnalité de cartographie interactive permet notamment de relier la localisation dans l'espace du participant et les niveaux d'exposition, d'inhalation et d'activité physique enregistrés.

34 Deuxièmement, il est possible de jouer une animation à partir des boutons de lecture situés sous la carte, et ce, avec différents niveaux de vitesse ③. Durant l'animation, des icônes représentant le cycliste, l'automobiliste et l'utilisateur du transport en commun se déplacent le long du trajet et des points bleus sont positionnés sur les cinq graphiques. Cela permet non seulement d'analyser les valeurs des cinq indicateurs sur les différents axes empruntés, mais aussi de repérer à quel moment les participants ont été ralentis par le trafic routier, des intersections ou l'attente du prochain métro.

# Comparaisons des trois modes de transport : deux exemples cartographiques de trajets

- 35 Tel qu'illustrés à la figure 6, les menus déroulants permettent de sélectionner un trajet en fonction de l'arrondissement (de départ ou d'arrivée) et de la période pointe (le matin ou le soir). Ainsi, un citoyen travaillant dans le centre-ville et résidant dans l'un des neuf arrondissements de la zone d'étude peut choisir un trajet au départ (le matin) ou à l'arrivée (le soir) de son secteur de résidence. Bien que les points de départ et d'arrivée des trajets ne puissent être jamais exactement ses lieux de résidence et de travail, il risque de reconnaître les axes majeurs qu'il emprunte habituellement pour se rendre au centre-ville en automobile, ou encore les lignes d'autobus et surtout de métro s'il se rend au travail en transport en commun, ou finalement, les principales pistes cyclables nord-sud ou est-ouest qui relient son quartier de résidence au centre-ville.
- 36 À titre de rappel, 108 trajets ont été réalisés (18 x 2 allers-retours x 3 modes de transport), soit 36 cartes avec les mêmes origines-destinations pour les trois modes. Bien entendu, nous ne pouvons pas présenter et décrire ici l'ensemble de ces cartes. Nous proposons plutôt d'en analyser uniquement deux – un trajet le matin et un autre le soir – afin d'illustrer comment les cartes peuvent être utilisées par les citoyens et les planificateurs urbains.

## Trajet 1 : du centre-ville vers le quartier Rosemont le soir

- 37 Les trois trajets analysés sont au départ du centre-ville à 17 h 00 vers le quartier Rosemont : de l'Université du Québec à Montréal (intersection des rues Saint-Denis et Saint-Catherine) à l'intersection de la 27<sup>e</sup> avenue et de la rue Beaubien, soit un trajet de 8,2 kilomètres à vélo et 7,8 kilomètres en automobile selon Google Maps (figure 7).
- 38 À la lecture du résumé des trajets selon le mode de transport (tableau positionné au bas de la carte), l'utilisateur de l'application peut rapidement constater que l'automobiliste est arrivé le premier (26"52), suivis de l'usager de transport en commun (30"49) et du cycliste (34"32). Concernant les niveaux d'exposition, l'usager du transport en commun est de loin le plus exposé au bruit (76 dB(A)), mais le moins exposé au dioxyde d'azote (78 µg/m<sup>3</sup>), alors qu'on observe une situation inverse pour l'automobiliste (66,1 dB(A) et 146 µg/m<sup>3</sup>). Par contre, sur l'ensemble du trajet, le cycliste inhale beaucoup plus de dioxyde d'azote que l'automobiliste et l'usager du transport en commun (241 contre 62 et 66 µg) du fait d'une ventilation bien plus forte. Cela s'explique par une fréquence cardiaque et un équivalent métabolique d'activité physique (METs) bien plus élevés pour le cycliste.
- 39 L'analyse des cinq graphiques à droite de la carte permet d'avancer plusieurs constats intéressants pour chacun des trois modes de transport. Pour ce faire, l'utilisateur du trajet peut simplement passer la souris le long du trajet (lignes rouge, bleue et verte sur la carte), du début jusqu'à la fin du tracé, et analyser les valeurs dans les cinq graphiques. Prenons l'exemple de l'usager du transport en commun (lignes rouges sur la carte et les graphiques). Les premières minutes du trajet sont parcourues à pied jusqu'à la rame de métro : les valeurs d'inhalation du NO<sub>2</sub>, de fréquence cardiaque et de METs sont donc plus élevées. Durant les dix minutes suivantes (de la 5<sup>e</sup> à la 15<sup>e</sup> minute), l'usager est dans le métro (des stations Berri-UQAM à Pie-IX de la ligne verte) : les valeurs de fréquence cardiaque, de METs et d'inhalation sont les plus faibles du trajet. Aussi, durant ces dix minutes dans le métro, il est possible de constater à la lecture des deux premiers graphiques que les mesures de dioxyde d'azote sont très faibles, alors que celles du bruit dépassent souvent les 80 dB(A) (voir les deux premiers graphiques à la figure 7). On

observe ensuite un pic pour la fréquence cardiaque, le METs et le dioxyde d'azote entre les 15<sup>e</sup> et 17<sup>e</sup> minutes, alors que les valeurs de bruit chutent fortement ; durant ces deux minutes, l'usager sort du métro pour rejoindre l'arrêt de l'autobus 439-N. Entre les 18<sup>e</sup> et 25<sup>e</sup> minutes, l'usager est dans l'autobus : sa fréquence cardiaque et son METs sont de nouveau faibles tandis que le niveau de bruit oscille autour de 75 dB(A). Son trajet se termine avec 5 minutes de marche : la fréquence cardiaque et le METs augmentent, les niveaux d'exposition plafonnent à 65 dB(A) pour le bruit et à 120 µg/m<sup>3</sup> pour le dioxyde d'azote.

40 Pour le trajet de l'automobiliste (tracé en bleu), signalons d'emblée que l'on observe très peu de variations pour la fréquence cardiaque, le niveau d'activité physique (METs) et l'inhalation de NO<sub>2</sub> qui restent très faibles comparativement aux deux autres modes. Par contre, les niveaux de bruit et de pollution semblent être plus élevés sur certains tronçons d'artères majeures de circulation, comme le boulevard Saint-Joseph.

41 Quant au cycliste (tracé en vert), il est exposé aux plus fortes valeurs de NO<sub>2</sub> (supérieures à 150 µg/m<sup>3</sup>) durant les dix premières minutes du trajet, c'est-à-dire sur les pistes cyclables aux abords des rues Berri et Cherrier et de l'avenue du Parc La Fontaine. On observe aussi un pic pour la fréquence cardiaque et le METs aux alentours de la cinquième minute qui correspond au segment de la côte Berri entre les rues Ontario Est et Cherrier. Or, sur cette section de piste cyclable en site propre sur rue, la pente fait augmenter significativement la fréquence cardiaque et la ventilation du cycliste qui, combinée à un niveau de pollution élevé (atteignant 200 µg/m<sup>3</sup> de NO<sub>2</sub>), contribue à une forte dose inhalée de ce polluant.

Figure 7 : Trajets du centre-ville vers le quartier Rosemont (heure de pointe de soir)

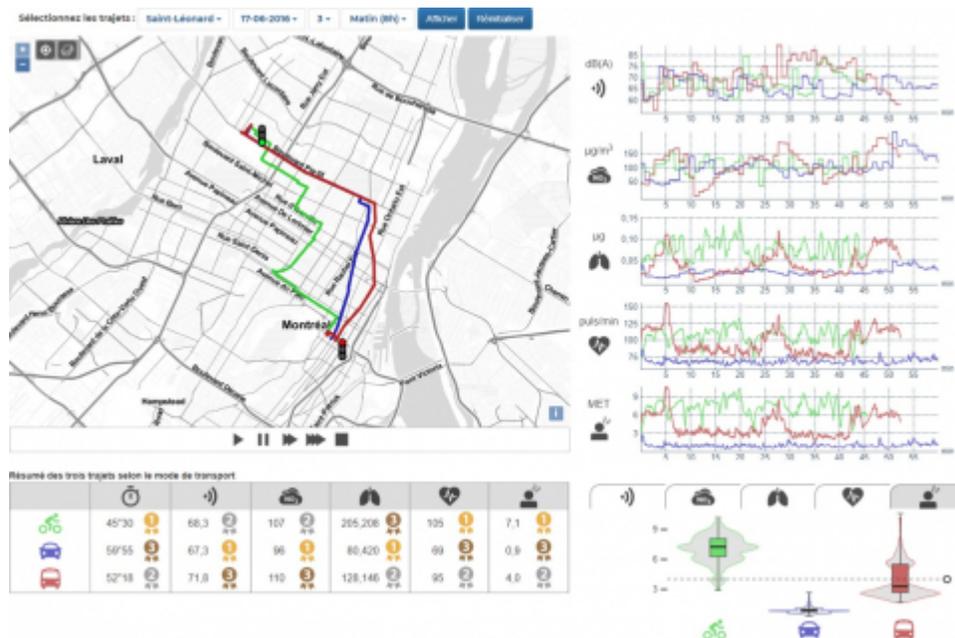


Source : Aparicio Ph., Gelb J.

## Trajet 2 : de Saint-Léonard vers le centre-ville le matin

- 42 Ces trois trajets sont au départ de Saint-Léonard (intersection des rues de Gaspésie et Descartes) à 8h le matin et à destination du centre-ville (université McGill), soit des trajets un peu plus longs, de 12,9 km pour le cycliste et de 12,1 km pour l'automobiliste (figure 8).
- 43 Le cycliste est arrivé le premier (45"30), suivis de l'usager du transport en commun (52"18) et l'automobiliste (59"55). Comme dans plusieurs autres trajets réalisés dans le cadre de cette collecte (Apparicio *et al.*, 2018), cela illustre que le vélo et le transport en commun sont des alternatives efficaces à l'automobile durant les heures de pointe. De nouveau, l'usager du transport en commun est le plus exposé au bruit en raison de l'utilisation du métro tandis que son niveau d'exposition à la pollution atmosphérique est très similaire à celui du cycliste. Par contre, l'automobiliste est à la fois le moins exposé au bruit et au dioxyde d'azote. Bien que son trajet soit plus lent, il inhale 2,6 fois moins de ce polluant que le cycliste. Cela constitue une certaine forme d'iniquité environnementale : il est moins exposé au bruit et inhale moins de dioxyde d'azote, soit deux nuisances qu'il produit contrairement aux autres modes. Sans surprise, la fréquence cardiaque et le METs sont bien plus élevés pour le cycliste. Comme pour de nombreux trajets en heures de pointe, le vélo est donc à la fois plus rapide et bien plus bénéfique pour la santé que l'automobile, du fait de l'activité physique qu'il génère.
- 44 Pour l'usager du transport en commun, les graphiques permettent d'identifier cinq étapes pour ce trajet. Tout d'abord, durant les huit premières minutes, le participant marche jusqu'à l'arrêt d'autobus : les pulsations cardiaques et le METs sont plus élevés, tout comme l'exposition et l'inhalation du NO<sub>2</sub>. Deuxièmement, de la 9<sup>e</sup> et à 24<sup>e</sup> minute, il est dans l'autobus 439-S le long du boulevard Pie-IX avec des pulsations et des mesures de pollution et d'inhalation en baisse. Troisièmement, entre les 25<sup>e</sup> et 42<sup>e</sup> minutes, il est dans le métro (des stations Pie IX à McGill sur la ligne verte) : fréquence cardiaque et METs faibles, niveau de bruit dépassant souvent les 80 dB(A) et faible exposition au NO<sub>2</sub>. Quatrièmement, il marche dix minutes de la station McGill à l'université : fréquence cardiaque, METs, inhalation et exposition au NO<sub>2</sub> en hausse et exposition au bruit en baisse.
- 45 Pour le trajet de l'automobiliste (tracé en bleu), seuls les niveaux d'exposition au bruit et à la pollution varient significativement le long du trajet. On relève notamment des niveaux plus élevés pour ces deux polluants dans le centre-ville en fin de trajet, en particulier sur la rue Sherbrooke Ouest entre le boulevard Saint-Laurent et l'université, soit une section particulièrement congestionnée en heure de pointe du matin.
- 46 Pour le cycliste, les variations des expositions et de l'inhalation sont aussi très importantes, et ce, en fonction du type d'infrastructures cyclables. Par exemple, entre les 25<sup>e</sup> et 30<sup>e</sup> minutes, le cycliste emprunte un sentier mixte (vélo-piéton) où les mesures de NO<sub>2</sub> et de bruit sont plus faibles tandis qu'entre les 35<sup>e</sup> et 40<sup>e</sup> minutes, il circule sur une bande cyclable située sur un axe très achalandé le matin, soit la rue Saint-Urbain, avec des niveaux de bruit et de pollution plus élevés.

**Figure 8 : Trajets de Saint-Léonard vers l'université McGill (heure de pointe du matin)**



Source : Apparicio Ph., Gelb J.

## Discussion

47 Cette collecte de données a permis de montrer que pour des trajets de dix kilomètres en moyenne à Montréal en heures de pointe, il n'y a pas de différences significatives en termes de temps de déplacement entre les trois modes de transport (vélo, transport en commun et automobile) (Apparicio *et al.*, 2016). En outre, les niveaux d'activité physique mesurés par le METs montrent clairement que l'utilisation du vélo a un impact significatif sur la santé et le bien-être des individus (Bassett *et al.*, 2008 ; Oja *et al.*, 1998 ; Woodcock *et al.*, 2009). L'atlas illustre bien que le vélo est une alternative efficace à l'automobile pour des déplacements domicile-travail de la périphérie vers le centre en heures de pointe, tant le matin que le soir. Par conséquent, en termes de transfert de connaissances auprès du grand public, on peut espérer qu'après consultation de l'atlas, certains citoyens délaisseront progressivement l'automobile comme mode de transport au profit du vélo. Pour les personnes qui se déplacent déjà à vélo en heures de pointe, les informations fournies par l'atlas pourraient éventuellement les amener à modifier leurs trajets, et ce, afin de minimiser leur exposition au bruit et à la pollution. En effet, des études récentes montrent que les cyclistes sont sensibles à cette problématique (Anowar *et al.*, 2017 ; Cole-Hunter *et al.*, 2015) et qu'une fois informés sur leur exposition, ils seraient prêts à modifier leur itinéraire. Par exemple, à partir d'une enquête auprès de 153 cyclistes réguliers, Cole-Hunter *et al.* (2015) ont montré que 80 % d'entre eux déclaraient percevoir être exposés à la pollution atmosphérique, et qu'une relation positive existe entre le nombre de trajets effectués et cette perception. Aussi, dans la majorité des cas, les cyclistes se déclaraient prêts à emprunter des itinéraires différents s'il leur était prouvé que ceux-ci réduiraient leur exposition.

48 Les planificateurs urbains considèrent aujourd'hui le vélo comme un moyen de transport permettant de réduire les gaz à effets de serre et la congestion routière. Montréal n'échappe pas à cette tendance : la Ville de Montréal planifie d'investir 225 millions de dollars dans les 15 prochaines années pour étendre son réseau cyclable et encourager la pratique du vélo. En termes de transfert de connaissances auprès des planificateurs et des décideurs, l'atlas démontre qu'en heures de pointe les cyclistes sont plus exposés au bruit et qu'ils inhalent plus de polluants que les automobilistes. Une telle situation peut être considérée comme une forme d'iniquité environnementale : ils sont bien plus exposés à des polluants qu'ils ne génèrent pas. Pour réduire ces iniquités, protéger les cyclistes et

encourager la pratique du vélo, il conviendrait de planifier de nouvelles infrastructures cyclables rejoignant le centre-ville sur des axes où les niveaux de bruit et de pollution sont plus faibles. Or, à ce jour, les niveaux de pollutions atmosphérique et sonore sont rarement pris en compte lors de la planification des infrastructures cyclables. Une solution envisageable serait l'aménagement d'autoroutes à vélo (*cycle superhighways* comme à Copenhague ou à Londres) reliant les arrondissements périphériques au centre-ville, facilitant ainsi les déplacements domicile-travail en heures de pointe. Ces axes devraient être exclusifs aux cyclistes afin de limiter les expositions au bruit et aux polluants atmosphériques. Cela permettrait d'une part d'augmenter la fluidité, le sentiment de sécurité des cyclistes et diminuer le risque d'accident ; et d'autre part, d'encourager beaucoup plus de navetteurs à se rendre au travail à vélo et de réduire ainsi la congestion et les gaz à effet de serre.

- 49 L'atlas a montré aussi que les usagers du transport en commun sont plus exposés au bruit, et ce, surtout dans le métro. Il est à noter toutefois que depuis 2016, la Société de transport de Montréal remplace progressivement les vieilles rames de métro (MR-73) par de nouvelles (modèle AZUR) moins bruyantes (85 dB(A) contre 90 dB(A) au centre du train) (Bape, 2016).

## Conclusion

- 50 Une fois les données collectées sur le terrain, la méthodologie proposée ici permet de déployer rapidement un atlas interactif portant sur la comparaison des expositions selon les modes de transport, et ce, pour deux raisons principales. Premièrement, la structuration des données primaires et le déploiement de l'atlas reposent intégralement sur des logiciels et bibliothèques gratuits : Python, SQLite, mongoDB, API OSMR et bibliothèques JavaScript *OpenLayers* et *Data-Driven Documents*. Deuxièmement, tel que démontré à l'aide du diagramme UML (*Unified Modeling Language*), l'architecture de l'atlas est très flexible : il est très facile d'ajouter des nouveaux éléments aux objets *Trace*, *Serie*, *Graph* et *Boxplot* pour bonifier l'application. En guise d'exemple, il serait aisé d'ajouter un nouveau mode de transport à partir de nouveaux fichiers *Geojson* ou bien une nouvelle mesure de pollution (PM10, PM2.5, etc.) comme *Serie*. Dans la même veine, il serait très rapide de construire d'autres atlas similaires à partir de données collectées dans d'autres villes.
- 51 Outre les forces, il convient de dégager les limites de l'atlas qui sont principalement de deux ordres. Tout d'abord, le déploiement d'un tel atlas repose sur des données primaires relativement coûteuses à collecter. En effet, tel que décrit dans la section 1.1, la collecte est basée sur de nombreux instruments de mesure – neuf appareils portatifs de pollution, neuf sonomètres, neuf montres GPS et trois caméras d'action – et sur un test d'effort physique pour chaque participant réalisé en laboratoire. Or, malheureusement, rares sont les laboratoires de géographie ou d'études urbaines à travers le monde qui disposent actuellement de tels instruments de mesure. Il est toutefois plus fréquent de retrouver ce type d'équipements onéreux dans les laboratoires d'ingénierie (génie civil principalement) et en sciences de la santé (santé environnementale et épidémiologie notamment).
- 52 La seconde limite est que l'utilisateur ne peut pas définir son propre trajet pour évaluer ses niveaux d'exposition, soit à partir de trajets qu'il réalise sur une base régulière, soit pour des trajets qu'il souhaite effectuer. Il serait certainement plus pertinent pour le grand public de pouvoir choisir des trajets permettant de réduire les niveaux d'exposition. Ce type d'application a déjà été développé (Davies *et al.*, 2009 ; Davies *et al.*, 2014 ; Hertel *et al.*, 2008) pour la pollution atmosphérique, faisant notamment appel à des algorithmes de plus court chemin dans un réseau ; l'enjeu étant de proposer un itinéraire minimisant la dose totale de polluant inhalée. Dans le cas du bruit, ceci est plus compliqué car il n'est pas mesuré comme une quantité, mais comme une intensité. Il serait cependant possible de convertir les mesures d'intensité en dose de bruit pour contourner ce problème. Une autre

alternative serait d'utiliser les données collectées pour construire des modèles de prédiction de la pollution atmosphérique et du bruit (Apparicio *et al.*, 2016 ; Boogaard *et al.*, 2009). À partir des équations obtenues, il serait possible de prédire dynamiquement les niveaux d'exposition potentiels auxquels s'exposerait un cycliste, une fois son trajet défini. Un utilisateur pourrait donc aisément comparer plusieurs trajets et opter pour l'alternative répondant à ces priorités en termes de rapidité, sécurité, praticité et exposition.

---

## **Bibliographie**

Anowar S., Eluru N., Hatzopoulou M., 2017, "Quantifying the value of a clean ride : How far would you bicycle to avoid exposure to traffic-related air pollution ?", *Transportation research part A : policy and practice*, Vol.105, 66-78.

DOI : 10.1016/j.tra.2017.08.017

Apparicio P., Petkevitch V., 2006, "Déploiement d'atlas interactifs sur Internet : nouvelles avenues avec le Scalable Vector Graphics, le C# et l'ASP. Net", *Cybergeo : European Journal of Geography*, Vol.340.

Apparicio P., Carrier M., Gelb J., Séguin A.-M., Kingham S., 2016, "Cyclists' exposure to air pollution and road traffic noise in central city neighbourhoods of Montreal", *Journal of Transport Geography*, Vol.57, 63-69.

Apparicio P., Gelb J., Carrier M., Mathieu M.-È., Kingham S., 2018, "Exposure to noise and air pollution by mode of transportation during rush hours in Montreal", *Journal of Transport Geography*, Vol.70, 182-192.

BAPE, 2016, *Rapport 331. Projet de réseau électrique métropolitain de transport collectif*, Montréal.

Bassett D. R., Pucher Jr J., Buehler R., Thompson D. L., Crouter S. E., 2008, "Walking, cycling, and obesity rates in Europe, North America, and Australia", *Journal of Physical Activity and Health*, Vol.5, No.6, 795-814.

DOI : 10.1123/jpah.5.6.795

Bigazzi A. Y., Figliozzi M. A., 2014, "Review of Urban Bicyclists' Intake and Uptake of Traffic-Related Air Pollution", *Transport Reviews*, Vol.34, No.2, 221-245.

DOI : 10.1080/01441647.2014.897772

Boogaard H., Borgman F., Kamminga J., Hoek G., 2009, "Exposure to ultrafine and fine particles and noise during cycling and driving in 11 Dutch cities", *Atmospheric Environment*, Vol.43, No.27, 4234-4242.

DOI : 10.1016/j.atmosenv.2009.05.035

Chertok M., Voukelatos A., Sheppard V., Rissel C., 2004, "Comparison of air pollution exposure for five commuting modes in Sydney-car, train, bus, bicycle and walking", *Health promotion journal of Australia*, Vol.15, No.1, 63-67.

Cepeda M., Schoufour J., Freak-Poli R., Koolhaas C.M., Dhana K., Bramer W.M., Franco O. H., 2017, "Levels of ambient air pollution according to mode of transport: a systematic review". *The Lancet Public Health*, Vol.2, No.1, 23-34.

Cole-Hunter T., Morawska L., Solomon C., 2015, "Bicycle Commuting and Exposure to Air Pollution : A Questionnaire-Based Investigation of Perceptions, Symptoms, and Risk Management Strategies", *Journal of Physical Activity and Health*, Vol.12, No.4, 490-499.

DOI : 10.1123/jpah.2013-0122

Contributors OpenStreetMap, 2017, *Planet dump retrieved from* <https://planet.osm.org>.

Danzart A., Moissinac J.-C., Potier C., 2003, "Standards pour la cartographie animée sur internet", *Revue internationale de géomatique*, Vol.13, No.1, 49-68.

DOI : 10.3166/rig.13.49-68

Davies G., Whyatt D., 2009, "A least-cost approach to personal exposure reduction", *Transactions in GIS*, Vol.13, No.2, 229-246.

DOI : 10.1111/j.1467-9671.2009.01150.x

Davies G., Whyatt J. D., 2014, "A network-based approach for estimating pedestrian journey-time exposure to air pollution", *Science of the Total Environment*, Vol.485, 62-70.

DOI : 10.1016/j.scitotenv.2014.03.038

De Hartog J. J., Boogaard H., Nijland H., Hoek G., 2010, "Do the health benefits of cycling outweigh the risks?", *Environmental health perspectives*, Vol.118, No.8, 1109.

- De Nazelle A., Fruin S., Westerdahl D., Martinez D., Ripoll A., Kubesch N., Nieuwenhuijsen M., 2012, "A travel mode comparison of commuters' exposures to air pollutants in Barcelona", *Atmospheric Environment*, Vol.59, 151-159.  
DOI : 10.1016/j.atmosenv.2012.05.013
- Duci A., Chaloulakou A., Spyrellis N., 2003, "Exposure to carbon monoxide in the Athens urban area during commuting", *Science of the Total Environment*, Vol.309, No.1, 47-58.  
DOI : 10.1016/S0048-9697(03)00045-7
- Fishman E., Schepers P., Kamphuis C. B. M., 2015, "Dutch cycling : quantifying the health and related economic benefits", *American journal of public health*, Vol.105, No.8, e13-e15.  
DOI : 10.2105/AJPH.2015.302724
- Goël R., Gani S., Guttikunda S. K., Wilson D., Tiwari G., 2015, "On-road PM 2.5 pollution exposure in multiple transport microenvironments in Delhi", *Atmospheric Environment*, Vol.123, 129-138.
- Gouvernement du Québec, 2018, *Indice de la qualité de l'air*, Québec, Environnement et lutte contre les changements climatiques. URL: <http://www.iqa.mddefp.gouv.qc.ca/contenu/polluants.htm#particules>
- Hatzopoulou M., Weichenthal S., Dugum H., Pickett G., Miranda-Moreno L., Kulka R., Andersen R., Goldberg M., 2013, "The impact of traffic volume, composition, and road geometry on personal air pollution exposures among cyclists in Montreal, Canada", *J Expo Sci Environ Epidemiol*, Vol.23, No.1, 46-51.  
DOI : 10.1038/jes.2012.85
- Hertel O., Hvidberg M., Ketzel M., Storm L., Stausgaard L., 2008, "A proper choice of route significantly reduces air pollution exposure – a study on bicycle and bus trips in urban streets", *Science of the Total Environment*, Vol.389, No.1, 58-70.  
DOI : 10.1016/j.scitotenv.2007.08.058
- Houde M., Apparicio P., Séguin A.-M., 2018, "A ride for whom : Has cycling network expansion reduced inequities in accessibility in Montreal, Canada?", *Journal of Transport Geography*, Vol.68, 9-21.  
DOI : 10.1016/j.jtrangeo.2018.02.005
- Huang J., Deng F., Wu S., Guo X., 2012, "Comparisons of personal exposure to PM 2.5 and CO by different commuting modes in Beijing, China", *Science of the Total Environment*, Vol.425, 52-59.
- Kaur S., Nieuwenhuijsen M., Colville R., 2005, "Personal exposure of street canyon intersection users to PM 2.5, ultrafine particle counts and carbon monoxide in Central London, UK", *Atmospheric Environment*, Vol.39, No.20, 3629-3641.
- Laumbach R., Meng Q., Kipen H., 2015, "What can individuals do to reduce personal health risks from air pollution?", *Journal of thoracic disease*, Vol.7, No.1, 96.
- Lewne M., Nise G., Lind M.-L., Gustavsson P., 2006, "Exposure to particles and nitrogen dioxide among taxi, bus and lorry drivers", *International archives of occupational and environmental health*, Vol.79, No.3, 220-226.  
DOI : 10.1007/s00420-005-0047-6
- Liu W.-T., Ma C.-M., Liu I.-J., Han B.-C., Chuang H.-C., Chuang K.-J., 2015, "Effects of commuting mode on air pollution exposure and cardiovascular health among young adults in Taipei, Taiwan", *International journal of hygiene and environmental health*, Vol.218, No.3, 319-323.
- Luxen D., Vetter C., 2011, "Real-time routing with OpenStreetMap data", Proceedings of the 19th ACM SIGSPATIAL international conference on advances in geographic information systems, 513-516.
- Macmillan A., Connor J., Witten K., Kearns R., Rees D., Woodward A., 2014, "The societal costs and benefits of commuter bicycling : simulating the effects of specific policies using system dynamics modeling", *Environmental health perspectives*, Vol.122, No.4, 335-344.
- Nyhan M., McNabola A., Misstear B., 2014, "Comparison of particulate matter dose and acute heart rate variability response in cyclists, pedestrians, bus and train passengers", *Science of the Total Environment*, Vol.468, 821-831.
- Oja P., Vuori I., Paronen O., 1998, "Daily walking and cycling to work: their utility as health-enhancing physical activity", *Patient education and counseling*, Vol.33, S87-S94.  
DOI : 10.1016/S0738-3991(98)00013-5
- Peterson M. P., 2003, *Maps and the Internet*, Amsterdam (P.B.), Elsevier Ltd.  
DOI : 10.1016/B978-008044201-3/50003-7
- Pucher J., Buehler R., Seinen M., 2011, "Bicycling renaissance in North America? An update and re-appraisal of cycling trends and policies", *Transportation research part A : policy and practice*, Vol.45, No.6, 451-475.  
DOI : 10.1016/j.tra.2011.03.001

Rojas-Rueda D., de Nazelle A., Tainio M., Nieuwenhuijsen M. J., 2011, "The health risks and benefits of cycling in urban environments compared with car use: health impact assessment study", *Bmj*, Vol.343, d4521.

DOI : 10.1136/bmj.d4521

Suárez L., Mesías S., Iglesias V., Silva C., Cáceres D. D., Ruiz-Rudolph P., 2014, "Personal exposure to particulate matter in commuters using different transport modes (bus, bicycle, car and subway) in an assigned route in downtown Santiago, Chile", *Environmental Science : Processes & Impacts*, Vol.16, No.6, 1309-1317.

Tainio M., de Nazelle A. J., Götschi T., Kahlmeier S., Rojas-Rueda D., Nieuwenhuijsen M. J., de Sá T. H., Kelly P., Woodcock J., 2016, "Can air pollution negate the health benefits of cycling and walking?", *Preventive Medicine*, Vol.87, 233-236.

DOI : 10.1016/j.ypmed.2016.02.002

Team R Core, 2017, *R : A Language and Environment for Statistical Computing*, Vienna, Austria, <https://www.R-project.org/>.

Woodcock J., Edwards P., Tonne C., Armstrong B. G., Ashiru O., Banister D., Beevers S., Chalabi Z., Chowdhury Z., Cohen A., 2009, "Public health benefits of strategies to reduce greenhouse-gas emissions : urban land transport", *The Lancet*, Vol.374, No.9705, 1930-1943.

Wu D.-L., Lin M., Chan C.-Y., Li W.-Z., Tao J., Li Y.-P., Sang X.-F., Bu C.-W., 2013, "Influences of commuting mode, air conditioning mode and meteorological parameters on fine particle (PM2. 5) exposure levels in traffic microenvironments", *Aerosol Air Qual Res*, Vol.13, 709-720.

Yan C., Zheng M., Yang Q., Zhang Q., Qiu X., Zhang Y., Fu H., Li X., Zhu T., Zhu Y., 2015, "Commuter exposure to particulate matter and particle-bound PAHs in three transportation modes in Beijing, China", *Environmental Pollution*, Vol.204, 199-206.

DOI : 10.1016/j.envpol.2015.05.001

Zuurbier M., Hoek G., Oldenwening M., Lenters V., Meliefste K., van den Hazel P., Brunekreef B., 2010, "Commuters' exposure to particulate matter air pollution is affected by mode of transport, fuel type, and route", *Environmental health perspectives*, Vol.118, No.6, 783-789.

## Notes

1 La mesure de l'équivalent métabolique d'activité (METs) permet d'évaluer l'intensité d'une activité physique : elle varie de 0,9 (sommeil) à plus de 18 (course à 17,5 km/h ou plus). Il existe plusieurs échelles de MET permettant de distinguer plusieurs niveaux d'activité physique. Habituellement, on retient trois intervalles de valeurs : activité physique d'intensité légère (MET inférieur à 3) ; activité physique d'intensité moyenne (METs de 3 à 6) ; activité physique d'intensité élevée (MET supérieur à 6).

## Table des illustrations

 <p><b>Légende</b></p>	<p><b>Titre</b> Figure 1 : Quatre outils de collecte</p> <p><b>Légende :</b> <b>a)</b> appareil Aeroqual (Series 500) avec un capteur de dioxyde d'azote et un capteur de température et d'humidité ; <b>b)</b> exposimètre acoustique Brüel &amp; Kjær (type 4448) ; <b>c)</b> caméra d'action Garmin Virb XE ; <b>d)</b> montre multisport GPS Garmin Forerunner 920 XT.</p> <p><b>URL</b> <a href="http://journals.openedition.org/cybergeorge/docannexe/image/32391/img-1.jpg">http://journals.openedition.org/cybergeorge/docannexe/image/32391/img-1.jpg</a></p> <p><b>Fichier</b> image/jpeg, 156k</p>
	<p><b>Titre</b> Figure 2 : Test d'effort physique maximal sur vélo stationnaire</p> <p><b>URL</b> <a href="http://journals.openedition.org/cybergeorge/docannexe/image/32391/img-2.jpg">http://journals.openedition.org/cybergeorge/docannexe/image/32391/img-2.jpg</a></p> <p><b>Fichier</b> image/jpeg, 180k</p>
	<p><b>Titre</b> Figure 3 : Structuration des données primaires</p> <p><b>Crédits</b> Source : Aparicio Ph., Gelb J.</p> <p><b>URL</b> <a href="http://journals.openedition.org/cybergeorge/docannexe/image/32391/img-3.jpg">http://journals.openedition.org/cybergeorge/docannexe/image/32391/img-3.jpg</a></p> <p><b>Fichier</b> image/jpeg, 260k</p>
	<p><b>Titre</b> Figure 4 : Diagramme UML de l'application cartographique</p> <p><b>Crédits</b> Source : Aparicio Ph., Gelb J.</p>

	<b>URL</b>	<a href="http://journals.openedition.org/cybergegeo/docannexe/image/32391/img-4.jpg">http://journals.openedition.org/cybergegeo/docannexe/image/32391/img-4.jpg</a>
	<b>Fichier</b>	image/jpeg, 324k
	<b>Titre</b>	Figure 5 : Identification des objets du diagramme UML dans l'interface de l'atlas-Web
	<b>Crédits</b>	Source : Apparicio Ph., Gelb J.
	<b>URL</b>	<a href="http://journals.openedition.org/cybergegeo/docannexe/image/32391/img-5.jpg">http://journals.openedition.org/cybergegeo/docannexe/image/32391/img-5.jpg</a>
	<b>Fichier</b>	image/jpeg, 304k
	<b>Titre</b>	Tableau 1 : Description des icônes utilisées dans l'application
	<b>Crédits</b>	Source : Apparicio Ph., Gelb J.
	<b>URL</b>	<a href="http://journals.openedition.org/cybergegeo/docannexe/image/32391/img-6.png">http://journals.openedition.org/cybergegeo/docannexe/image/32391/img-6.png</a>
	<b>Fichier</b>	image/png, 221k
	<b>Titre</b>	Figure 6 : Interface de l'atlas-Web
	<b>Légende</b>	Source : Apparicio Ph., Gelb J.
	<b>URL</b>	<a href="http://journals.openedition.org/cybergegeo/docannexe/image/32391/img-7.jpg">http://journals.openedition.org/cybergegeo/docannexe/image/32391/img-7.jpg</a>
	<b>Fichier</b>	image/jpeg, 444k
	<b>Titre</b>	Figure 7 : Trajets du centre-ville vers le quartier Rosemont (heure de pointe de soir)
	<b>Crédits</b>	Source : Apparicio Ph., Gelb J.
	<b>URL</b>	<a href="http://journals.openedition.org/cybergegeo/docannexe/image/32391/img-8.jpg">http://journals.openedition.org/cybergegeo/docannexe/image/32391/img-8.jpg</a>
	<b>Fichier</b>	image/jpeg, 816k
	<b>Titre</b>	Figure 8 : Trajets de Saint-Léonard vers l'université McGill (heure de pointe du matin)
	<b>Crédits</b>	Source : Apparicio Ph., Gelb J.
	<b>URL</b>	<a href="http://journals.openedition.org/cybergegeo/docannexe/image/32391/img-9.jpg">http://journals.openedition.org/cybergegeo/docannexe/image/32391/img-9.jpg</a>
	<b>Fichier</b>	image/jpeg, 378k

## Pour citer cet article

### Référence électronique

Philippe Apparicio, Jérémy Gelb et Marie-Ève Mathieu, « Un atlas-web pour comparer l'exposition individuelle aux pollutions atmosphérique et sonore selon le mode de transport », *Cybergegeo* : *European Journal of Geography* [En ligne], GeOpenMod - Modèles et logiciels, document 903, mis en ligne le 10 juin 2019, consulté le 21 octobre 2019. URL : <http://journals.openedition.org/cybergegeo/32391> ; DOI : 10.4000/cybergegeo.32391

## Auteurs

### Philippe Apparicio

Professeur titulaire

Laboratoire d'équité environnementale (LAEQ), Institut national de la recherche scientifique, 385 rue Sherbrooke Est, Montréal (QC), Canada, H2X 1E3

[Philippe.apparicio@ucs.inrs.ca](mailto:Philippe.apparicio@ucs.inrs.ca)

### Articles du même auteur

**A comparison of two methods for classifying trajectories: a case study on neighborhood poverty at the intra-metropolitan level in Montreal** [Texte intégral]

Article 727

Paru dans *Cybergegeo* : *European Journal of Geography*, Espace, Société, Territoire

**La répartition de la population âgée dans huit métropoles canadiennes de 1981 à 2006 : un groupe de moins en moins ségrégué** [Texte intégral]

Article 639

Paru dans *Cybergegeo* : *European Journal of Geography*, Espace, Société, Territoire

**Segregation Analyzer: a C#.Net application for calculating residential segregation indices**

[Texte intégral]

Article 414

Paru dans *Cybergeo : European Journal of Geography*, Systèmes, Modélisation, Géostatistiques**Déploiement d'atlas interactifs sur Internet : nouvelles avenues avec le Scalable Vector Graphics, le C# et l'ASP.Net** [Texte intégral]

Article 340

Paru dans *Cybergeo : European Journal of Geography*, Dossiers**Les indices de ségrégation résidentielle : un outil intégré dans un système d'information géographique** [Texte intégral]

Article 134

Paru dans *Cybergeo : European Journal of Geography*, Espace, Société, Territoire**Jérémy Gelb**

Laboratoire d'équité environnementale (LAEQ), Institut national de la recherche scientifique, 385 rue Sherbrooke Est, Montréal (Québec), Canada, H2X 1E3

Jeremy.Gelb@ucs.inrs.ca

**Marie-Ève Mathieu**

Professeure

Laboratoire Activité Physique et Santé (LAPS), École de kinésiologie et des sciences de l'activité physique, Université de Montréal, 2100, boulevard Édouard-Montpetit, Montréal (Québec), Canada, H3T 1J4

me.mathieu@umontreal.ca

---

**Droits d'auteur**

La revue *Cybergeo* est mise à disposition selon les termes de la Licence Creative Commons Attribution - Pas d'Utilisation Commerciale - Pas de Modification 3.0 non transposé.

Ce site utilise des cookies et collecte des informations personnelles vous concernant.

Pour plus de précisions, nous vous invitons à consulter notre politique de confidentialité (mise à jour le 25 juin 2018).

En poursuivant votre navigation, vous acceptez l'utilisation des cookies. Fermer