

MASTER 1

Observation de la Terre et Géomatique

Travail d'Étude et de Recherche

2024-2025

Misaki UOZUMI HARRAULT

Sujet : Vers une cartographie des temps (Sujet 15)

Encadrants : **Agathe COLLARD**
Responsable du pôle mobilité décarbonée
Agence du climat sur l'Eurométropole de Strasbourg
2 avenue de la Forêt-Noire, 67000 Strasbourg

Noémie MEYER
Chargée de mission thématique vélo
Direction Mobilité Service Planification et organisation des mobilités
Ville et Eurométropole de Strasbourg
1 parc de l'Étoile 67076 Strasbourg Cedex

Olivier FINANCE
Laboratoire Image, Ville, Environnement
UMR7362 CNRS-Unistra
3 rue de l'Argonne F-67000 Strasbourg

Membres du jury : **Paul SALZE, Kenji FUJIKI, Olivier FINANCE**

Remerciements

Je tiens à remercier chaleureusement mes trois encadrants : Madame COLLARD, Madame MEYER et Monsieur FINANCE, pour leur accompagnement, leurs conseils et leurs disponibilités tout au long de ce mémoire. Leurs précieuses aides, tant contextuelles que techniques, ainsi que nos échanges collaboratifs, m'ont non seulement guidée dans la rédaction de ce travail, mais ont également éveillé davantage mon intérêt pour cette thématique essentielle. Je remercie également l'ensemble des enseignants et camarades qui m'ont transmis des connaissances et des réflexions précieuses tout au long de ma vie scolaire. Je suis reconnaissante envers toutes les personnes qui m'ont accompagnée de près ou de loin, y compris mes proches, pour leur encouragement constant.

Résumé

Français : Les cartes des temps de déplacement, qui affichent les durées de trajet entre points d'intérêt de manière simplifiée et visuelle, se développent de plus en plus dans les villes européennes comme Pontevedra en Espagne ou Lyon en France. Les méthodes manuelles de représentation cartographique de ces cartes reposent souvent sur des processus longs, peu reproductibles et difficilement généralisables. Ce mémoire propose une méthodologie semi-automatique et multi-échelle pour produire de telles cartes, selon plusieurs modes de transport (marche, vélo, tram et voiture). Basée exclusivement sur des données ouvertes (GTFS, OSM et open data national et local) et des outils libres (Python, QGIS et ORS API), l'approche est testée sur le territoire de l'Eurométropole de Strasbourg. La méthode intègre un traitement automatisé des données ainsi que la production de cartes statiques et interactives. L'étude est structurée autour de trois axes : la qualité des données et des outils, la pertinence spatiale (choix des POIs et des échelles), et la répliquabilité à d'autres territoires ou périodes. Les résultats mettent en lumière la pertinence technique et l'intérêt opérationnel de ce type de cartographie dans le cadre de la transition vers une mobilité décarbonée. En offrant une lecture claire, accessible et comparative des temps de déplacement, ce mémoire constitue un outil de communication puissant au service d'une mobilité durable pour de nombreux territoires.

English : Travel time maps, which visually and intuitively represent the duration of journeys between points of interest, are increasingly being adopted in European cities such as Pontevedra in Spain and Lyon in France. However, traditional manual methods for producing such maps often rely on time-consuming processes that are difficult to reproduce and generalize. This study proposes a semi-automated, multi-scale methodology for generating these maps across various modes of transport (walking, cycling, tram, and car). Relying exclusively on open data sources (GTFS, OSM, and national/local open data) and open-source tools (Python, QGIS, and ORS API), the method is applied to Eurométropole de Strasbourg. The approach includes automated data processing as well as the generation of static and interactive maps. The study is structured around three main axes: the quality of data and tools, the spatial relevance (selection of POIs and geographic scales), and the replicability to other territories or time periods. The findings highlight the technical relevance and operational value of this type of cartography in supporting the transition to low-carbon mobility. By providing a clear, accessible, and comparative visualization of travel times, this study offers a powerful communication tool for advancing sustainable mobility across diverse urban contexts.

Mots-clés

Français : Mobilité décarbonée, Mode de transport, Temps de déplacement, Théorie des graphes, Carte des temps, Cartographie automatisée, Carte interactive, Python, OpenStreetMap, Openrouteservice, Strasbourg, Eurométropole de Strasbourg

English : Decarbonising mobility, Mode of transport, Travel time, Graph theory, Time travel map, Automate mapping, Interactive cartography, Python, OpenStreetMap, Openrouteservice, Strasbourg, Eurométropole de Strasbourg

Table des matières

Remerciements	3
Résumé	3
Mots-clés	4
Table des matières	5
Table des illustrations	7
Liste de notations	9
Liste des symboles et unités de mesure	9
Introduction	10
Contexte général et motivation	10
Buts globaux du mémoire	12
Enjeux autour du sujet et Problématique du mémoire	13
Objectifs et Axes d'intervention du mémoire	15
Annonce du plan	15
Chapitre 1 : Cadrage de l'étude	16
1. État de connaissance : mobilité et cartographie	16
1.A. Diversité des modes de transport — Quels modes sont durables ?	16
1.B. Aménagements et infrastructures pour une mobilité durable	16
1.C. Représentation des réseaux de transport : théorie des graphes	17
1.D. Pour une communication effective via une carte : lisibilité, échelles et POIs	18
1.D.1. Lisibilité	18
1.D.2. Échelles	19
1.D.3. POIs	19
2. État d'art : contextes et méthodologies des autres villes	19
2.A. « Legible London » à Londres : cartes des temps entre stations de métro	19
2.B. « Metrominuto » de Pontevedra : un pionnier exemplaire des politiques de la mobilité et de la cartographie des temps	20
2.C. « Plan des Modes Actifs » et « Rose des Modes™ » de Lyon : favorisation de la multimodalité	21
2.D. Autres références	22
Chapitre 2 : Méthodologie	23
3. Territoire d'étude de cas : Eurométropole de Strasbourg	23
3.A. Présentation générale	23
3.B. Morphologie urbaine et Réseaux de transport	23
3.C. Défis de la mobilité : Révolution des mobilités	23
4. Données et outils	25
4.A. Données utilisées	25
4.A.1. General Transit Feed Specification (GTFS)	25
4.A.2. Données disponibles à l'échelle nationale	26
4.A.3. Données locales : Open Data EMS	26
4.B. Outils utilisés	27
4.B.1. OpenStreetMap comme base de référence	27
4.B.2. Openrouteservice : moteur de calcul des temps	27
4.B.3. Bibliothèques Python utilisées	29

5. Méthodologie automatisée la plus possible	29
5.A. Démarches globales	29
5.B. Traitement Python 1 : POIs de base sur le réseau TC	32
5.B.1. Prétraitement des données de GTFS et Calcul de temps du TC	32
5.B.2. Calcul des temps à pied, à vélo et en voiture	33
5.B.3. Mise en ensemble dans un tableau et Export des résultats	33
5.C. Traitement QGIS : ajout de POIs en dehors du réseau TC	34
5.C.1. Préparation des données	35
5.C.2. Préparation des POIs : création des grilles et sélection des POIs	35
5.C.3. Création manuelle des segments	37
5.D. Traitement Python 2 : calculs en dehors du réseau TC	38
6. Visualisation	39
6.A. Types de visualisations	39
6.B. Choix du fond de carte	39
6.C. Choix sémantiques	40
6.D. Choix du design	41
7. Synthèse de la méthodologie	42
Chapitre 3 : Résultat	43
8. Résultats cartographiques : focus fonctionnel et géographique	43
8.A. Cartes statiques	43
8.B. Cartes interactives	45
8.C. Observations géographiques	46
Chapitre 4 : Discussion	48
9. Bénéfices et limites de l'étude	48
9.A. Apports méthodologiques et thématiques de l'étude	48
9.A.1. Bénéfices méthodologiques	48
9.A.2. Bénéfices thématiques	48
9.B. Évaluation de la validité des temps calculés	49
9.C. Limites et contraintes : données, outils et méthodologie	49
9.C.1. Données GTFS	49
9.C.2. OSM et ORS : qualité des données, POIs et calculs	49
9.C.3. Contraintes techniques personnelles	51
10. Réplicabilité	51
10.A. Réplicabilité géographique : application à d'autres territoires	51
10.B. Réplicabilité temporelle : actualisation et mise à jour des données	52
11. Perspectives et améliorations possibles	52
11.A. Pour une meilleure utilisation : idées de communication et de promotion	53
11.B. Pour aller plus loin thématiquement	53
11.C. Pour aller plus loin techniquement	55
Conclusion	57
Annexe	58
Bibliographie	77
Sitographie	79

Table des illustrations

Figure

Figure 1 : Exemples initiatives de cartes des temps (à gauche : Metrominuto de Pontevedra, à droite : Carte ma ville à pied de Lyon)	12
Figure 2 : 4 types de cartographie des temps de trajet de la ville d'Enschede. (a) : Étiquettes le long des segments de réseau. (b) : Étiquettes aux destinations. (c) : Isochrones. (d) : Un cartogramme temporel. (Ullah R. et Kraak, M-J., 2014)	12
Figure 3 : Schéma relationnel des enjeux autour de ce mémoire : automatisation de la cartographie des temps d'un territoire	13
Figure 4 : Schéma comparatif des modes de transport d'un système unhealthy vers un système healthy (OCDE, 2021)	16
Figure 5 : Réseaux de métro, tramways, trolleybus en France mi-2020 (Wikipédia, 2025c)	17
Figure 6 : Représentation d'un réseau sous forme de graphe (Kim V-M., 2021)	18
Figure 7 : Cartes des temps de marche entre stations du métro londonien par Transport for London (à gauche : type carte géographique (2025b), à droite : type plan métro (2025a))	20
Figure 8 : Grilles typiques utilisées pour structurer une carte Metrominuto (Ciudades que Caminan, s.d.)	21
Figure 9 : Carte interactive des temps des déplacements à pied	21
Figure 10 : Extrait du Plan des modes actifs du réseau TCL	22
Figure 11 : Part modale de la voiture pour des déplacements inférieurs à 5 km des résidents de l'EMS à gauche & Répartition des déplacements dans l'EMS selon la localisation du ménage, par tranche de distance et par mode à droite (source : EMD 2009) (Eurométropole de Strasbourg, 2019)	24
Figure 12 : Modèle relationnel simplifié des données GTFS utilisées (gras : attributs utilisés, PK : Primary Key, FK : Foreign Key)	26
Figure 13 : Recherche des distances et des temps pertinents par mode pour considérer une meilleure échelles et les choix méthodologiques	30
Figure 14 : Ensemble des démarches avec des explications schématiques simplifiées selon les étapes et les échelles	31
Figure 15 : Démarches de l'étape 1 : données, traitements et sorties attendues	32
Figure 16 : Regroupement des arrêts par leur centroïde (les coordonnées dans le fichier stop_times.txt en jaune & la nouvelle coordonnée après regroupement en brun)	33
Figure 17 : Visualisation du Tableau 2 sur Python (trajets_tram_comparaison_modes.csv)	34
Figure 18 : Démarches de l'étape 2 : données, traitements et sorties attendues	34
Figure 19 : Méthodologie de la sélection des POIs finaux (filtrés) adaptés aux territoires et échelles	36
Figure 20 : Types d'arrêts distingués sur le plan détaillé du réseau urbain de Strasbourg	37
Figure 21 : Résultat de la « Distance au plus proche centre (ligne vers centre) » : les POIs sauf arrêts de tram cherchent un arrêt de tram le plus proche (à gauche) & Les structure des réseaux (fond de	

carte) et segments réalisés autour de la zone de deux POIs, la Lampertheim Mairie et de la gare Vendenheim (à droite)	37
Figure 22 : Démarches de l'étape 3 jusqu'à (7) et de l'étape 4 pour (8)&(9) : données, traitements et sorties attendues	38
Figure 23 : Légende des segments de la carte interactive : classement des temps et type des lignes	40
Figure 24 : Distributions des valeurs (temps sur l'axe verticale) grâce aux nuages de point (exemple de la carte à l'échelle 2)	40
Figure 25 : Exemples de popups dans la carte interactive (en haut : informations sur les POIs, en bas : détails des temps modaux)	41
Figure 26 : Synthèse schématique de la logique du calcul et de la représentation visuelle	42
Figure 27 : À gauche, éléments constitutifs d'une carte statique & exemple de comparaison vélo/voiture à l'échelle 2 (réseau de tram de Strasbourg)	43
Figure 28 : Exemple de comparaison par curseur glissant	44
Figure 29 : Comparaison des temps à vélo aux trois échelles étudiées	44
Figure 30 : Interface type d'une carte interactive à l'échelle 3 (EMS) et explication des éléments fonctionnels	45
Figure 31 : Affichage des POIs du fond d'OSM Standard autour de l'arrêt de tram Homme de Fer	46
Figure 32 : Comparaison des itinéraires et temps : Marche (jaune) vs Tram (bleu) à gauche & Vélo (vert) vs Tram (bleu) à droite	46
Figure 33 : Couche de la comparaison des temps : l'échelle 2 à gauche l'échelle 3 à droite	47
Figure 34 : Histogramme de la distribution des différences de temps	47
Figure 35 : Carte transfrontalière des RPN vélo du Bassin minier (Valenciennes Métropole, s.d.)	54
Figure 36 : Carte interactive des RPN vélo autour de Dunkerque	55
 <u>Tableau</u>	
Tableau 1 : Liste de données utilisées	25
Tableau 2 : Structure du fichier final de l'étape 1 (trajets_tram_comparaison_modes.csv)	34
Tableau 3 : Structure du fichier final de l'étape 3	38
Tableau 4 : Synthèse de la méthodologie construite	42
Tableau 5 : Synthèse des cartes produites et informations contenues (V = visualisation, P = popup interactive)	43
Tableau 6 : Vitesses moyennes issues de 10 segments échantillons, par mode de transport et moteur de calcul	49

Liste de notations

Organismes, établissements, institutions et collectivités

- **Cerema** : Centre d'études et d'expertise sur les risques, l'environnement, la mobilité et l'aménagement
- **CTS** : Compagnie des Transports Strasbourgeois
- **EMS** : Eurométropole de Strasbourg
- **EPCI** : Établissement public de coopération intercommunale
- **FNTV** : Fédération Nationale des Transports de Voyageurs
- **IGN** : Institut national de l'information géographique et forestière
- **ONU** : Organisation des Nations unies
- **UE** : Union européenne

Thèmes liés à l'écologie et à la mobilité

- **CO₂** : Dioxyde de carbone
- **GES** : Gaz à effet de serre
- **RPN** : Réseau points-nœuds
- **TC** : Transport en commun
- **TCL** : Transports en Commun Lyonnais

Méthodologie et outils techniques

- **API** : Application Programming Interface (interface de programmation)
- **D** : Point de destination
- **DF** : DataFrame
- **GDF** : GeoDataFrame
- **Google Colab** : Google Colaboratory
- **GTFS** : General Transit Feed Specification
- **O** : Point d'origine
- **OD** : Origine - Destination
- **ORS** : OpenRouteService
- **OSM** : OpenStreetMap
- **OTP** : OpenTripPlanner
- **POI** : Point of Interest (Point d'intérêt)
- **Shp** : Shapefile
- **SCR** : Système de coordonnées de référence

Liste des symboles et unités de mesure

- **km** : kilomètre
- **m** : mètre
- **km²** : kilomètre carré
- **hab./km²** : habitants par kilomètre carré
- **h** : heure
- **min** : minute
- **km/h** : kilomètre par heure

Introduction

Contexte général et motivation

Mobilité et Décarbonation

Aujourd'hui, la « **mobilité durable** » et la « **mobilité décarbonée** » sont au cœur des sujets « **mobilité** », que ce soit en France, en Europe, ou à l'échelle mondiale. L'Organisation des Nations unies (ONU) (s.d.) définit la « **décarbonation** » comme « l'ensemble des mesures et des techniques permettant de réduire les émissions de dioxyde de carbone. » En vertu de la loi européenne sur le climat, l'Union européenne (UE) s'est engagée à atteindre la neutralité carbone d'ici 2050, avec pour objectif de limiter le réchauffement climatique à 1,5 °C par rapport aux niveaux préindustriels : « **Zéro Emission Nette** ». Cet engagement s'inscrit dans le cadre de l'Accord de Paris, signé par 195 pays, dont les membres de l'UE. Selon l'UE, la « **neutralité carbone** » signifie « un équilibre entre les émissions de carbone produites et leur absorption dans l'atmosphère par les puits de carbone (Duch Guillot J., 2023). »

Les émissions annuelles de CO₂ ont atteint 37,8 Gigatonnes (Duch Guillot J., 2023) à l'échelle mondiale et 60,4 Mégatonnes au niveau national en 2021 (Baudeau M., 2022). En 2018, la décomposition de l'empreinte carbone par poste de consommation (par an et par personne) montre que les **déplacements** représentent environ 30 % des émissions totales (Annexe 1) (Baudeau M., 2022). Réfléchir aux pratiques de mobilité apparaît donc comme un levier crucial pour la décarbonisation. La mobilité désigne un changement de lieu accompli par une ou des personnes. Les mobilités sont distinguées en trois grands types : (1) les mobilités définitives ou de longues durées, appelées migrations (internationales si une frontière est franchie, intérieures sinon), (2) les mobilités plus temporaires comme le tourisme et (3) les mobilités quotidiennes (Géoconfluence, 2024). Ce mémoire s'intéresse au troisième champ de mobilité essentiel dans notre vie, qui relève des comportements quotidiens tels que les courses, les loisirs ou des déplacements domicile et travail.

Causes et Solutions : Politiques publiques vers la mobilité écologique

Avec l'essor brut de l'urbanisation et de l'usage individuel de l'automobile dès les années 1950-60, les distances parcourues en voiture ont fortement augmenté. Bien que la voiture individuelle offre une certaine liberté de déplacement, ses impacts négatifs tels que la pollution de l'air, l'occupation de l'espace et l'insécurité routière sont largement reconnus. En particulier, la pollution atmosphérique constitue un risque majeur pour la santé publique. Face à ces problèmes, des efforts importants ont été déployés en France depuis une trentaine d'années pour limiter l'usage de la voiture et détacher le pays de la société dépend des automobiles, notamment par le développement des transports en commun (TC) et des infrastructures cyclables.

En effet, en France, « la Loi d'orientation des mobilités de 2019 » a tracé une trajectoire de décarbonation avec trois piliers : (1) investir plus et mieux dans les transports du quotidien, (2) faciliter et encourager le déploiement de nouvelles solutions pour permettre à tous de se déplacer et (3) engager la transition vers une mobilité plus propre. « Les pouvoirs publics jouent évidemment un rôle important, pour impulser des pratiques de mobilités durables visant en particulier à diminuer l'usage des voitures individuelles et à développer l'usage des transports en commun seuls ou en combinaison avec d'autres modes de mobilité tels que la marche, le vélo, l'autopartage, le covoiturage... (Aknin P. et al., 2018) » Voiture ou train ? Bus, vélo ou marche ? Le processus de choix modal repose sur une combinaison complexe de facteurs socio-démographiques,

socio-psychologiques et spatiaux (De Witte A. et al., 2013). Cette complexité est accentuée « dans la diversification des offres modales au sein d'un même réseau de transport collectif, particulièrement en milieu urbain, puisque les activités sont de plus en plus segmentées et ne correspondent plus au modèle routinier domicile-travail (Kim V-M., 2021). » Dans ce contexte, avec quelles manières concrètes les politiques publiques peuvent-elles favoriser la transition vers des modes de déplacement plus durables ?

Des approches issues de la Norm Activation Theory (NAT) et de la Social Norms Theory ont déjà montré leur efficacité dans ce type de politique. Par exemple, Mundaca L. et al. (2022) soulignent que la complémentarité entre les services d'autopartage et les modes de transport décarbonés, en particulier les mobilités actives, joue un rôle significatif. Par ailleurs, Liu Y. et al. (2017) rappellent que la conscience des conséquences et le sentiment de responsabilité personnelle influencent les normes personnelles, qui à leur tour conditionnent l'intention de réduire l'usage de la voiture. L'un des leviers identifiés ici est la **diffusion d'informations** claires et accessibles, permettant aux usagers de comprendre les avantages concrets des alternatives à la voiture.

La cartographie, un outil de communication d'informations

La **cartographie** peut constituer un des outils puissants de communication et de sensibilisation pour diffuser des informations aux publics. « Les cartes constituent des modèles simples d'un monde réel » et permettent de mettre en évidence les relations spatiales et les associations surfaciques (Kansky K-J. et Beauguitte L., 2023). Ainsi, les cartes (les visualisations des informations) simplifient la réalité et, par conséquent, facilitent aux gens la compréhension et leurs appropriations.

Pourquoi les cartes des « temps » ?

Certaines collectivités ont déjà, en effet, intégré des cartes des temps de déplacement dans leur stratégie de transition. A titre d'exemple, la ville de Pontevedra en Espagne est connue pour sa réussite en matière de mobilité piétonne grâce à son initiative MetroMinuto (Figure 1 à gauche), une carte inspirée des plans de métro, destinée à encourager la marche (Pazos-Otón M. et al., 2024). Metrominuto s'agit d'une carte qui mesure les distances et les temps de trajet moyens entre des points en reliant les nœuds par chaque arc. En France, la Métropole de Lyon a connu un certain succès avec des cartes des temps, à la fois en combinant mobilités actives et transports en commun, qui permettent de visualiser les alternatives à la voiture (Figure 1 à droite). Cet outil a été créé dans le but de mettre à disposition de chacun les informations essentielles pour choisir les modalités de son parcours, à savoir ses alternatives de mobilité ainsi que la durée du trajet relatif à chaque mode (Amandine G., 2022). Quels sont les intérêts de transmettre aux gens les informations sur les « temps » ? Curtis C. et Scheurer J. (2010) mettent en avant la simplicité de l'utilisation d'autres mesures, notamment le temps des déplacements que la distance pour quantifier les obstacles aux déplacements. De plus, Widmer G. (2009) insiste que « parmi l'ensemble de facteurs de choix modal, le temps de déplacement occupe une place très importante, notamment dans le cadre de la mobilité quotidienne. »

En effet, les deux bons exemples cités ci-dessus mettent en évidence la familiarité des perceptions des distances entre deux points grâce à l'affichage des temps des déplacements. Nous percevons souvent des distances plus grandes que la réalité en termes de temps, bien que ce ne soit pas le cas en réalité (Amandine G., 2022). C'est-à-dire, parfois, il n'y a pas une grande distance entre deux points que nous imaginons, ce qui conduit en conclusion que la marche ou le vélo sont plus

efficaces que la conduite. Les cartes des temps peuvent donc fournir un bon outil de contre-argument à ces perceptions erronées.

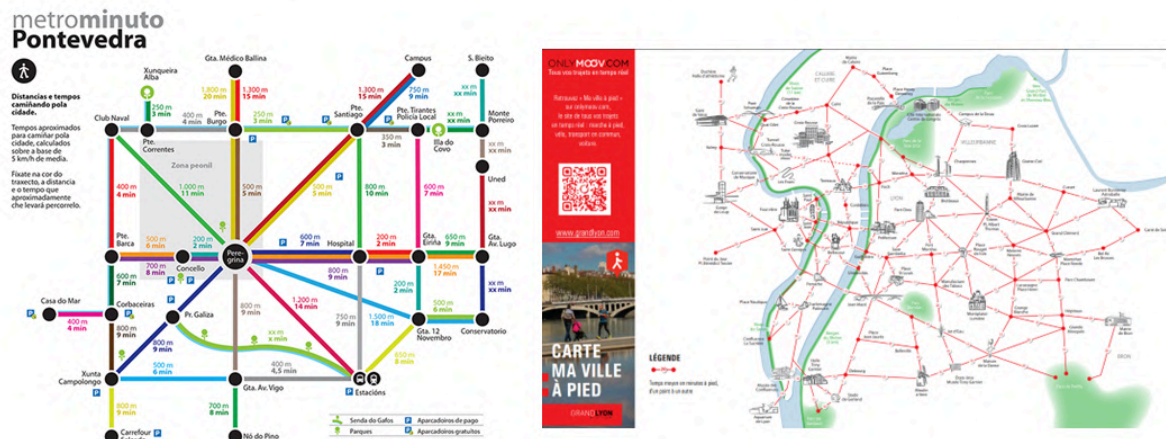


Figure 1 : Exemples initiatives de cartes des temps
(à gauche : Metrominuto de Pontevedra, à droite : Carte ma ville à pied de Lyon)

Buts globaux du mémoire

De ce fait, ce mémoire vise à concevoir une méthodologie la plus automatisable possible, puis à produire une visualisation cartographique des temps de déplacement, en prenant l'exemple du territoire de Strasbourg.

Il convient ici de souligner clairement la nature spécifique de la carte réalisée. Comme l'a montré l'étude d'Ullah R. et Kraak, M-J. (2014), il y a plusieurs types de cartes des temps (Figure 2). Ici, il ne s'agit ni d'une carte d'itinéraires optimisés (du type navigation d'itinéraire OD comme dans Google Maps), ni d'une carte d'isochrones (représentant des zones atteignables depuis un point selon un seuil de temps donné), mais bien d'une carte des temps structurée à partir de la logique des graphes, comme « Metrominuto ». Ce type de carte distance-temps met en scène des segments entre des POIs représentant chacun un temps de parcours en graphe simplifié et lisible.

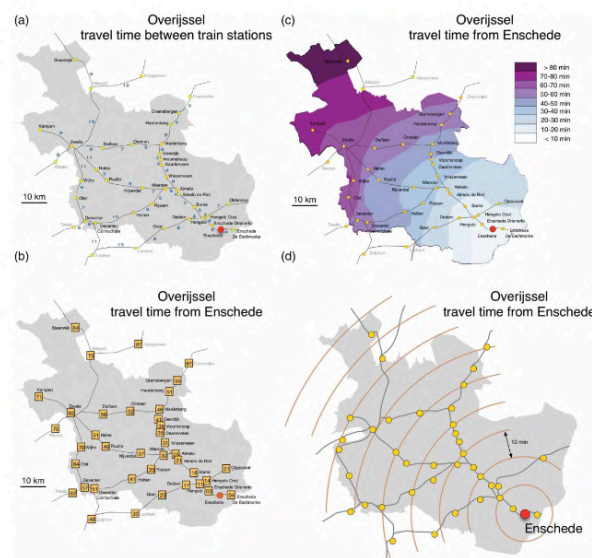


Figure 2 : 4 types de cartographie des temps de trajet de la ville d'Enschede. (a) : Étiquettes le long des segments de réseau. (b) : Étiquettes aux destinations. (c) : Isochrones. (d) : Un cartogramme temporel. (Ullah R. et Kraak, M-J., 2014)

Le but n'est donc pas de guider un individu d'un point de départ vers une destination finale, mais plutôt de représenter la proximité fonctionnelle entre différents points urbains selon plusieurs modes de transport, et de donner à voir les potentiels de mobilité douce d'un simple coup d'œil. Il s'agit ainsi d'un outil qui donne des idées variées sur les modes de déplacements afin d'accompagner enfin les habitants vers une mobilité plus durable.

Cerema (2023) propose trois approches de la mobilité décarbonée :

- (1) Éviter : diminuer les distances parcourues avec des modes motorisés ;
- (2) Changer : faire émerger un système de mobilité plus sobre ;
- (3) Améliorer : réduire la consommation énergétique et favoriser les technologies moins émissives.

Ce mémoire s'applique donc principalement dans la deuxième approche, en aidant à rendre visibles des alternatives et adaptées aux spécificités territoriales.

Enjeux autour du sujet et Problématique du mémoire

La carte des temps de déplacement s'inscrit au croisement de plusieurs enjeux majeurs du point de vue thématique (enjeux environnementaux, sanitaires, politiques, sociaux et spatiaux) et méthodologique (enjeux des données, outils et méthodes) (Figure 3).

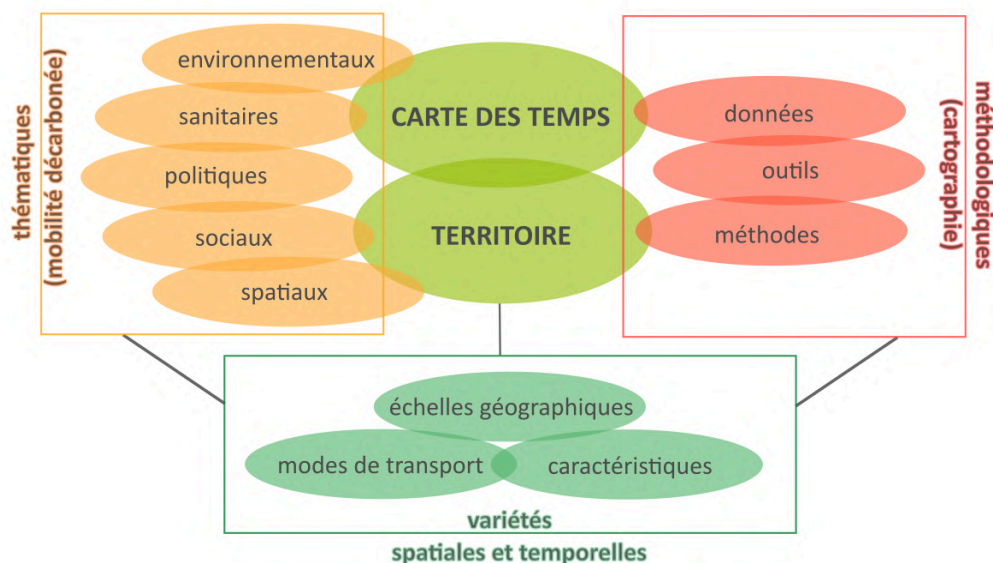


Figure 3 : Schéma relationnel des enjeux autour de ce mémoire : automatisation de la cartographie des temps d'un territoire

Enjeux thématiques : mobilité décarbonée

Les actions vers la mobilité décarbonée peuvent contribuer premièrement à l'environnement en réduisant les émissions de gaz à effet de serre (GES). De même, cela peut encourager la sobriété énergétique. Ces choix ont également des retombées sanitaires significatives. Les impacts de la pollution de l'air sur la santé sont connus. Les véhicules routiers sont les principaux générateurs de la pollution qui peut être à l'origine ou aggraver des maladies respiratoires ou cardiovasculaires. « En France, plus de 40 000 décès prématurés sont ainsi imputables, chaque année, aux particules fines, et 7 000 décès imputables aux oxydes d'azote (Ministère de l'Aménagement du territoire et de la

Décentralisation. et Ministère de la Transition écologique, de la Biodiversité, de la Forêt, de la Mer et de la Pêche., 2025). »

En outre, la carte des temps a une relation avec l'enjeu politique sur la prise de décision publique par exemple en matière d'aménagement urbain et de planification des transports. Cette diffusion des informations participe aussi aux enjeux spatiaux et sociaux en exposant les défis de l'équité en matière de mobilité, de l'organisation de l'espace, et des modes de vie des citoyens.

Enjeux méthodologiques : cartographie et automatisation

D'un côté, les données de mobilité sont souvent massives, hétérogènes, multimodales et soulèvent des enjeux cruciaux en termes de qualité, accessibilité et interopérabilité. Elles nécessitent des outils avancés et des méthodologies intégrées pour leur traitement, croisement et visualisation, puisque leurs sources, formats, échelles voire temporalité sont multiples. De l'autre, les manipulations de ce type d'outils ainsi que leur accessibilité ne sont pas toujours faciles. Il est nécessaire de connaître leurs performances, coûts et fiabilités. La cartographie par ces données et ces outils peut donc comporter plusieurs étapes nécessitant le prétraitement manuel et un temps de travail important en surjetant aux erreurs humaines.

La conception d'une méthodologie la plus automatisable possible jouera donc un rôle important face aux défis d'un gain de temps considérable et de la reproductibilité à d'autres territoires et à la mise à jour des données. Grâce aux progrès informatiques et logiciels, nous pouvons aujourd'hui traiter presque toutes les données géographiques et produire des cartes qui représentent visuellement les phénomènes complexes dans l'espace (Antoni J-P. et al., 2004). Il est désormais possible d'effectuer une analyse de mobilité en combinant des SIG open source, des données spatiales ouvertes et des API Web qui fournissent des services de traitement d'informations géographiques. Il existe plusieurs façons de procéder, mais l'une d'entre elles consiste à l'utilisation de Python. Jusqu'à il y a quelques années au moins, pour effectuer une analyse basée sur la distance du réseau routier, il était courant d'utiliser des logiciels SIG tels que ArcGIS ou ceux payants (Masuyama A., 2022). Aujourd'hui, Python est utilisé dans de nombreuses études par ses avantages : le langage est populaire, accessible aux débutants, puissant, rapide, gratuit et open source (Boeing G., 2017).

Pour la carte des temps, la méthodologie de production, et plus encore leur automatisation, reste peu documentée et rarement partagée au public, bien que la recherche d'itinéraire et de simulation soit largement développée. Maintenant qu'une nécessité et une importance de ce type de carte croissent dans les contextes contemporains, il est intéressant d'inventer une méthodologie la plus automatisable.

Ainsi, la carte des temps, donc la visualisation finale, sera enrichissante pour les habitants et la méthodologie sera utile pour les techniciens et les acteurs concernés pour la construction de la carte. Ce mémoire répondra donc, plus concrètement, à la problématique suivante : **quels méthodes et outils permettent d'automatiser efficacement la production de cartes des temps des déplacements, adaptées aux modes de transport, aux différentes échelles géographiques et aux caractéristiques des territoires, afin de favoriser une meilleure compréhension et la promotion de la mobilité décarbonée auprès des habitants ? : le cas de Strasbourg.**

Objectifs et Axes d'intervention du mémoire

Ce mémoire s'articule autour de trois questions de recherche émanant d'axes croisés entre les techniques (la méthodologie automatisée, l'outil et les données) et les variabilités spatiales et territoriales (différences des modes, des échelles et des caractéristiques d'un territoire) :

- (1) Explorer les données et les outils fiables, propres et faciles à accéder, traiter, manipuler et calculer ;
- (2) Chercher les échelles géographiques, les types et nombres de POIs et leurs positions pertinentes pour la meilleure compréhension ;
- (3) Examiner l'impact et la reproductibilité des différences de la morphologie urbaine et la taille (caractéristiques territoriales) d'un territoire ciblé sur la méthodologie construite.

Le défi géographique de ce travail se manifeste par une structure complexe des réseaux de transport et par la diversité et le nombre important des POIs. Le défi méthodologique fait apparaître le nombre important des données et le croisement des données et des outils.

Annonce du plan

Ce mémoire s'articule autour de quatre chapitres principaux. Le chapitre 1 fournit à ce mémoire un cadrage théorique et méthodologique, afin de faire ressortir ce qui doit y être étudié dans ce mémoire, en rappelant les notions clés et en examinant des études inspirantes dans d'autres villes européennes. Le chapitre 2 développe la méthodologie construite. Il présente d'abord le territoire d'étude de cas, les données et outils mobilisés, puis détaille les traitements appliqués sous Python et QGIS pour la production semi-automatique de cartes des temps, ainsi que les choix de visualisation. Le chapitre 3 expose les résultats cartographiques obtenus, sous forme de cartes statiques et interactives, en les analysant du point de vue géographique et fonctionnel, afin de souligner les apports concrets des outils produits. Enfin, le chapitre 4 met en lumière, du point de vue thématique et méthodologique, une discussion critique des apports, des limites, de la répliquabilité et des perspectives de ce projet.

Chapitre 1 : Cadrage de l'étude

1. État de connaissance : mobilité et cartographie

1.A. Diversité des modes de transport — Quels modes sont durables ?

Aujourd'hui, la mobilité urbaine française se caractérise par une diversité de modes de déplacement. La mobilité décarbonée favorise les déplacements générant peu ou pas d'émissions de GES. Trois grandes catégories de modes de transport durables sont généralement reconnues : les modes actifs (marche, vélo), les TC (tram, bus, métro, train) et les modes partagés (covoiturage, autopartage). La Figure 4 illustre la transition souhaitée d'un système de transport « unhealthy » vers un système « healthy » (OCDE, 2021), à travers une comparaison des usages modaux dans les systèmes actuels (à gauche) et les systèmes durables (à droite).

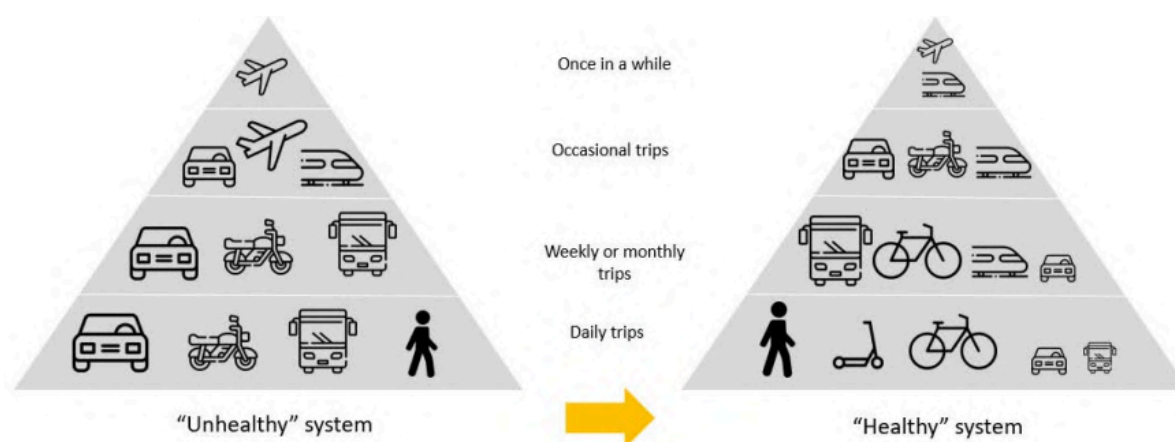


Figure 4 : Schéma comparatif des modes de transport d'un système unhealthy vers un système healthy (OCDE, 2021)

D'après Brand C. et al. (2021), les individus qui privilégient la marche ou le vélo présentent des émissions quotidiennes de CO₂ significativement plus faibles. En effet, éviter un trajet en voiture permet de réduire les émissions de 62 %, tandis que chaque trajet effectué à vélo entraîne une baisse d'environ 14 %. « Même si tous les déplacements en voiture ne pouvaient pas être remplacés par des déplacements à vélo, le potentiel de réduction des émissions est très élevé (Brand C. et al., 2021). »

Ce mémoire s'inscrit dans une approche « changer » plutôt qu'« améliorer », c'est-à-dire qu'elle vise la substitution des modes motorisés individuels par des modes plus durables, au lieu de leur simple optimisation. Par conséquent, les voitures électriques ne sont pas ciblées, car elles n'affectent pas les temps de trajet et leur impact reste conséquent en matière de consommation d'énergie. L'accent est donc mis sur les modes actifs et les TC comme leviers principaux de changement.

1.B. Aménagements et infrastructures pour une mobilité durable

La France déployait, jusqu'au mois de juin 2025, 77 594 km d'aménagements cyclables, répartis entre pistes cyclables (36 972 km), voies vertes (25 645 km) et bandes cyclables (14 977 km) (Annexe 2) (Bicycle facilities by geovelo : <https://amenagements-cyclables.fr/fr/stats>). Ce chiffre continue à croître pour des usages variés : déplacements quotidiens, loisirs ou tourisme.

Les transports publics jouent un rôle important de la mobilité durable notamment dans les zones denses et périurbaines. D'après la Fédération Nationale des Transports de Voyageurs (FNTV,

2015), les lignes régulières de bus desservent plus de 15 000 communes, avec environ 120 000 liaisons quotidiennes, couvrant 65 % de la population française. Les lignes de tram comptent sur 28 villes aujourd'hui en juin 2025 (Figure 5) (Wikipédia, 2025c). Le métro est desservi dans 6 métropoles : Paris, Marseille, Lyon, Lille, Toulouse et Rennes (Figure 5) (Wikipédia, 2025b).

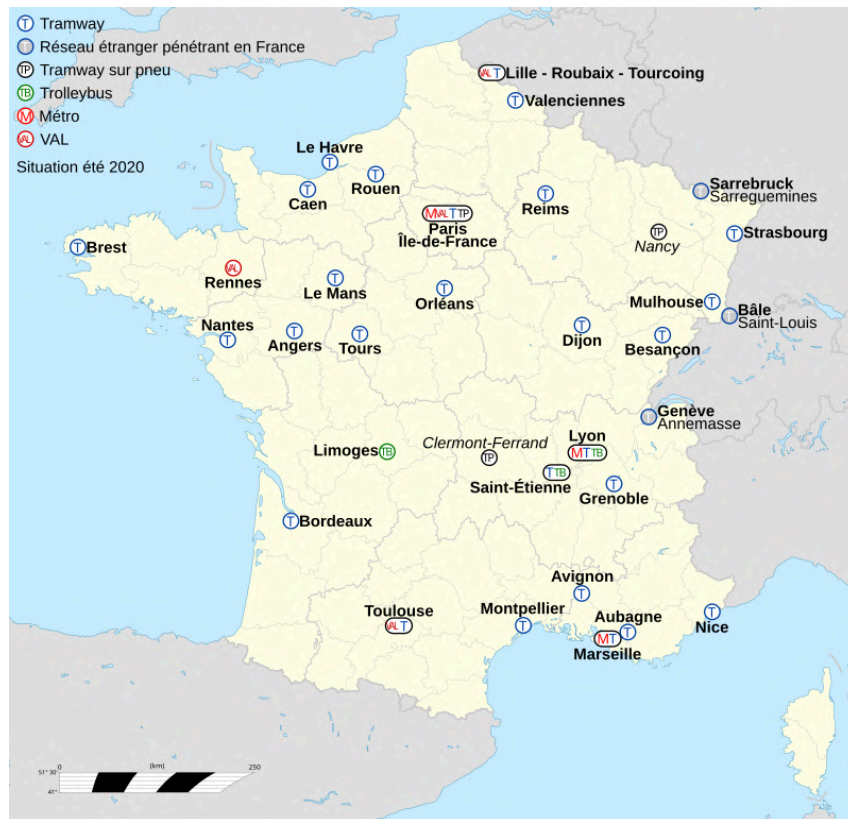


Figure 5 : Réseaux de métro, tramways, trolleybus en France mi-2020 (Wikipédia, 2025c)

1.C. Représentation des réseaux de transport : théorie des graphes

Un réseau de transport désigne un système interconnecté composé de lieux géographiques reliés entre eux par un certain nombre de routes. Trois composantes fondamentales le structurent : les origines, les routes et les destinations. Chacun de ces éléments occupe une position géographique unique, et leur agencement sur le territoire suit des motifs géométriques (Kansky K-J. et Beauguitte L., 2023).

Pour représenter simplement ces structures complexes, la **théorie des graphes**, introduite par Leonhard Euler au 18^e siècle, est souvent employée dans les études de la mobilité. Cette théorie est caractérisée par un ensemble de composantes : **nœuds/sommets** et **liens/arêtes**, qui connectent les deux nœuds. Spécifique à la représentation des réseaux TC, « un nœud représente une station ou un arrêt à partir duquel il est possible d'interagir avec le réseau. Les nœuds sont souvent regroupés selon leur fonction, soit transfert, terminal ou intermédiaire (Figure 6) (Kim V-M., 2021). » La définition d'un lien et celle d'un **segment** sont similaires, mais un peu différentes. Par exemple, il existe un lien et deux segments entre les nœuds 5 et 6 de la Figure 6. « Un lien représente donc le nombre de nœuds directement liés à un nœud donné (Kim V-M., 2021). » Par ailleurs, « les points et les lignes peuvent se voir attribuer des valeurs numériques individuelles (scores) (Kansky K-J. et Beauguitte L., 2023). »

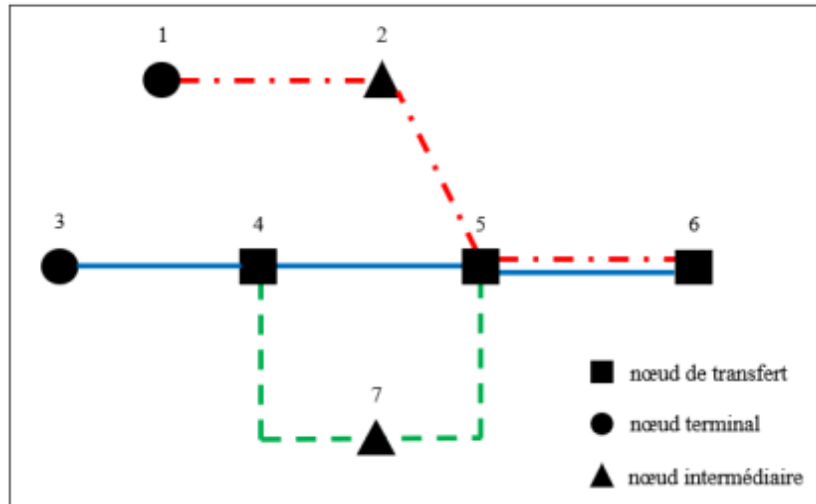


Figure 6 : Représentation d'un réseau sous forme de graphe (Kim V-M., 2021)

« Le choix de représentation du réseau influence généralement ses propriétés (Kim V-M., 2021). » Un graphe est dit planaire s'il peut être représenté sans croisement de liens. Un graphe est non-planaire lorsque ses arêtes se superposent (ex. métro sur plusieurs niveaux), ce qui rend plus complexe la représentation. Il peut être directionnel (ex. trajets aller et retour différents souvent le cas des réseaux de bus), ou non-directionnel (ex. lignes symétriques comme certains trams et métros). Un graphe non-directionnel signifie donc que les déplacements sont possibles dans les deux sens sur une même route. Enfin, les segments entre nœuds peuvent être simples (une seule liaison) ou multiples (plusieurs lignes partagent le même lien). Systématiquement, une représentation avec moins de segments facilite la compréhension des liens d'un graphe (Kim V-M., 2021).

Il existe plusieurs types de la forme des réseaux (Annexe 3) (Brunet R., 1987). Le réseau réel dépend souvent de son mode de transport. Un réseau ferroviaire ou de tram présente généralement une structure linéaire ou en étoile. Un réseau routier et cyclable adopte souvent une structure en maillage plus dense. Les réseaux TC français sont effectivement marqués par une grande variété de la forme (Annexe 4). En résumé, en dépit de la diversité morphologique des réseaux, le graphisme permet une simplification fonctionnelle utile pour la cartographie et l'analyse.

1.D. Pour une communication effective via une carte : lisibilité, échelles et POIs

1.D.1. Lisibilité

La lisibilité d'une carte est essentielle à sa compréhension. Harrie L. et al. (2015) ont montré les facteurs influençant la lisibilité dans leur étude sur la lisibilité d'une carte. La quantité d'information était primordiale, suivie de la distribution spatiale de l'information. Par ailleurs, plus la longueur de la ligne d'objet est longue ainsi que le nombre de types d'objets et le nombre de sommets sont importants, plus la lisibilité est faible. Leur méthodologie de la mesure de la lisibilité a porté sur plusieurs critères : (1) nombre d'objets, (2) nombre de types d'objets (3) nombre de sommets, (4) longueur d'un objet, (5) distribution spatiale d'objets, (6) distribution spatiale de sommets, (7) proximité, (8) taille d'objets, (9) longueur d'un segment, (10) teinte et (11) luminosité. Reljan-Delaney M. (2023) a considéré lors de la création de l'interface sur la carte des expériences du cyclage : l'importance de la facilité d'usage, de la clarté visuelle, de la performance et de l'adaptation aux besoins utilisateurs dans la conception cartographique. Ces critères guideront ce mémoire afin de créer une carte lisible.

1.D.2. Échelles

Il est non négligeable de rappeler la notion d'échelle pour la cartographie. « Les faits géographiques doivent être étudiés à l'échelle adaptée, en fonction de leurs caractères et des thématiques abordées. Ils pourront parfois être appréhendés à divers niveaux d'échelle (de manière dite multiscale) qui apparaîtront donc emboîtés les uns dans les autres. De tels changements d'échelle, par leurs effets de « zoom » avant ou arrière, peuvent révéler des réalités différentes (Geoconfluence, 2017). » « Tous les faits ne peuvent donc être pris en considération à un même ordre de grandeur, soit parce qu'ils sont trop grands pour que l'on puisse observer leur configuration, soit parce qu'ils sont trop petits. (Fusco G., 2013). » Il est donc essentiel d'adopter une approche multiscale pour la carte des temps selon les objectifs tout en considérant les caractéristiques des informations à transmettre. Psyllidis A. et al. (2022) recommandent que l'échelle optimale puisse être calibrée en tamponnant la zone d'étude avec une distance de déplacement de bon sens, ou par des tests de sensibilité.

1.D.3. POIs

Les POIs, constituant les nœuds sur une carte, jouent un rôle important dans ce mémoire. Ils représentent, sous forme ponctuelle, un élément particulier à l'aide de symboles et d'étiquettes cartographiques ou une icône spécifique. Traditionnellement, il s'agit des lieux intéressants ou pertinents visuellement et culturellement, pouvant également avoir des implications pour la navigation, tels que des sommets de montagnes, des églises et des emplacements de champs de batailles historiques. Les POIs numériques contemporains sont des substituts de lieux réels (par exemple, des parcs, des pubs, des cafés, des centres communautaires et des librairies, des restaurants, des théâtres, des écoles), généralement représentés par des entités ponctuelles géométriques. Ils désignent souvent des destinations propices à des activités telles que l'emploi, le tourisme, les loisirs et l'orientation (Psyllidis A. et al., 2022). Selon Psyllidis A. et al. (2022), l'un des principaux défis est de déterminer où tracer les limites d'une zone d'étude incluant des POIs (inclus le cas du changement de l'échelle géographique), et comment gérer les effets de bord. Premièrement, modifier le périmètre géographique de l'analyse altère les statistiques d'analyse spatiale (type des POIs, nombre des POIs, etc.). Deuxièmement, l'exclusion des cas limite, c'est-à-dire des POIs situés hors de la zone d'étude, mais desservant néanmoins les personnes qui s'y trouvent, peut entraîner une modification de la représentation de la mobilité et de l'accessibilité. Un choix réfléchi et adapté des POIs, en cohérence avec l'échelle et les objectifs, est donc crucial pour garantir la pertinence de la visualisation et de l'interprétation cartographique.

2. État d'art : contextes et méthodologies des autres villes

2.A. « Legible London » à Londres : cartes des temps entre stations de métro

En 2004, le maire de l'époque annonce l'objectif de faire de Londres une ville marchable à l'horizon 2015. Dans ce contexte, le « Legible London », un programme d'information et de communication sur les temps de marche, a été publié en 2006. Une étude menée par AIG London Ltd (2006) a révélé que plus de 40 % des voyageurs de la ville utilisaient le plan du métro comme carte de référence, y compris pour des trajets piétons, ignorant souvent que certains trajets sont plus rapides à pied qu'en train. En réponse, la ville a développé une signalétique piétonne et des cartes de temps de marche intuitives intégrées dans l'espace public. La Figure 7 est bénéfique pour mettre en valeur que la marche entre deux stations proches pourrait être plus rapide et confortable par rapport au métro notamment aux heures de pointe.

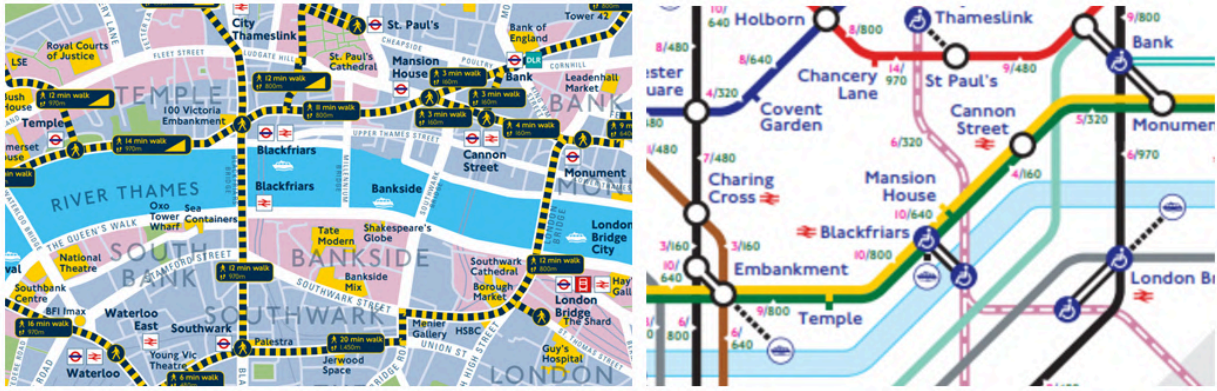


Figure 7 : Cartes des temps de marche entre stations du métro londonien par Transport for London (à gauche : type carte géographique (2025b), à droite : type plan métro (2025a))

2.B. « Metrominuto » de Pontevedra : un pionnier exemplaire des politiques de la mobilité et de la cartographie des temps

Pontevedra, ville moyenne du nord-ouest de l'Espagne à la topographie relativement plate, s'est imposée depuis la fin des années 1990 comme une référence internationale en matière de mobilité piétonne. En réduisant drastiquement l'usage de la voiture et en requalifiant l'espace public, la ville a mis en œuvre une politique active de revalorisation des modes doux. Ce processus est mondialement apprécié non seulement par ses bénéfices conséquents d'urbanisme et de mobilité, mais aussi par ses approches humaines, participatives, durables et saines. Dans ce cadre, « Metrominuto » (Figure 1 à gauche), une carte des temps de marche stylisée, inspirée des plans de métro (Figure 7 à droite), affichant les temps de parcours à pied entre différents POIs stratégiques de la ville, est né. L'objectif de Metrominuto est de montrer que la ville est parcourable à pied, souvent plus facilement qu'on le pense (Amandine G., 2022). Le concept s'est diffusé dans de nombreuses autres villes espagnoles (Annexe 5), et même en France, notamment à Bidart et Saint-Jean-de-Luz (Annexe 6) proches de l'Espagne, dans une logique de sensibilisation à la marche et à la cyclabilité.

Méthodologie employée

L'élaboration de Metrominuto repose sur une sélection raisonnée des POIs et une simplification graphique poussée comme ci-dessous (Ciudades que Caminan, s.d.).

(1) **Sélection des POIs** : Les POIs sont choisis selon leur importance fonctionnelle, leur position stratégique et leur accessibilité piétonne avec Google Maps. Metrominuto identifie d'abord une série de nœuds fondamentaux dans le transport urbain. Grâce à cette répartition initiale, nous pouvons déterminer les références à inclure (par exemple, une rivière ou la mer) ainsi que le sens de la carte final, vertical ou horizontal. Concernant les choix des POIs, il est important de se mettre à la place des usagers et de sélectionner les lieux qui intéressent particulièrement les piétons. Il est donc conseillé d'éviter de représenter des ronds-points, des entités privées, des stations-service, des intersections, etc., aussi utiles soient-ils à titre de référence. Les catégories des POIs recommandés pour les piétons sont : administrations, sécurité, culture, loisirs, sports, santé, transport en commun et zones spécifiques telles que les places et parcs (détaillées en Annexe 7).

(2) **Distribution des POIs** : L'usage de grilles préformatées (Figure 8) permet de répartir équitablement les POIs sur la carte tout en simplifiant la lecture. Le nombre de points est volontairement limité pour préserver la lisibilité.

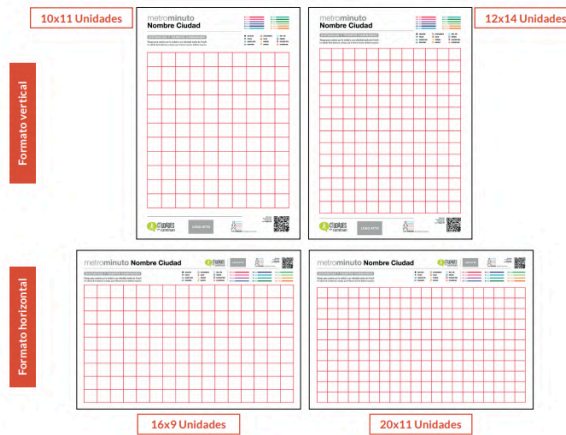


Figure 8 : Grilles typiques utilisées pour structurer une carte Metrominuto (Ciudades que Caminan, s.d.)

(3) **Segmentation** : Les liens sont établis entre POIs selon les itinéraires de référence sans attribuer de couleurs, de distances ni de minutes spécifiques.

(4) **Cartographie** : Les segments sont ensuite colorés et annotés avec les distances et temps estimés, calculés à partir d'une vitesse moyenne de 4 km/h. Les distances sont basées sur les distances de Google Maps. Pour les icônes des POIs, il est conseillé de conserver les mêmes icônes déjà créées dans les précédents projets. L'esthétique vise à transmettre un message positif sur la marche : simplicité, clarté, accessibilité.

2.C. « Plan des Modes Actifs » et « Rose des Modes™ » de Lyon : favorisation de la multimodalité

La métropole de Lyon est une des communautés qui s'engagent dynamiquement dans la promotion de la mobilité durable. En plus de la carte des temps à pied (Figure 1 à droite), plusieurs outils cartographiques profitables étaient inventés. En complément, l'Agence des Mobilités - Métropole de Lyon offre une carte interactive des temps des déplacements à pied (Figure 9). Ces cartes représentent des temps selon les segments de 5, 10, 15 et 20 min qui relient les sites emblématiques du territoire.

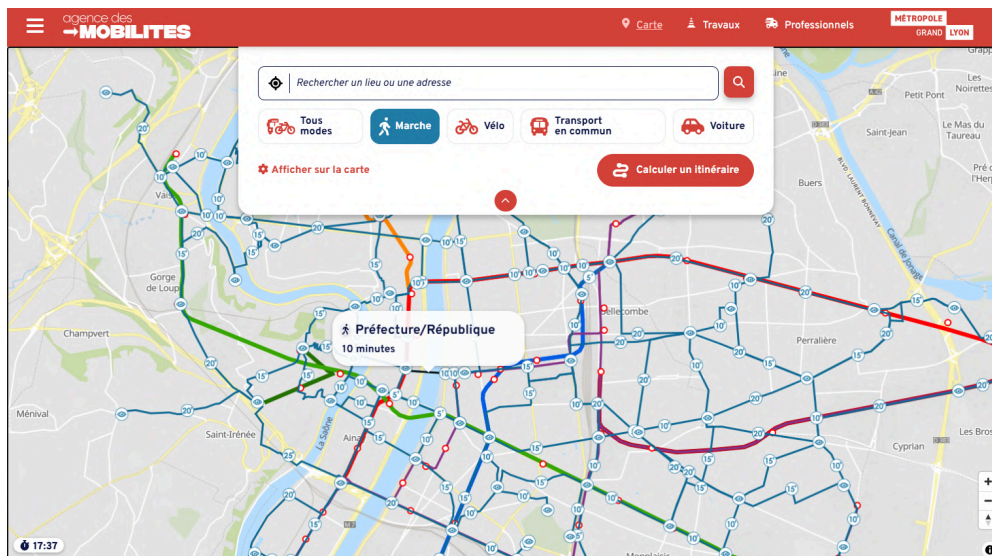


Figure 9 : Carte interactive des temps des déplacements à pied (<https://mobilites.grandlyon.com/carte>)

Chapitre 2 : Méthodologie

Dans le chapitre 1, les principaux concepts théoriques et les sources d'inspiration qui posent les bases de réflexion de ce mémoire ont été identifiés. Ces éléments nourrissent directement la méthodologie présentée dans le chapitre 2. Il est probable que la recherche bibliographique ne soit pas totalement exhaustive. Toutefois, aucun exemple documenté de méthodologie automatisée pour produire ce type de cartes des temps (type graphe simplifié inspiré de Metrominuto) n'a été trouvé. Dans ce contexte, ce chapitre propose d'abord une présentation du territoire d'étude de cas, afin de contextualiser les caractéristiques physiques, morphologiques et de mobilité. Puis, après avoir présenté les données et outils utilisés, les traitements automatisés les plus possibles visant à une meilleure reproductibilité, seront détaillés en justifiant les choix et les stratégies. Toutes les données utilisées, les fichiers et les cartes produits ainsi que les codes Python (fichiers .ipynb) peuvent être trouvés via GitHub, un service web d'hébergement (Annexe 9).

3. Territoire d'étude de cas : Eurométropole de Strasbourg

3.A. Présentation générale

L'étude de cas est basée sur le territoire de l'**Eurométropole de Strasbourg (EMS)**, située dans le département du Bas-Rhin en région Grand Est. Située dans le Nord-Est de la France à la frontière avec l'Allemagne, cette EPCI regroupe 33 communes pour une population totale de plus de 500 000 habitants. Strasbourg, le siège de la métropole et également un pôle régional majeur, est connu à la fois pour sa fonction politique (siège du Parlement européen), universitaire, culturelle, touristique et économique. La densité de la métropole est d'environ 1 500 hab./km², tandis que la ville de Strasbourg atteint une densité d'environ 3 700 hab./km² (Wikipédia, 2025a). La topographie de Strasbourg est globalement plate et homogène avec une altitude moyenne de 142 m (Wikipédia, 2025a), ce qui facilite la pratique du vélo ainsi que la construction de réseaux de tram .

3.B. Morphologie urbaine et Réseaux de transport

La structure urbaine de l'EMS est graduée du centre vers les périphéries. Le centre fonctionne comme lieu de travail et de tourisme et les périphéries sont composées de communes à dominante résidentielle ou mixte. D'après Le Néchet F. (2015), l'organisation spatiale de l'EMS repose sur une structure « monocentrique discontinue » : la centralité est forte, mais les densités urbaines sont diffusément réparties sur l'ensemble du territoire. Le tissu urbain présente une morphologie concentrique autour du centre historique de Strasbourg, avec des quartiers bien connectés entre eux et vers les communes périphériques de manière radiale, grâce à un réseau de tram, de bus, et de liaisons ferroviaires (Annexe 10). En sus, ce territoire est également marqué par la présence de plusieurs cours d'eau (notamment le Rhin, l'Ill et les canaux) qui agissent comme des éléments à la fois structurants et contraignants pour les déplacements.

3.C. Défis de la mobilité : Révolution des mobilités

L'EMS est reconnue pour ses politiques de mobilité innovantes, notamment en matière de mobilité douce. En 1994, la première ligne de tram a été inaugurée pour répondre à des enjeux sanitaires publics, face à une pollution atmosphérique élevée en centre-ville (Woessner R., 2019). Depuis, Strasbourg s'engage dans une réduction progressive de la place de la voiture, au profit des TC, des vélos, de la marche, et d'une requalification des espaces publics. Cette dynamique s'est progressivement étendue aux premières et deuxièmes couronnes de l'agglomération afin de garantir une équité territoriale, en proposant des solutions de mobilité adaptées aux spécificités de chaque

secteur : par exemple, parkings-relais, système de vélos en libre-service, pôles d'échanges multimodaux, itinéraires cyclables sécurisés, hiérarchisation du réseau de bus ou encore développement du transport à la demande (Eurométropole de Strasbourg, 2024a). « En 20 ans, sur l'EMS, la part des transports en commun augmente de 9 à 16%, le vélo de 7 à 11% et la marche de 31 à 36% quand celle de la voiture dans les déplacements quotidiens est passée de 53% à 37% (Eurométropole de Strasbourg, 2024a). »

Visant à davantage favoriser un changement des comportements, une véritable « **révolution des mobilités** » est actuellement en cours, accompagnée d'objectifs ambitieuses dans des documents stratégiques comme le Plan d'Actions pour les Mobilités Actives (PAMA) (Eurométropole de Strasbourg, 2019) ou le Plan Climat 2030 (Eurométropole de Strasbourg, 2024b). En plus des réseaux actuels piétons et vélos qui s'étendent radio-concentriquement du centre vers la périphérie, l'extension du réseau cyclable vers 2030 est au cœur de ces plans (Annexe 11). Les défis et les contextes face à cette révolution des mobilités varient selon l'échelle géographique et la zone. Au centre, notamment sur les déplacements de moins 3 km, l'usage de la marche à pied et du vélo croît fortement. L'usage du vélo et des transports collectifs urbains croît fortement sur les distances de 3 à 5 km. L'usage des transports collectifs interurbains croît sur les distances de plus de 20 km. La Figure 11 présente la répartition modale des déplacements de moins de 5 km selon les communes, illustrant les **inégalités centre-périphérie** (Eurométropole de Strasbourg, 2019 et 2024 a).

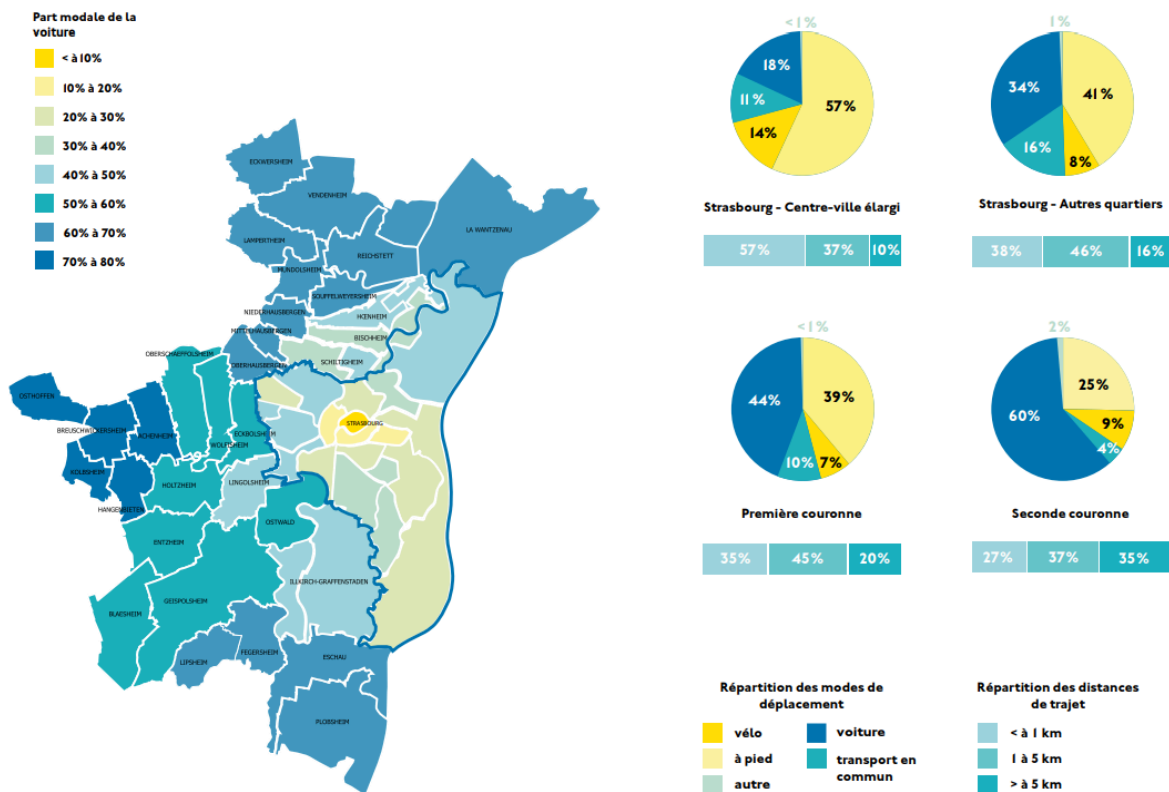


Figure 11 : Part modale de la voiture pour des déplacements inférieurs à 5 km des résidents de l'EMS à gauche & Répartition des déplacements dans l'EMS selon la localisation du ménage, par tranche de distance et par mode à droite (source : EMD 2009) (Eurométropole de Strasbourg, 2019)

Ce mémoire s'inscrit non seulement dans l'automatisation de la cartographie des temps, mais aussi dans les premières étapes de la construction d'une carte des temps pour ce territoire. Cette carte des temps strasbourgeoise est menée en collaboration avec l'Agence du Climat, qui accompagne les

habitants dans leur transition vers des mobilités décarbonées, et l'**Eurométropole**, qui élabore actuellement un plan piéton incluant la réalisation d'une carte des temps piétons.

4. Données et outils

4.A. Données utilisées

Différentes sources de données ont été mobilisées (Tableau 1). Toutes les données sélectionnées sont open source afin de garantir une reproductibilité maximale. Les données D5 et D8-D11 sont disponibles à l'échelle nationale. Les données D1-D4 (GTFS) sont indispensables. Les données D6, D7, D12 et D13, quant à elles, ont été extraites de l'open data local de l'EMS afin d'enrichir les informations, et leur disponibilité peut varier d'un territoire à l'autre.

Catégorie	Producteur	Année	No.	Nom	Type / Projection	Pour	Nécessité	Lien
Tram et bus	CTS	2025		Données théoriques (GTFS)				https://transport.data.gouv.fr/datasets/donnees-theoriques-gtfs-et-temps-reel-siri-lite-du-reseau-cts
			D1	stops	.txt	1, 2	Obligatoire	
			D2	stop_times	.txt	2	Obligatoire	
			D3	trips	.txt	2	Obligatoire	
			D4	routes	.txt	2	Obligatoire	
Train	IGN	2021		Route 500	LAMB93 - RGF93			https://geoservices.ign.fr/routesp
			D5	NOEUD_FERRE	.shp (points)	1	Obligatoire	
					LAMB93 - RGF93			https://data.strasbourg.eu/pages/accueil/
Localisation des stations de VELHOP	Eurométropole de Strasbourg	2025	D6	stations-velhop	.shp (points)	1,3	Facultatif	
Stations de gonflage et d'outils		2021	D7	stations_velo	.shp (points)	1,3	Facultatif	
Limites administratives	IGN	2025		ADMIN Expresse	LAMB93 - RGF93			
			D8	CHFLIEU_COMMUNE	.shp (points)	1	Obligatoire	https://geoservices.ign.fr/adminexpresse
			D9	EPCI	.shp (polygones)	3,4	Obligatoire	
			D10	COMMUNE	.shp (polygones)	3	Facultatif	
Cours d'eau	Sandre	2024		Sandre BD Topage	EPSG:2154 - RGF93 v1			https://catalogue.open-data.fr/geone
			D11	CoursEau_FXX	.shp (lignes)	3	Facultatif	
					EPSG:4326 - WGS 84			https://data.strasbourg.eu/pages/accueil/
Médiathèques et bibliothèques	Eurométropole de Strasbourg	2025	D12	mediatheques_bibliotheques	.shp (points)	1	Facultatif	
Parcs		2018	D13	lieux_parcs	.shp (points)	1	Facultatif	

Tableau 1 : Liste de données utilisées

4.A.1. General Transit Feed Specification (GTFS)

Inspiré des cas d'étude existants, les **arrêts de tram** ont été choisis comme POIs de base en raison de leur espacement régulier, de leur visibilité dans l'espace urbain, et de leur familiarité auprès des habitants. Pour représenter un réseau de TC sous forme de graphe, il est nécessaire de disposer au minimum d'informations sur les **nœuds** et les **segments**. Au départ, trois sources de données ont été considérées : les données GTFS, les jeux de données locaux en open data et les informations extraites d'OSM. Bien que l'OSM offre une richesse importante pour de nombreux territoires, une confusion dans les catégories (ex. certains arrêts de train mal classés comme arrêts de tram) a été constatée dans ce territoire. Le **GTFS** a donc été retenu pour sa disponibilité, sa standardisation, sa cohérence et sa compatibilité avec des traitements automatisés.

Ce format ouvert, initialement développé par Google en 2006, est désormais un standard pour la publication des données de TC, comprenant des fichiers texte des informations sur les itinéraires, les horaires, les arrêts et les caractéristiques géographiques. « Les flux GTFS permettent aux agences publiques de publier leurs informations de transports en commun et aux développeurs de créer des applications qui utilisent ces données de manière interopérable (Google, 2024a). » Pour Strasbourg, les données sur le tram et le bus sont fournies par la Compagnie des Transports Strasbourgeois (CTS), qui exploite actuellement les six lignes du tram, le réseau de bus ainsi que les parkings relais associés. Le flux GTFS téléchargé le 25 mai 2025 a été utilisé et ses détails se trouvent en Annexe 12. La Figure 12 illustre leurs attributs principaux et leurs liens de quatre fichiers exploités.

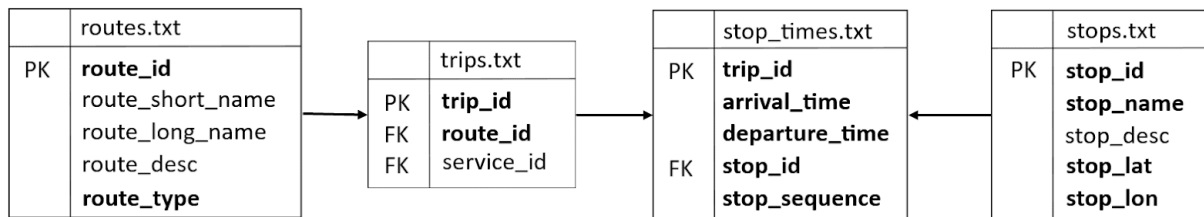


Figure 12 : Modèle relationnel simplifié des données GTFS utilisées
(gras : attributs utilisés, PK : Primary Key, FK : Foreign Key)

- (1) stops.txt : liste des arrêts de transport (position, nom, station associée)
- (2) routes.txt : description des lignes et types de transport
- (3) trips.txt : trajets spécifiques associés à chaque ligne
- (4) stop_times.txt : horaires d'arrivée et de départ à chaque arrêt pour chaque trajet

Le fichier shapes.txt, semblant utile pour afficher les tracés exacts des itinéraires, n'a pas été retenu, car il n'était pas disponible pour Strasbourg et, par ailleurs, le dépôt de ce fichier est optionnel. Les données GTFS ont servi à : (1) extraire les nœuds du réseau (arrêts de TC), (2) connecter ces nœuds entre eux selon leur ordre réel sur les trajets et (3) calculer les temps de trajet réels entre deux arrêts consécutifs.

4.A.2. Données disponibles à l'échelle nationale

IGN - Admin express (D8-10) : Admin Express par l'IGN s'agit d'une base de données de limites administratives du territoire français (commune, arrondissement départemental, département, région...) sous forme de polygones. Ces données permettent une structuration spatiale du territoire d'étude. Les chefs-lieux communaux sous forme ponctuelle sont également utilisés comme POIs complémentaires.

IGN - Route 500 (D5) : La couche NOEUD_FERRE.shp sous forme ponctuelle contient les nœuds du réseau ferré à l'échelle nationale. Elle complète des données GTFS, car les données GTFS n'incluent pas nécessairement les lignes ferroviaires nationales. Seuls les nœuds classés comme « gare de voyageurs » dans la colonne NATURE ont été retenus.

Sandre - cours d'eau (D11) : Le Sandre fournit les référentiels de données liés au réseau hydrographique français. La couche CoursEau_FXX.shp sous forme linéaire est utile pour repérer les obstacles naturels potentiels aux déplacements piétons, cyclistes ou motorisés lors de la création de segments et pour caractériser la morphologie du territoire.

4.A.3. Données locales : Open Data EMS

L'EMS fournit en open data une grande diversité de données géolocalisées et des informations d'infrastructures comme les autres grandes villes. Certaines ont été utilisées pour compléter les informations cyclistes telles que les stations Vélhop (vélos en libre-service) et stations de gonflage ou de réparation vélo. « Savoir que l'on peut emprunter un vélo à côté de la gare est une information pertinente (Amandine G., 2022). » Les localisations des parcs, des bibliothèques et médiathèques sont profitables pour les sélections de POIs.

4.B. Outils utilisés

Les traitements ont été réalisés principalement à l'aide de QGIS 3.38.2-Grenoble et de Python 3.11.13 via Google Colab, un service hébergé de notebooks Jupyter. Pour les visualisations statiques, Inkscape, un logiciel gratuit de dessin vectoriel, a été également mobilisé. Masuyama A. (2022) précise quatre avantages de l'utilisation de Python pour l'analyse de la mobilité :

- (1) Open source et gratuité ;
- (2) Simplicité technique et de la syntaxe ;
- (3) Disponibilité d'une large gamme de bibliothèques ;
- (4) Automatisation d'ensemble de l'analyse permettant de changer de territoire ou d'échelle avec un effort minimal.

4.B.1. OpenStreetMap comme base de référence

L'OSM est une carte numérique mondiale, libre et collaborative, contenant des informations sur les routes, l'occupation du sol et les POIs. Dans ce mémoire, la base de données OSM a été retenue comme référentiel principal pour trois raisons clés :

- (1) Calcul des itinéraires et des temps des déplacements via API ORS ;
- (2) Utilisation comme fond de carte sous QGIS et Folium (Python) ;
- (3) Référence pour extraire certains POIs.

L'OSM s'est imposé comme un choix pertinent à la fois techniquement et méthodologiquement. Ce choix repose sur trois critères majeurs :

- (1) Cohérence des données : L'OSM fournit une structure homogène des réseaux variés à l'échelle mondiale, assurant dans ce projet une correspondance fiable entre les calculs des temps et la visualisation cartographique ;
- (2) Facilité d'accès et d'intégration : L'OSM est une base de données libre, ouverte et régulièrement mise à jour. De plus, ceci est téléchargeable et interopérable avec de nombreux outils ;
- (3) Reproductibilité : L'utilisation d'une base libre et largement partagée garantit une méthodologie reproductible sur d'autres territoires.

Ainsi, la méthodologie construite dans ce mémoire s'intéresse à la combinaison **Python + Folium + ORS** qui permet une chaîne cohérente, modulaire et reproductible.

4.B.2. Openrouteservice : moteur de calcul des temps

Choix méthodologique pour le calcul des temps

Afin de déterminer les temps des trajets selon les différents modes de transport, trois approches ont été envisagées :

- (1) Utiliser les temps réels des temps réels issus de données GTFS (uniquement pour TC) lorsqu'elles sont disponibles ;
- (2) Utiliser un moteur de routage ;
- (3) Calculer des temps à partir des distances réelles divisées par des vitesses moyennes estimées par mode.

L'approche (3) a été considérée la plus instable, car elle nécessite une grande étape du calcul des distances et des temps par mode. De ce fait, pour ce projet, l'approche (2) a été privilégiée pour les modes actifs et motorisés individuels (marche, vélo, voiture), à l'aide de l'API Web ORS, pour sa capacité à produire des temps réalistes tenant compte des itinéraires réels de l'OSM par mode, et sa compatibilité avec Python. L'ORS ne fournit pas le calcul des temps et les itinéraires des TC. L'approche (1) a été retenue pour les TC en s'appuyant sur le GTFS.

Choix de moteur de routage ORS

Un moteur de routage est un outil permettant de calculer rapidement et facilement l'itinéraire optimal entre deux points sur une carte. Il peut être utilisé pour calculer l'itinéraire le plus rapide ou le plus court entre deux points et il peut également être utilisé pour analyser des réseaux de transport entiers. Juninger M. et Narvell N. (2023) relèvent certains critères du choix d'un moteur de routage pour le calcul des temps des déplacements. Les critères suivants sont classés par ordre d'importance approximatif. Si aucun outil ne remplit tous les critères, le ou les outils les plus proches ont été pris en compte dans leur projet : (1) gratuité, (2) limite du nombre de requêtes, (3) recherche matricielle, (4) performance (stabilité et temps de traitement) et (5) facilité d'utilisation. En m'appuyant sur ces critères ainsi qu'en considérant les coordinations avec les outils et données des autres étapes, l'API Web ORS s'est imposée comme la solution la plus équilibrée. Plusieurs autres moteurs et outils ont été identifiés dans la littérature. Les moteurs et solutions fréquemment trouvés sont par exemple : Google Directions API, GraphHopper, NetworkX (OSMnx), OpenTripPlanner (OTP), OSRM (Open Source Routing Machine), Valhalla, plugins SIG (ex. QGIS avec QNEAT3, pgRouting et ArcGIS avec Network Analyst). Malgré leurs atouts, ils présentaient des inconvénients pour ce projet, notamment un accès payant et une intégration difficile avec Python.

L'ORS Web API et Matrix

L'ORS est bien plus qu'un service de routage. Il utilise une large gamme de services basés sur les données OSM tels que le service d'itinéraires, le service de POIs, le service d'isochrones, le service de géocodage, la matrice des temps-distances, etc. L'API Web ORS offre un service de routage en ligne gratuit, mais impose des limites quotidiennes au nombre d'appels (Annexe 13). Pourtant, ces limites sont suffisantes pour réaliser toutes les cartes de Strasbourg (3 échelles x 4 modes) pour une journée grâce à l'ORS Matrix. Contrairement à l'API Directions (calcul des itinéraires un par un), cette méthode permet de produire une matrice complète de temps entre tous les arrêts, tout en respectant les limites de requête. Pour une matrice, nous pouvons demander une matrice des 3 500 itinéraires maximum simultanément : jusqu'à $59 \times 59 = 3\,481$ paires OD. De plus, des algorithmes de parcours de graphes de pointe garantissent un temps de réponse rapide. Nous pouvons spécifier le mode de transport et calculer des itinéraires respectant certaines restrictions, comme éviter certains types de routes ou certaines caractéristiques d'objets (openstreetmap, s.d.). Les données géométriques ne sont pas nécessaires dans ce projet, étant donné qu'il s'agit de représentations finales d'une carte simplifiée type graphe et non pas d'itinéraire précis : Matrix est suffisant.

Modes et vitesses intégrés dans ORS

Trois modes de transport classiques ['foot-walking', 'cycling-regular', 'driving-car'] sont utilisés dans ce projet. La matrice utilise des vitesses moyennes prédéfinies selon le profil de déplacement choisi (openrouteservice, 2024). La vitesse de 'foot-walking' est fixée à 5 km/h sur tous les types de chemins autorisés. Les types de voies autorisées comprennent les voies sûres, celles qu'il vaut mieux éviter (mais néanmoins autorisées) et les autres voies intermédiaires autorisées. Pour

'cycling-regular', une vitesse d'environ 10-18 km/h est utilisée selon les profils vélo déterminant leur vitesse en fonction de plusieurs valeurs par défaut définies dans le code, en fonction du type de surface, d'autoroute et de piste. En ce qui concerne 'driving-car', l'ORS utilise les vitesses limites OSM et adapté selon le trafic ou le type de voie, si ces données sont disponibles. Si aucune des valeurs ci-dessus ne définit de vitesse de base, la vitesse de base d'environ 50 à 90 km/h selon le type des routes.

4.B.3. Bibliothèques Python utilisées

Les traitements automatisés reposent sur un ensemble de bibliothèques Python. Pour le traitement des données, « math » a été mobilisé pour certaines opérations mathématiques simples, par exemple, pour arrondir des chiffres. « matplotlib » a été apprécié pour produire une graphique de nuages de points permettant de visualiser la distribution des valeurs. « pandas » est une bibliothèque incontournable pour la manipulation de données tabulaires (DataFrame) organisées en colonnes, de manière flexible et efficace. « geopandas » est une extension de pandas dédiée aux données géographiques permettant de manipuler des objets spatiaux associés à des attributs tabulaires GeoDataFrame. « shapely », une bibliothèque complémentaire à geopandas, permet de manipuler des géométries simples. Dans ce mémoire, elle a généré des segments qui relient deux points. « itertools.product » est une fonction de la bibliothèque standard itertools qui permet de générer toutes les combinaisons possibles entre deux listes. Dans ce projet, elle a servi à créer toutes les paires OD entre les points de départ et d'arrivée.

À propos de la visualisation interactive, « folium » est une bibliothèque importante, construite autour de Leaflet.js, pour la création de cartes interactives exportables en HTML. Son principal avantage réside dans sa capacité à réaliser automatiquement une carte interactive sans nécessiter d'écriture JavaScript. Grâce au « jinja2 », le contenu HTML tel qu'une légende peut être y ajouté.

5. Méthodologie automatisée la plus possible

5.A. Démarches globales

Vérifications préalables

Avant d'engager le processus de traitement, plusieurs vérifications doivent être réalisées :

- (1) Disponibilité des données : Dans le cas où nous ne trouverions pas les mêmes données (GTFS et POIs), il conviendra d'adapter la méthode ou de recourir à des alternatives, comme cela sera examiné en détail dans la partie Discussion. ;
- (2) Qualité et cohérence des données : Les fichiers doivent être structurés de manière propre, sans valeurs manquantes, valeurs nulles, doublons incohérents ou projections inadaptées. ;
- (3) Choix du réseau de TC comme POIs (structure) de base : Un réseau structurant est sélectionné selon l'objectif, sa lisibilité, sa couverture et la densité de ses arrêts. Dans cette étude de cas, le réseau de tram avec 87 arrêts (Annexe 10c) a été retenu. ;
- (4) Choix des échelles de représentation finale : Des modes de transport à intégrer adaptés aux échelles choisies sont également sélectionnés. Dans cette étude de cas, trois différentes échelles (1 : petite échelle du centre, 2 : moyenne échelle du réseau tram et 3 : grande échelle de l'EPCI) et quatre différents modes de transport (ped, vélo, tram et voiture) sont essayées.

Afin d'obtenir une vision d'ensemble sur les échelles cartographiques, les modes de transport à intégrer, l'espacement entre les points OD, ainsi que la longueur des segments à représenter, un travail préalable de calcul des distances et des temps de trajet estimés par mode a été réalisé (Figure 13). Les vitesses retenues pour la marche et le vélo correspondent à celles couramment utilisées dans les travaux similaires. La vitesse moyenne du tram a été calculée à partir des vitesses commerciales par ligne disponibles pour l'année 2020 publiées sur Wikipédia (2025d). Quant à la voiture, la définition d'une vitesse moyenne s'est révélée délicate, car celle-ci varie fortement selon le contexte (centre-ville, périphérie et autoroute). Une vitesse de 50 km/h a été retenue, celle relativement faible dans les paramètres de l'ORS. Dans ce calcul préalable, la précision absolue de la vitesse en voiture n'est pas cruciale : l'objectif est d'aboutir à une première estimation globale.

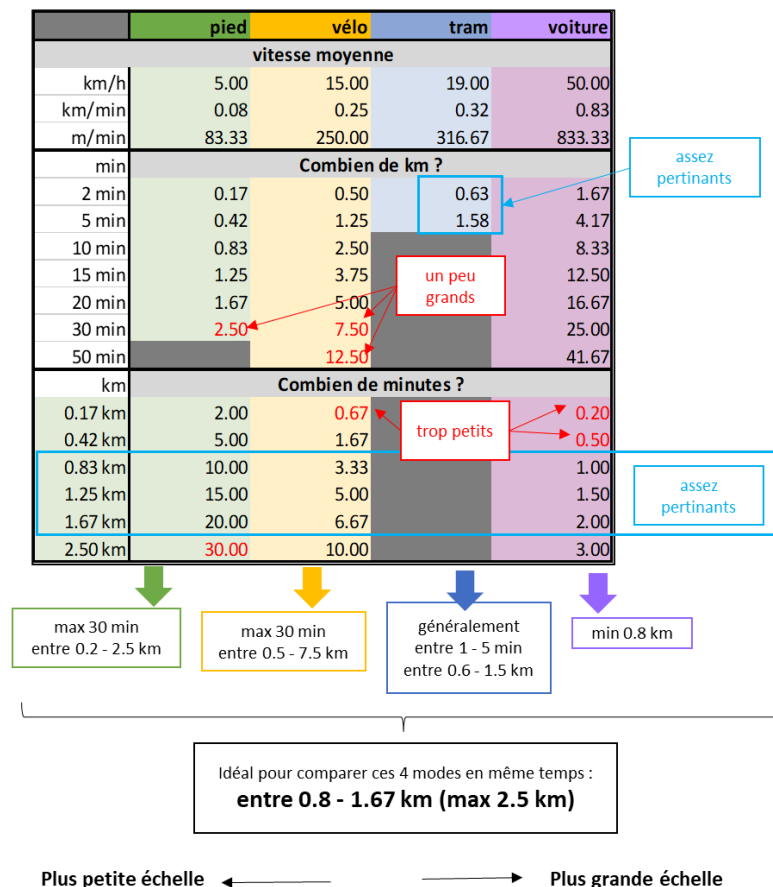


Figure 13 : Recherche des distances et des temps pertinents par mode pour considérer une meilleure échelles et les choix méthodologiques

Les résultats indiquent que, pour permettre une comparaison cohérente entre les modes, les distances réelles des itinéraires entre deux points doivent se situer approximativement entre 0,8 km et 1,67 km. Ces valeurs correspondent à des durées réalistes pour tous les quatre modes considérés. Une petite échelle, associée à des distances relativement courtes, est particulièrement adaptée à la marche. Des temps maximaux représentés dans les travaux d'autres villes (Annexe 6) se montrent 30 min pour la marche et 50 min pour le vélo. À l'inverse, une distance trop courte n'a que peu d'intérêt analytique pour les trajets en voiture ou à vélo. Enfin, il n'est pertinent ni sur le plan contextuel ni sur le plan spatial (en termes de distance) de comparer directement les temps de marche et les temps de voiture dans ce mémoire.

Enchaînement des étapes

L'organigramme (Figure 14) présente la démarche globale des traitements appliqués. La méthodologie repose sur une approche mixte, combinant les données et outils divers précédemment présentés. Les traitements ont été organisés autour des quatre grandes étapes. Afin de mettre en ensemble toutes les informations préparées en amont et puis de les cartographier dans la quatrième étape, il est nécessaire, dans les étapes 1 et 3, de préparer des tableaux avec les noms d'OD, leurs coordonnées XY et les temps des déplacements selon le mode.

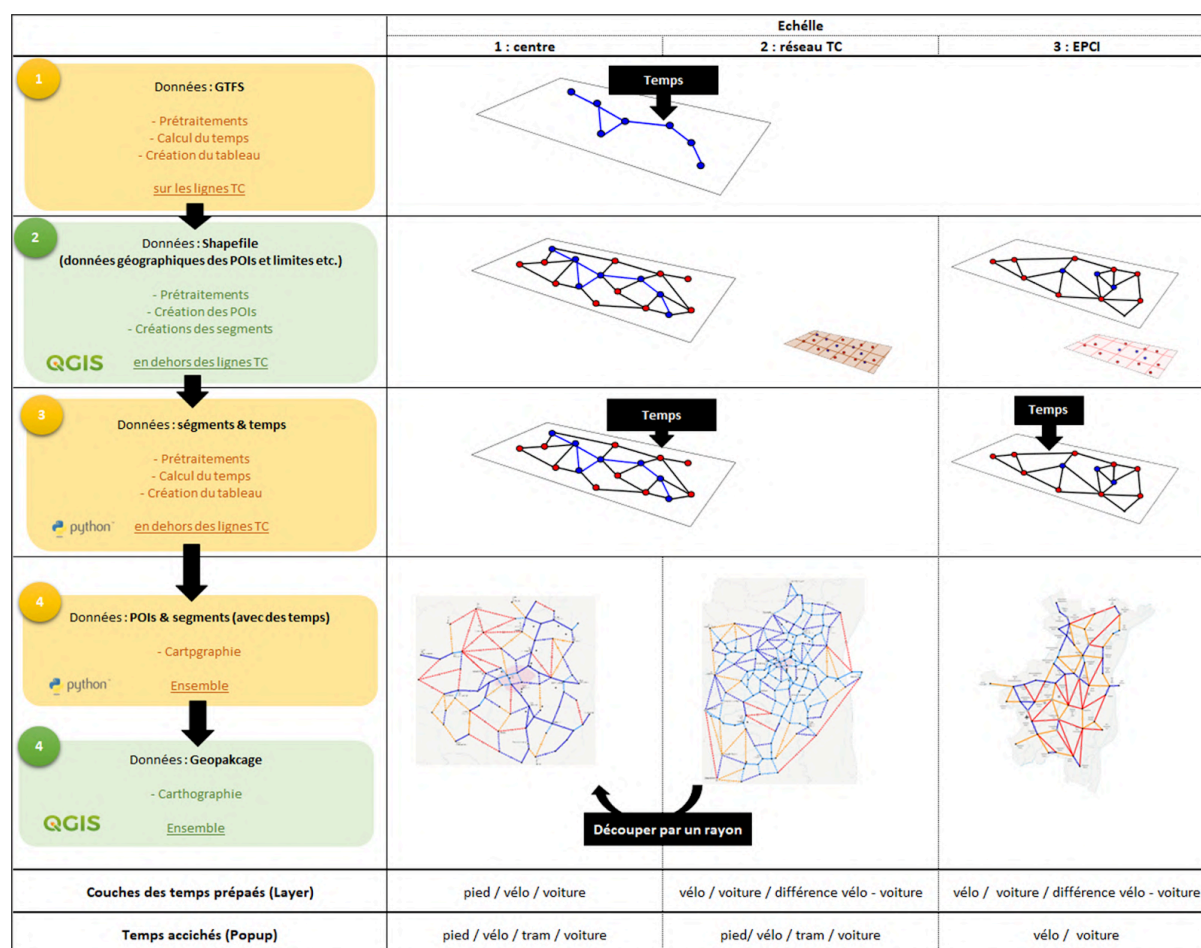


Figure 14 : Ensemble des démarches avec des explications schématiques simplifiées selon les étapes et les échelles

[Étape 1] **Calcul des temps sur le réseau TC** : L'étape 1 concerne les traitements et calculs automatiques pour les segments le long du réseau TC.

[Étape 2] **Définition des POIs et des segments complémentaires hors réseau TC** : L'étape 2 prépare les POIs et les segments en dehors du réseau TC qui seront utilisés dans l'étape 3. L'étape 2 place une manipulation plus adaptée aux spécificités du territoire d'étude et aux objectifs finaux de visualisation sur QGIS. Cette étape manuelle permet un réglage fin.

[Étape 3] **Calculs des temps sur les segments en dehors du réseau TC** : L'étape 3 concerne principalement une répétition de l'étape 1.

[Étape 4] **Visualisation finale** : Les cartes interactives sont d'abord réalisées en Python, notamment à partir de l'échelle 2. Ensuite, la carte à l'échelle 2 est découpée selon un rayon de 3 km afin de

générer une carte à l'échelle 1, adaptée aux déplacements à pied. Il est également possible de créer des cartes statiques simples directement en Python. Toutefois, pour obtenir des cartes statiques plus soignées, le travail de cette partie se fait sous QGIS, en partant des fichiers propres exportés au format Geopackage générés avec Python. Pour l'ensemble de ces étapes, les projections (SCR) doivent être adaptées aux outils et aux objectifs. Le package Leaflet s'attend à ce que toutes les données soient spécifiées en **WGS 84 (EPSG : 4326)**, mais peut montrer des limites pour les calculs de distances ou de surfaces en raison de cette unité d'expression. Le **Lambert 93 (EPSG:2154)**, adapté à la France avec l'unité en mètres, est donc privilégié pour les calculs.

5.B. Traitement Python 1 : POIs de base sur le réseau TC

La Figure 15 illustre les traitements de l'étape 1 sur Python en indiquant les fichiers entrés et sortis.

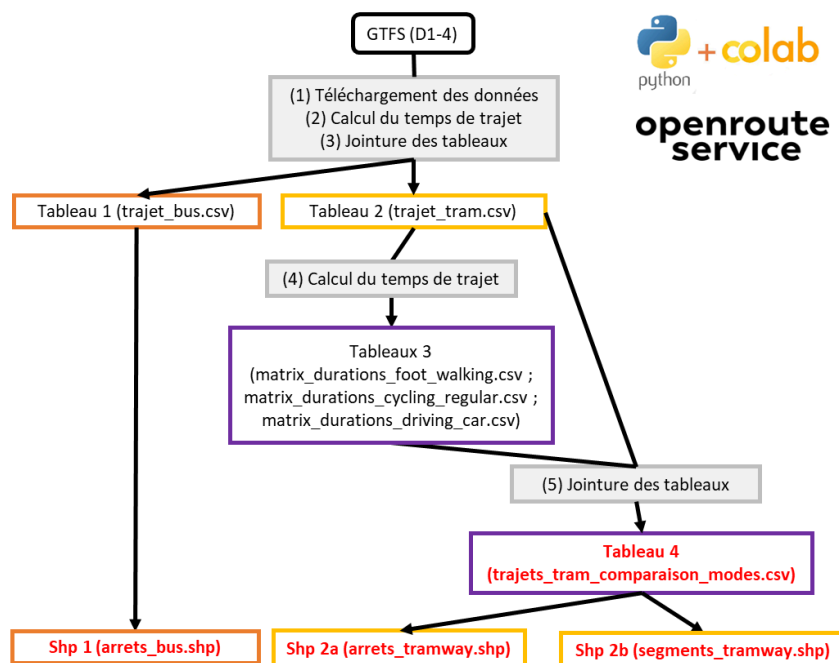


Figure 15 : Démarches de l'étape 1 : données, traitements et sorties attendues

5.B.1. Prétraitement des données de GTFS et Calcul de temps du TC

La première phase consiste à exploiter les fichiers GTFS afin de construire une table de correspondance des temps de déplacement entre arrêts du réseau de tram. Pour cela, les jointures des fichiers entre les arrêts (stops.txt), les horaires (stop_times.txt), les trajets (trips.txt) et les lignes (routes.txt) sont nécessaires en se basant sur le modèle relationnel (Figure 12). Le tableau OD construit ici servira de base à la suite des calculs.

Plusieurs opérations de nettoyage et de structuration sont nécessaires pour obtenir un tableau OD exploitable :

- (1) Conversion des horaires du format texte hh:mm:ss vers un format numérique (en secondes ou minutes) pour permettre les calculs de temps ;
- (2) Identification du type de transport (bus, tram, etc.) afin de filtrer uniquement le tram comme base de POIs ;

- (3) Tri et nettoyage tels que la suppression des doublons, la réorganisation alphabétique, la suppression des lignes incomplètes ou erronées ;
- (4) Suppression des doublons OD/DO, c'est-à-dire seuls les trajets dans un sens sont visuellement conservés pour trois raisons : éviter la redondance visuelle sur la carte, réduire le volume de calculs et considérer le fait que les temps aller/retour sont généralement proches avec la topographie plate de Strasbourg ;
- (5) Ajout des coordonnées géographiques des arrêts : Pour les arrêts ayant le même nom, mais plusieurs identifiants, les coordonnées sont moyennées afin de représenter un seul point par nom d'arrêt (Figure 16).

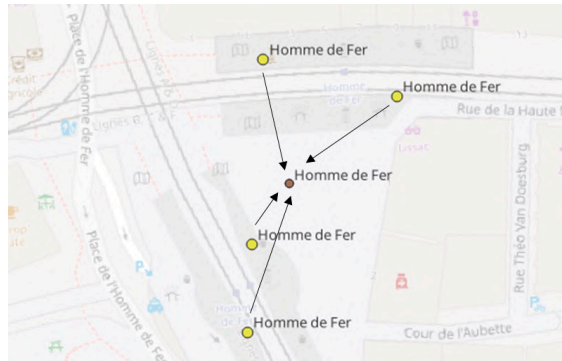


Figure 16 : Regroupement des arrêts par leur centroïde
(les coordonnées dans le fichier stop_times.txt en jaune & la nouvelle coordonnée après regroupement en brun)

Enfin, des fichiers .csv contenant les paires OD, leurs coordonnées, et les temps de déplacement en tram sont exportés. [Sorties de cette phase : Tableau 1 (trajet_bus.csv) et Tableau 2 (trajet_tram.csv)]

5.B.2. Calcul des temps à pied, à vélo et en voiture

Sur la base de POIs (arrêts de tram) précédemment préparée, des matrices de temps de trajet entre ces arrêts ont été générées à l'aide de l'API ORS pour les modes marche, vélo et voiture. Le tableau organisé de tram est converti en DataFrame et les coordonnées sont converties en format requis par l'ORS : liste de tuples (longitude, latitude). En raison du nombre limité des paires en une seule requête, les calculs de matrice sont divisés en plusieurs appels selon les nombres des OD d'un territoire. Chaque requête produit une matrice de temps de trajet entre les points, qui est stockée dans un dictionnaire puis convertie en DataFrame. Ces sous-matrices sont fusionnées pour chaque mode de transport, et trois fichiers .csv finaux, contenant tous les temps entre les arrêts, sont produits : un pour la marche, un pour le vélo et un pour la voiture. [Sorties de cette phase : Tableaux 3 (matrix_durations_foot_walking.csv/matrix_durations_cycling_regular.csv/matrix_durations_driving_car.csv)]

5.B.3. Mise en ensemble dans un tableau et Export des résultats

Les trois fichiers.csv obtenus sont fusionnés avec le fichier .csv du tram précédemment produit. Le tableau final (Tableau 2) contient alors pour chaque paire OD : les coordonnées d'origine et de destination, les identifiants et noms des arrêts et les temps de déplacement pour les quatre modes étudiés. Le temps s'agit ici de la moyenne de ceux de deux sens d'un segment. La visualisation du Tableau 2 est comme la Figure 17. Ce tableau consolidé est ensuite converti en GeoDataFrame, puis exporté au format shapefile, en vue d'être exploité dans l'étape 2 dans QGIS. [Sorties de cette phase : Shp 1 (arrets_bus.shp), Shp 2a (arrets_tramway.shp), Shp 2b (segments_tramway.shp) et Tableau 4 (trajets_tram_comparaison_modes.csv)]

id	from_stop_name	to_stop_name	route_type	from_lat	from_lon	to_lat	to_lon	tram_min	pieds_min	velo_min	voiture_min
1	Alt Winmàrik-Vieux N	Faubourg National	Tram	48.5834	7.74022	48.5824	7.73657	2	5.3	3.1	2.7
2	Alt Winmàrik-Vieux N	Homme de Fer	Tram	48.5834	7.74022	48.5842	7.74468	2	4.2	2.8	5.2
3	Ancienne Synagogue	Gare Centrale	Tram	48.5853	7.74231	48.5851	7.73531	2	7.5	2.6	4.4
4	Ancienne Synagogue	Homme de Fer	Tram	48.5853	7.74231	48.5842	7.74468	2	3	1.4	3.6
5	Aristide Briand	Citadelle	Tram	48.5686	7.77687	48.5714	7.78006	1.5	5.3	2	1.7

Tableau 2 : Structure du fichier final de l'étape 1 (trajets_tram_comparaison_modes.csv)

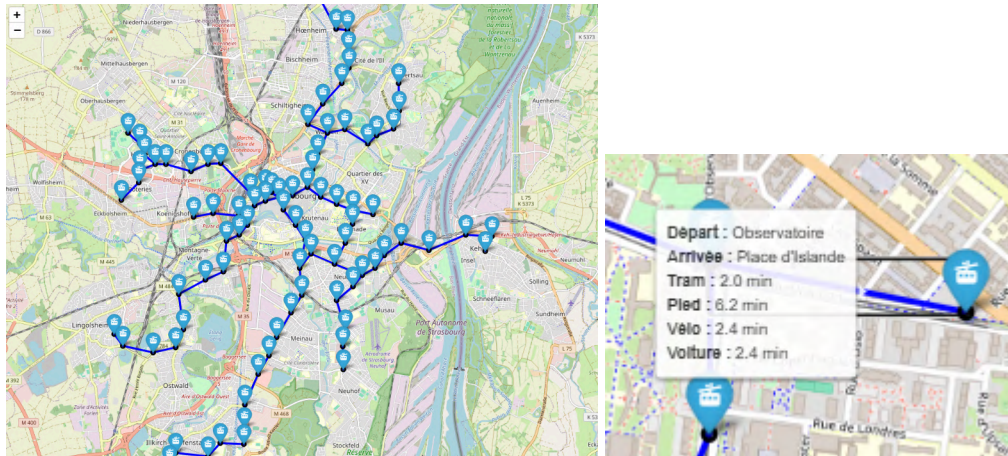


Figure 17 : Visualisation du Tableau 2 sur Python (trajets_tram_comparaison_modes.csv)

5.C. Traitement QGIS : ajout de POIs en dehors du réseau TC

La Figure 18 illustre les traitements de l'étape 2 sur QGIS en indiquant les fichiers entrés et sorties.

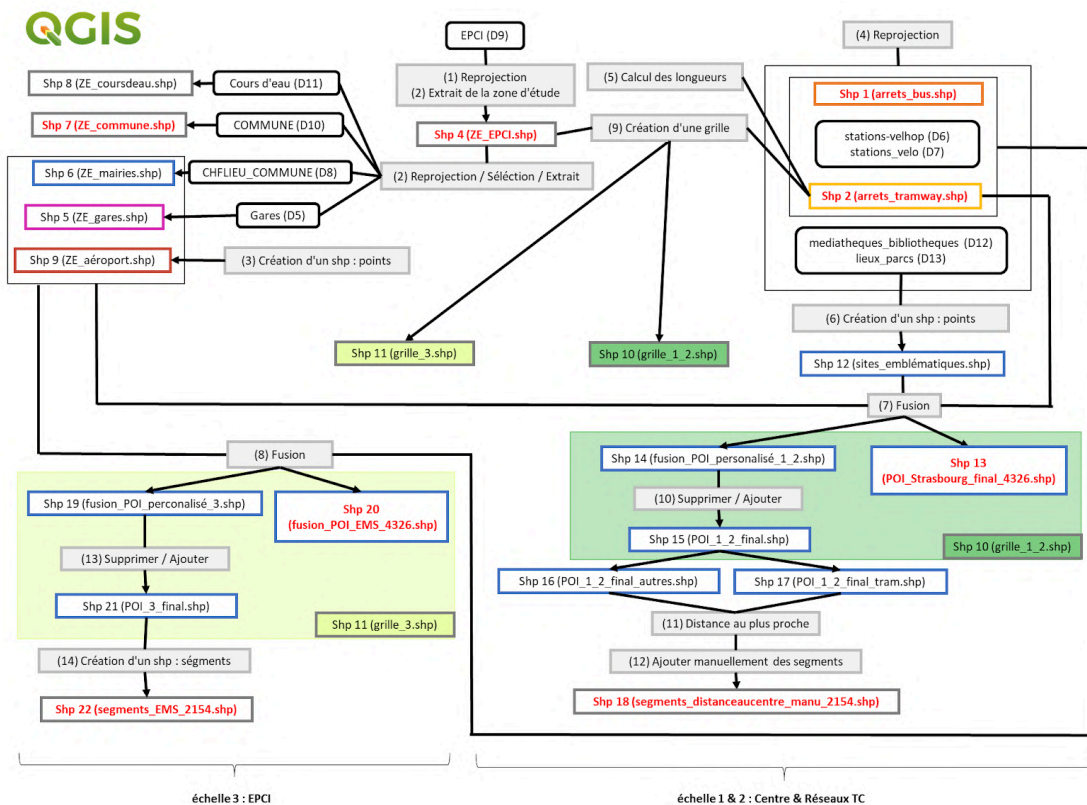


Figure 18 : Démarches de l'étape 2 : données, traitements et sorties attendues

5.C.1. Préparation des données

La première phase dans QGIS consiste à préparer les couches géographiques utiles à la sélection et à la localisation des POIs. Le polygone de l'EPCI de l'EMS extrait pour servir de base de découpage. Les couches (données) D5, D8, D10 et D11 sont découpées par cette emprise de l'EMS. Si un aéroport est présent dans la zone d'étude, une couche ponctuelle dédiée est ajoutée à l'aide du fond de carte l'OSM. En l'absence de données ouvertes sur les sites emblématiques, une couche est manuellement créée, en s'appuyant sur des repères connus (Annexe 7). Chaque site est obligatoirement identifié par un nom pour que nous puissions les afficher sur la carte finale. [Sorties de cette phase : Shp 4 (ZE_EPCI.shp), Shp 5 (ZE_gares.shp), Shp 6 (ZE_mairies.shp), Shp 7 (ZE_commune.shp), Shp 8 (ZE_coursdeau.shp) et Shp 9 (ZE_aéroport.shp)]

5.C.2. Préparation des POIs : création des grilles et sélection des POIs

Préparation de la base des POIs et leurs choix

En plus de la couche des sites emblématiques, les Shp 5, 6 et 7, les Shp 1 et 2a (téléchargés depuis l'étape précédente de Python) et les données D6, D7, D12 et D13 (Shapefiles locaux de la zone d'étude) serviront pour la création et la sélection des POIs. La Figure 19 montre schématiquement les combinaisons des couches fusionnées selon l'échelle.

- Pour les échelles 1 et 2: arrêts de tram, gares, aéroport, mairies + sites emblématiques (Shp 2a, 5, 6, 9, 12)
- Pour l'échelle 3 : arrêts de transport + mairies + stations vélo (Shp 1, 2a, 5, 6, 9 + D6, 7)

Les localisations des arrêts de tram, gares, aéroport et mairies sont considérées importantes. En m'inspirant des exemples des autres villes, les cartes d'une petite échelle (1&2 plus locale) se basent sur les sites emblématiques. Les arrêts de bus sont généralement très denses. C'est la raison pour laquelle ils sont intégrés dans une grande échelle 3, mais non pas dans une petite échelle 1&2. Les cartes d'une grande échelle 3 se basent sur les arrêts de transport et les mairies, car elles couvrent toutes les communes de l'EMS.

Ces couches sont fusionnées tout en gardant le nom des sites pour qu'ils soient affichés sur les cartes finales. Le shapefile fusionné est dupliqué : un comme un layer informatif de carte finale (Shp 13 et 20) et un pour des POIs finaux filtrés (Shp 14 et 19). [Sorties de cette phase : Shp 13 (POI_Strasbourg_final_4326.shp), Shp 14 (fusion_POI_personalisé_1_2.shp), Shp 19 (fusion_POI_perconalisé_3.shp) et Shp 20 (fusion_POI_EMS_4326.shp)]

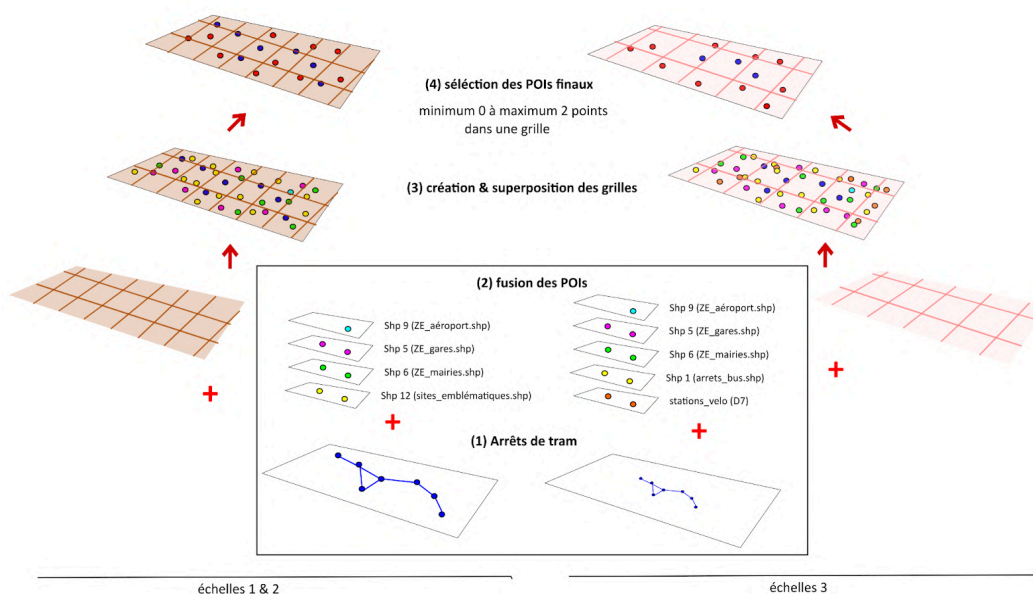


Figure 19 : Méthodologie de la sélection des POIs finaux (filtrés) adaptés aux territoires et échelles

Détermination du nombre et de la disposition des POIs à l'aide des grilles

Afin de sélectionner équitablement des POIs finaux filtrés (Shp 14 et 19) pour les calculs des temps (les nœuds qui relient les segments finaux à la fin), une approche de la sélection spatiale à l'aide des grilles a été choisie. Plus précisément, nous créons une couche des grilles et puis nous sélectionnons de minimum 0 à maximum 2 points dans une grille (Figure 19). En fonction de l'importance des sites, de l'espacement des points et de l'occupation du sol (présence de la rivière par exemple), le nombre des points peut être manuellement choisi. Selon la nécessité, les points peuvent être supprimés ou ajoutés.

Pour les échelles 1 et 2, en m'appuyant sur les exemples d'autres villes et en regardant la prévisualisation sur le QGIS, je considère que les intervalles des arrêts de tram sont convenables à la visualisation finale. Grâce au Shp 2b (segments_tramway.shp), les longueurs des segments entre les arrêts sont calculées à vol d'oiseaux. Son médian est à 481,4 m. Une maille de 500 m, correspondant également à 6 min à pied et 2 min à vélo, est donc optée. Pour ces deux échelles, les points de tram (POIs de base) sont priorisés. Lorsque les arrêts de tram sont proches les uns des autres, nous pouvons les supprimer.

Pour l'échelle 3, en m'appuyant sur les exemples d'autres villes et en regardant la prévisualisation sur le QGIS, je considère que 1-2 points par commune sont pertinents. Avec le Shp 7 (ZE_commune.shp), les superficies de chaque commune sont calculées et le médian est à 6,23 km². Une maille de 2,5 km (2,5 x 2,5 = 6,25 km²), correspondant également à 10 min à vélo et 2 min en voiture, est donc optée. Pour l'échelle 3, les POIs sont sélectionnés en se basant sur les arrêts de transport (train, tram, bus). A l'aide des autres informations supplémentaires (mairies et stations vélo), les POIs finaux sont triés selon cinq critères suivantes (à l'ordre d'importance) :

- (1) Superposition ou regroupement de plusieurs POIs ;
- (2) Connectivité élevée (points d'intermodalité) ;
- (3) Toponymes évocateurs (ex. Hautepierre, Neudorf, etc.) ;
- (4) Terminus de ligne ;
- (5) Pertinence spatiale.

Le plan de réseau (CTS, 2025) a été utilisé comme support pour identifier les arrêts structurants (critère 2) et terminus (critère 4) (Figure 20). [Sorties de cette phase : Shp 10 (grille_1_2.shp), Shp 11 (grille_3.shp), Shp 15 (POI_1_2_final.shp) et Shp 21 (POI_3_final.shp)]

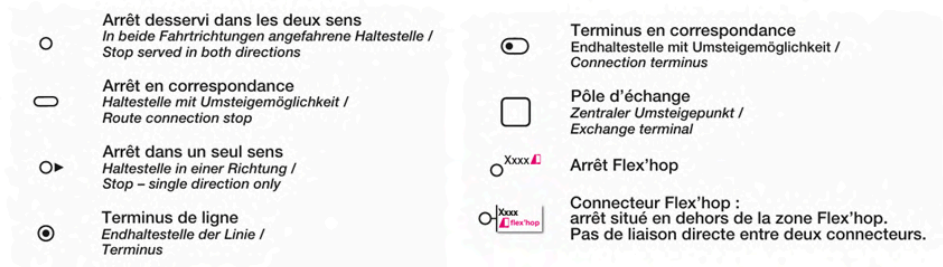


Figure 20 : Types d'arrêts distingués sur le plan détaillé du réseau urbain de Strasbourg (CTS, 2024)

5.C.3. Création manuelle des segments

Bien qu'une automatisation ait été envisagée, la création des segments s'est finalement faite manuellement sous QGIS, pour plus de précision et de souplesse dans l'ajustement local. Pour les échelles 1 et 2, un outil d'automatisation « Distance au plus proche centre » a été utilisé pour relier chaque POI ajouté à l'arrêt de tram le plus proche, générant un segment initial (Shp 17 vers Shp 16) (Figure 21 à gauche). Cette segmentation ne nécessite pas la distinction des points OD/DO, donc le sens. Les segments sont manuellement créés selon les critères suivantes :

- (1) Longueur maximale réaliste : maximum 30 min à pied ou à vélo (Figure 13 e 5.A.) ;
- (2) Nombre de segments par POI : idéalement 3-4 (jusqu'à 6-7 lorsqu'il y a un grand espace autour de ce point, lorsque ce point s'agit du dernier dans la zone d'étude) ;
- (3) Évitement des croisements entre segments ;
- (4) Respect des contraintes physiques du territoire (réseaux, rivières, etc.).

A titre d'exemple, il est irréaliste de créer un segment direct entre Lampertheim Mairie et Vendenheim Gare, car ces deux points ne sont pas reliés directement par les réseaux routiers ou cyclistes (Figure 21 à droite). Le trajet réaliste emprunte M263 et M64 via la zone commerciale. [Sorties de cette phase : Shp 18 (segments_distanceaucentre_manu_2154.shp) et Shp 22 (segments_EMS_2154.shp)]

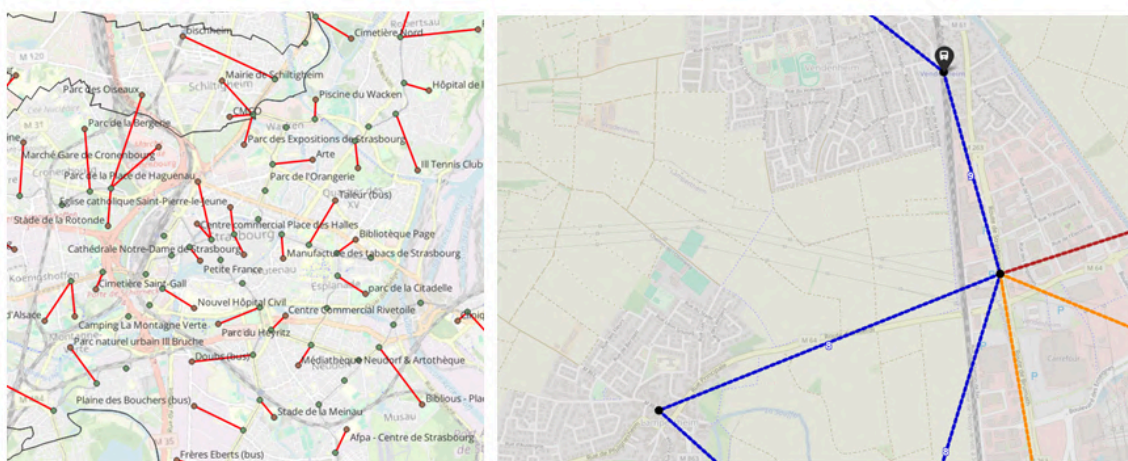


Figure 21 : Résultat de la « Distance au plus proche centre (ligne vers centre) » : les POIs sauf arrêts de tram cherchent un arrêt de tram le plus proche (à gauche) & Les structure des réseaux (fond de carte) et segments réalisés autour de la zone de deux POIs, la Lampertheim Mairie et de la gare Vendenheim (à droite)

5.D. Traitement Python 2 : calculs en dehors du réseau TC

La Figure 22 illustre les traitements des étapes 3 et 4 sur Python en indiquant les fichiers entrées et sorties.

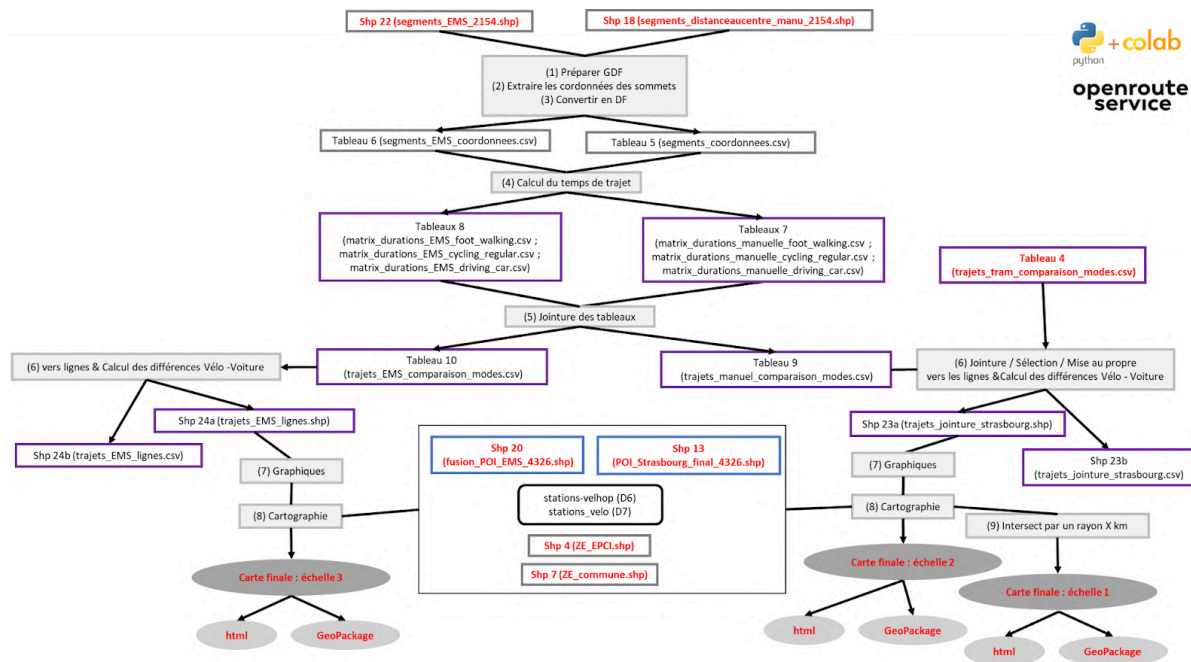


Figure 22 : Démarches de l'étape 3 jusqu'à (7) et de l'étape 4 pour (8)&(9) : données, traitements et sorties attendues

Les segments créés manuellement dans QGIS (Shp 18 et 22) sont importés dans Python et convertis en GeoDataFrame, puis en DataFrame. Les coordonnées des sommets de chaque segment sont extraites pour constituer des paires OD. L'étape 3 est globalement pareille à celle première. Les temps de trajet pour les modes marche, vélo et voiture sont alors calculés avec l'API ORS, selon la même méthode que décrite en 5.B.2. Pour les échelles 1 et 2, les résultats (Tableau 9 : trajets_manuel_comparaison_modes.csv) sont fusionnés avec ceux du tram calculés dans l'étape 1 (Tableau 4 : trajets_tram_comparaison_modes.csv) (Tableau 2). Pour aller un peu plus loin, nous pouvons calculer les différences des temps entre deux modes et les ajouter dans le tableau. Le tableau complet avec toutes les informations nécessaires est finalisé (Tableau 3). Les résultats finaux sont exportés en shapefile et csv pour être exploités dans l'étape suivante. [Sorties de cette phase : Shp 23a (trajets_jointure_strasbourg.shp), Shp 23b (trajets_jointure_strasbourg.csv), Shp 24a (trajets_EMS_lignes.shp) et Shp 24b (trajets_EMS_lignes.csv)]

id	from_stop_n	to_stop_n	route_type	from_lat	from_lon	to_lat	to_lon	tram_min	pieds_min	velo_min	voiture_min
0	stop_0_A	stop_0_B	manu	48.6851141	7.69811384	48.6727931	7.70394571		22.9	5.8	3.3
1	stop_1_A	stop_1_B	manu	48.6727931	7.70394571	48.6654139	7.71822128		21.5	8.9	4.3
2	stop_2_A	stop_2_B	manu	48.6654139	7.71822128	48.6567244	7.72194628		16.7	8.2	2.1
3	stop_3_A	stop_3_B	manu	48.6567244	7.72194628	48.6508605	7.69967748		26	7.3	3.3
4	stop_4_A	stop_4_B	manu	48.6508605	7.69967748	48.6417201	7.71499882		22.9	6.4	4.3

Tableau 3 : Structure du fichier final de l'étape 3

6. Visualisation

6.A. Types de visualisations

Deux types de visualisations cartographiques ont été développés : d'une part, des cartes interactives, et d'autre part, des cartes statiques comparatives. L'utilisation combinée de ces deux types de cartes s'explique par une volonté de diversifier les outils d'analyse et les supports de restitution. La « cartographie sur support numérique (cartographie multimédia, interactive et dynamique) (Antoni J-P. et al., 2004) » envisage les technologies numériques simultanément comme support de communication et comme canal de diffusion de l'information.

La construction des cartes interactives repose sur huit grandes étapes sous Python :

- (1) Télécharger des couches nécessaires
- (2) Création de la carte de base
- (3) Génération des couches de trajets par mode
- (4) Intégration des POIs et stations vélos
- (5) Visualisation des limites administratives
- (6) Interface utilisateur et interactions
- (7) Exportation au format HTML interactif
- (8) Exportation de toutes les couches finales au format GeoPackage

Les cartes statiques sont générées à l'aide de QGIS, à partir de données au format GeoPackage préalablement exportées depuis Python. Une fois le style cartographique défini, celui-ci est enregistré au format.qml, ce qui permet de l'appliquer facilement à d'autres couches. Les cartes ainsi produites sont ensuite intégrées dans une page HTML, avec une fonctionnalité de slider (curseur latéral) offrant une visualisation comparative interactive.

6.B. Choix du fond de carte

Reljan-Delaney M. (2023) souligne que le choix du fond cartographique dépend de deux facteurs majeurs : la pertinence des informations affichées et la lisibilité globale, influencée par la densité graphique, les contrastes et l'échelle. Il a utilisé les fonds de l'OSM dans son projet. « En fin de compte, la lisibilité est subjective et difficile à déterminer pour les cartes interactives en raison des préférences personnelles et de la diversité des lieux. Il varie également en fonction de l'échelle. (Reljan-Delaney M., 2023) »

Sur cette base, trois fonds sont proposés dans mon projet via le contrôle de couches (Annexe 14). Il peut être changé pour mieux s'adapter au contexte de l'analyse. Un fond typé vélo comme OSM Cycle Map a été testé, mais écarté en raison de sa densité visuelle excessive, rendant les segments des temps de déplacement difficilement lisibles.

- (1) OpenStreetMap Standard: Il est utile pour situer les réseaux de transport et les structures urbaines et riches en POIs. Ce projet a repris une faible opacité 0,4 pour une bonne lisibilité, vu qu'il est très saturé en informations et en couleurs. ;
- (2) Humanitarian Layer (OSM France) : C' est une version simplifiée et centrée sur les axes routiers. La même opacité que la première a été adaptée.;
- (3) **CartoDB Positron (fond clair)** : Ce fond le plus simple a été choisi comme le fond par défaut pour mettre en avant les éléments principaux sans surcharge visuelle.

Pour les cartes statiques, dans une logique de clarté, le fond choisi est discret et neutre (tons gris/beige), avec ajout modéré de repères géographiques (cours d'eau, centre-ville), afin de contextualiser les trajets.

6.C. Choix sémantiques

Segments

Pour ce projet, les temps de trajet ont été représentés par des segments colorés selon des seuils : de quatre (≤ 5 min, ≤ 10 min, ≤ 15 min, > 15 min) pour les temps de trajet par mode (Figure 21 à gauche) et de cinq (< -5 min, $-5 \leq < 0$ min, 0 min, $0 < \leq 5$ min, > 5 min) pour les différences entre deux modes différents (Figure 23 à droite). Les seuils ont été définis à partir de l'analyse des distributions des temps sous forme de nuages de points (Figure 24), produits automatiquement en Python. Chaque segment porte également une étiquette numérique indiquant la durée arrondie au-dessus pour éviter la sous-estimation : par exemple, $4,2 = 5$ et $4,9 = 5$.



Figure 23 : Légende des segments de la carte interactive : classement des temps et type des lignes

Distribution des temps de trajet

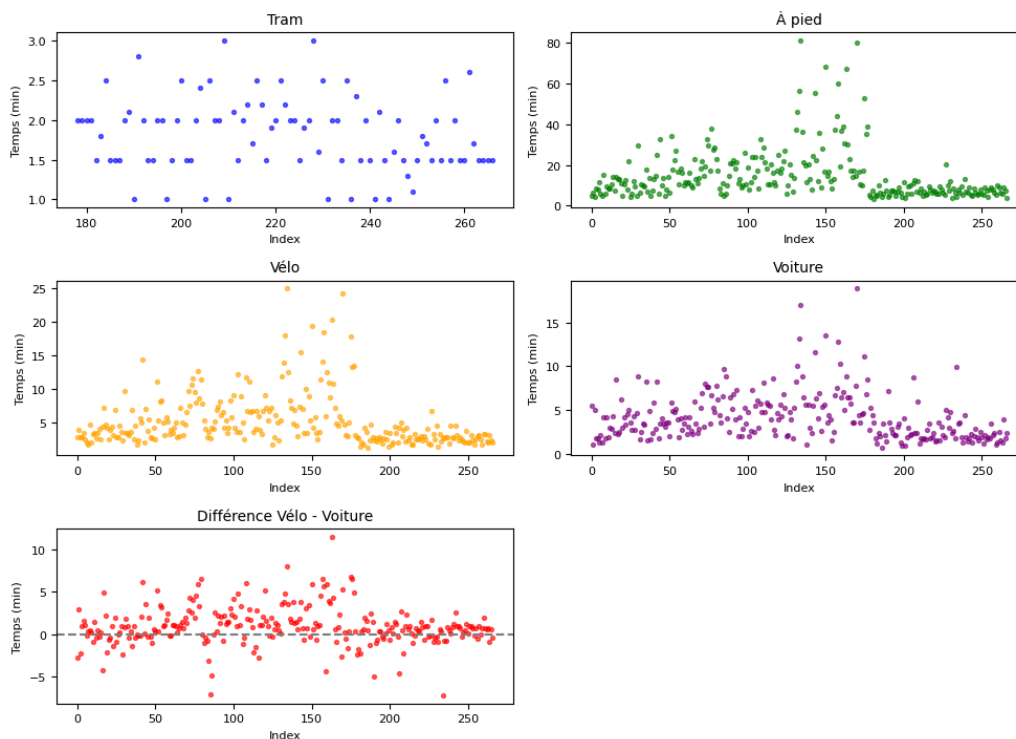


Figure 24 : Distributions des valeurs (temps sur l'axe verticale) grâce aux nuages de points (exemple de la carte à l'échelle 2)

Des styles de trait différents sont utilisés. Les échelles 1 et 2 ont pris le trait plein pour les segments du réseau tram, trait pointillé pour les autres (Figure 23 à gauche). Les segments désactivés dans QGIS (ex. segments redondants) ne sont pas affichés. Pour l'échelle 3 (sans les lignes de tram), seul le trait plein est utilisé pour maximiser la lisibilité.

Pour la carte interactive, chaque segment est enrichi d'un pop-up interactif détaillant les temps de déplacement pour tous les modes disponibles.

POIs

Dans les cartes interactives, les stations Vélhop et les gares sont affichées avec des icônes spécifiques (vélo et train). Les autres POIs sont représentés par des cercles en noir pour les arrêts de tram et bus, en blanc pour les autres POIs et en vert pour les stations de gonflage et d'outils. Dans les cartes statiques, les POI sont affichés avec des cercles en noir pour les arrêts de tram et en blanc/noir pour les gares.

6.D. Choix du design

Le design des cartes statiques est conçu simple avec une légende, une flèche de Nord et un sous-titre indiquant la zone concernée. Le titre accentue le mode concerné en utilisant une icône symbolique et la couleur de logo de l'EMS.

Les cartes interactives sont pensées comme des outils dynamiques d'exploration.

(1) **Interface** : En plus des éléments précédemment expliqués, une légende explicative, fixe et lisible, pour interpréter les couleurs, les symboles et les seuils des temps, un bouton de réinitialisation permettant de revenir à l'état initial de la carte y sont intégrés. Un bouton d'aide explique comment les utilisateurs manipulent cette carte. Elle est conçue pour être claire, épurée et informative, en intégrant des éléments essentiels. Cette interface vise à faciliter la navigation tout en restant accessible à un public non technique.

(2) **Interaction** : L'interaction permet à l'utilisateur d'agir sur la carte. Les utilisateurs peuvent cliquer sur un segment pour voir les temps de tous les modes, cliquer sur un point ou une icône pour voir le nom des POIs (Figure 25), activer ou désactiver des couches thématiques à l'aide d'un menu interactif (LayerControl), et zoomer et se déplacer librement dans la zone. Ces fonctionnalités rendent la carte explorable et personnalisable en offrant plusieurs niveaux de lecture.

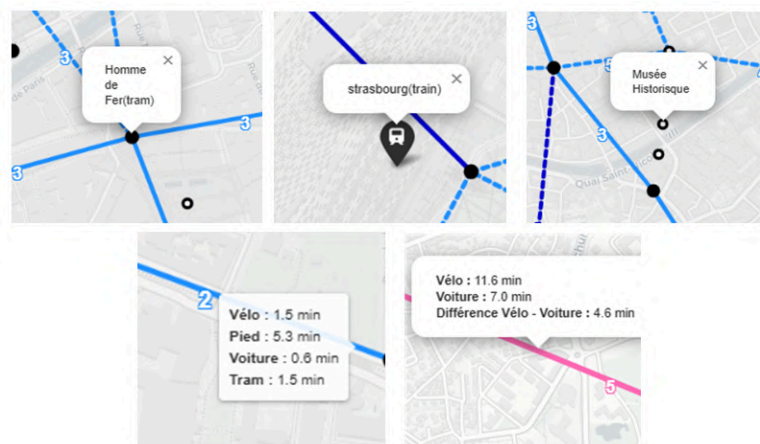


Figure 25 : Exemples de popups dans la carte interactive
(en haut : informations sur les POIs, en bas : détails des temps modaux)

7. Synthèse de la méthodologie

Le Tableau 4 présente une synthèse des éléments clé de la méthodologie développée dans ce projet. Bien que les paramètres détails choisis (ex. taille des grilles, types de POIs intégrés) soient spécifiquement adaptés au territoire étudié, les fondements de la méthodologie restent pareils à d'autres contextes géographiques. Ces éléments incluent : l'échelle, les couches de données préparées, le mode de transport ciblé, les types de données mobilisées, les outils utilisés, les méthodes de calcul, les grilles spatiales, les POIs et les segments. Chaque démarche s'ajuste en fonction de l'échelle cartographique et du mode de transport ciblé, en mobilisant des paramètres, des outils et des données appropriés à chaque cas.

couches préparées	échelles 1 & 2			échelle 3	Python (automatisé) → Cartes interactives	
	échelle 1 : pied / vélo / voiture		échelle 2 : vélo / voiture / diff. vélo-voiture	vélo / voiture / diff. vélo-voiture		
mode ciblé	tram	pied	vélo	voiture	Python (automatisé) → Cartes interactives	
données, outils et calcul	GTFS	ORS				
	temps réels de trajet		temps théoriques par ORS		Python (automatisé) → Cartes interactives	
	OD / DO (aller/retour) prenant une moyenne des deux sens					
grilles	0.5x0.5 (intervalle d'arrêts de tram & distance réaliste)			2.5x2.5 (superficie communale & distance réaliste)		QGIS (manuel) → Cartes statiques
POIs	arrêts de tram	sites emblématiques maries gares aéroport		stations vélo arrêts de bus maries gares aéroport		
segments	pas trop long			pas trop court		

Tableau 4 : Synthèse de la méthodologie construite

La visualisation finale repose sur la théorie des graphes, en s'inspirant notamment d'exemples issus d'autres villes, comme le Metrominuto, qui propose une simplification des réseaux sous forme de nœuds et de segments. Dans le cadre de ce mémoire, les nœuds correspondent aux POIs (sites emblématiques et arrêts de transports en commun), tandis que les segments représentent des itinéraires simplifiés illustrant les liens entre deux points. Bien que la représentation graphique finale puisse évoquer des distances à vol d'oiseau, les temps de déplacement sont calculés sur la base des itinéraires réels fournis par l'ORS et le GTFS. Ces calculs sont effectués à partir des coordonnées précises des POIs tout au long du processus. Les lignes présentes dans la visualisation finale ont donc uniquement une fonction visuelle (Figure 26).

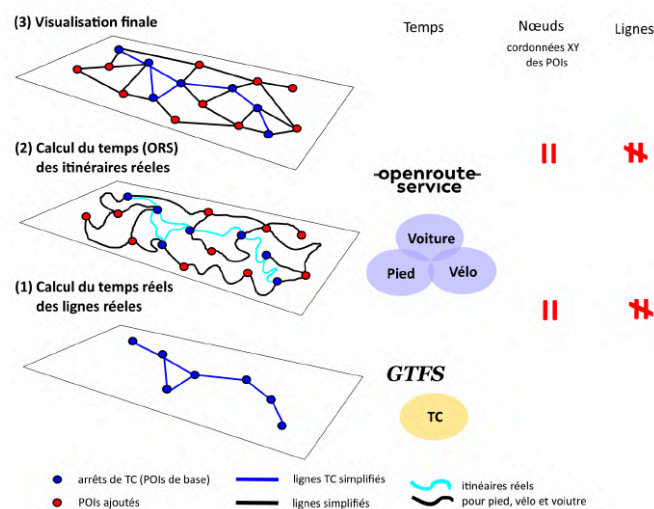


Figure 26 : Synthèse schématique de la logique du calcul et de la représentation visuelle

Chapitre 3 : Résultat

La méthodologie présentée au chapitre précédent a permis de produire plusieurs restitutions cartographiques, sous deux formats complémentaires : cartes statiques et cartes interactives. L'ensemble des cartes réalisées est accessible en ligne via une page dédiée sur GitHub, un service web d'hébergement (Annexe 9). Ces représentations offrent une lecture visuelle et comparative des temps de déplacement entre POIs, selon différents modes de transport (marche, vélo, voiture, tram) et trois échelles géographiques (centre, réseau tram, EPCI).

8. Résultats cartographiques : focus fonctionnel et géographique

Au total, sept cartes statiques (✓ dans le tableau) et trois cartes interactives (une par échelle) ont été produites (Tableau 5). Chaque carte est adaptée à son niveau d'échelle et aux spécificités du territoire représenté. Les points correspondent aux POIs, soit utilisés comme nœuds de calcul, soit sélectionnés pour leur valeur emblématique. Les lignes entre ces points représentent les segments OD calculés. Les temps de trajet sont illustrés par des couleurs différentes et par les étiquettes sur les segments.

carte statique	temps de ...			comparaison entre ...	
	pied	vélo	voiture	pied -vélo	vélo - voiture
échelle 1	✓	✓	✓	pied -vélo	vélo - voiture
échelle 2	-	✓	✓	vélo - voiture	
échelle 3	-	✓	✓	vélo - voiture	

carte interactive	temps de ...				
	pied	vélo	tram	voiture	vélo - voiture
échelle 1	V / P	V / P	P	V / P	-
échelle 2	P	V / P	P	V / P	V / P
échelle 3	-	V / P	-	V / P	V / P

Tableau 5 : Synthèse des cartes produites et informations contenues (V = visualisation, P = popup interactive)

8.A. Cartes statiques

Les cartes statiques, de type graphique inspiré du Metrominuto, se concentrent sur une visualisation simple, rapide et stable d'un seul mode de déplacement à une échelle donnée. Elles facilitent la compréhension visuelle directe, sans manipulation numérique. La Figure 27 à gauche illustre les éléments clés d'une carte statique typique.

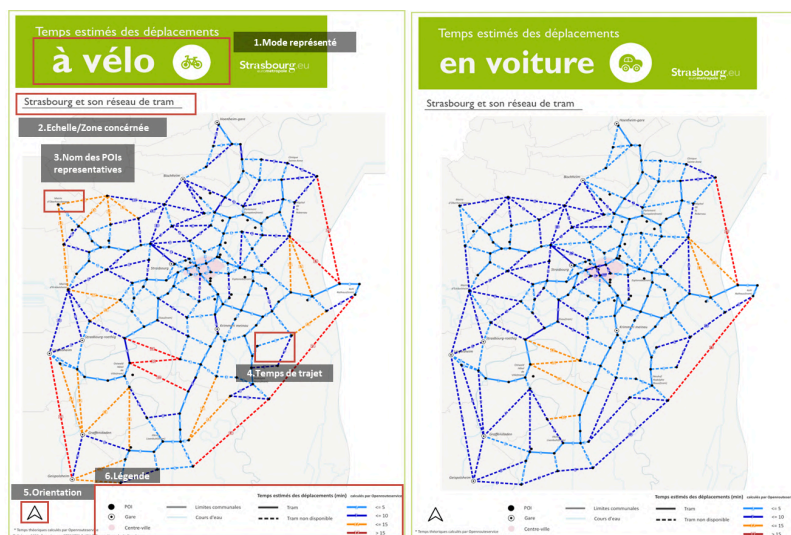


Figure 27 : À gauche, éléments constitutifs d'une carte statique & exemple de comparaison vélo/voiture à l'échelle 2 (réseau de tram de Strasbourg)

Grâce au design unifié, les cartes peuvent être superposées pour comparer les temps par mode. Au-delà d'une lecture classique, ces cartes offrent deux usages analytiques puissants :

(1) Comparaison entre plusieurs modes à une échelle donnée

Un outil slider est disponible sur le site Github (Annexe 9) en permettant à l'utilisateur de faire glisser un curseur pour comparer visuellement deux cartes (Figure 28).

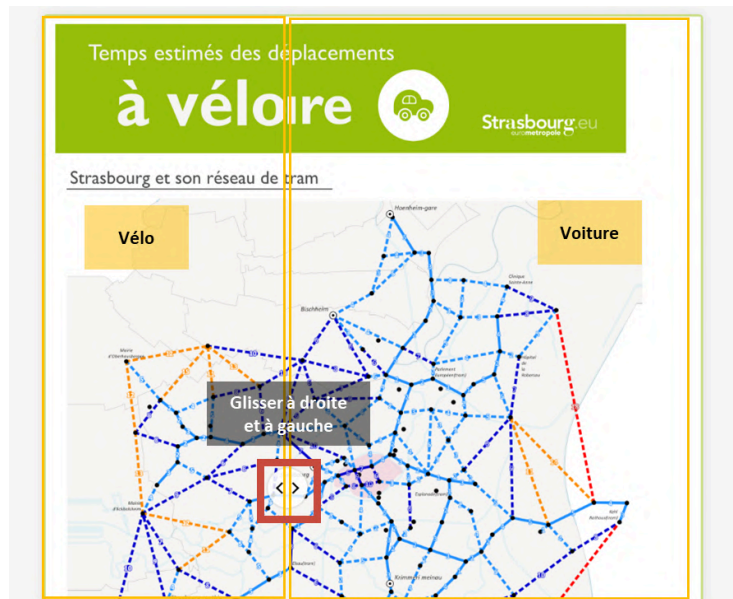


Figure 28 : Exemple de comparaison par curseur glissant

(2) Comparaison intra-modale aux différentes échelles

Il est également possible d'observer comment un même mode de transport se comporte à différentes échelles géographiques (Figure 29).

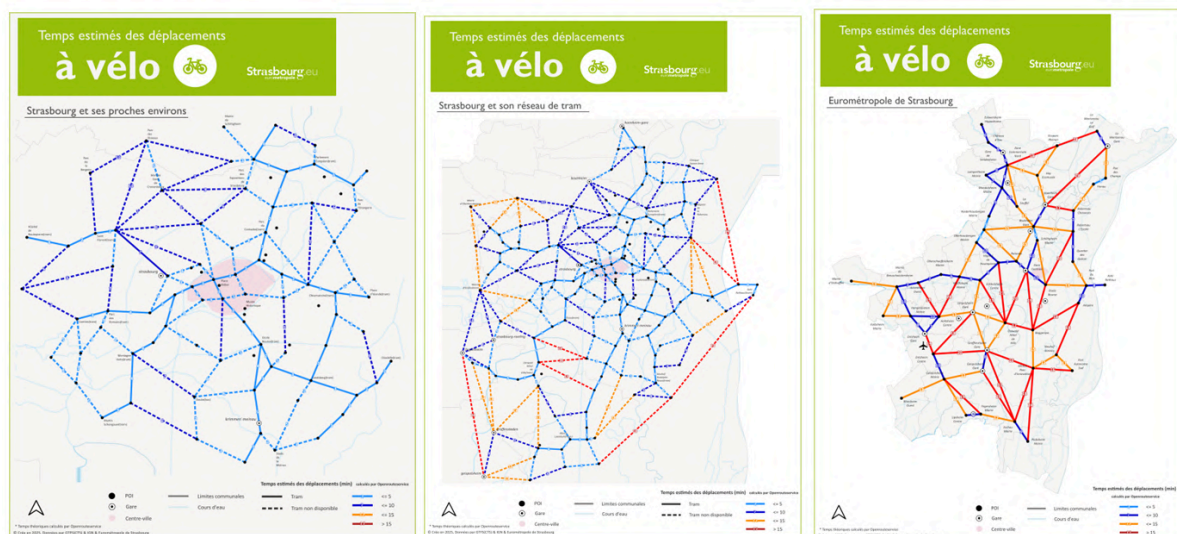


Figure 29 : Comparaison des temps à vélo aux trois échelles étudiées

8.B. Cartes interactives

Les cartes interactives sont consultables en ligne via un navigateur web. Pour une meilleure exploitation, l’affichage sur écran d’ordinateur est recommandé. Elles offrent une exploration approfondie et personnalisée notamment pour accéder à des détails. L’utilisateur peut interagir directement avec la carte : activer ou désactiver les couches, consulter les temps de trajets modaux via des infobulles, ou encore se positionner librement sur l’espace géographique. La Figure 30 explique les éléments et fonctionnels principaux.

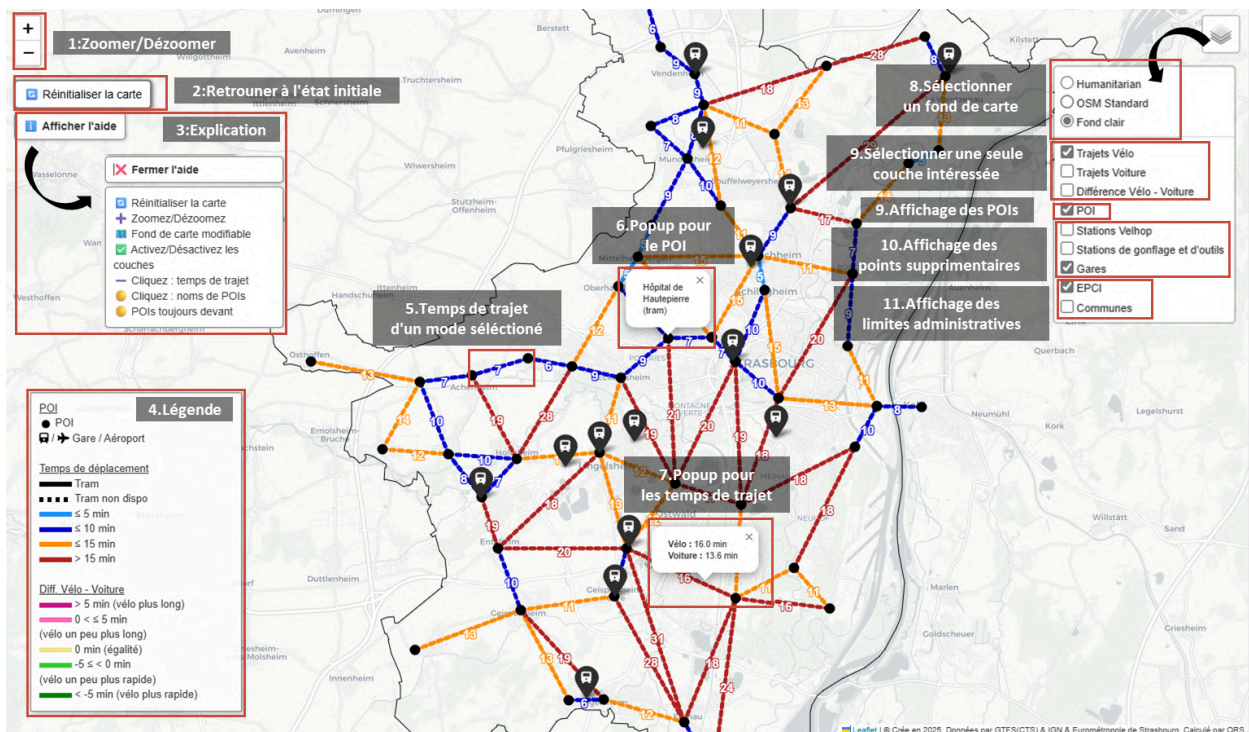


Figure 30 : Interface type d’une carte interactive à l’échelle 3 (EMS) et explication des éléments fonctionnels

Bien qu’une seule couche de temps puisse être affichée à la fois à l’écran, deux fonctionnalités permettent les comparaisons entre modes sur un même segment.

- (1) Les popups sur les segments (7 de la Figure 30) permettent de visualiser tous les temps de trajet disponibles
- (2) Une couche appelée « Différence Vélo - Voiture » (8 de la Figure 30) indique visuellement les écarts de temps entre les deux modes (positifs ou négatifs)

Cette couche offre donc un aperçu rapide des avantages comparatifs du vélo sur la voiture, ou inversement : dans quelles mesures le vélo est plus ou moins rapide que la voiture ?

L’avantage de la carte interactive est de chercher des informations plus détaillées que nous n’avons pas pu trouver sur les cartes statiques : à titre d’illustration, les noms de tous les POIs et les temps de plusieurs modes sur un segment. Les couches supplémentaires (9 et 10 de la Figure 30) nous aideront à mieux nous situer géographiquement et à chercher des points utiles le long de trajet. En outre, des fonds de carte enrichis (8 de la Figure 30) complètent la lecture géographique, en affichant les POIs détaillés (Figure 31), les réseaux, infrastructures et obstacles éventuels tels que les rivières.

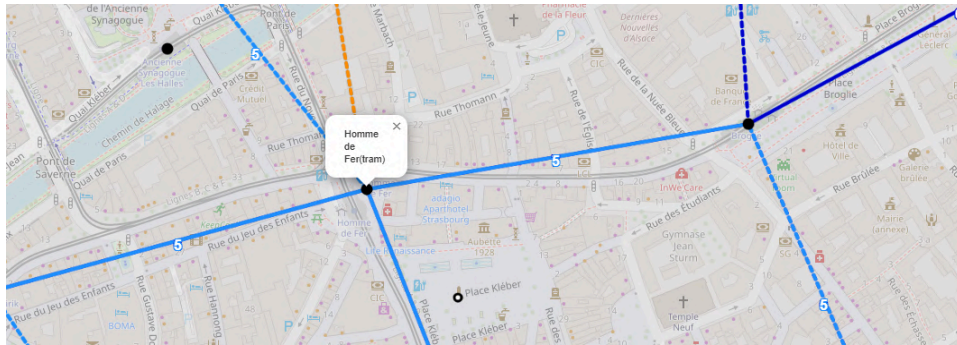


Figure 31 : Affichage des POIs du fond de l'OSM Standard autour de l'arrêt de tram Homme de Fer

8.C. Observations géographiques

Les résultats cartographiques révèlent plusieurs enjeux de la mobilité décarbonée. Même si les cartes ne représentent pas les itinéraires exacts (elles mènent à une visualisation simplifiée des itinéraires réels), plusieurs intérêts d'un mode y sont mis en lumière.

[Marche vs Tram] Bien que le temps de marche soit généralement plus long, la carte du centre-ville (échelle 1) montre que marcher peut parfois rivaliser avec les autres modes sans autant d'effort. A titre d'exemple, entre l'Université (O) et le parc de l'Orangerie (D), le trajet directement à pied prend 19,5 min, contre environ 18 min (12,1 min de tram + 6 min à pied) en tram (Figure 32 à gauche).

[Vélo vs TC] Le vélo apparaît attractif pour certains trajets moyens (3-5 km). De même que la marche, la carte révèle qu'entre les arrêts de tram Wihrel et Baggersee, le vélo (19,5 min) surpasse le tram (30-40 min) de manière notable (Figure 32 à droite).

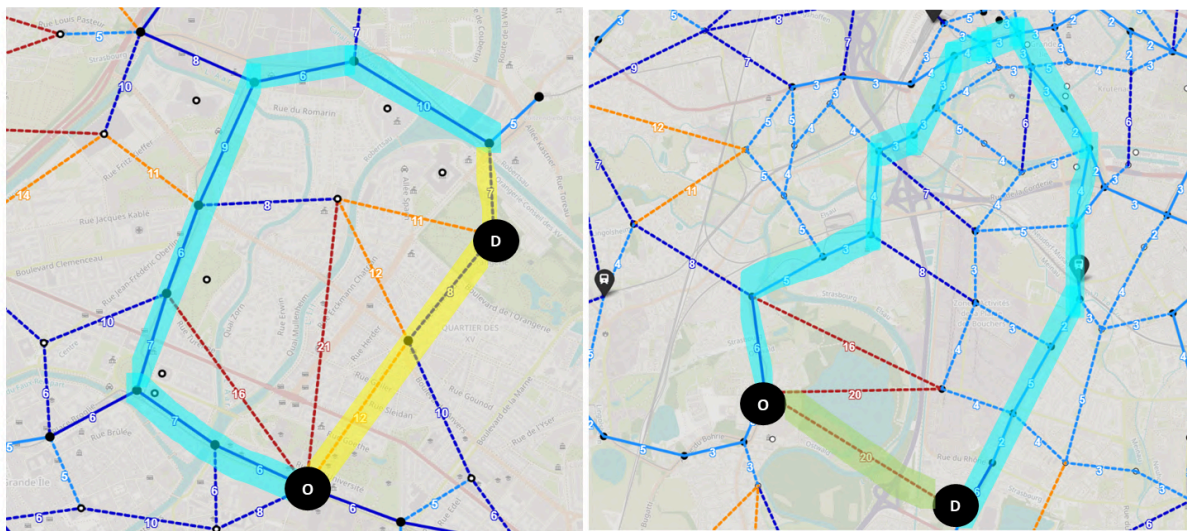


Figure 32 : Comparaison des itinéraires et temps : Marche (jaune) vs Tram (bleu) à gauche & Vélo (vert) vs Tram (bleu) à droite

[Vélo vs Voiture] À l'échelle 2, la carte révèle que le vélo est souvent plus rapide que la voiture dans le centre historique de Strasbourg (Figure 33 à gauche). Ce phénomène est visible notamment autour de la gare de Strasbourg et du Campus d'Illkirch. À cette échelle, dans les zones périphériques ou sur les segments relativement longs, la voiture reprend souvent l'avantage, mais les écarts restent modérés (< 10 min dans de nombreux cas). À l'échelle 3 de l'EMS, la compétitivité de la rapidité de vélo n'est

pas autant montrée, mais les différences sont souvent inférieures à 10 min, ce qui a suffisamment montré son attractivité (Figure 33 à droite).

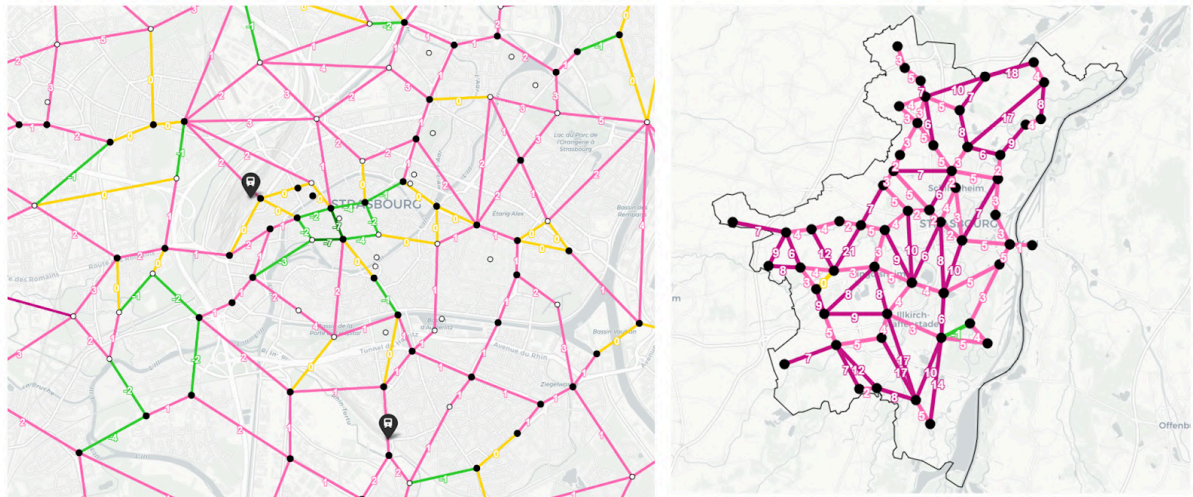


Figure 33 : Couche de la comparaison des temps : l'échelle 2 à gauche l'échelle 3 à droite

[Tram vs Voiture] La carte à l'échelle 2 et la Figure 34 montrent que le tram est fréquemment plus rapide que la voiture.

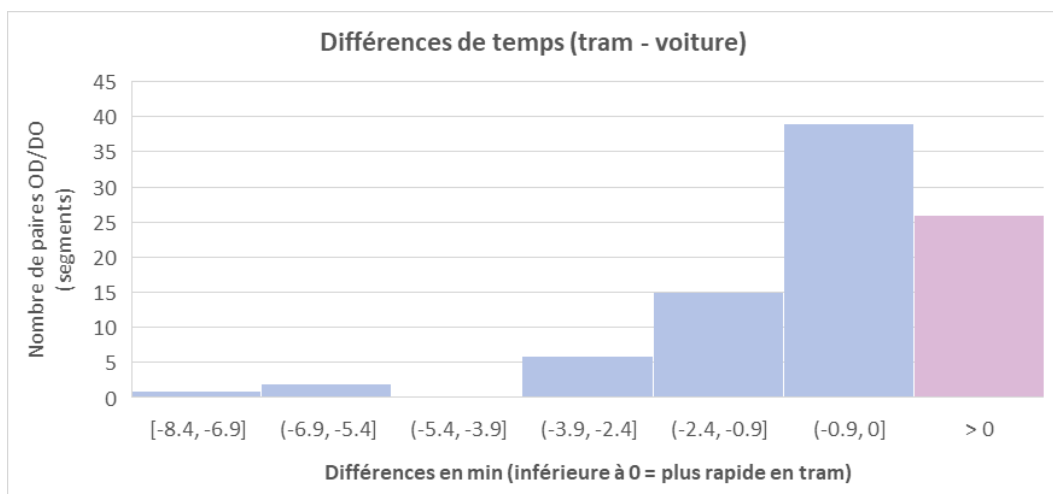


Figure 34 : Histogramme de la distribution des différences de temps

Chapitre 4 : Discussion

Le chapitre précédent a présenté les résultats cartographiques issus de la méthodologie partiellement automatisée. Ces résultats sont visuellement et opérationnellement convaincants en témoignant de la faisabilité d'une cartographie automatisée des temps de déplacement à l'échelle territoriale. Cette méthodologie peut être considérée comme innovante, dans la mesure où elle combine l'accessibilité des données, la reproductibilité méthodologique et le potentiel d'analyse pour la mobilité décarbonée. Toutefois, ce projet a également rencontré certaines limites et restrictions. L'identification de ces contraintes contribuera à nourrir des pistes d'amélioration et de développement et à ouvrir de nouvelles perspectives pour les travaux futurs dans ce domaine.

9. Bénéfices et limites de l'étude

9.A. Apports méthodologiques et thématiques de l'étude

9.A.1. Bénéfices méthodologiques

La méthodologie élaborée dans ce mémoire présente plusieurs atouts.

(1) **Automatisation partielle du processus** : Grâce à l'usage de Python et de ses bibliothèques, voire la combinaison Python + Folium + ORS, une large part du traitement, le calcul des temps et la cartographie, ont été automatisés. Cela permet une réduction notable du temps de traitement, une reproductibilité renforcée, ainsi qu'une limitation des erreurs humaines. Cette automatisation partielle et ce croisement d'outils sont indispensables pour ce projet ayant des défis : une structure complexe des réseaux de transport et la diversité, le nombre important des POIs et le nombre important des données.

(2) **Gratuité et accessibilité des données et outils** : L'ensemble des données et outils mobilisés dans ce projet sont open source et libres d'accès, ce qui garantit une méthodologie applicable à d'autres territoires.

(3) **Cohérence et compatibilité** : L'uniformisation des données et des outils, ainsi que l'appui sur OSM comme base de référence, assurent une homogénéité des résultats et une compatibilité entre les différentes étapes de traitement, quel que soit le territoire d'étude.

(4) **Personnalisation** : La méthode proposée constitue une base adaptable. Les scripts Python, les choix de POIs, les échelles d'analyse ou le style de visualisation sont facilement modifiables, permettant d'ajuster la démarche aux spécificités territoriales et aux objectifs stratégiques.

(5) **Flexibilité méthodologique** : Bien que la méthode proposée soit structurée, elle n'exclut pas d'autres approches. En cas de manque de données ou de contraintes techniques, des alternatives peuvent être explorées tout en conservant l'ossature générale du processus.

9.A.2. Bénéfices thématiques

Les résultats obtenus jouent également un rôle important pour la sensibilisation de la mobilité durable auprès des habitants.

(1) **Comparaison multi-modale des temps de déplacement** : Les cartes produites offrent une lecture synthétique et comparative des temps selon plusieurs modes de transport. Cela permet de visualiser les écarts de performance entre les modes et de sensibiliser les usagers aux potentiels de report modal vers les mobilités plus durables. Ce mémoire propose ainsi un nouvel outil visant à promouvoir un

changement de comportement modal, en encourageant le passage de l'automobile vers les modes actifs ou les TC, par le biais d'une comparaison visuelle de ces différents modes.

(2) **Approche multi-échelle** : La déclinaison des résultats à différentes échelles spatiales (centre, réseau TC, EPCI) permet de s'adapter à la diversité des espaces urbains et des besoins d'analyse, rendant les cartes pertinentes à la fois pour l'utilisateur et le décideur.

9.B. Évaluation de la validité des temps calculés

Afin d'évaluer la fiabilité des temps de parcours calculés à l'aide d'ORS, une comparaison a été réalisée avec Google Maps et Geovelo, deux outils fréquemment utilisés dans d'autres villes (résultats détaillés en Annexe 15). Le Tableau 6 présente les vitesses moyennes calculées sur 10 segments échantillons pour chaque mode de transport. Il en ressort les constats suivants :

- **Marche** : Les vitesses moyennes sont globalement similaires entre ORS et Google. Toutefois, si Google Maps présente des vitesses relativement stables, celles d'ORS montrent une variabilité plus marquée d'un échantillon à l'autre.
- **Vélo** : La vitesse estimée par ORS est plus élevée que celles de Google Maps et Geovelo, avec un écart notable notamment par rapport à Geovelo.
- **Voiture** : La vitesse calculée par ORS est légèrement inférieure à celle estimée par Google Maps, bien que l'écart reste modéré.

km/h	ORS	Google	Geovelo (Equilibré)
ped	5.0	4.6	
vélo	16.5	14.8	12.3
voiture	25.2	27.3	

Tableau 6 : Vitesses moyennes issues de 10 segments échantillons, par mode de transport et moteur de calcul

Les différences observées ne remettent pas en cause la validité des temps calculés par l'ORS. Il faut rappeler qu'il ne s'agit ici que de résultats basés sur un échantillon limité de 10 segments. Par conséquent, la fiabilité des temps produits par l'ORS peut être considérée globalement acceptable, notamment au regard des valeurs moyennes couramment utilisées et des deux autres moteurs de comparaison.

9.C. Limites et contraintes : données, outils et méthodologie

9.C.1. Données GTFS

Les données peuvent parfois contenir des erreurs de codification ou des représentations erronées du réseau réel. Les heures d'arrêt inscrites peuvent être erronées en raison de la congestion, ou les arrêts peuvent être codés de manière imprécise et avoir des coordonnées erronées (Fortin P. et al., 2016). Pour éviter ces erreurs, Google fait des efforts pour l'introduction des outils de validation de flux avant de publier les flux GTFS. À cet effet, un script de nettoyage a été intégré dans le processus de traitement de ce mémoire.

9.C.2. OSM et ORS : qualité des données, POIs et calculs

En termes de qualité des données, l'OSM est reconnu pour sa couverture et sa richesse notamment en Europe (Boeing G., 2017) et il est utilisé dans de nombreux travaux. En revanche, certaines limites sont également mises en relief : des erreurs de classification, des localisations

approximatives ou un niveau de détail inégal qui peut affecter la précision des calculs, notamment pour les POIs ou les routes.

Dans ce projet, j'ai effectivement tenté au départ l'outil OSMnx dans le but de faciliter et automatiser le processus de manière cohérente. L'OSMnx est un package Python gratuit et open source qui télécharge les géométries des limites politiques et administratives, les empreintes de bâtiments et les réseaux routiers depuis l'OSM. Il permet de construire, projeter, visualiser et analyser facilement et de manière cohérente des réseaux routiers complexes non plats en construisant le réseau piétonnier, routier ou cyclable d'une ville ou d'un quartier avec une seule ligne de code Python, incluant les élévations des nœuds et les niveaux des rues (Boeing G., 2017). Néanmoins, malgré ses points positifs, cette approche a été écartée pour des raisons des erreurs de classification, de l'absence d'estimation directe des temps de trajet, d'informations incomplètes ou mal classées et du temps important de traitement (Annexe 16) (Fu X. et al., 2023). C'est la raison pour laquelle la sélection des POIs et la segmentation ont manuellement été effectuées sur QGIS et les temps calculés par l'ORS.

Temps du traitement par l'ORS API

Bien que des lenteurs aient été signalées par Juninger M. et Narvell N. (2023), les performances observées dans ce projet restent acceptables.

- Calcul sur le réseau tram : 87 lignes x 87 lignes x 3 fichiers (modes) = environ 7 min
- Calcul en dehors du réseau tram : 183 lignes x 183 lignes x 3 fichiers (modes) = environ 12 min

Validité des temps calculés par l'ORS

Plusieurs facteurs peuvent expliquer les écarts constatés avec Google Maps ou Geovelo dans la partie 9.B. :

- ORS ne prend pas en compte le trafic en temps réel ;
- ORS repose sur des vitesses moyennes paramétrées, qui peuvent être sous-estimées ou trop génériques selon le contexte urbain.

Par ailleurs, les conditions réelles peuvent influencer fortement les durées : heure, météo, embouteillages, comportement des usagers, conditions d'accessibilité, temps de correspondance etc. Curtis C. et Scheurer J. (2010) soulignent d'ailleurs l'importance de ces éléments dans l'estimation des temps de trajet. Certaines applications SIG avancées intègrent ces facteurs pour modéliser les itinéraires les plus fréquemment empruntés en fonction des vitesses moyennes réellement observées par segment. Bien qu'ils soient utiles pour l'analyse, ils ne reflètent pas nécessairement les conditions réelles. Des éléments comme les feux de circulation et leur respect influencent sensiblement la durée réelle du trajet en zone urbaine, spécialement pour les déplacements en voiture.

Plusieurs références soulignent les différences dans les calculs de temps ou d'itinéraires entre différents outils, notamment entre Google Maps et OSM. À ce sujet, Masuyama A. (2017) a conclu qu'il existe une forte corrélation entre les résultats obtenus par Google Maps et OSM, en particulier pour les trajets à pied, avec un coefficient de régression partielle de 0,99873, contre 0,87293 pour les trajets en voiture (Annexe 17). Cette petite différence s'explique par le fait que Google Maps présente une corrélation relativement plus faible entre la distance et le temps de trajet pour les déplacements en voiture que pour ceux à pied. Cela peut être attribué à la capacité de Google Maps à mieux s'adapter

aux conditions réelles, tant sur le plan spatial que temporel. Geovelo se base sur l'OSM, mais les documentations officielles indiquant les paramètres concernant les vitesses, etc. n'ont pas été trouvées dans mes recherches bibliographiques.

Malgré tout, dans ce mémoire, il ne s'agit pas de représenter les conditions de circulation en temps réel. À ce titre, Google Maps a effectivement montré des temps variables selon l'heure de la requête. En outre, Geovelo a proposé des vitesses plus faibles que celles couramment citées dans d'autres études, bien qu'il existe aussi des pistes cyclables avec des vitesses autorisées plus élevées. Ainsi, les écarts constatés avec deux autres outils ne remettent pas en cause la validité des temps calculés par l'ORS. Il est néanmoins pertinent de préciser aux lecteurs que ces résultats reposent sur des temps théoriques.

Qualité des POIs

Une autre raison pour expliquer, Psyllidis A. et al. (2022) mettent en avant que les niveaux d'exhaustivité, de précision et de cohérence des POIs et de leurs attributs varient selon les sources de données et les zones géographiques (Annexe 18). Lorsque les POIs sont représentés sous forme ponctuelle non sous forme de polygone, les points exacts d'accès à ce POI sont généralement inconnus. Savoir si un POI est décalé par rapport à la route et où se trouvent ses entrées (Psyllidis A. et al., 2022) jouera un rôle critique pour le calcul précis. Selon Rahman F. et al. (2025), la qualité des POIs de l'OSM manque de précision par rapport à la réalité et voire à GoogleMap et cela peut donc influencer la qualité de calcul de l'accessibilité. Pour ce point, dans ce mémoire, bien que les coordonnées des POIs n'aient pas été extraites automatiquement depuis l'OSM, leur positionnement manuel basé sur les fonds OSM peut introduire des décalages avec la réalité (notamment sur une grande surface telle que le Parc de l'Orangerie ou le centre commercial Rivétoile), ce qui contribue aux écarts observés entre l'ORS et les autres outils. De plus, je souligne que, dans ce mémoire, les coordonnées des arrêts de TC sont préalablement regroupées par leur centroïde, afin de simplifier à la fois le traitement mathématique et la représentation graphique.

9.C.3. Contraintes techniques personnelles

Les données et les outils utilisés et la méthodologie construite ont été orientés par les contraintes de temps et les compétences personnelles disponibles. Certains aspects auraient pu être améliorés avec davantage de temps ou une expertise technique plus poussée : intégration d'une interface plus avancée et paramétrage plus fin des profils ORS. Par ailleurs, une connaissance fine du territoire est essentielle pour assurer des choix pertinents en matière de POIs, d'échelles et de réseaux. Un travail collaboratif avec des experts territoriaux permettrait de mieux contextualiser les résultats.

10. Réplicabilité

10.A. Réplicabilité géographique : application à d'autres territoires

La méthodologie élaborée a été conçue pour être répliquable sur d'autres territoires français, à condition de disposer d'un socle de données homogène et de capacités techniques similaires. Cette répliquabilité est premièrement conditionnée par l'outil accessible à tout le monde et par la qualité, la couverture et la cohérence des données disponibles. L'usage d'outils open source (Python, QGIS, OSM et ORS) et de données ouvertes (GTFS et INSEE, etc.) est un atout majeur pour la reproductibilité. Deuxièmement, l'automatisation du calcul et de la cartographie permet de facilement reproduire et de retraiter le même type des résultats statistiques et visuels. Les scripts Python,

combinés à QGIS et ORS, permettent de reproduire automatiquement les traitements à condition d'adapter les paramètres aux spécificités du territoire.

(1) Forme et densité des réseaux TC

La méthodologie construite repose sur une base de POIs des arrêts TC (ici tram). Elle suppose donc la présence d'au moins un mode de TC structurant, et de données GTFS exploitables. En juin 2025, plus de 330 jeux GTFS étaient disponibles en France (Annexe 19). Comme l'a montré la Figure 5, les réseaux tram ont été aujourd'hui aménagés dans la plupart des métropoles françaises. Pour les métropoles dotées d'un réseau dense et complexe comme Paris, il est possible de ne sélectionner qu'une seule ligne stratégique, par exemple pour sa lisibilité ou sa centralité. Il est important de sélectionner un réseau stratégique en termes de sa forme, sa densité et des informations à transmettre aux lecteurs. D'autre part, un réseau TC peut s'étendre sur plusieurs territoires administrativement différents ou, au contraire, seulement sur une petite zone. En outre, les espacements entre arrêts peuvent également varier selon le territoire. Pour cette étude de cas, les réseaux tram et bus s'étendent simplement sur l'EPCI de l'EMS de manière assez régulière.

(2) Morphologie urbaine et Topographie

Le territoire strasbourgeois est caractérisé par une structure dite « monocentrique discontinue (Le Néchet F., 2015) ». Selon Le Néchet F. (2015), chaque territoire peut être catégorisé par leurs caractéristiques (Annexe 20). Par exemple, d'autres métropoles, comme Paris ou Lyon, relèvent d'une structure « monocentrique compacte », plus concentrée spatialement. « L'accent est mis sur le fait que la structure du réseau de transport d'une région ne peut être dissociée des caractéristiques géographiques de cette région (Kansky K.-J. et Beauguitte L., 2023). » Ainsi, les choix de l'échelle ou des POIs (la taille des grilles) seront mieux différenciés.

Par surcroît, la méthodologie construite repose également sur une hypothèse de symétrie des temps de trajet aller-retour, valable dans des contextes plats. Pour les territoires à forte dénivellation, il serait pertinent de différencier les temps selon le sens du déplacement, comme en témoignent certains projets locaux (voir l'exemple de Clermont-Ferrand en Annexe 6).

10.B. Réplicabilité temporelle : actualisation et mise à jour des données

La méthodologie se veut également répliquable dans le temps, afin de permettre le suivi des évolutions spatiales, modales et d'infrastructures. Les POIs sont des éléments dynamiques. Psyllidis A. et al. (2022) soulignent que les POIs peuvent apparaître, disparaître ou être déplacés, souvent avec un délai entre leur mise à jour réelle et leur reflet dans les bases de données. Une surveillance régulière de la validité des POIs utilisés est donc indispensable. Fortin P. et al. (2016) font valoir que les réseaux de TC sont également sujets à des changements fréquents : modifications d'horaires, création ou suppression de lignes et changements de fréquence. En effet, de nombreuses extensions et de modifications horaires (train, tram, bus) sont effectuées dans l'EMS, le territoire d'étude de cas (Eurométropole de Strasbourg, 2024a). Le format GTFS permet en théorie une mise à jour régulière et automatisable, tant que la structure générale du fichier est conservée. La chaîne de traitement mise en place de Python et ORS reste donc applicable, sous réserve d'un ajustement des entrées. Par ailleurs, les profils de vitesse utilisés dans l'ORS reposent sur les données l'OSM, qui sont elles-mêmes mises à jour en continu.

11. Perspectives et améliorations possibles

11.A. Pour une meilleure utilisation : idées de communication et de promotion

La carte des temps, en tant qu'outil visuel accessible et lisible, peut être utilisée de manière stratégique pour sensibiliser les usagers à la mobilité décarbonée. En s'appuyant sur la Norm Activation Theory et la Social Norms Theory, il est démontré que la conscience des conséquences et des responsabilités peut favoriser l'adoption de comportements écologiques. Une meilleure communication via la carte pourrait consolider l'achèvement de l'objectif. En effet, le Metrominuto de Pontevedra (Ciudades que Caminan, s.d.) manifeste qu'« il répond à tous les paramètres d'une campagne publicitaire motivationnelle » et « son contenu s'adapte à tout plan promotionnel public ou privé en raison du caractère optimiste de son message. » Selon Munzner T. (2014), la visualisation est plus efficace lorsqu'elle intègre « humans in the loop », c'est-à-dire lorsque l'utilisateur est acteur de son interprétation. Cela implique un outil simple et lisible, adapté à un usage rapide et intuitif.

Des exemples inspirants ont été identifiés. À Londres, le programme Legible London a positionné des affichages dans des lieux stratégiques de passage, permettant une consultation rapide avant ou pendant un déplacement (AIG London Ltd, 2006). Ciudades que Caminan (s.d.) expose dans son guide les exemples de promotion ainsi que des modèles structurels d'une carte (Annexe 21). À Lyon, Amandine G. (2022) suggère de placer ces plans aux abris de tram, abribus ou quais de métro, soulignant leur utilité lors d'attentes ou de perturbations. La valorisation de ces cartes passe donc par une intégration contextuelle et visible dans l'espace public, mais aussi par leur déclinaison numérique (QR codes, sites interactifs, etc.).

11.B. Pour aller plus loin thématiquement

Vers la mobilité multimodale et intermodale

L'importance de la multimodalité et l'intermodalité dans la mobilité durable est révélée dans de nombreuses études. Le Plan des Modes Actifs de Lyon illustre bien cette démarche dans 2.C. (Figure 10 et Annexe 8 pour la carte entière). Actuellement, la méthodologie développée dans ce mémoire produit des cartes par mode unique. « Les transports en commun et les modes actifs ne sont pas concurrents, mais complémentaires (Amandine G., 2022). » Par ailleurs, Mundaca L. et al. (2022) souligne également que les complémentarités et l'efficacité environnementale perçue des services d'autopartage et des TC jouent un rôle important. Ainsi, une piste d'amélioration serait de construire une cartographie des temps combinés (ex. marche + tram, vélo + bus, etc.).

« Selon le contexte (envie du moment, conditions météorologiques favorables ou non, perturbation ou arrêt la nuit du réseau de transports en commun, déplacement qui nécessite d'opérer plusieurs correspondances dans une zone peu desservie, embouteillages...), avoir plusieurs solutions pour se déplacer représente une opportunité pour les voyageurs (Amandine G., 2022). » Les résultats de l'enquête de Lyon, qui ont fait ressortir les conditions selon lesquelles le choix du mode pouvait se porter sur la marche à pied, le vélo en libre-service ou les TC, serviront à la création des cartes des temps pour la multimodalité et l'intermodalité (Annexe 22).

Sélection alternative des POIs adaptée aux usages

La pertinence d'une carte dépend en grande partie du choix des POIs. Cette méthodologie construite peut fonctionner pour créer une carte des temps d'une stratégie plus spécifique : par

exemple, pour les touristes en sélectionnant les sites touristiques et pour les enfants et sa famille en indiquant les parcs, les bibliothèques et les lieux du sport.

Une autre piste originale concerne les Réseaux Points-Nœuds (RPN), déjà implantés en Belgique, aux Pays-Bas et dans certaines régions françaises. Notamment, le Département du Nord poursuit le développement des RPN vélo et aujourd'hui à 400 panneaux et 35 carrefours points-nœuds. Le réseau Points Nœuds vélo du Bassin Minier sera finalisé en 2026 avec plus de 1 500 kilomètres d'itinéraires (Valenciennes Métropole, s.d.). En plus du concept, l'espacement des points paraît avantageux du point de vue cartographique. En effet, la carte statique du Bassin Minier de la Valenciennes Métropole (Figure 35) et la carte interactive zoomée sur Dunkerque (Figure 36) illustrent environ 0.5 - 4 km de l'espacement entre deux points, équivalent à 2 - 16 min à vélo (avec une vitesse moyenne générale de 15 km/h). De plus, l'OSM contient des informations détaillées sur le réseau de nœuds numérotés, disponibles sous forme de cartes et d'ensembles de données téléchargeables (OpenStreetMap Wiki, 2023a). Pour ces raisons, les PNR seront pertinents comme POIs lorsque leurs informations et données sont disponibles.

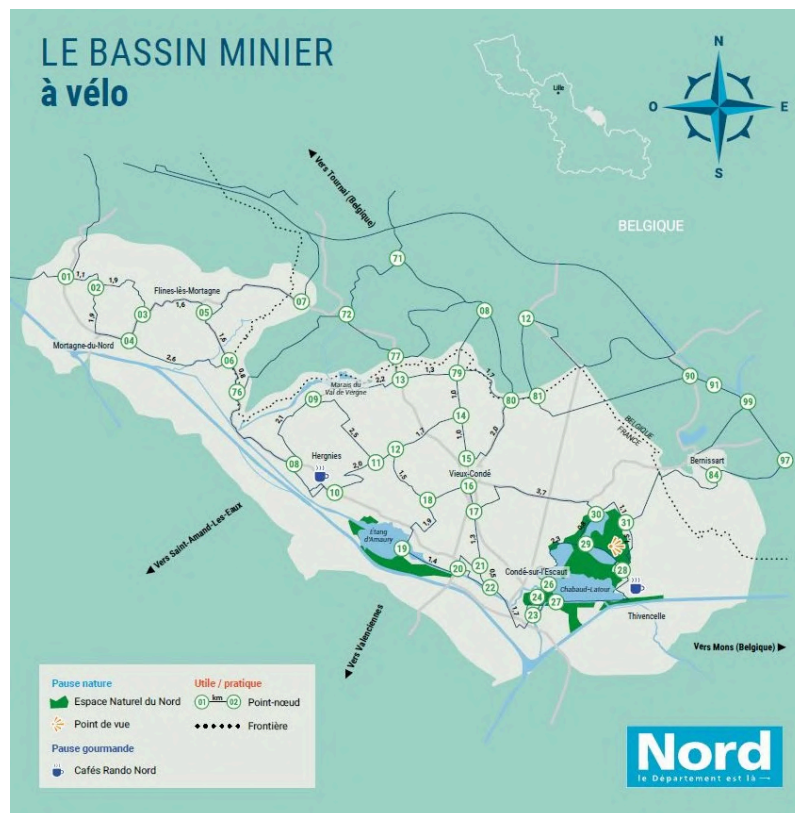


Figure 35 : Carte transfrontalière des RPN vélo du Bassin minier (Valenciennes Métropole, s.d.)

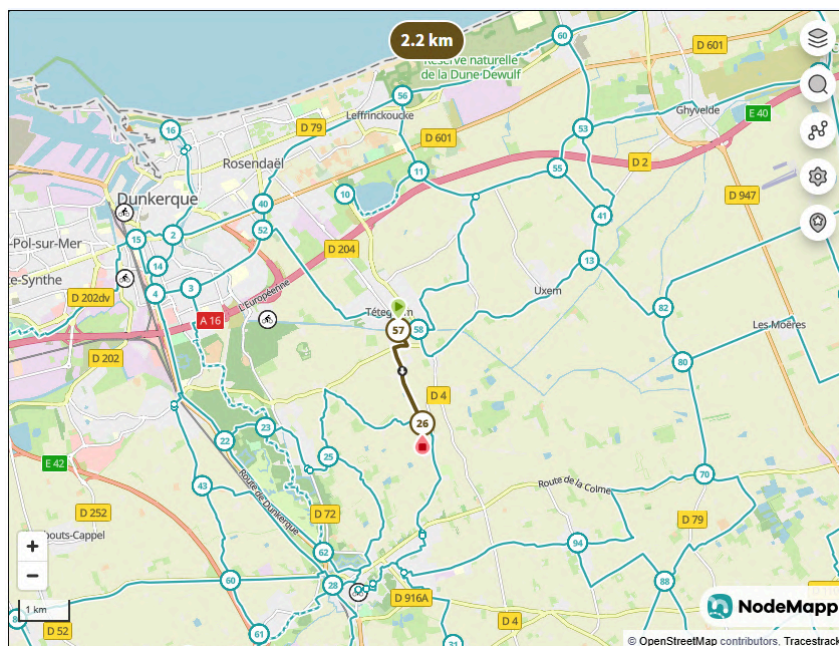


Figure 36 : Carte interactive des RPN vélo autour de Dunkerque (<https://www.nodemapp.com/fr>)

Cohabitation des modes et conflits d'usage

La promotion des modes actifs ne va pas sans tensions potentielles : entre piétons et cyclistes, usagers et habitants, ou encore entre collectivités et opérateurs. De nombreux défis sont possibles : la dangerosité, le respect, l'accident, les bruits, la pollution, le stationnement, le volume de circulation, les travaux et le budget. Dans le cadre de la promotion des modes actifs, la cohabitation des différents modes est un des enjeux majeurs. Ces enjeux pourraient être intégrés dès la conception des cartes, notamment dans le choix des zones cartographiées, des messages portés, ou des informations affichées.

11.C. Pour aller plus loin techniquement

(1) Vers une plateforme web plus intégrée

Concernant la carte interactive, une création d'une plateforme web plus intégrée sera profitable. Il est préférable de pouvoir sélectionner une seule couche de temps par mode : actuellement, elles sont superposées si nous couchons plus de deux couches. Avec cela, nous pourrions mettre plus de fonctionnalités telles que la sélection avancée des couches, l'imprimante et le calcul automatique des temps totaux. Ce type de plateforme, déjà explorée dans des projets comme celui de Paris (Annexe 6) (Robert J., 2020), permet une expérience utilisateur enrichie. De plus, nous pourrions aussi mettre plusieurs couches des temps des différentes échelles dans un page : la couche changera une par une en fonction de l'échelle en zoomant ou dézoomant. Pour cela, il faut la modification directe et manuelle de code HTML (Javascript), soit un codage Python plus avancé. Dans ce mémoire, la création de l'HTML de la carte interactive est restée sur l'automatisation simple et complète sur Python : cette méthodologie ne requiert pas la modification manuelle du code HTML.

(2) Personnalisation des vitesses et profils ORS

L'ORS API propose plusieurs profils de déplacement (ex. cycling-electric, wheelchair). La vitesse par défaut (openrouteservice, 2024) peut également être corrigée sur Python. Par exemple, pour simuler une marche à 4 km/h au lieu de 5 km/h, il est possible d'appliquer un calcul : [temps

calculé * (vitesse_ors / vitesse_souhaitée)] donc [temps calculé * (5/4)]. En revanche, la modification directe des vitesses dans les requêtes Python via l'ORS API publique n'est pas possible.

(3) Automatisation partielle du traitement sur QGIS

Une partie des traitements sur QGIS (notamment le début de la démarche) peut être davantage automatisée par la création du modèle QGIS ou par l'automatisation sur Python.

(4) Intégration d'un moteur plus avancé : OpenTripPlanner

Il serait intéressant de tester les auteurs moteurs du calcul des temps. Notamment, l'OpenTripPlanner (OTP), qui permet une modélisation multimodale complète, incluant les correspondances et les temps d'attente, paraît pertinent. L'OTP est open source et conçu pour exploiter les sources de données ouvertes OSM, la spécification GTFS et NeTex. Il permet aux utilisateurs de planifier un trajet combinant plusieurs modes de transport, comme le vélo ou la marche, pour rejoindre les TC (OpenStreetMap Wiki, 2023b).

Conclusion

Ce mémoire a été développé en explorant les méthodes et outils permettant d'automatiser efficacement la production de cartes des temps des déplacements, adaptées aux modes de transport, aux différentes échelles géographiques et aux caractéristiques des territoires, afin de favoriser une meilleure compréhension et la promotion de la mobilité décarbonée auprès des habitants. À travers l'étude de cas de l'EMS, il a été démontré qu'une telle approche, partiellement automatisée, est non seulement techniquement réalisable et répliquable, mais également utile comme outil de sensibilisation et de communication pour soutenir les changements de comportements vers des pratiques de mobilité plus durables. En m'appuyant sur les trois questions de recherche formulées en introduction, cette conclusion synthétise les résultats obtenus et apporte une réponse argumentée à la problématique centrale du mémoire.

(1) Explorer les données et les outils fiables, propres et faciles à accéder, traiter, manipuler et calculer

La méthodologie construite se base complètement sur la combinaison des données et outils open source et libres, accessibles et relativement faciles à manipuler : données GTFS, IGN, locaux de la collectivité, OSM, Python et QGIS.

(2) Chercher les échelles géographiques et POIs adaptés à la visualisation et à la compréhension

En s'appuyant sur le réseau TC comme POIs de base et l'approche spatiale avec les grilles, les meilleurs positionnements et nombre de POIs ont été saisis en garantissant à la fois homogénéité et pertinence fonctionnelle. Trois échelles (centre, réseau TC et EPCI) testées ici seraient pertinentes en considérant de la distance réaliste selon le mode de transport (pied, vélo et voiture), permettant de répondre à l'enjeu fondamental de lisibilité pour les lecteurs.

(3) Examiner l'impact et la reproductibilité en prisant en compte des caractéristiques territoriales

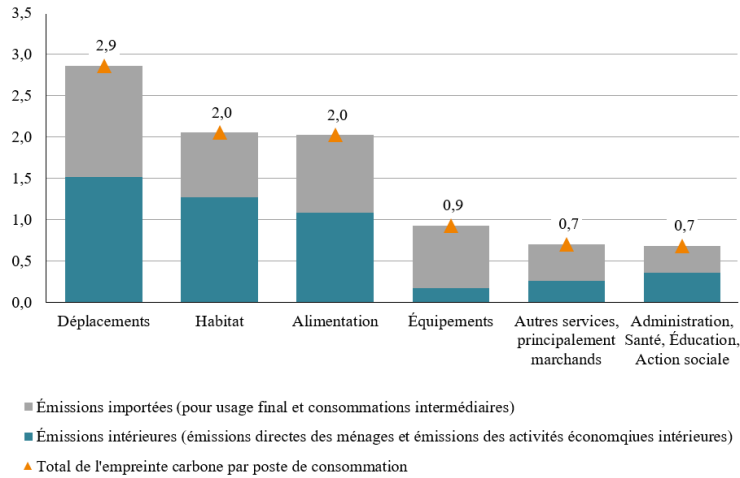
Les échelles de la carte dépendent de la morphologie de la ville ou du réseau TC du territoire d'étude. Ces éléments influent sur les choix d'échelle de visualisation finale et la taille des grilles. Malgré ces variables contextuelles, la logique générale de traitement reste transférable. Grâce à l'automatisation partielle, les adaptations à d'autres territoires peuvent être effectuées sans refonte complète du code. Toutefois, une connaissance préalable du territoire est recommandée pour affiner les paramètres.

Certes, certaines limites et restrictions ont été révélées. Toutefois, la méthodologie construite et les résultats obtenus sont innovants, car ce mémoire reste fidèle aux deux objectifs principaux : (1) une visualisation lisible et compréhensive et (2) l'automatisation efficace et simple. Les défis majeurs ont concerné la complexité des réseaux, la multiplicité des POIs, la qualité hétérogène des données et le croisement de plusieurs outils. Ce mémoire a cherché, dans ce contexte, un équilibre délicat entre précision technique et simplicité graphique.

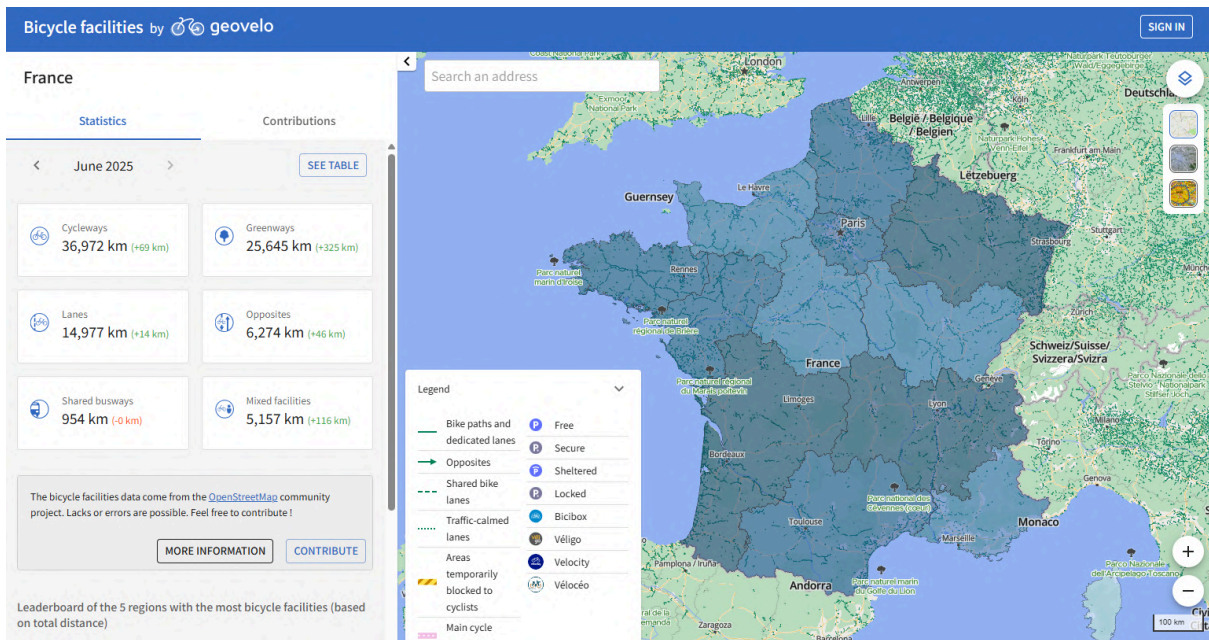
Ce mémoire constitue une première étape vers une cartographie automatisée et multi-échelle des temps de déplacement. Plusieurs contraintes identifiées peuvent désormais être envisagées comme des leviers d'amélioration et d'enrichissement méthodologique. Dans un contexte où les défis liés à la mobilité décarbonée s'intensifient et où les réseaux TC se développent, les résultats de ce mémoire contribuent aux enjeux situés au croisement de la géomatique, de la mobilité durable et de la visualisation de données, en proposant un outil méthodologique solide et répliquable.

Annexe

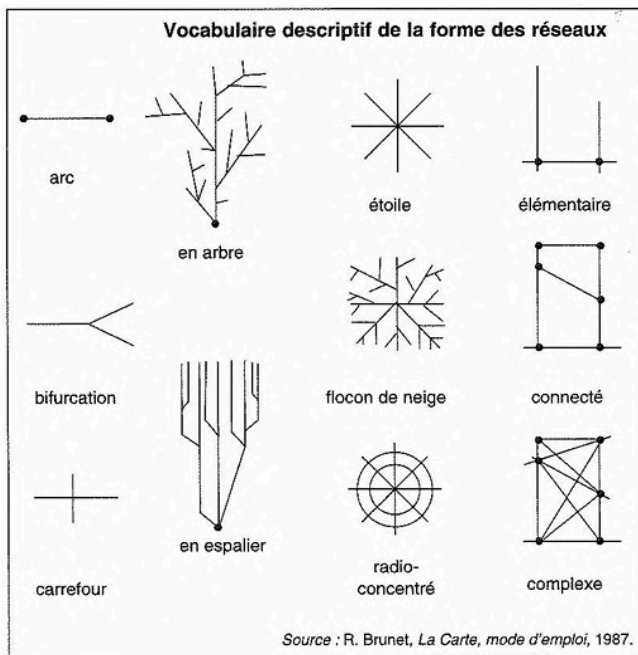
Annexe 1 | Décomposition de l’empreinte carbone par poste de consommation en 2018 (en tonnes de CO2 eq par an et par personne) (Baudeau M., 2022)



Annexe 2 | Chiffres clés de l’aménagement pistes cyclables en France métropolitaine : consultés le 19 juin 2025 (Bicycle facilities by geovelo : <https://amenagements-cyclables.fr/fr/stats>)

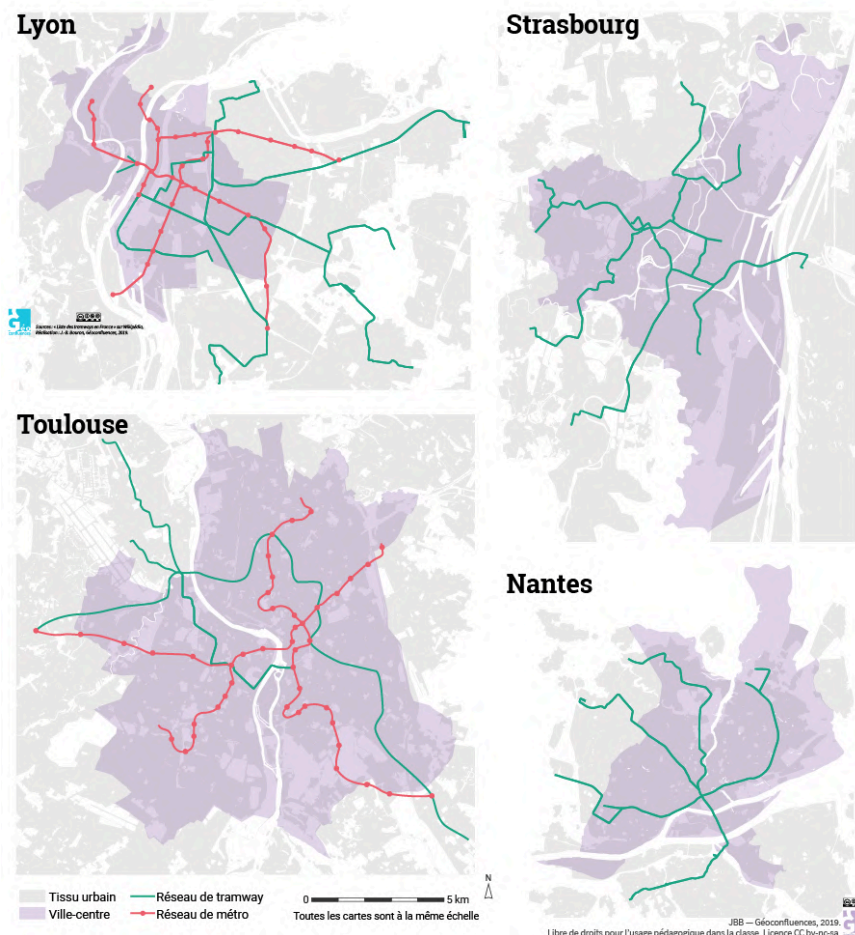


Annexe 3 | Types de la forme des réseaux (Brunet R., 1987)



Annexe 4 | Comparaison des réseaux TC au milieu urbain

a) Quelques exemples de la forme des réseaux tram français (Woessner R., 2019)



b) Comparaison entre les modes de transport urbain (Woessner R., 2019)

	BHNS	Tramway	MéTRO léger	MéTRO
Insertion	Site propre		Site propre intégral	
Mode	Bus	Tramway	Tramway long, méTRO, VAL	MéTRO, RER
Guidage	Optique (rare)	Par rail	Par rail	
Longueur	Bus articulés de 12 à 25 m	20 à 50 m	40 à 90 m	50 à 225 m
Nombre de passagers par heure et par sens	500 à 2 000	5 000	5 000 à 7 000	10 000 à 20 000
Vitesse commerciale, km/h	15 à 20 (Mexico 17)	15 à 20	30 à 40	30 à 40
Construction, en millions d'euros par km	1 (Jakarta), souvent 2, 11 (Metz)	17 (Casablanca) 18 à 25 (France) jusqu'à 80 (Paris)	60 à 80	50 à 120
Coût par rame, en millions d'euros	0,25 à 0,5	2 à 3	13	6 à 10

NB : de nombreux cas particuliers peuvent contredire ces données générales. Dans une publicité, Volvo affirme que pour un milliard de dollars, on peut construire 10 km de méTRO, 50 km de tramway ou 250 km de BHNS.

Sources : CERTU, 2011, *Mobilités et Transports n° 18*, 8 p. Données des réseaux.

Annexe 5 | Introduction de Metrominuto en Espagne consulté le 20 juin 2025 (Ciudades que Caminan, s.d., URL : <https://ciudadesquecaminan.org/ciudades/>)

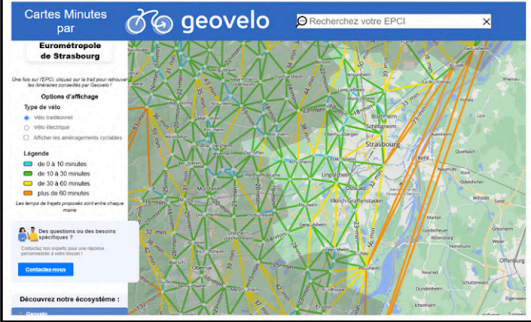


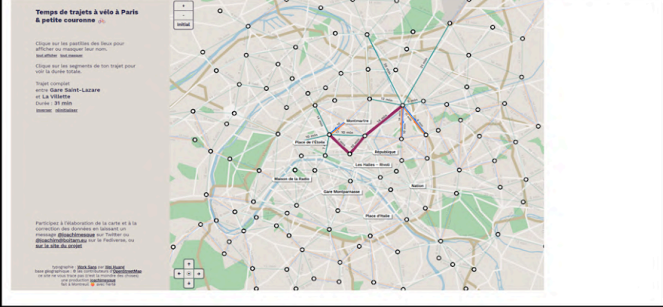




The screenshot shows the website 'CIUDADES QUE CAMINAN' with the following statistics:

- 88 CIUDADES
- 4 DIPUTACIONES
- 15.389.115 HABITANTES

Below the statistics is a map of Europe and the Mediterranean region with green circular markers indicating the locations of participating cities. A sidebar on the left shows a social media feed for 'Maó-Mahón' with a description: 'Metrominuto Maó-Mahón'.

Annexe 6 | Exemples des cartes des temps en France

a) Les autres villes françaises

<p>a) France métropolitaine - vélo, entre communes (mairies), Geovelo https://carte-minute.geovelo.app/</p> 	<p>b) Lyon - vélo, Métropole (mairies), Geovelo https://geovelo.app/fr/blog/une-carte-minute-velo-pour-mon-territoire/</p> 
<p>c) Paris - vélo, 14 quartiers, Places & Gares, 15km/h, Geovelo https://geovelo.app/fr/blog/une-carte-minute-velo-pour-mon-territoire/</p> 	<p>d) Paris, vélo, carte interactive https://joachimisque.github.io/paris-a-velo/</p> 
<p>e) Lille - vélo, Métropole https://lillemetropole.fr/sites/default/files/2024-02/MEL_Velo_Plus_plan_schematicque_202401.pdf</p> 	<p>f) Châtelleraut - Vélo, Métropole https://www.a-velo-chatelleraut.org/et-si-on-y-allait-a-velo/</p> 
<p>g) Nantes - Vélo, Métropole, 15 km/h, Geovelo https://naobike.com/temps-deplacement-cyclable-nantes/</p> 	<p>h) Bordeaux - Pied, Métropole, 4km/h https://sedeplacer.bordeaux-metropole.fr/a-pied/temps-parcours-pietons</p> 

i) Montpellier - Vélo, Centre et Métropole

<https://www.velocite-montpellier.fr/pratique/carte/>



i') sa carte interactive

https://umap.openstreetmap.fr/fr/map/temps-velo_464393814/43.6090/3.8853



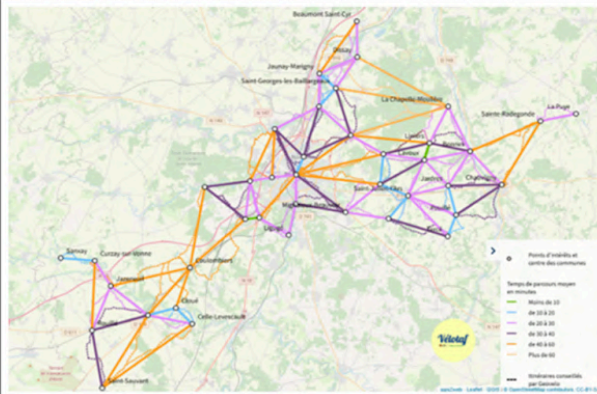
j) Orléans - Vélo, Métropole

<https://www.orleans-metropole.fr/fileadmin/orleans-metropole/MEDIA/document/deplacement/velo/ORLEANS-METROPOLE-A-VELO.pdf>



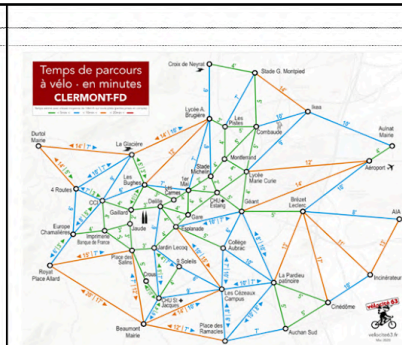
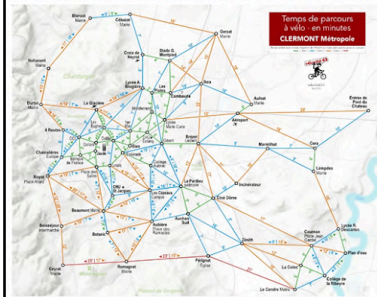
k) Grand Poitiers - Vélo, Communauté urbaine de Grand Poitiers et centre, carte interactive

<https://carte.velotagrandpoitiers.org/#11/46.5279/0.3371>
<https://velotagrandpoitiers.org/cartes-minutes/>



l) Clermont-Ferrand - Vélo, Métropole et centre

<https://www.veloci63.fr/Carte-des-temps-de-parcours-a-Clermont>



m) Saint-Jean-de-Luz - Pied & Vélo, Centre, 4km/h & 15km/h, Geovelo

https://www.saintjeandeluz.fr/wp-content/uploads/2021/07/zc_metrominuto_300x234_bilingue.pdf

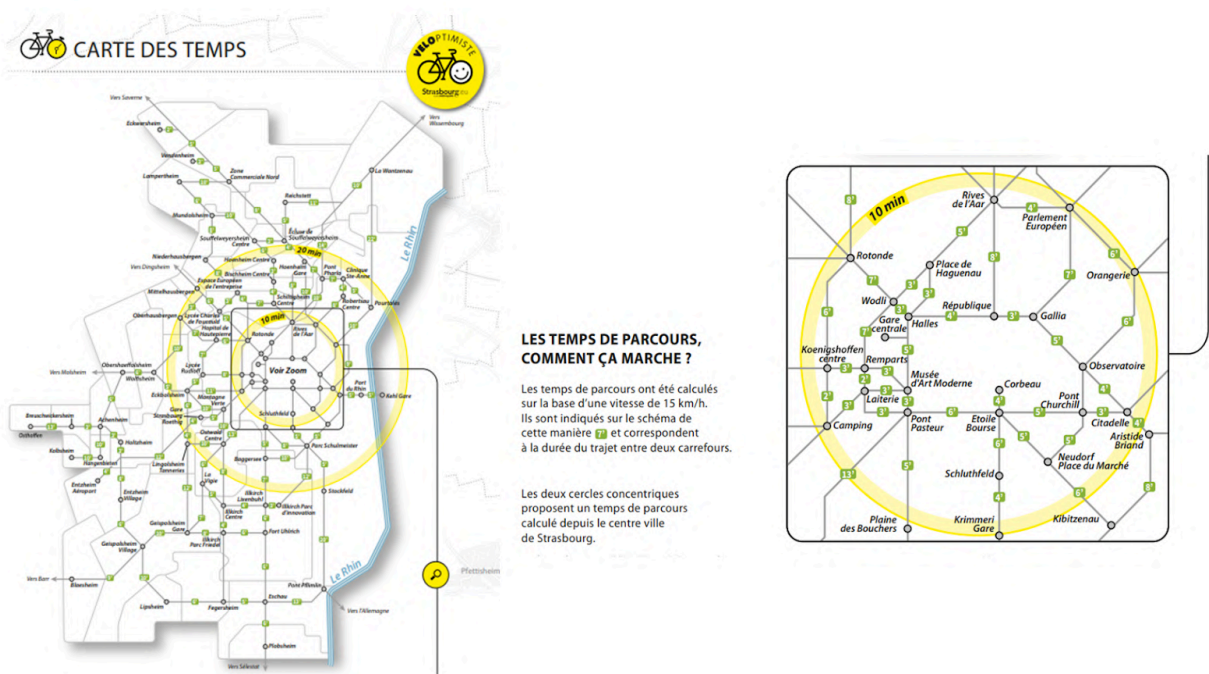


n) Bidart - Pied, Centre

https://www.bidartourisme.com/wp-content/uploads/2022/06/Metro_minuto_Bidart_2022.pdf



b) Strasbourg (Eurométropole de Strasbourg, 2023. URL : <https://www.strasbourg.eu/a-velo>)



Annexe 7 | POIs recommandés pour la création de Metrominuto (Ciudades que Caminan, s.d.)

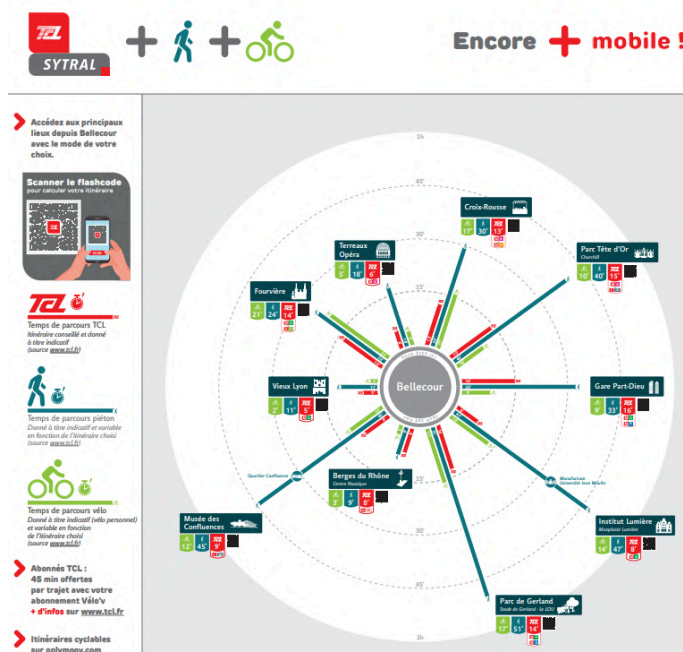
- Administrations : Mairie, administrations, bureau de poste, offices d'information et de tourisme, tribunaux, etc.
- Sécurité : Police locale, Garde civile, Garde nationale, Protection civile, etc.
- Culture : Écoles, universités, bibliothèques, monuments, musées, théâtres, centres culturels, etc.
- Loisirs et sports : Centres culturels, civiques et pour personnes âgées, complexes sportifs, stades, sentiers, piscines, etc.
- Santé : Hôpitaux, centres de santé, consultations externes, etc. Transports en commun : Métro, train, bus, etc.
- Zones spécifiques : Zones industrielles, ports, plages, embarcadères, centres de congrès, ponts, quartiers, foires, jardins, parcs, places, promenades, etc.
- Autre : Parkings publics

Annexe 8 | Exemples du Lyon

a) Plan des Modes Actifs de Lyon (carte entière)



b) Rose des modes – Bellecour (Réseau TCL – Lyon) (<https://latitude-cartagene.com/wp-content/uploads/2022/04/rose-des-modes-bellecour-tcl-lyon.pdf>)



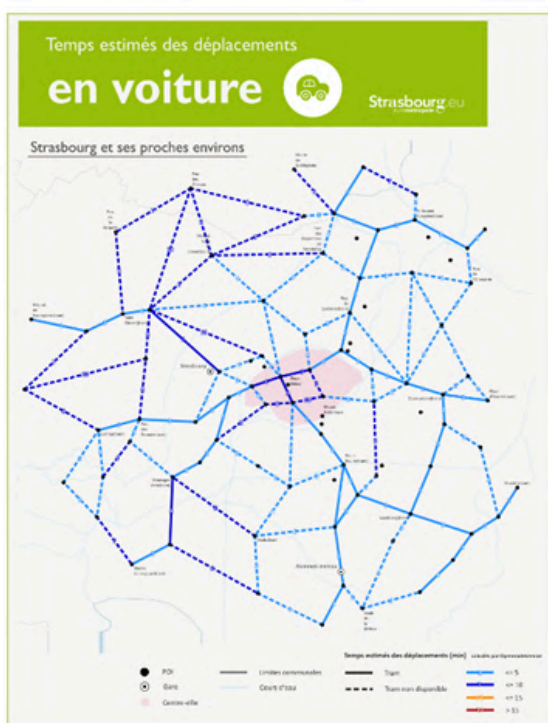
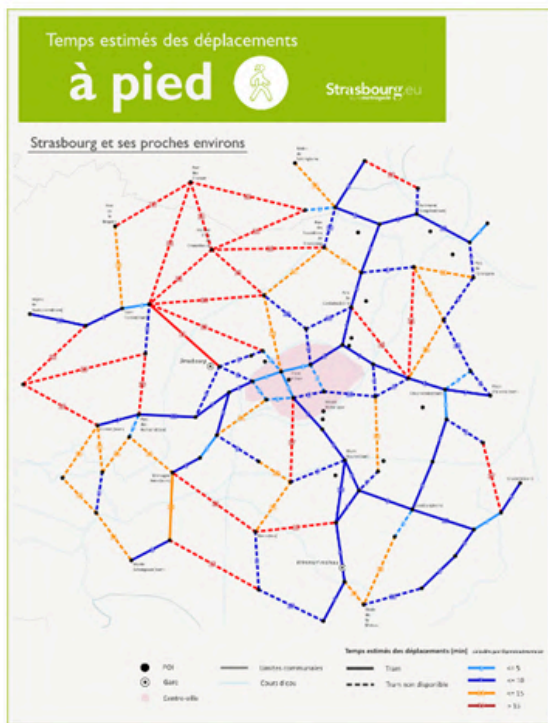
Annexe 9 | Les données utilisées et les codes et visualisations produits via Github

a) Liens

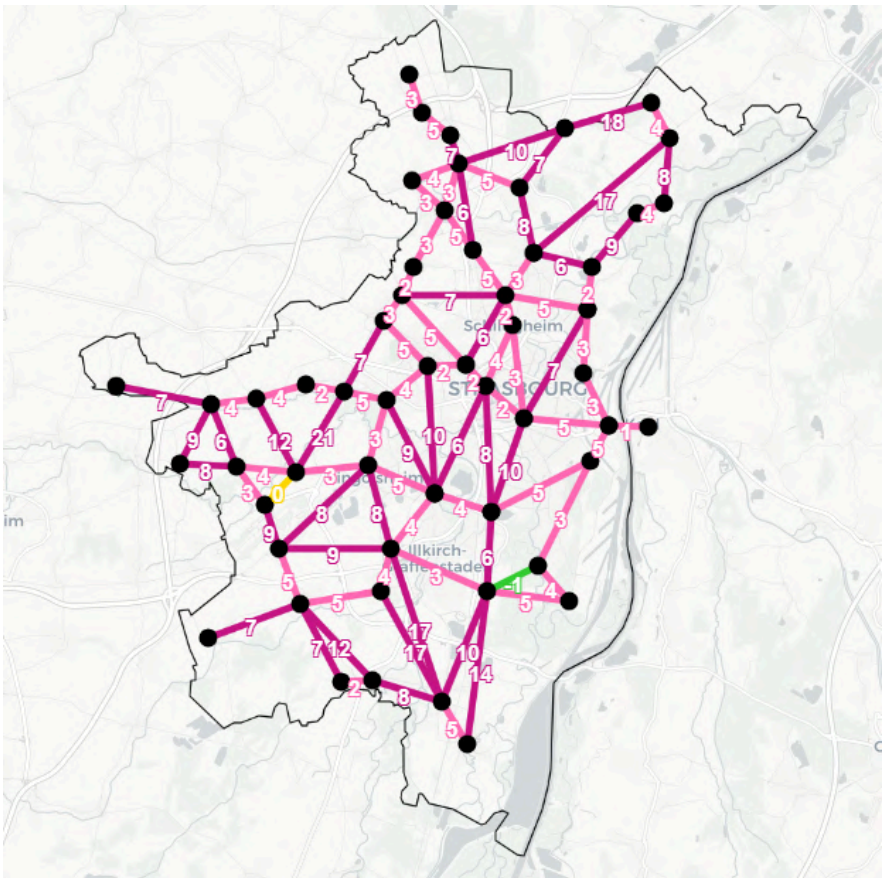
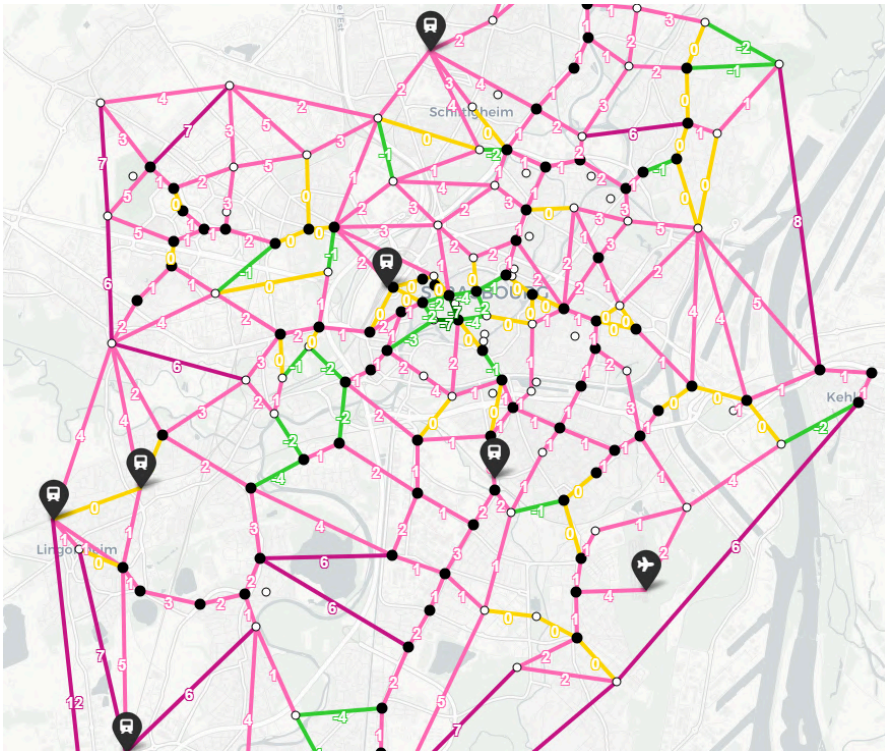
Résultats cartographiques : https://misakiuo.github.io/carte_des_temps_strasbourg/

Données et méthodologie : https://github.com/misakiuo/carte_des_temps_strasbourg

b) Visualisations finales



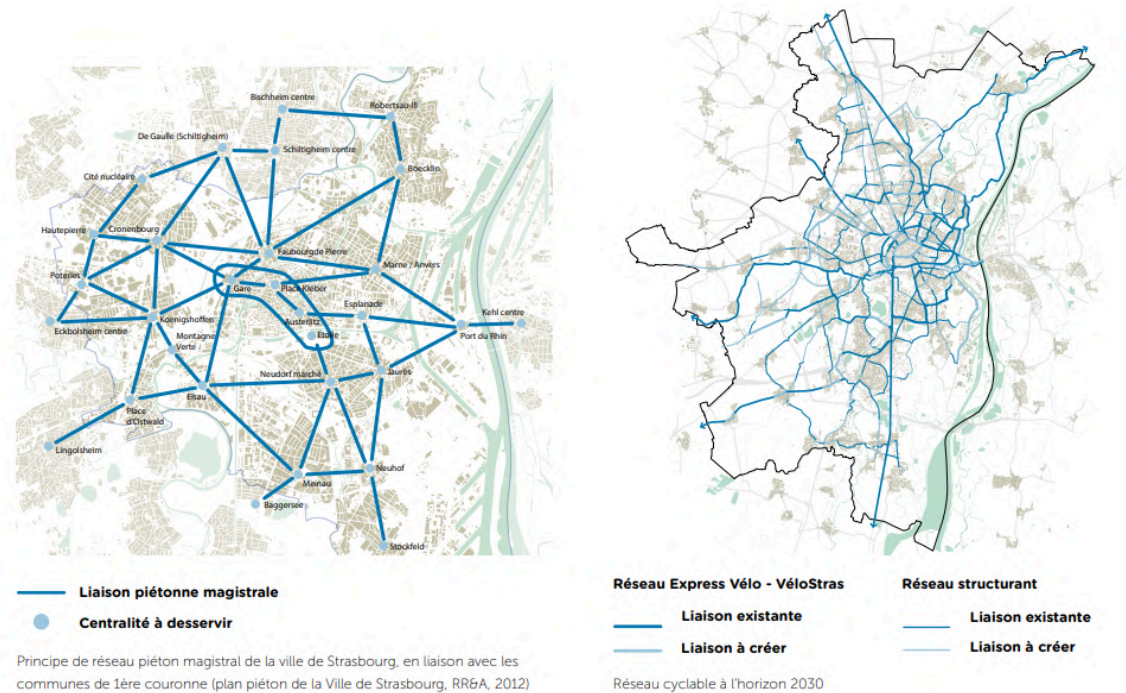





c) Plan schématique du réseau tram de Strasbourg (CTS, 2025)



Annexe 11 | Liaison piétonne magistrale à gauche & Pistes cyclable actuels et extension du réseau cyclable vers 2030 à droite (Eurométropole de Strasbourg, 2019)




Annexe 12 | Le flux GTFS téléchargé le 25 mai 2025



Réseau urbain CTS

Eurométropole de Strasbourg



créé le 26/04/2018
Format GTFS SIRI Lite
Transport public collectif

Nom du fichier : **Données théoriques (GTFS)**

Format : GTFS

Taille : 6.71 MB

 Télécharger

Fichiers GTFS du réseau de la CTS.
 Le fichier contient une profondeur de minimum 1 mois et est actualisé de façon régulière selon les modifications d'offres (généralement plusieurs fois par mois).
 Il est également actualisé à J-1 dans le cas des grèves, il est donc recommandé de le vérifier tous les jours.

Les services Taxibus et le TAD Flex'hop ne font pas partis du GTFS.
 Ne couvre pas les transports du Bas Rhin (CTBR).

Cette ressource fait partie du jeu de données [Réseau urbain CTS](#).

Le fichier couvre la période du **03/06/2025** au **31/08/2025**.

- réseau : **CTS**
- modes de transport : **bus, tramway**
- nombre de lignes : **77**
- nombre d'arrêts : **1433**
- nombre de zones d'arrêts : **0**

Le tableau ci-dessous affiche si le fichier ou le champ est présent dans le GTFS.

DESCRIPTION	FICHER OU CHAMP	STATUT	QUANTITÉ
Accessibilité de l'arrêt	stops.txt — wheelchair_boarding	✗	0
Accessibilité de la course	trips.txt — wheelchair_accessible	✗	0
Nom court ou n° de la ligne	routes.txt — route_short_name	✓	77
Nom long de la ligne	routes.txt — route_long_name	✓	77
Couleur de la ligne	routes.txt — route_color	✓	77
Destination de la course	trips.txt — trip_headsign	✓	54667
Possibilité d'emport de vélo	trips.txt — bikes_allowed	✗	0
Tracés d'itinéraires	shapes.txt	✗	0
Attributs tarifaires	fare_attributes.txt	✗	0
Règles tarifaires	fare_rules.txt	✗	0
Correspondances	transfers.txt	✗	0
Transport à la demande	stop_times.txt — pickup_type , drop_off_type	✗	

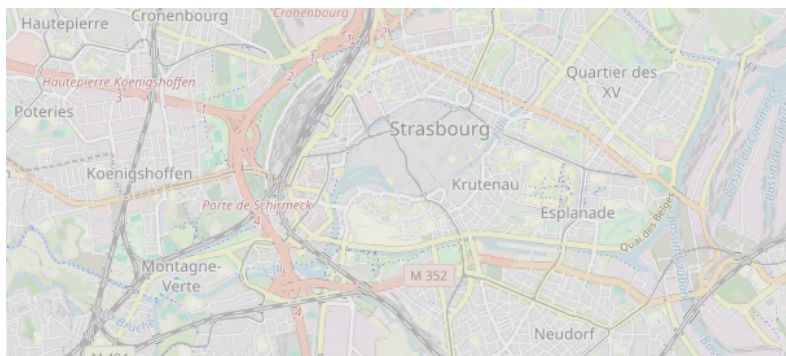
Annexe 13 | Limites quotidiennes du nombre de requêtes de l'ORS Web API
 (<https://openrouteservice.org/>)

Remaining Key Quotas		
Main Endpoints	Total Quota Left (renews in)	Quota per Minute
Directions V2	2000/2000	40
Export V2	100/100	5
Isochrones V2	500/500	20
Matrix V2	500/500	40
Snap V2	2000/2000	100

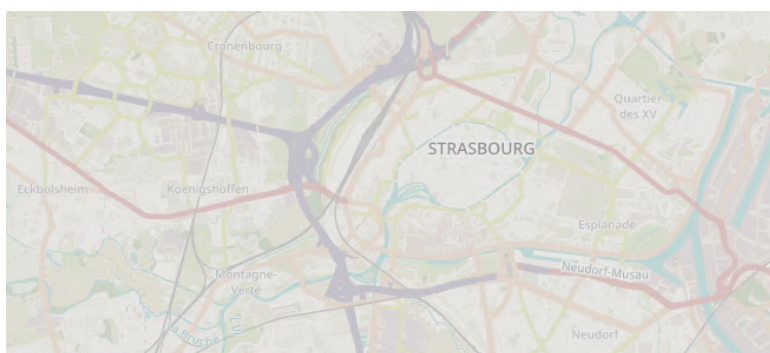
Micro Endpoints	Total Quota Left (renews in)	Quota per Minute
Elevation Line	200/200	40
Elevation Point	2000/2000	100
Geocode Autocomplete	1000/1000	100
Geocode Reverse	1000/1000	100
Geocode Search	1000/1000	100
Optimization	500/500	40
POIs	500/500	60

Annexe 14 | Trois fonds de carte utilisés pour les cartes interactives

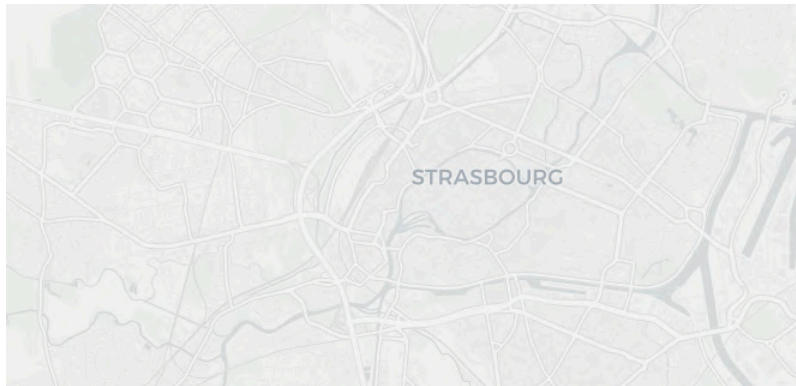
(1) OpenStreetMap Standard



(2) Humanitarian Layer (OSM France)



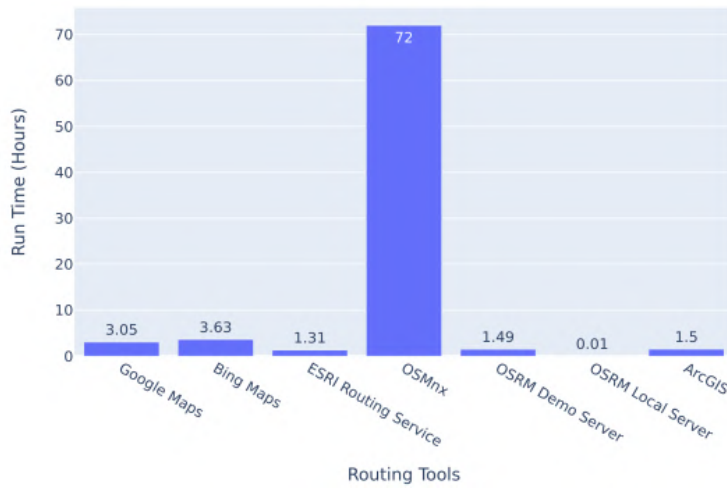
(3) CartoDB Positron (fond clair)



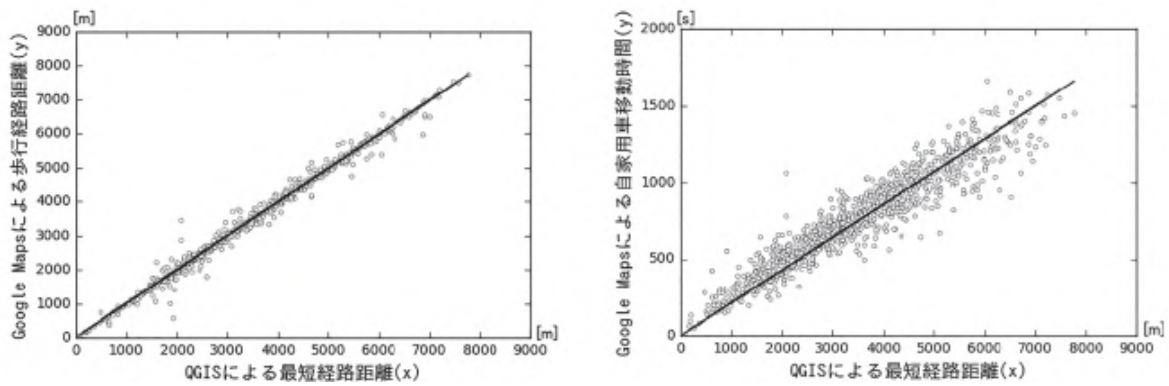
Annexe 15 | Résultats détaillés de l'évaluation de la validité des temps calculés (9.B.) : ORS, Google Maps et Geovelo

	PointA	PointB	GTFS / ORS		Google			Geovelo (Equilibré)		
			min	km/h	km	min	km/h	km	min	km/h
tram_min										
1	Gallia (tram)	République (tram)	1.5			2.5				
4	Lycée Marc Bloch (tram)	Le Ried (tram)	1.1			1.0				
pied_min										
1	Gallia (tram)	République (tram)	6.1	3.9	0.4	5.0	4.8			
2	Centre Commercial Rivetoile	Manufacture des tabacs de Strasbourg	13.6	5.3	1.2	16.0	4.5			
3	Plaine des Bouchers (bus)	Elsau (tram)	24.3	6.2	2.5	34.0	4.4			
4	Lycée Marc Bloch (tram)	Le Ried (tram)	7.8	4.6	0.6	8.0	4.5			
velo_min										
1	Gallia (tram)	République (tram)	1.8	13.3	0.4	3.0	8.0	0.5	2.5	10.8
2	Centre Commercial Rivetoile	Manufacture des tabacs de Strasbourg	5.3	15.8	1.4	6.0	14.0	1.4	8.5	9.9
3	Plaine des Bouchers (bus)	Elsau (tram)	7.2	19.2	2.3	9.0	15.3	2.1	10.0	12.6
4	Lycée Marc Bloch (tram)	Le Ried (tram)	5.2	8.7	0.75	4.5	10.0	0.6	3.0	12.0
5	Graffenstaden (train)	Lingolsheim Tiergaertel (tram)	11.1	18.9	3.5	12.0	17.5	3.7	16.0	13.9
6	Stade Michel Walter	Kehl Rathaus (tram)	24.0	17.3	6.9	23.5	17.6	7.0	31.5	13.3
7	Gare Strasbourg (train)	Etoile Bourse (tram)	9.8	18.4	3	12.5	14.4	2.8	17.0	9.9
8	Rotonde (tram)	Bischheim Gare (bus)	14.9	18.1	4.5	17.0	15.9	4.4	20.5	12.9
9	Entzheim Centre (bus)	Gare Lingolsheim (train)	17.4	16.6	4.8	16.0	18.0	4.9	21.0	14.0
10	Neuhof Ganzau (bus)	Ampère (bus)	18.0	18.3	5.5	19.0	17.4	5.5	23.5	14.0
voiture_min										
1	Gallia (tram)	République (tram)	2.8	16.1	0.75	3.5	12.9			
2	Centre Commercial Rivetoile	Manufacture des tabacs de Strasbourg	5.2	20.8	1.8	5.5	19.6			
3	Plaine des Bouchers (bus)	Elsau (tram)	5.6	26.8	2.5	5.5	27.3			
4	Lycée Marc Bloch (tram)	Le Ried (tram)	2.9	12.4	0.6	2.0	18.0			
5	Graffenstaden (train)	Lingolsheim Tiergaertel (tram)	6.4	30.0	3.2	5.0	38.4			
6	Stade Michel Walter	Kehl Rathaus (tram)	18.3	25.2	7.7	14.5	31.9			
7	Gare Strasbourg (train)	Etoile Bourse (tram)	8.7	37.9	5.5	9.5	34.7			
8	Rotonde (tram)	Bischheim Gare (bus)	8.6	30.0	4.3	9.5	27.2			
9	Entzheim Centre (bus)	Gare Lingolsheim (train)	9.7	29.7	4.8	8.0	36.0			
10	Neuhof Ganzau (bus)	Ampère (bus)	15.3	23.5	6	11.0	32.7			

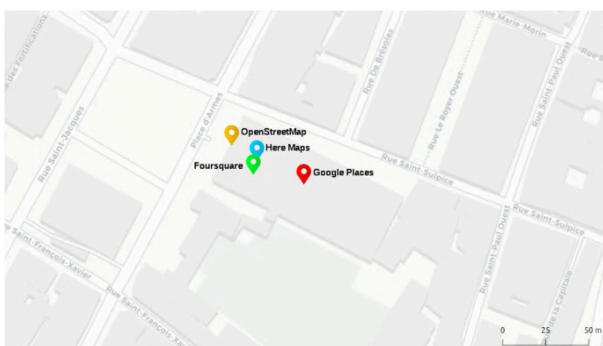
Annexe 16 | Comparaison de six méthodes d'estimation du temps de trajet : Google Maps API, Bing Maps API, Esri Routing Web Service, ArcGIS Pro Desktop, OpenStreetMap NetworkX (OSMnx) et Open Source Routing Machine (OSRM) (Fu X. et al., 2023)

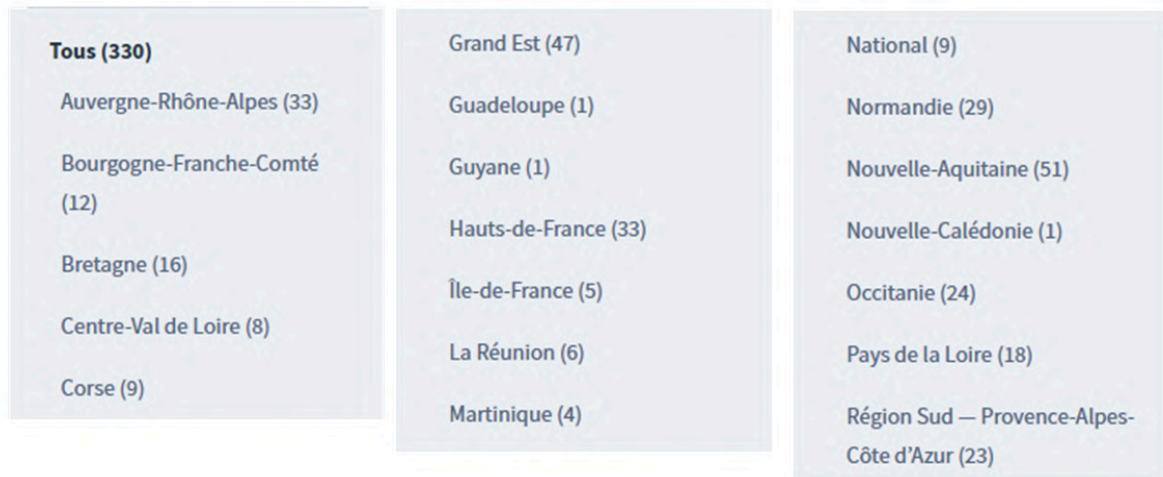


Annexe 17 | Comparaison (corrélation) entre Google Maps et OSM : à gauche à pied / à droite en voiture et axe Y pour Google Maps / axe X pour OSM



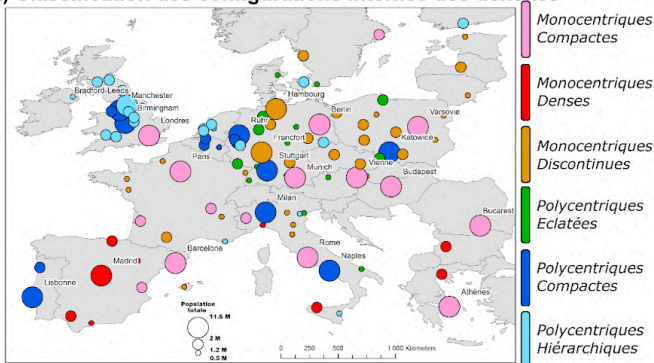
Annexe 18 | Quatre représentations numériques basées sur des points d'intérêt (POI) pour un même lieu réel (la basilique Notre-Dame de Montréal). (fond de carte : contributeurs CARTO/OpenStreetMap) (Psyllidis A. et al., 2022)



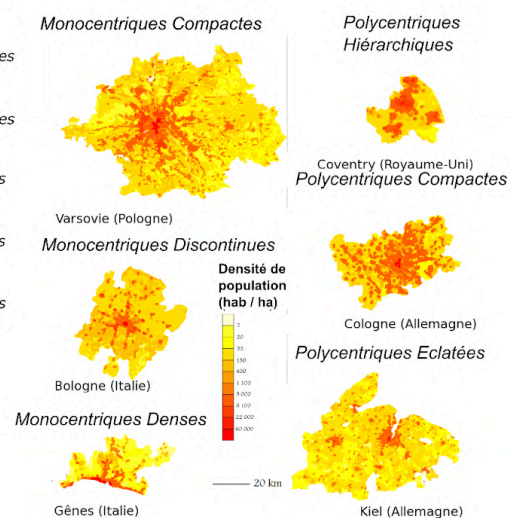


Annexe 20 | Typologie des 110 LUZ européennes (Le Néchet F., 2015)

A) Classification des configurations internes des densités



D) LUZ proche du centre de gravité de chaque classe



B) Valeurs moyennes des indicateurs, par classe

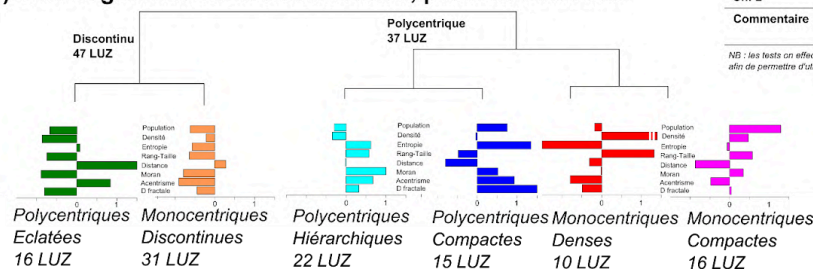
	Population	Densité nette	Entropie	Pente loi rang-taille	Distance entre deux individus	Moran	Acentrisme	Dimension fractale
Monocentrique compact	3,44 M	57,5 hab / ha	0,800	1,75	19,2 km	0,110	0,467	1,21
Monocentrique dense	1,32 M	88,7 hab / ha	0,702	1,97	10,1 km	0,093	0,429	1,17
Polycentrique compact	2,14 M	45,2 hab / ha	0,878	1,44	15,9 km	0,120	0,630	1,31
Polycentrique hiérarchique	1,01 M	40,5 hab / ha	0,837	1,75	14,5 km	0,139	0,600	1,23
Monocentrique discontinu	0,777 M	49,2 hab / ha	0,772	1,39	16,2 km	0,069	0,417	1,18
Polycentrique éclaté	0,759 M	38,9 hab / ha	0,808	1,36	21,1 km	0,067	0,617	1,15

E) Tests du Chi-2

Appartenance à 1 des 3 classes	Pays du Sud	Ville capitale	Méthode LUZ
Résultat test Chi-2	$X^2 = 17,4$ $p = 1,7e-4$	$X^2 = 14,7$ $p = 6,5e-3$	$X^2 = 11,3$ $p = 3,5e-3$
Commentaire	Surreprésentation des LUZ monocentriques parmi les villes du Sud	Surreprésentation des LUZ monocentriques parmi les capitales	Surreprésentation des LUZ monocentriques ayant une densité fractale

NB : les tests ont été effectués à partir de la classification en trois classes (cf. arbre) afin de permettre d'utiliser les tests du Chi-2

C) Dendrogramme de la classification, profil des classes



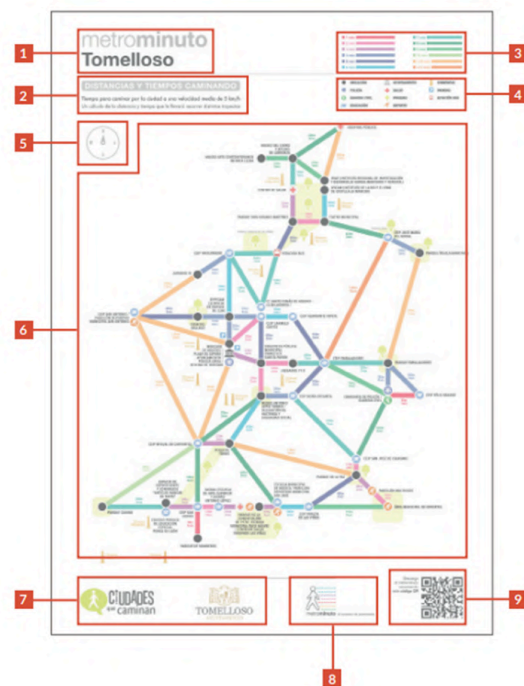
Annexe 21 | Exemples de promotion et modèle structurel d'une carte (Ciudades que Caminan, s.d.)



PARTES DEL METROMINUTO

Formato vertical

- 1) Titular del metrominuto + nombre de municipio
- 2) Descripción del metrominuto
- 3) Código cromático de los tiempos del trayecto
- 4) Leyenda de los iconos de ubicaciones destacadas¹
- 5) Orientación del mapa
- 6) Área de composición
- 7) Logotipos de las entidades participantes
- 8) Logotipo de metrominuto + idea original Pontevedra
- 9) Código QR del perfil privado de la entidad colaboradora



¹ Conoce las ubicaciones destacadas que la Red cree oportunas en RECOMENDACIONES

Annexe 22 | Résultats de l'enquête du Lyon : les conditions selon lesquelles le choix du mode pouvait se porter sur la marche à pied, le vélo en libre-service ou les transports en commun (Amandine G., 2022)

1. Les critères en faveur de la marche à pied

- Un temps de marche de 10 à 30 minutes maximum entre l'origine et la destination ;
- Une météo favorable ;
- Le temps disponible pour effectuer le trajet ;

- Un moyen d'éviter une correspondance en transports en commun si le tronçon restant en bus ne concerne qu'un ou deux arrêts ou en cas de retard du bus ou du tram.

2. Les critères en faveur du vélo en libre-service

- le réseau est perturbé ;
- le trafic est perturbé et le contraint à attendre plus longuement sa correspondance ;
- la desserte en transports en commun n'est pas optimale ;
- la distance est adaptée (ni trop longue, ni trop courte) ;
- la météo est favorable ;
- cela lui permet d'éviter les heures de pointe (sauf le matin) ;
- le trajet est un trajet cyclable, sans trop de dénivelé et il s'y sent en sécurité ;
- le trajet lui apporte du plaisir, lui permet de faire un peu de sport ou de s'aérer ;
- la marge d'incertitude est acceptable (dans le cas où il n'y aurait pas de place à la station de destination) ;
- cela lui permet d'économiser un mois d'abonnement TCL, notamment les mois où la météo est plus agréable.

3. Les critères en faveur des transports en commun

- C'est une habitude ;
- La distance à parcourir est grande ;
- La météo n'est pas clémente ;
- Cela fait gagner du temps par rapport à la marche à pied ou au vélo ;
- Il habite à proximité d'un arrêt d'une ligne forte (métro et tramway) ;
- Le trajet est sans correspondance(s) ;
- Il ne connaît pas l'itinéraire à pied ou à vélo ;
- Le trajet n'est pas adapté au vélo et à la marche ;
- Il s'agit d'une vraie alternative à la voiture, pour des motifs écologiques ou pour éviter les problèmes de stationnement.

Bibliographie

- AIG London Ltd, (2006). *Legible London A wayfinding study March 2006*, p. 33. En ligne : 2018-egd-cc-wb-research-london.pdf
- Aknin P., Côme É. et Oukhellou L., (2018). L'ouverture des données, une opportunité pour la recherche sur les transports et la mobilité, *Transports urbains*, 132(1), pp. 21-27. DOI : 10.3917/turb.132.0021
- Antoni J-P., Klein O. et Moisy S., (2004). Cartographie interactive et multimédia : vers une aide à la réflexion géographique, *Cybergeo: European Journal of Geography*, Systèmes, Modélisation, Géostatistiques, document 288. DOI : 10.4000/cybergeo.2621
- Boeing G., (2017). OSMnx: New Methods for Acquiring, Constructing, Analyzing, and Visualizing Complex Street Networks, *Environment and Urban Systems*, Volume 65, 2017, pp. 126-139. DOI : 10.1016/j.compenvurbsys.2017.05.004
- Brand C., Dons E., Anaya-Boig E., Avila-Palencia I., Clark A., De Nazelle A., Gascon M., Gaupp-Berghausen M., Gerike R., Götschi R., Iacorossi F., Kahlmeier S., Laeremans M., J Nieuwenhuijsen M-J., Orjuela J-P., Racioppi F., Raser E., Rojas-Rueda D., Standaert A., Stigell E., Sulikova S., Wegener S. et Int Panis L., (2021). The climate change mitigation effects of daily active travel in cities, *Transportation Research Part D: Transport and Environment*, Volume 93, April 2021, 102764. DOI : 10.1016/j.trd.2021.102764
- Brunet R., (1987). *La carte mode d'emploi*, Paris, Fayard/Reclus, p. 270.
- Cerema, (2023). *Décarboner les mobilités quotidiennes : Enjeux et leviers pour l'action territoriale*, p. 48. Dernière consultation le 7 juin 2025. URL : <https://doc.cerema.fr/accueil-portal.aspx>
- Curtis C. et Scheurer J., (2010). Planning for sustainable accessibility : Developing tools to aid discussion and decision-making, *Progress in Planning*, Volume 74, Issue 2, 2010, pp. 53-106. DOI : 10.1016/j.progress.2010.05.001
- De Witte A., Hollevoet J., Dobruszkes F., Hubert M. et Macharis C., (2013). Linking modal choice to motility : A comprehensive review, *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, Volume 49, pp. 329-341. DOI : 10.1016/j.tra.2013.01.009
- Duch Guillot J., (2023). *Qu'est-ce que la neutralité carbone et comment l'atteindre d'ici 2050 ?*. In : Parlement européen. Dernière consultation le 20 mai 2025. En ligne : https://www.europarl.europa.eu/pdfs/news/expert/2019/10/story/20190926STO62270/20190926STO62270_fr.pdf
- Eurométropole de Strasbourg, (2019). *PLAN D' ACTIONS POUR DES MOBILITÉS ACTIVES (PAMA)*, p. 72. Dernière consultation le 20 mai 2025. En ligne : <https://www.strasbourg.eu/documents/976405/1084289/PAMA-brochure.pdf>
- Eurométropole de Strasbourg, (2024a). *La Révolution des Mobilités. Des solutions de mobilités durables pour tous-tes, partout.*, p. 36. Dernière consultation le 20 mai 2025. En ligne : https://www.strasbourg.eu/documents/976405/1084289/EMS_REVOLUTION-MOBILITES.pdf/d7d21a12-1bc2-3425-b972-f966c2628f02?version=1.1&t=1745828070314
- Eurométropole de Strasbourg, (2024b). *Le Plan Climat 2030 - Eurométropole de Strasbourg - Plan d'action mis à jour 2024*, p. 221. Dernière consultation le 20 mai 2025. En ligne : <https://www.strasbourg.eu/documents/976405/1084539/PLAN+CLIMAT+EUROM%C3%89TROPOLE+PLAN+D%27ACTIONS+V2024.pdf/c1a2f7ee-865e-8122-7d3f-0eb394acc6d2?version=1.1&t=1711621639232>
- Fortin P., Morency C. et Trépanier M., (2016). Innovative GTFS Data Application for Transit Network Analysis Using a Graph-Oriented Method, *Journal of Public Transportation*, Volume 19, Issue 4, pp. 18-37. DOI : 10.5038/2375-0901.19.4.2
- Fu X., Kakkar D., Chen J., Moynihan K-M., Hegland T-A. et Blossom J., (2023). A Comparative Study of Methods for Drive Time Estimation on Big Geospatial Data: A Case Study in USA, *International*

- Society for Photogrammetry and Remote Sensing (ISPRS)*, XLVIII-4/W7-2023, pp. 53-60. DOI : 10.5194/isprs-archives-XLVIII-4-W7-2023-53-2023
- Harrie L., Stigmar H. et Djordjevic M., (2015). Analytical Estimation of Map Readability, *ISPRS International Journal of Geo-Information*, 4(2), pp. 418-446. DOI : 10.3390/ijgi4020418
- Juninger M. et Narvell N., (2023). *On the use of routing engines for dynamic travel time calculation within emergency vehicle transport simulation*, Mémoire de licence, Malmö University, p. 36. En ligne : <https://www.diva-portal.org/smash/record.jsf?pid=diva2%3A1763123&dsid=7622>
- Kim V-M., (2021). *Analyse de la connectivité des réseaux de transport en commun multimodaux en milieu urbain : étude de cas montréalais*. Mémoire de maîtrise électronique, Montréal, École de technologie supérieure, p. 148. En ligne : <https://espace.etsmtl.ca/id/eprint/2755/>
- Kansky K-J. et Beauguitte L., (2023). *Kansky, 1963, Structure of Transportation Networks. Version française commentée*, p. 143. En ligne : <https://hal.science/hal-04001189v1>
- Le Néchet F., (2015). De la forme urbaine à la structure métropolitaine : une typologie de la configuration interne des densités pour les principales métropoles européennes de l’Audit Urbain. *Cybergeo: European Journal of Geography*, Aménagement, Urbanisme, document 709. DOI : 10.4000/cybergeo.26753
- Liu Y., Sheng H., Mundorf N., Redding C. et Ye Y., (2017). Integrating Norm Activation Model and Theory of Planned Behavior to Understand Sustainable Transport Behavior: Evidence from China, *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 14(12), 1593. DOI: 10.3390/ijerph14121593
- Masuyama A., (2017). An experimental result of distance and travel time calculations between two locations using, *Theory and Applications of GIS*, 25(2), pp. 71-78. DOI : 10.5638/thagis.25.71
- Masuyama A., (2022). The potential use of Python in network-distance-based spatial accessibility analysis, *Theory and Applications of GIS*, 30(1), pp. 11–18. DOI : 10.5638/thagis.30.11
- Mundaca L., Román-Collado R. et Cansino J., (2022). Assessing the impacts of social norms on low-carbon mobility options, *Energy Policy*, Volume 162, 112814. DOI : 10.1016/j.enpol.2022.112814
- Munzner T., (2014). Visualization analysis and design, *CRC press*, p. 395. En ligne : https://paul.zhdk.ch/pluginfile.php/208390/mod_resource/content/5/%28AK%20Peters%20Visualization%20Series%29%20Tamara%20Munzner%20-%20Visualization%20Analysis%20and%20Design-A%20K%20Peters_CRC%20Press%20%282014%29.pdf
- Organisation de coopération et de développements économiques (OCDE), (2021). *Transport Strategies for Net-Zero Systems by Design*, p. 173. Dernière consultation le 20 mai 2025. En ligne : <https://doi.org/10.1787/0a20f779-en>
- Pazos-Otón M., Fari S. et Avellaneda P., (2024). La transformación de las políticas de movilidad en Pontevedra: una ciudad para caminar. *Ciudad y Territorio Estudios Territoriales*, 56(220). DOI : 10.37230/CyTET.2024.220.18
- Psyllidis A., Gao S., Hu Y., Kim E-K., McKenzie G., Purves R., Yuan M. et Andris C., (2022). Points of Interest (POI): a commentary on the state of the art, challenges, and prospects for the future, *Computational Urban Science*, 2, 20. DOI : 10.1007/s43762-022-00047-w
- Rahman F., Oliver R., Buehler R., Lee J., Crawford R. et Kim J., (2025). Impacts of point of interest (POI) data selection on 15-Minute City (15-MC) accessibility scores and inequality assessments, *Transportation Research Part A: Policy and Practice*, Volume 195, 104429. DOI : 10.1016/j.tra.2025.104429
- Reljan-Delaney M., (2023). *Exploration of New Approaches to Expressing Cycling Experience*. Unpublished Doctoral thesis, City St George, University of London, p. 356. En ligne : <https://openaccess.city.ac.uk/id/eprint/32684/>

- Ullah R. et Kraak, M-J., (2014). An alternative method to constructing time cartograms for the visual representation of scheduled movement data, *Journal of Maps*, 11(4), pp. 674–687. DOI: 10.1080/17445647.2014.935502
- Widmer G., (2009). *Mobilité quotidienne et géographie : l'influence du territoire sur les habitudes modales*. Doctoral thesis, Université de Genève, p. 227. DOI : 10.13097/archive-ouverte/unige:122793
- Woessner R., (2019). Du tramway au bus en site propre, récit géographique d'une passion urbaine française, *Géococonfluences*. Dernière consultation le 18 juin 2025. En ligne : <https://geoconfluences.ens-lyon.fr/informations-scientifiques/dossiers-regionaux/la-france-des-territoires-en-mutation/articles-scientifiques/tramway-bus-france>

Sitographie

- Amandine G., (2022). *Plan des modes actifs et Rose des modesTM : deux innovations pour montrer la complémentarité des transports en commun et des modes actifs*. In : Latitude-Cartagène. Dernière consultation le 20 mai 2025. URL : <https://latitude-cartagene.com/plan-des-modes-actifs-et-rose-des-modes-pour-favoriser-multimodalite-intermodalite/>
- Baudeu M., (2022). *L'empreinte carbone de la France de 1995 à 2021*. In : Données et études statistiques de la Ministère de l'Aménagement du territoire et de la Décentralisation. Dernière consultation le 20 mai 2025. URL : <https://www.statistiques.developpement-durable.gouv.fr/lempreinte-carbone-de-la-france-de-1995-2021>
- Bicycle facilities by geovelo. Dernière consultation le 19 juin 2025. URL : <https://amenagements-cyclables.fr/fr/stats>
- Ciudades que Caminan, (s.d.). *GuiaMetrominuto - Tu propio METROMINUTO*, p. 18. In : Ciudades que Caminan. Dernière consultation le 20 mai 2025. URL : <https://ciudadesquecaminan.org/wp-content/uploads/2021/08/GuiaMetrominuto.pdf>
- CTS, (2024). *Plan détaillé du réseau urbain*. Dernière consultation le 20 juin 2025. URL : https://www.cts-strasbourg.eu/export/sites/default/pdf/04SeDeplacer/03PlansReseau/CTS_plan_detaille_09_2024.pdf (<https://www.cts-strasbourg.eu/fr/se-deplacer/plans-du-reseau/>)
- CTS, (2025). *Plan schématique du réseau Tram, format de poche*. Dernière consultation le 20 juin 2025. URL : https://www.cts-strasbourg.eu/export/sites/default/pdf/04SeDeplacer/03PlansReseau/CTS_Armatu_re_cartonnette_mars-2025.pdf (<https://www.cts-strasbourg.eu/fr/se-deplacer/plans-du-reseau/>)
- Département du Nord, (s.d.). *À vélo*. Dernière consultation le 19 juin 2025. URL : <https://evasion.lenord.fr/fr/se-balader/a-velo>
- Eurométropole de Strasbourg, (2023). *A vélo*. In : Eurométropole de Strasbourg. Dernière consultation le 20 mai 2025. URL : <https://www.strasbourg.eu/a-velo>
- FNTV, (2015). *Lignes régulières et Transports scolaires*. Dernière consultation le 19 juin 2025. URL : <https://fntv.fr/article/lignes-regulieres-et-transports-scolaires>
- Fusco G., (2013). *Essentiel méthodologique : l'analyse multi-échelles d'un espace urbain*. In : L'analyse des espaces publics. Les places. par l'Université Numérique Thématique UOH (Université Ouverte des Humanités) et l'Université Nice Sophia-Antipolis. Dernière consultation le 20 mai 2025. URL : <https://unt.unice.fr/uoh/espaces-publics-places/essentiel-methodologique-lanalyse-multi-echelles-dun-espace-urbain/>
- Geoconfluence, (2017). *Glossaire :Échelle*. Dernière consultation le 19 juin 2025. URL : <https://geoconfluences.ens-lyon.fr/glossaire/echelle>
- Geoconfluence, (2024). *Glossaire : Mobilité*. Dernière consultation le 19 juin 2025. URL : <https://geoconfluences.ens-lyon.fr/glossaire/mobilite>

- Google, (2024a). *GTFIS statique*. In : Google Transit. Dernière consultation le 9 juin 2025. URL : <https://developers.google.com/transit/gtfs?hl=fr>
- Google, (2024b). *Test des flux GTF*. In : Google Transit. Dernière consultation le 9 juin 2025. URL : <https://developers.google.com/transit/gtfs?hl=fr>
- Leaflet, (s.d.). Dernière consultation le 13 juin 2025. URL : <https://leafletjs.com/index.html>
- Ministère de l'Aménagement du territoire et de la Décentralisation. et Ministère de la Transition écologique, de la Biodiversité, de la Forêt, de la Mer et de la Pêche., (2025). *Zones à faibles émissions (ZFE)*. Dernière consultation le 9 juin 2025. URL : <https://www.ecologie.gouv.fr/politiques-publiques/zones-faibles-emissions-zfe>
- NodeMapp, (s.d.). Dernière consultation le 25 juin 2025. URL : <https://www.nodemapp.com/fr>
- openrouteservice, (s.d.). Dernière consultation le 13 juin 2025. URL : <https://openrouteservice.org/>
- openrouteservice, (2024). *Travel Speeds*. In : Openrouteservice Backend Documentation. Dernière consultation le 13 juin 2025. URL : <https://giscience.github.io/openrouteservice/technical-details/travel-speeds/>
- Organisation des Nations unies (ONU), (s.d.). *Pour un climat vivable : les engagements en faveur du zéro émission nette doivent être étayés par des mesures crédibles*. Dernière consultation le 9 juin 2025. URL : <https://www.un.org/fr/climatechange/net-zero-coalition>
- Robert J., (2020). *Temps de trajets à vélo à Paris & petite couronne*. Dernière consultation le 20 mai 2025. URL : <https://joachimesque.github.io/paris-a-velo/>, Données : <https://github.com/joachimesque/paris-a-velo>
- Transport for London, (2025a). *Map of walking times and distances between stations*. Dernière consultation le 19 juin 2025. URL : <https://content.tfl.gov.uk/walking-between-stations-map.pdf> (<https://tfl.gov.uk/modes/walking/?cid=walking>)
- Transport for London, (2025b). *Walking between stations in the city*. Dernière consultation le 19 juin 2025. URL : <https://content.tfl.gov.uk/city-of-london-walking-map.pdf> (<https://tfl.gov.uk/modes/walking/?cid=walking>)
- Valenciennes Métropole, (s.d.). Réseau Points Nœuds vélo du Bassin Minier. Dernière consultation le 22 juin 2025. URL : <https://www.valenciennes-metropole.fr/sortir-decouvrir/tourisme/balades-touristiques/reseau-point-s-noeuds-velo-du-bassin-minier/>

Wikipédia

- OpenStreetMap Wiki, (2023a). *Cycle Node Network Tagging*. Dernière consultation le 22 juin 2025. URL : https://wiki.openstreetmap.org/wiki/Cycle_Node_Network_Tagging
- OpenStreetMap Wiki, (2023b). *OpenTripPlanner*. Dernière consultation le 22 juin 2025. URL : <https://wiki.openstreetmap.org/wiki/OpenTripPlanner>
- Wikipédia, (2025a). *Eurométropole de Strasbourg*. Dernière consultation le 18 juin 2025. URL : https://fr.wikipedia.org/wiki/Eurom%C3%A9tropole_de_Strasbourg
- Wikipédia, (2025b). *Liste des métros en France*. Dernière consultation le 18 juin 2025. URL : https://fr.wikipedia.org/wiki/Liste_des_m%C3%A9tros_en_France
- Wikipédia, (2025c). *Liste des tramways en France*. Dernière consultation le 18 juin 2025. URL : https://fr.wikipedia.org/wiki/Liste_des_tramways_en_France
- Wikipédia, (2025d). *Tramway de Strasbourg*. Dernière consultation le 18 juin 2025. URL : https://fr.wikipedia.org/wiki/Tramway_de_Strasbourg