



HAL
open science

Construction et utilisation d'un indicateur d'accessibilité aux transports en communs

Baptiste Cordhomme

► **To cite this version:**

Baptiste Cordhomme. Construction et utilisation d'un indicateur d'accessibilité aux transports en communs. Sciences de l'ingénieur [physics]. 2019. dumas-02497409

HAL Id: dumas-02497409

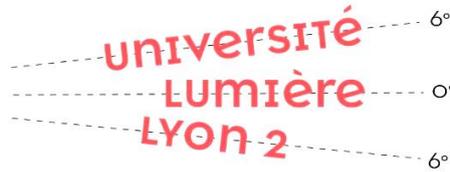
<https://dumas.ccsd.cnrs.fr/dumas-02497409>

Submitted on 3 Mar 2020

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Copyright



Travail de fin d'études

pour le diplôme d'ingénieur de l'École nationale des travaux publics de l'État

Année 2018-2019

Voie d'approfondissement :
Transport – Economie des Transports

Soutenu le 11 septembre 2019

Devant le jury composé de :

- Président du Jury : Mathieu GARDRAT
- Tuteur Entreprise : Laurent GUIMAS
- Expert : Ouassim MANOUT

Par

Baptiste CORDHOMME

Construction et utilisation d'un indicateur d'accessibilité aux transports en communs

Organisme d'accueil
EXPLAIN



Notice analytique

AUTEUR			
Nom	CORDHOMME		
Prénom	Baptiste		
ORGANISME D'ACCUEIL			
Nom de l'organisme et Localité	EXPLAIN 16 Rue de la Vieille Comédie, 59800 LILLE		
Nom du Tuteur	Laurent GUIMAS		
ANALYSE DU TFE			
Titre (français)	Construction et utilisation d'un indicateur d'accessibilité aux transports en communs		
Titre (anglais)	Building and use of an accessibility indicator for public transport		
Résumé (français)	<p>Ce mémoire présente la construction et l'utilisation d'un indicateur d'accessibilité aux transports en communs sur le territoire de la Métropole Européenne de Lille. L'indicateur d'accessibilité choisi a été le <i>Public Transport Accesibility Level</i> développé par <i>Transport for London</i>.</p> <p>L'étude propose une première partie de choix de l'indicateur étudié, puis une deuxième partie de construction de cet indicateur sur le territoire d'étude avec les ajustements réalisés, et enfin une troisième partie prospective d'exploitation des résultats obtenus pour différents projets en les croisant avec des données socio-économiques. L'objectif principal de cette étude est de fournir un outil d'aide à la décision à destination des collectivités afin de leur permettre de choisir entre différents projet de transports publics.</p>		
Résumé (anglais)	<p>This thesis presents the construction and the use of an indicator of accessibility to public transport on the territory of the European Metropolis of Lille. The chosen accessibility indicator was the <i>Public Transport Accesibility Level</i> developed by <i>Transport for London</i>.</p> <p>The study proposes a first part of choice of the studied indicator, then a second part of construction of this indicator on the territory of study with the adjustments made, and finally a third part prospective of exploitation of the results obtained for various projects crossing them with socio-economic data. The main objective of this study is to provide a decision support tool for communities to enable them to choose between different public transport projects.</p>		
Mots-clés (français, 5 maxi)	Indicateur d'accessibilité, accessibilité, transports en commun, aide à la décision		
Mots-clés (anglais, 5 maxi)	Accessibility indicator, aaccessibility, public transports, decision support		
Termes géographiques (français)	Métropole Européenne de Lille, MEL, Lille, France		
COLLATION			
	Nb de pages	Nb d'annexes (nb de pages)	Nb de réf. biblio.
	80	29	19

Remerciements

Pour la réalisation de cette étude, j'aimerais chaleureusement remercier M. Mathieu GARDRAT, président de jury de ce travail de fin d'étude, pour ces précieux conseils.

J'aimerais aussi remercier M. Laurent GUIMAS, tuteur entreprise, pour sa relecture riche en préconisations.

J'aimerais finalement remercier M. Ioannis BARAKLIANOS qui a su me donner un peu de son temps et de son savoir-faire alors que rien ne l'obligeait à le faire.

Sommaire

Notice analytique	2
Remerciements.....	3
Sommaire.....	4
Liste des illustrations.....	6
Introduction.....	7
1. Les indicateurs chiffrés de l'accessibilité aux transports publics.....	9
1.1 L'évaluation de projet de transports publics.....	9
1.2 L'accessibilité dans la littérature.....	10
2. Public Transport Accessibility Level : Présentation et Construction.....	13
2.1 Présentation de l'indicateur avec sa construction pas-à-pas sur le territoire du Grand Londres.....	13
2.2 La construction du PTAL sur le territoire de la MEL	17
2.2.1 Présentation des outils utilisés	17
2.2.2 Présentation de la démarche point par point.....	18
2.2.3 Propositions d'améliorations de la méthode.....	24
2.3 Evaluations des résultats obtenus sur le territoire de la MEL.....	25
2.4 Les limites théoriques et pratiques du PTAL.....	27
2.4.1 Les limites théoriques.....	27
2.4.2 Les limites pratiques	28
3. Vers un outil d'aide à la décision	30
3.1 La comparaison du PTAL dans les projets.....	30
3.1.1 Présentation des projets testés	30
3.1.2 Calculs et interprétations qualitatives des résultats.....	32
3.1.3 Interprétations quantitatives et processus décisionnel	34
3.2 Présentation du territoire d'étude : la Métropole Européenne de Lille.....	35
3.2.1 La population dans la métropole.....	35
3.2.2 Les emplois dans la métropole.....	37
3.2.3 Le prix de l'immobilier dans la métropole	38
3.3 Couplage des résultats aux données socio-économiques	40
3.3.1 Les résultats du modèle en situation actuelle	40
3.3.2 Les résultats du modèle sur les scénarios prospectifs	42
3.3.3 Analyse économétrique simplifiée et perspectives d'améliorations.....	46
Conclusion.....	49
Bibliographie	51
Annexes	53
Annexe 1 : Code python d'exploitation des GTFS et de calcul de l'indice d'accessibilité	53

Annexe 2 : Code python d'exploitation des résultats61
Annexe 3 : Résultat de l'interpréteur python au code présenté en annexe 167
Annexe 4 : Résultat de l'interpréteur python au code présenté en annexe 270

Liste des illustrations

Figure 1 : Transformation de l'Indice d'Accessibilité en PTAL et couleur correspondante sur une carte (Source : TFL).....	15
Figure 2 : Représentation cartographique du PTAL pour le Grand Londres (Source : TFL).....	16
Figure 3 : Schéma de présentation des différents fichiers composants les GTFS et des identifiants les liants entre eux.....	21
Figure 4 : Localisation des différents arrêts du réseau de la MEL après extraction des GTFS.....	22
Figure 5 : Indice d'accessibilité de trois services fictifs selon la distance d'éloignement à l'arrêt.....	24
Figure 6 : Représentation cartographique du PTAL sur le territoire de la MEL.....	26
Figure 7 : Disposition des arrêts des différents projets et des modes lourds déjà existants sur la MEL (2018).....	31
Figure 8 : PTAL de la MEL pour le projet Y avec l'alternative tramway.....	32
Figure 9 : Mesure des écarts en indice d'accessibilité par rapport à la situation initiale pour les trois alternatives du projet Y.....	33
Figure 10 : Population par entité du modèle sur la MEL (INSEE 2014).....	36
Figure 11 : Nombre d'emplois par entité sur la MEL (SIREN 2019).....	38
Figure 12 : Prix moyen de l'immobilier au m ² par entité sur la MEL (Open Data MEL 2017-2018).....	40
Tableau 1 : Distance d'accessibilité par mode et temps de parcours piéton pour le modèle de la MEL.....	18
Tableau 2 : Distance d'accessibilité par mode et temps de parcours piétons pour le modèle initial de Londres.....	18
Tableau 3 : Présentation des différentes valeurs des paramètres pour des services fictifs situés à distance accessible maximale.....	23
Tableau 4 : Comparaison de l'impact des différents scénarios sur l'indice d'accessibilité.....	34
Tableau 5 : Régression linéaire de l'indice d'accessibilité sur les densités de population et d'emplois.....	41
Tableau 6 : Régression linéaire du logarithme (base 10) du prix de l'immobilier moyen sur l'indice d'accessibilité et la densité d'emplois.....	42
Tableau 7 : Impact des différents scénarios par rapport à la population habitant les entités.....	43
Tableau 8 : Impact des différents scénarios par rapport aux emplois des entreprises les entités.....	44
Tableau 9 : Impact des différents scénarios par rapport à la somme de la population et des emplois des entités.....	45
Tableau 10 : Obtention de l'impact moyen de chaque scénario sur l'indice d'accessibilité par million d'euros investis.....	47
Tableau 11 : Obtention de la population et des emplois impactés par chaque projet par million d'euros investis.....	48

Introduction

Les développements récents des réseaux de transport en commun dans un grand nombre de métropoles partout dans le monde, en lien avec la transition écologique et l'évolution des mobilités du quotidien, ont amené des chercheurs et des décideurs publics à se poser la question de la meilleure configuration à adopter pour ces réseaux. En France, les projets de transport étant le plus souvent liés à l'initiative publique, il relève donc d'une obligation légale pour la puissance publique de justifier ses choix de projet, ceci en évaluant ces projets via une Analyse Coût – Avantages [ACA]. Jusqu'aujourd'hui, le paramètre de l'accessibilité des usagers à ces réseaux est exclu de ces analyses, pour plusieurs raisons, dont notamment l'absence d'un indicateur chiffré reflétant le degré d'accessibilité des territoires qui fasse consensus. Cette absence d'indicateur d'accessibilité est aujourd'hui comblée par une approche économique appelée « surplus des usagers », qui permet de mesurer le gain temporel total des usagers impactés par un projet de transport public (monétarisé ensuite via la valeur du temps dans les ACA).

Ce travail se positionne donc comme une recherche d'alternative pour les décideurs publics ayant à réaliser des choix dans le domaine des transports. Que ce soit en termes de tracé, de mode, de fréquence ou de desserte, les possibilités sont nombreuses mais les outils d'aide à la décision restent finalement limités face à cette multiplicité. L'objectif est donc de proposer un outil polyvalent d'aide à la décision via un indicateur d'accessibilité chiffré, cela se traduit par un indicateur permettant de comparer les projets entre eux par rapport aux bénéfices que ces derniers sont susceptibles d'apporter aux usagers.

En effet, les projets de transports en communs présentent un caractère particulier dans les choix d'investissements des collectivités locales. En effet, il existe de nombreux paramètres et variables difficiles à modéliser dans les transports urbains qui relèvent des comportements individuels. Au-delà du choix modal abordé dans le modèle à quatre étapes de prévision macroscopique du trafic multimodal, il existe encore aujourd'hui des aspects que l'on ne sait pas modéliser avec précision. On retrouve parmi ces sujets ceux du confort, de la conscience écologique, mais aussi de l'accessibilité. Nonobstant le calcul de temps généralisé qui s'actualise en fonction de la distance d'éloignement à un arrêt de transport en commun via le temps de marche, il n'existe pas véritablement de moyen pour déterminer l'impact d'un service de transport public sur un territoire. Cette approche relève plutôt de l'accessibilité, où il peut être question de mesurer l'effet de la connexion d'une zone au réseau de transport public sur les parts modales par exemple.

Avant de rentrer dans le cœur du sujet, il est important de préciser au lecteur que dans ce document il sera seulement question de l'accessibilité aux transports en commun dans sa dimension spatiale et temporelle. Ce qui signifie que le cas des individus à mobilité réduite ne sera pas traité ici. C'est un choix motivé par l'objectif d'obtenir un indicateur chiffré qui se veut simpliste (mais non moins complet) et par le fait d'éviter de se disperser dans l'analyse présentée ici. Néanmoins, la perspective d'intégrer cette nouvelle dimension à l'indicateur reste ouverte.

Deuxièmement, il s'agit dans le travail illustré par ce rapport de mettre en évidence la mesure de l'accessibilité au réseau de transport public sur un territoire. Non pas de mesurer l'effet de l'accessibilité sur les individus, ce qui se révèle être une toute autre approche. En effet, ce choix se justifie notamment par le fait de vouloir proposer une alternative nouvelle à l'approche désagrégé des choix individuels, bien que cette dernière soit réutilisée dans des domaines tels que les bilans socio-économiques. Cette étude avance une analyse territoriale des offres de transport en commun

qui présente l'avantage de se détacher des individus, dont le caractère imprévisible est bien souvent modélisé de manière probabiliste, ce qui est susceptible de biaiser certains indicateurs.

L'objet de ce document est donc de choisir un indicateur capable de mesurer la desserte d'un territoire en transports publics puis d'en exploiter les résultats. Ce mémoire s'articulera selon un processus de réflexion naturel en trois temps. Tout d'abord, il sera nécessaire de faire un tour d'horizon des différents auteurs ayant abordés l'accessibilité et son évaluation. Puis, nous nous concentrerons sur un indicateur en particulier que nous construirons pas à pas sur le territoire de la Métropole Européenne de Lille (France, région Hauts-de-France). Enfin, nous nous concentrerons sur l'utilisation de cet indicateur pour la comparaison de projets en tant qu'outil d'aide à la décision.

1. Les indicateurs chiffrés de l'accessibilité aux transports publics

1.1 L'évaluation de projet de transports publics

Dans la littérature scientifique et économique, la question de l'évaluation des projets de transports publics pose encore aujourd'hui un problème. Dans la mesure où l'ensemble des enjeux que ceux-ci intègrent sont nombreux et parfois peu commodes à modéliser. En effet, malgré les connaissances approfondies aujourd'hui reconnues concernant les calculs économiques des projets de transport routier, il est difficile de les appliquer stricto sensu aux projets de transports urbains car les enjeux sont différents. Là où les projets routiers considèrent que les gains de temps cumulés des usagers sont la principale motivation pour construire une nouvelle infrastructure, ce qui n'est pas toujours vrai pour une infrastructure de transport publics.

Ne serait-ce que par le fait que la plupart des nouvelles infrastructures construites dans les vingt dernières années étaient motivées par le fait de vouloir augmenter la part modale des transports publics dans les milieux urbains, ou tout du moins de diminuer la part modale de la voiture particulière. Cette volonté s'exprime par exemple par les ouvrages publiés par le Cerema, bureau d'étude public au service du ministère de la transition écologique et solidaire, tournés vers l'intégration des transports et communs et des modes doux dans le tissu urbain. Elle possède aussi des raisons plus profondes encore comme la pollution ou la transition écologique, mais qui ne font pas l'objet principal de ce travail.

Les causes qui motivent les collectivités locales à investir de l'argent public dans le transport est une question complexe d'économie publique qui ne sera pas traitée de manière exhaustive dans ce travail. Même si nous découvrirons dans la dernière partie de ce document, que l'évaluation est finalement intrinsèquement liée à la problématique de l'évaluation de projet, ce qui nous poussera à effleurer le concept de coût d'opportunité appliqué aux transports.

Dans la mesure du possible, le présent document va essayer de s'affranchir au maximum des questions de coût, car bien que ces considérations restent prédominantes dans les prises de décisions des collectivités locales, elle ne justifie pas entièrement les prises de décisions. Sinon il serait particulièrement compliqué de justifier les projets de métro particulièrement onéreux que l'on a pu voir apparaître entre les années 1980 et 2000 pour les agglomérations de tailles moyennes en France telles que Lille, Rennes, Rouen, Toulouse, etc... La même réflexion pourrait être menée sur les projets de tramway urbain depuis le début du XXI^{ème} siècle, qui ont amenés certains chercheurs à se poser la question de l'intérêt de telles infrastructures dans villes de petite taille comme Besançon, Caen ou Nancy.

Les aspects économiques ou financiers apparaissent ainsi comme finalement limités dans les choix d'investissements des collectivités locales, ce qui permet d'avancer deux éléments. Le premier étant qu'il semble y avoir des lacunes dans l'évaluation des projets de transports en France puisque le temps a parfois permis de questionner les choix de certaines collectivités. Le second est que les choix des projets de transports est aussi une affaire politique et électoraliste. Ces deux éléments constituent un terreau favorable à la création d'un indicateur relatif à l'évaluation des projets de transport publics, dans une optique autre que celle du calcul économique seul car il s'avère que celui-ci présente des failles.

1.2 L'accessibilité dans la littérature

La notion de mobilité est intrinsèquement liée à celle de l'accessibilité. Dans sa définition la plus stricte, la mobilité est envisagée comme la capacité des objets et des individus à se déplacer, mais dans son acceptation plus générale dans le domaine des transports, la mobilité se définit comme l'ensemble des actions de déplacement d'un individu. Néanmoins, la nécessité d'un individu de se déplacer est motivée par la proximité des services auxquels il a accès depuis son lieu de résidence. En effet, si tout un chacun avait l'ensemble de ses besoins au pied de chez lui, il n'y aurait alors nul besoin de se déplacer. Cependant, les déplacements sont aussi anciens que l'humanité elle-même et les besoins en déplacement ont parfois des motifs pouvant apparaître comme irrationnels, ne serait-ce que l'envie de voyager par exemple qui considère le déplacement comme un but en soi. Dès lors, il est important de considérer que les individus envisagent les déplacements comme un service, il serait donc mal avisé d'envisager des individus immobiles en mettant à leur disposition l'ensemble des services auxquels ils auraient besoins.

En partant du postulat que les déplacements sont nécessaires et inhérents aux activités humaines, le concept d'accessibilité prend alors tout son sens. Il s'agit donc de s'assurer que les activités nécessaires aux individus sont accessibles par ceux-ci. Dans un contexte de transition écologique, qui se traduit par un objectif de réduction de la part modale de la voiture particulière en milieu urbain, l'accessibilité aux services de transports publics pose un véritable contexte d'équilibre territoriale et de cohérence des réseaux pour les collectivités. Les infrastructures de transport représentent un investissement non négligeable pour ces dernières et la multiplicité des choix s'offrant à celles-ci sont parfois une source d'inaction tant les choix réalisés peuvent être sujets à controverses. On pourra citer comme exemple le Grand Paris Express dont le choix du mode et du tracé a longtemps été une controverse marquée par les discussions politiques et scientifiques, ou alors le Lemman Express (CEVA) reliant Annemasse, France, et Genève, Suisse, qui est resté à l'état de projet pendant près d'un siècle.

Comme nous avons pu le voir, la mobilité est intrinsèque aux activités et par conséquent inévitable, permettre aux individus de réaliser leur mobilité sans voiture particulière est un réel défi pour les collectivités. Dans l'approche générale de l'économie des transports, réduire la place de ce mode de transport passe par l'augmentation de son coût généralisé afin que ce mode paraisse moins intéressant que d'autres pour les individus. Nonobstant la concurrence biaisée des modes par les collectivités, un report modal depuis la voiture particulière nécessite que d'autres modes soient accessibles aux individus. Le service permettant de déplacer le plus d'individus tout en proposant une concurrence intéressante à ce mode reste les transports publics. C'est un des axes majeurs du développement des compétences de transport des collectivités depuis le début du XXIème siècle. C'est pourquoi le travail proposé dans ce document sera axé autour de l'accessibilité territoriale aux transports en communs, car souhaiter un report modal des usagers depuis la voiture particulière vers les transports publics est une chose, mais faire en sorte de proposer une alternative viable aux usagers en est une autre.

Dans le domaine des transports, le sujet de l'accessibilité présentait une revue de la littérature plutôt frustrante avant le début des années 2000. Seules quelques définitions avaient été proposées, comme celle de Hansen en 1959 qui fait le lien entre le trafic routier et la localisation spatiale. Puis le papier de Morris et al en 1979 affine cette première définition, en ajoutant que l'accessibilité est une manière de mesurer la séparation spatiale des activités humaines, c'est-à-dire que l'accessibilité est vue comme la facilité avec laquelle les individus accèdent à certains lieux. Enfin, plus récemment, Geurs et Van Wee publie en 2004 un papier qui redéfinit l'accessibilité, cette fois comme un moyen

de refléter l'organisation spatiale et la qualité du système de transport en offrant aux individus la possibilité de participer à des activités localisées en différents points du territoire. Cette dernière définition correspond au sens le plus large de l'accessibilité, en y incluant tous les systèmes de transport et en envisageant la mobilité comme un moyen d'accéder aux différentes activités d'un territoire.

C'est de cette dernière définition dont il va être question dans ce document car elle correspond le plus précisément à la vision de l'accessibilité mue par notre problématique, notamment sur l'aspect de définition d'un réseau de transport en commun. Il va s'agir de pouvoir mesurer la performance d'un réseau dans sa desserte afin de déterminer un indicateur chiffré et localisé, permettant de déterminer une valeur d'accessibilité en chaque point. L'objectif de ce travail est alors double : proposer une vision globale de l'accessibilité aux services de transports publics sur un territoire, mais aussi être capable de prévoir l'impact de futurs projets afin d'être en capacité de choisir parmi ceux-ci. Pour cela, il va falloir se baser sur un indicateur permettant de transformer des données parfois qualitatives, comme la fiabilité d'un mode par exemple, en une valeur chiffrée exploitable.

Au début des années 2000, avec le développement de plus en plus important des réseaux de transport en communs dans les villes, la communauté scientifique s'est concentrée sur la construction d'indicateur permettant de chiffrer l'accessibilité. Une partie de ces indicateurs sont issus d'initiatives privées et sont associés à des logiciels payants permettant de les construire à partir de jeux de données conséquents. Durant cette période apparaît aussi des idéologies de corrélations entre la desserte en transports en communs et l'implantation des activités sur les territoires (Clifton, et al., 2001).

C'est sur sa dimension spatiale que l'accessibilité aux transports en communs est la plus importante, car elle s'exprime en termes de desserte et de flux. En effet, un besoin de déplacement induit un flux d'individus souhaitant se rendre d'un point A à un point B. Les projets de transports en communs permettent à ces flux d'emprunter un mode alternatif à la voiture individuelle mais en sont dépendant. En clair, une infrastructure de transport en communs ne peut voir le jour sans l'existence préalable de ce flux, l'inverse serait contreproductif. C'est pourtant la quantification de ces flux qui représentent aujourd'hui les biais les plus importants dans les modèles de transports, c'est le point nécessitant le plus de complexité et de données pour les calculs. Pour autant, l'accessibilité n'est pas intimement liée à la demande, elle peut aussi être un reflet de l'offre uniquement.

Cette approche de l'accessibilité permet de s'affranchir des biais potentiels imposés par la modélisation de la demande. En effet, les comportements humains sont par nature imprévisibles, tandis que les infrastructures et la desserte sont des éléments non probabilistes mais purement factuels. Evaluer des projets de transports sur une base non probabiliste semble donc présenter un avantage de taille même si cela implique d'omettre les besoins des individus. Ce travail va alors être motivé par l'objectif de permettre aux collectivités de choisir entre différents projets de transport en communs en fonction de leur efficacité sans avoir à modéliser la demande. En effet, bien souvent les projets de transports ne résultent pas seulement d'une volonté de présenter une alternative viable à la voiture particulière aux individus, mais nourrissent aussi des desseins spatiaux tierces comme le désenclavement d'une zone ou sa réhabilitation. De plus en plus le choix des tracés n'est pas motivé seulement par la demande, mais intègrent une composante spatiale d'aménagement du territoire non négligeable. Le choix de l'indicateur d'accessibilité utilisé dans ce travail va donc être mu par sa capacité à comparer l'impact de différents projets de transports sur l'accessibilité des territoires aux services de transports publics. Ceci en omettant volontairement les besoins des individus en partant du postulat que ceux-ci auront toujours la nécessité de se déplacer.

Certains scientifiques voient dans ces indicateurs d'accessibilité non pas seulement un moyen d'évaluer la répartition du réseau de transport en commun sur un territoire, mais aussi un moyen de planifier les nouveaux projets de transport et l'implantation de nouvelles lignes. Ils considèrent ces mesures comme un outil pour prévoir l'impact d'un projet de transport sur un territoire et ainsi d'optimiser leur implantation (Wu, et al., 2003). L'indicateur utilisé par ces chercheurs est un outil conçu par la société *Transport for London* [TFL] nommé *Public Transport Accessibility Level* (PTAL). L'utilisation de données SIG¹ est alors novateur dans l'analyse d'un projet de transport.

Cet indicateur est alors le seul à proposer une mesure de la connectivité d'une zone au réseau de transports en communs à partir de la simple desserte du territoire. Cette caractéristique permet une prise en main simple ne nécessitant pas de logiciels sous licences et des jeux de données en libre accès. En effet, aujourd'hui de nombreuses métropoles mettent à disposition en libre accès des jeux de données géolocalisées en lien avec leur territoire. Parmi celles-ci on peut trouver de nombreuses informations sur les réseaux de transports en communs. L'intérêt de disposer de données uniquement libres de droits est de permettre aux collectivités de s'approprier un outil d'aide à la décision à moindre coût tout en favorisant la transparence auprès de ses concitoyens. En effet, l'indicateur construit par TFL peut être construit par n'importe quel individu muni d'un ordinateur et d'une connexion internet, en témoigne le présent document.

Sur ce sujet, les décideurs publics y voient un excellent moyen de constater la performance du réseau de transport du Grand Londres, tout en proposant aux concitoyens un moyen de pouvoir constater par eux-mêmes son efficacité en mettant en ligne les résultats de cette étude sur une carte dynamique² (Transport for London; Mayor of London, 2015). Tandis que la communauté scientifique se penche sur la question de la validité et de la robustesse de cet indicateur, qui est alors examiné positivement lors de l'« International Transport Forum » à Paris en 2018 et dont la simplicité est mise en exergue (London's Accessibility Indicators: Strengths, Weaknesses, Challenges, 2018).

J'ai donc choisi de me concentrer sur l'indicateur du PTAL pour axer mon travail, car c'est un objet dont la construction se veut mathématiquement simpliste, ce qui permet de conserver la lisibilité de l'indicateur. Le second avantage de cet indicateur est le libre accès aux données nécessaires pour le construire et la non-nécessité d'utiliser un logiciel privé particulier, ce qui le rend totalement transparent. Ce dernier aspect est important lorsque l'on se place dans un contexte d'utilisation par le domaine public.

¹ Système d'Information Géographique

² Voir : <https://tfl.gov.uk/info-for/urban-planning-and-construction/planning-with-webcat/webcat>

2. Public Transport Accessibility Level : Présentation et Construction

2.1 Présentation de l'indicateur avec sa construction pas-à-pas sur le territoire du Grand Londres

Le *Public Transport Accessibility Level*³ est un indicateur de densité de desserte du service de transport public, par construction c'est donc un indicateur d'accessibilité spatial et temporel aux transports publics. Originellement conçu par la société *Transport for London*⁴ en charge de la planification des transports en commun londoniens, cet indicateur a originellement été conçu pour rendre les démarches de conception et d'amélioration d'infrastructures plus transparentes aux yeux des concitoyens. Grâce à cet outil permettant de rendre mesurable l'accessibilité dans sa dimension spatiale sur le territoire du Grand Londres, l'AOM⁵ peut justifier ses choix d'investissement de façon plus transparente. D'autant plus que cet outil est disponible pour tous sur leur site internet, depuis la construction de l'outil pas à pas jusqu'à ses résultats. L'autorité organisatrice londonienne ne cherche pas non plus à cacher les défauts et les limites de cet indicateur, qui sont exposés publiquement sur leur site internet.

Le PTAL se construit comme un outil spatial de mesure de la densité de service de transports en commun. Celui-ci prend la forme d'un barème allant de 0 à 6b, où les niveaux 1 et 6 sont redécoupés en deux catégories *a* et *b* pour des raisons historiques, ce qui donne au total un découpage en neuf catégories. En effet, le découpage original (i.e. du niveau 0 à 6) correspond à un système de bandes en équipartition pour des indices d'accessibilité allant de cinq en cinq ; ainsi à un indice d'accessibilité de 0 correspond le PTAL 0, puis de 0,01 à 5 correspond le PTAL 1, etc... Les sous-découpages des niveaux 1 et 6 permettent d'ajouter des catégories supplémentaires aux niveaux extrêmes (i.e. les plus intéressants à étudier pour les planificateurs de transport et les plus revendiqués par les élus). Afin de pouvoir attribuer ces catégories, l'indicateur s'appuie sur un indice d'accessibilité [AI] qui se construit lui-même comme une combinaison linéaire des équivalents fréquences porte-à-porte [EDF] obtenus pour chaque service accessible en chaque point du territoire d'étude. Cet indicateur est donc construit selon un découpage du territoire, pour le Grand Londres dont la superficie s'élève à 1569 km², la précision utilisée a été un quadrillage de 100m par 100m (ce qui représente un total de 156 900 entités, chaque entité couvrant une surface d'un hectare). Chaque entité ainsi déterminée fait l'objet d'un process particulier permettant d'obtenir son indice d'accessibilité, ce process nécessite les données suivantes :

- L'implantation géographique de tous les **arrêts** de transports en communs ainsi que des **modes** associés (bus, métro, tram, train) à ces arrêts
- Un moyen de calculer des **temps de parcours piétons**, idéalement une cartographie des itinéraires piétons associée à une vitesse de marche à pied

³ Site internet : <https://data.london.gov.uk/dataset/public-transport-accessibility-levels>

⁴ Site internet : <https://tfl.gov.uk/>

⁵ Autorité Organisatrice des Mobilités (équivalent français)

- La **fréquence** de passage en heure de pointe du matin (entre 8h et 9h) de toutes les lignes de transports en commun du réseau

Une fois que l'on dispose de l'ensemble de ce jeu de données sous forme SIG, il va falloir suivre une série d'étapes afin de calculer l'indice d'accessibilité [AI] de chaque entité définie. Ce processus est donc découpé en 6 étapes distinctes de construction mathématique, le PTAL n'étant finalement que la catégorisation de cet indicateur afin de faciliter sa lisibilité. Le schéma ci-dessous illustre ce processus (sans rentrer dans le détail des calculs) :



Deux remarques supplémentaires accompagnent ce schéma de construction. Premièrement, le passage en fréquence s’accompagne de l’application d’un facteur un demi, celui-ci permet de représenter ce que serait le service si l’on s’affranchissait du temps de marche (en considérant que le temps d’accès total à chaque service serait équitablement réparti entre le temps de marche et la fréquence de service). Deuxièmement, la pondération de l’indice d’accessibilité permet de traduire la préférence des habitants pour la ligne la plus performante pour un mode donné, en outre cela permet de limiter la concurrence de deux lignes d’un même mode qui passe au même arrêt par rapport à une seule ligne du même mode ayant une fréquence double (ce qui est censé être équivalent du point de vue de la connectivité au réseau).

Mathématiquement, la construction de cet indice se construit avec les calculs suivants :

- $SAP = [distance \text{ à parcourir jusqu'au service (en mètres)} / vitesse \text{ de marche à pieds (en m/s)}] / 60$ (passage en minutes)
- $SWT = 0,5 * fréquence \text{ de passage du service (en minutes)}$
- $AWT = [pour \text{ les bus } 2 \text{ min} ; \text{ pour les modes lourds } 0,75 \text{ min}]$
- $TAT = SAP + SWT + AWT$
- $EDF = 0,5 * \frac{60}{TAT}$
- $AI_{mode,entité} = \max_{mode,entité} (EDF) + 0,5 * \sum_{entité} EDF_{mode,entité}$
- $AI_{entité} = \sum_{mode} AI_{mode,entité}$

Ainsi, l’obtention de l’indice d’accessibilité (AI) pour chaque entité (carré de 100m par 100m) va permettre de dresser une carte de l’accessibilité en transport en communs sur un territoire grâce à une échelle de couleur suivant le PTAL. La Figure 1 présente cette catégorisation issue du document cadre de TFL :

PTAL	Access Index range	Map colour
0 (worst)	0	
1a	0.01 – 2.50	
1b	2.51 – 5.0	
2	5.01 – 10.0	
3	10.01 – 15.0	
4	15.01 – 20.0	
5	20.01 – 25.0	
6a	25.01 – 40.0	
6b (best)	40.01+	

Figure 1 : Transformation de l’Indice d’Accessibilité en PTAL et couleur correspondante sur une carte (Source : TFL)

On retrouve ici le sous découpage des premiers paliers (1a et 1b) évoqué plus haut, chacun séparé de 2,5 Hz suivant l’AI, puis le découpage des paliers intermédiaires (2 à 5) séparés de 5 Hz, tandis que l’avant-dernier palier est bien plus important (15 Hz). D’un point de vue mathématique cela s’explique par la forme de la fonction inverse qui caractérise la construction de cet indicateur. En obtenant la couleur associée à chaque entité on peut finalement construire une carte des différents niveaux d’accessibilité aux services de transports publics sur le territoire d’étude. Ci-dessous la représentation spatiale du PTAL pour le Grand Londres selon le code couleur présenté sur la Figure 2 :

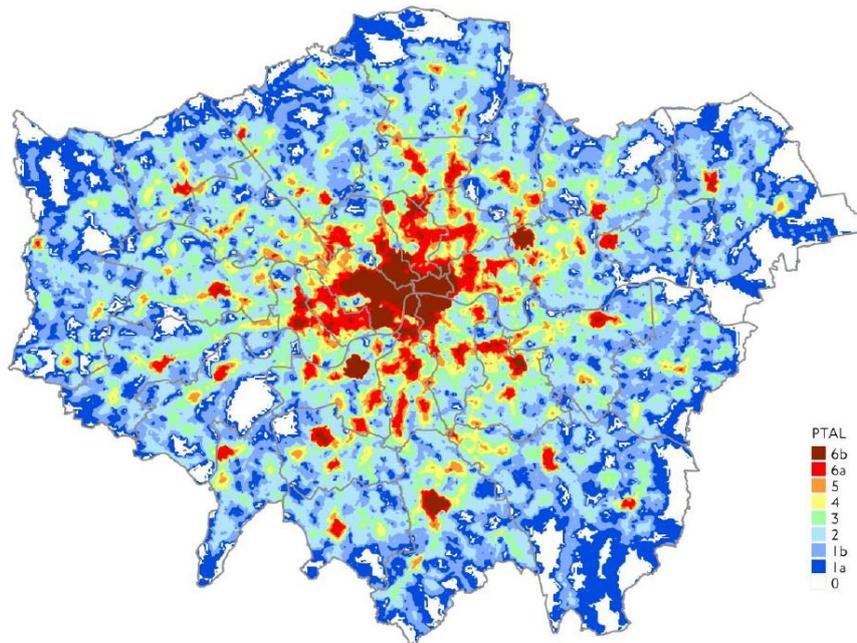


Figure 2 : Représentation cartographique du PTAL pour le Grand Londres (Source : TFL)

On peut voir sur la Figure 2 que la classification PTAL a un aspect proche du modèle gravitaire autour des arrêts de transports en communs, à la différence près que la construction de l'indice d'accessibilité se fait selon l'inverse du temps d'accès à un service plutôt que sur l'inverse de la distance à la puissance deux. On retrouve cependant un impact fort des modes lourds tels que le rail ou le métro, impact plutôt fidèle à la l'appréciation que tout un chacun pourrait avoir du niveau de desserte en transports en communs d'un espace. Cet impact est notamment dû au faible facteur de fiabilité associé à ces modes, mais surtout aux fréquences de passages élevées en heure de pointe. D'une manière générale, c'est aussi le reflet de la politique de *Transport for London* qui axe une bonne partie de son projet transport sur les modes « lourds », avec une fréquence de passage élevée aux heures de pointes et une faible fréquence dans les heures creuses. C'est un constat que l'on peut aussi retrouver dans les schémas de transports publics français avec l'exploitation intensive de plusieurs lignes structurantes des réseaux qui desservent des espaces de fortes densités avec des fréquences plus élevées, on trouve finalement peu de modes lourds ayant une fréquence de passage faible. Cela s'explique en partie par les investissements importants que représentent ces infrastructures, et de l'image que cela dégage pour une collectivité.

A l'exception près du ferroviaire lourd géré et exploité par la SNCF, mais qui ne sera pas intégré dans cette étude, car cet indicateur n'est pas adapté aux transports longues distances qui engendrent des pratiques d'intermodalité avec la voiture particulière. Ici, on n'envisage seulement l'accès pédestre aux transports publics urbains. On rappelle que les itinéraires et les choix modaux ne sont pas intégrés dans cet indicateur, un individu utilisant un service de transport public en combinaison avec un autre mode biaise le modèle car sa distance d'accès maximum à un arrêt augmente (diminution du temps de parcours) et sa vitesse de déplacement augmente.

Une analyse plus poussée de la répartition spatiale du niveau de PTAL permet d'observer une corrélation forte avec le modèle *Access To Opportunities and Services (ATOS)*, c'est-à-dire que les

zones ayant un niveau de PTAL élevé ont aussi un fort accès aux services-clés de manière générale⁶. Maintenant que nous avons observé comment se construit le PTAL, il va être possible de mettre cela en application sur le territoire de la Métropole Européenne de Lille, cela va permettre de mettre en exergue les différents freins techniques inhérents à la méthode proposée.

2.2 La construction du PTAL sur le territoire de la MEL

Avant de commencer la construction de cet indicateur et d'en étudier les différentes utilisations, il est important de préciser que certains choix de construction ont été contraint par la limite technique des logiciels et des ordinateurs. En effet, le découpage du territoire en carrés de 100m par 100m entraîne la création de plus de 66 000 entités, le coût d'une opération sur ces entités en termes de temps de calcul est donc élevé et le logiciel SIG⁷ avait notamment des difficultés à gérer les process sur un si grand nombre d'entités. Certaines opérations ont donc été motivées par le fait de limiter les opérations sur l'ensemble des entités, via des sélections d'entités ou des limites imposées sur le nombre de correspondances.

Le code python utilisé pour traiter tous les résultats présentés dans cette partie est disponible à l'**Annexe 1 : Code python d'exploitation des GTFS et de calcul de l'indice d'accessibilité** (page 53).

2.2.1 Présentation des outils utilisés

Les logiciels utilisés pour la construction du PTAL ont été : le logiciel SIG en open source **QGIS 2.18.26**, le logiciel de traitement des feuilles de calcul **Excel** du pack Microsoft et l'interface **Spyder 3.4.3** utilisant le langage orienté objet en libre accès **Python**. Le logiciel de tableur Excel n'a été utile que pour les processus de contrôle de variable sur un fichier avec un grand nombre d'entités, où QGIS présentait des difficultés notables, ainsi que pour certaines mises en forme. Il serait donc aisé de le remplacer par le logiciel de tableur du pack Open Office⁸, qui présente l'avantage d'être entièrement gratuit et en open source. Tandis que QGIS a permis d'établir les relations géographiques entre services et entités, ainsi que la mise en forme des résultats. Finalement, Python a été utilisé pour toute la partie calculatoire de la construction de l'AI, une fois que les matrices de distances avaient été obtenues sous QGIS.

Il y avait donc un découpage de process en trois étapes avec des outils qui leurs étaient propres, une première partie d'agrégation et de mise en forme des données géolocalisées grâce à un logiciel de traitement de données SIG, une phase de calcul de l'indice d'accessibilité selon les modalités présentées dans la partie précédente à l'aide d'un traitement algorithmique, et une dernière phase de mise en forme des résultats avec une utilisation combinée de **QGIS** et **Excel**.

⁶ Source : <https://data.london.gov.uk/dataset/public-transport-accessibility-levels>

⁷ Système d'Informations Géographiques

⁸ Pour aller plus loin : <https://www.openoffice.org/fr/>

2.2.2 Présentation de la démarche point par point

Maintenant que les logiciels ont été présentés, voici le processus de construction du PTAL pour le territoire de la MEL étape par étape comme décrit précédemment. On présentera dans cette partie tous les choix effectués permettant de dépasser les différentes contraintes techniques rencontrées.

Obtenir le temps d'accès à un service

Dans un premier temps, le **temps de marche** pour calculer le temps d'accès de chaque entité jusqu'à chaque arrêt a été déterminé par une matrice des distances entre le centroïde de chaque entité et les arrêts correspondants. Cette distance a été déterminée à « vol d'oiseau », car les itinéraires de marche à pied n'étaient pas à ma disposition et auraient de plus impliqués des temps de calculs bien trop importants. Les limites de distances pour qu'un service soit défini comme accessible ont été définies en fonction du mode considéré, pour le bus la distance est de 300m, pour le tramway 600m et pour le métro 900m. Cela représente la distance moyenne maximale qu'un individu accepte de faire à pied pour se rendre aux arrêts considérés. La vitesse de marche à pied utilisée a été de 1,1 m/s (environ 4 km/h), ce qui est légèrement inférieure à la vitesse de marche prévue pour le modèle initial de TFL autour de 1,3 m/s (4,8 km/h), car la distance utilisée dans le calcul était une distance à vol d'oiseau, cette sous-estimation volontaire visait à compenser la contrainte précédente. Le tableau suivant représente ces données d'entrées en termes de temps de parcours pour illustrer la situation réelle.

Tableau 1 : Distance d'accessibilité par mode et temps de parcours piéton pour le modèle de la MEL

MODE	BUS	TRAMWAY	METRO
Distance à vol d'oiseau	300 m	600 m	900 m
Temps de parcours	4 min 33 s	9 min 5 s	13 min 38 s

A titre de comparaison, le Tableau 2 ci-dessous compare ces choix avec les données initialement prévues dans le guide officiel qui détaille l'utilisation du PTAL pour la ville de Londres⁹. Dans le modèle initial il n'y avait que deux distinctions : les bus et les modes ferrés. Les réseaux de transports publics français imposent une distinction plus fine des modes entre eux, en jouant sur la fréquence, les temps de parcours et le confort de chaque mode les planificateurs de réseaux hiérarchisent les modes pour les usagers. Ainsi dans un ordre croissant de niveau de service on trouve le bus, le BHNS¹⁰, le métro et le tramway. Malheureusement l'utilisation des fichiers GTFS (voir ci-après) ne permettait pas de distinguer les bus des BHNS, ces derniers ont donc été traités de la même manière que les bus.

Tableau 2 : Distance d'accessibilité par mode et temps de parcours piétons pour le modèle initial de Londres

MODE	BUS	RAIL
Distance à pieds	640 m	960 m
Temps de parcours	9 min 42 s	14 min 33 s

⁹ Assessing transport connectivity in London, Transport for London, Avril 2015

¹⁰ Bus à Haut Niveau de Service

Ces choix de distance d'accessibilité et de temps d'accès ont été modifiés pour correspondre le plus finement possible aux mœurs des français et aux efforts qu'ils sont prêts à fournir pour accéder à un service de transport (en fonction du mode qui lui est associé). Le modèle de TFL initial surestime assez largement l'effort que sont prêt à fournir les londoniens pour avoir accès aux services de bus, ce qui contribue également à diminuer l'écart d'accessibilité entre modes rails et routes. Ce choix de la part de TFL s'explique notamment par la superficie importante couverte par ces services, ce qui est susceptible d'augmenter les temps de parcours moyens des individus et par conséquent l'effort qu'ils sont prêt à fournir (un individu est plus susceptible de marcher 10 min pour un service s'il l'utilise pendant 1h que s'il l'utilise pendant 30 min). De plus, le Grand Londres est desservi par un service ferroviaire express qui évolue en milieu périurbain, ce que l'on pourrait assimiler au RER¹¹ de la région parisienne, ce service est caractérisé par un niveau de service très important avec des distances inter-stations très importantes, ce qui augmente considérablement la distance d'accessibilité du mode.

Déterminer la fréquence de passage des services et la position des arrêts

Dans un deuxième temps, il a fallu déterminer le **temps d'attente prévu** à chaque arrêt, c'est-à-dire selon le calcul proposé par TFL la moitié de la fréquence de passage du service. Pour réaliser cette opération, combinée à l'étape précédente, il faut être en mesure de localiser les différents arrêts du réseau en y associant chacun une ligne et une fréquence de passage associée. En effet il est possible de dissocier l'étape d'association des arrêts avec les lignes, de l'étape de calcul des fréquences de passages des services pour chaque service. Une collectivité locale peut posséder ces jeux de données sous différentes formes, fournies par l'autorité organisatrice des mobilités [AMO] ou l'exploitant des transports publics du territoire d'étude. Dans cet exemple ce n'était pas le cas, pour permettre le bon déroulement de ces étapes j'ai donc utilisé les fichiers GTFS¹² de la métropole de Lille disponible sur leur open data. Aujourd'hui de nombreuses collectivités rendent disponibles ces fichiers qui permettent de caractériser les réseaux de transport public, de plus ces données sont régulièrement mises à jour (généralement au moins tous les six mois).

Les GTFS sont un ensemble de fichiers textes reliés les uns aux autres via des identifiants uniques, en les combinant ces fichiers ils permettent de reconstituer l'offre en transport en communs d'une région. Même si cet ensemble de fichiers demandés par Google dispose d'un formalisme permettant de combiner plusieurs exploitants en les distinguant sur le même jeu de fichiers, il est rare de se retrouver dans cette configuration, de manière générale on trouve un jeu de fichiers GTFS par exploitant. Pour la MEL, ce problème n'en est pas un puisque l'entreprise Keolis est la seule entreprise exploitante, mais par exemple pour Londres le problème se serait posé connaissant la multitude d'exploitants différents qui a été apporté par la privatisation. La structure des fichiers GTFS et leur contenu sont standardisés par Google, ce qui est particulièrement propice à un traitement algorithmique, ainsi ce qui a été fait sur le territoire de la métropole de Lille est reproductible sur toutes les collectivités de France disposant de fichiers GTFS correctement renseignés. Malgré le fait

¹¹ Réseau Express Régionale

¹² General Transit Feed Specification, source : <https://developers.google.com/transit/gtfs/reference/?hl=fr>

qu'il existe certains fichiers facultatifs, nous ne nous intéresserons ici seulement aux fichiers obligatoires.

Comme il est possible de le remarquer sur la Figure 3 ci-dessous, il existe un ensemble de cinq fichiers nécessaires (les fichiers *calendar* et *calendar_dates* ne sont pas indispensables tous les deux, mais au moins l'un des deux est obligatoire) à la démarche qui va suivre. Chaque fichier est ainsi lié aux autres par le biais d'identifiants uniques qui permettent, en les combinant de manière appropriée, de retrouver l'ensemble des arrêts desservis du réseau avec pour chaque arrêt les horaires de passages des différentes lignes de transports en fonction des différents jours de l'année. En complément du schéma présenté ci-dessous, voici un descriptif sommaire du contenu des différents fichiers GTFS présentés :

- **routes** : Ce fichier comporte le descriptif de chaque ligne de transport avec son nom, le mode associé (entre bus, tramway et métro, pas de distinction entre les bus et les BHNS), sa description, son numéro et éventuellement la couleur utilisée sur les plans (en hexadécimale). Ce fichier est lié à **trips** via l'identifiant *route_id*.
- **trips** : Ce fichier reprend toutes les missions proposées en mettant en relation la ligne qui assure la mission via le *route_id* et sa période d'activité (jours de l'année) via le *service_id*.
- **calendar** : Dans ce fichier sont présentés l'ensemble des périodes d'activités régulières (sous une forme hebdomadaire) de chaque service, dans le cas de la MEL seul le **calendar_dates** était utilisé.
- **calendar_dates** : Ce fichier détaille chaque service et chaque jour de l'année en figurant l'activité (ou non) de chaque service pour chaque jour de l'année, il peut être utilisé comme une gestion des exceptions du fichier **calendar** ou de manière exhaustive en y faisant apparaître la totalité des services et des jours d'activité (ce qui était le cas pour la MEL).
- **stop_times** : Ce fichier détaille pour chaque arrêt (*stop_id*) et chaque mission (*trip_id*) l'heure d'arrivée et de départ de chaque service.
- **stops** : Ce fichier recense l'ensemble des arrêts du réseau avec leurs noms et coordonnées géographiques (EPSG : 4326, WGS84), il est lié au fichier **stop_times** via le *stop_id*.

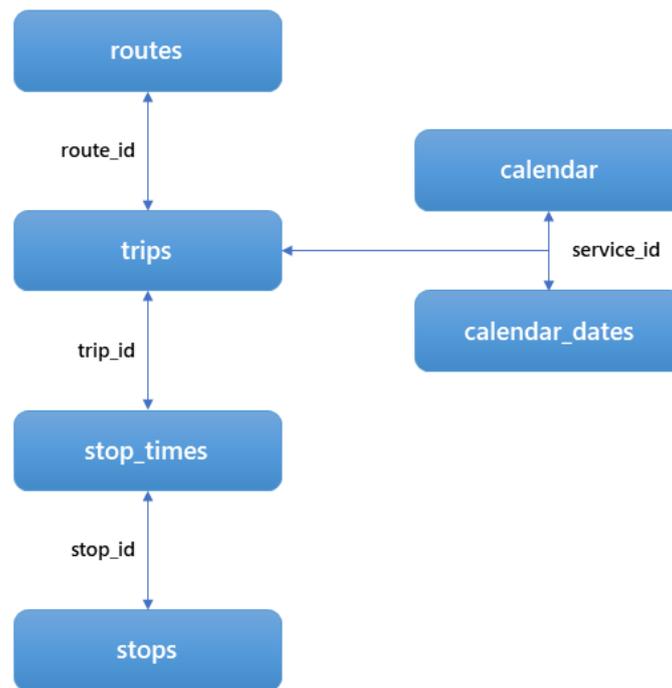


Figure 3 : Schéma de présentation des différents fichiers composants les GTFS et des identifiants les liants entre eux

L'objectif poursuivi par le calcul de l'indice d'accessibilité est d'obtenir un état de service représentatif de l'offre proposée par le réseau aux usagers, le modèle initial propose d'extraire les fréquences des différents services en se plaçant en heure de pointe du matin pour un jour de semaine. Dans le modèle ici proposé, on va extraire les différents horaires de passage d'un jour ouvrable de base entre sept heure du matin et dix-huit heure du soir. Cette nouvelle définition est motivée d'une part par le fait que certains services ne sont pas disponibles sur l'heure de pointe du matin mais existent néanmoins et d'autre part car l'accessibilité d'un réseau ne se résume pas seulement à l'heure de pointe du matin mais au service proposée tout au long de la journée. La date de référence ainsi déterminée a été le mardi 21 mai 2019, car c'est une journée en milieu de semaine hors vacances scolaires et hors jours fériés. La fréquence de passage est alors directement déduite depuis les horaires en calculant l'intervalle de temps entre chaque passage. Dans le cas où un service ne présente qu'un seul passage par jour, la fréquence de passage est fixée par défaut à 24h, s'il n'y en a aucun cette dernière est fixée à zéro.

De cette manière il a été possible de géolocaliser tous les arrêts du réseau de transports, de leur associer l'ensemble des lignes y passant et de construire un fichier de correspondance entre ces lignes et les fréquences qui leurs sont associées. Ce fichier est disponible à l'**Annexe 5 : Equivalence entre les routes et les fréquences associées**, il permet de contrôler les données d'entrées du modèle. En outre, afin de pouvoir si un arrêt est accessible ou non depuis un centroïde, il a été nécessaire de déterminer un mode pour chaque arrêt. En cas de conflit entre les modes, celui ayant le meilleur niveau de service (métro puis tramway puis bus) a été conservé. La Figure 4 ci-dessous présente la localisation de ces arrêts sur le territoire de la MEL, on peut y remarquer qu'une partie des arrêts définis dans les GTFS n'ont pas été définis car n'étant pas utilisés le mardi en semaine.

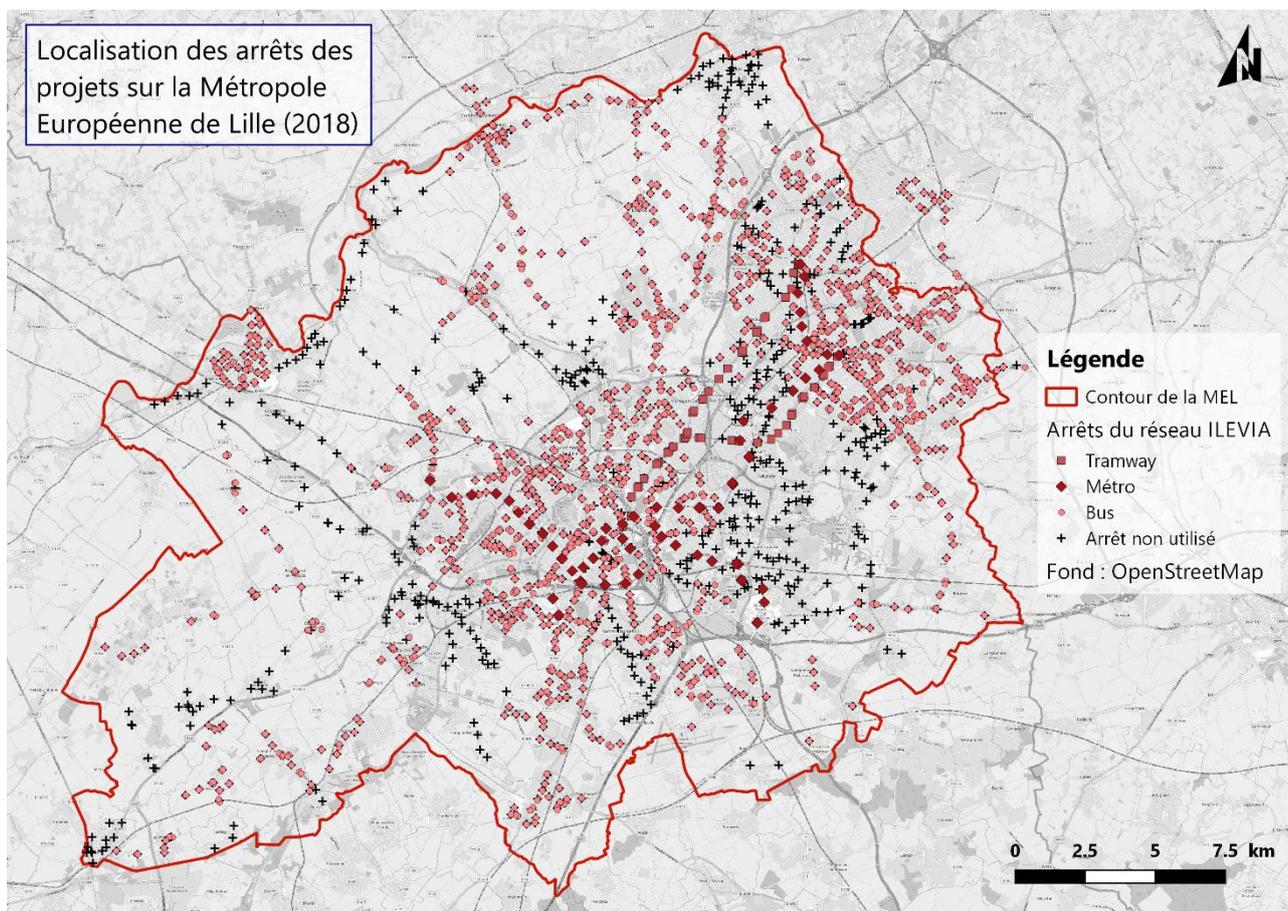


Figure 4 : Localisation des différents arrêts du réseau de la MEL après extraction des GTFS

D'un point de vue qualitatif, on observe que le réseau ILEVIA (AOM de la MEL) est largement développé dans le quart nord-est du territoire avec les communes de Roubaix, Tourcoing et la proximité de la frontière belge. Pour autant, en dehors de la municipalité lilloise et de cette partie du territoire, on observe un certain vide d'arrêts de transport en communs, ce qui pose la question de l'adéquation de l'offre et de la demande sur laquelle on reviendra dans la partie **3. Vers un outil d'aide à la décision**. Sur un aspect plutôt quantitatif, on remarque le nombre non négligeable d'arrêts non utilisés par le modèle, ceci s'explique de deux manières : premièrement, les arrêts de certaines lignes supprimées ont été conservés dans le fichier stops (cf. Figure 3), et deuxièmement la codification GTFS du fichier stops impose une séparation entre les zones d'arrêt et les plateformes qui y sont associées (typiquement il y aura un arrêt par plateforme, par exemple un pôle multimodal sera codé comme une zone d'arrêt mais le quai associé à chaque ligne de transport sera présenté comme un arrêt rattaché à cette zone), ici toutes les zones d'arrêts sont représentées comme n'étant pas utilisées (car physiquement elles ne font l'objet d'aucune desserte).

Nonobstant les contraintes techniques apparues lors de l'obtention des arrêts et des fréquences de passages dû à l'utilisation des GTFS, un autre aspect s'est avéré particulièrement limitant dans le calcul de ce PTAL. En effet la capacité de calcul de QGIS étant limitée pour des matrices avec de trop nombreuses entrées, il a été impossible de réaliser une matrice des distances impliquant l'ensemble des centroïdes (environ 66 000 entités) et tous les arrêts (environ 18 300) car cela représentait plus d'un milliard d'opérations. Afin de contourner ce phénomène, il a été nécessaire de limiter le nombre d'arrêts auxquels un centroïde pouvait être connecté, en effet pour l'ensemble des centroïdes définis dans le modèle il n'existe un nombre limité d'arrêts auquel il est possible de se connecter selon les distances d'accessibilité et la disponibilité de l'espace public. Ce nombre a été limité aux 15 arrêts les plus proches de chaque centroïde car le maximum d'arrêts

auquel était connecté un centroïde était de 18 et que cela représentait moins de deux heures de calculs pour mon ordinateur, ce qui semblait être un compromis acceptable.

Obtention de l'équivalent fréquence porte-à-porte et présentation de valeurs cadres

Le **facteur de fiabilité** est le dernier élément à avoir été modifié par rapport au modèle présenté par TFL, afin de modéliser au mieux les différences entre les modes du modèle de la MEL. En effet, le modèle de TFL ne considère que deux modes différents : la route et le fer ; tandis qu'avec l'utilisation des GFTS il a été possible de distinguer les trois modes cités auparavant. Ainsi, le facteur de fiabilité du bus a été maintenu à 2 minutes, mais celui du tramway a été fixé à 1 minute et celui du métro abaissé à 30 secondes, contrairement au modèle de TFL qui ne considérerait qu'un seul facteur de fiabilité de l'ordre de 45 secondes. Ces choix s'expliquent notamment par les fréquences de passages de ces deux modes ainsi que par le caractère automatisé du VAL¹³ lillois cadencé à près de 1 min 30 s en heure de pointe (2 minutes en moyenne sur la journée selon la méthode de calcul mentionné précédemment).

Pour le reste de la méthode, c'est-à-dire du calcul de l'EDF jusqu'à l'obtention de l'indice d'accessibilité, rien n'a été modifié par rapport au modèle original. Le Tableau 3 ci-dessous permet d'illustrer les valeurs des données pour chaque mode selon la méthode décrite dans les paragraphes précédent pour des services situés à la distance maximale d'accessibilité par rapport à une entité et pour des fréquences de passages choisies. Il est important de rappeler au lecteur que le temps d'attente prévu correspond à la durée moyenne d'attente pour un individu qui arriverait à l'arrêt à un horaire aléatoire, de cette manière ce temps d'attente prévu est égal à la moitié de la fréquence de passage du service.

Tableau 3 : Présentation des différentes valeurs des paramètres pour des services fictifs situés à distance accessible maximale

	BUS	TRAMWAY	METRO
<i>Distance d'accessibilité maximale (m)</i>	300	600	900
<i>Temps d'attente prévu (min)</i>	7.5	5	0.75
<i>Facteur de fiabilité (min)</i>	2	1	0.5
<i>Temps d'accès total max (min)</i>	14.0	15.1	14.8
<i>Equivalent fréquence – EDF (Hz)</i>	2.14	1.99	2.02

Dans l'optique de proposer un indicateur capable de faire partie intégrante des processus décisionnels, il est nécessaire de bien comprendre le fonctionnement de celui-ci, afin d'en maîtriser l'impact dans les analyses sur différents territoires. La Figure 5 présente donc l'indice d'accessibilité selon la distance d'accès à l'arrêt en reprenant l'ensemble des étapes précédentes, sur ce graphique sont présentés trois services fictifs, un pour chaque mode, possédant les mêmes caractéristiques que dans le Tableau 3. Cette démarche est particulièrement intéressante car elle permet de déceler d'éventuels biais dans la construction de l'indicateur, une perspective qui sera approfondie dans la

¹³

Véhicule

Automatique

Léger,

voir :

https://fr.wikipedia.org/wiki/V%C3%A9hicule_automatique_l%C3%A9ger

partie 2.4. D'autre part, cette analyse complémentaire permet de confirmer le choix réalisé sur la distance d'accessibilité, car on peut apercevoir dans le Tableau 3 que pour des fréquences de passages représentatives des modes la distance d'accessibilité maximale entraîne un équivalent fréquence proche de 2. Cela semble donc être un compromis raisonnable et judicieux.

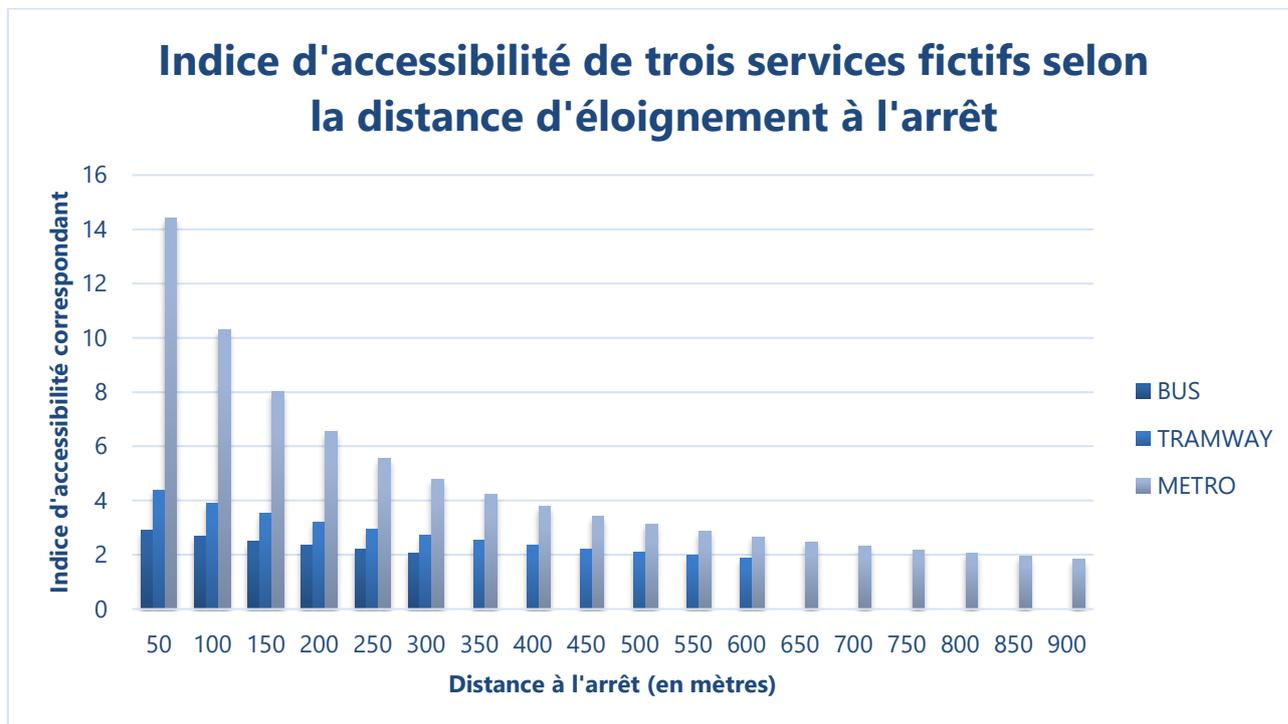


Figure 5 : Indice d'accessibilité de trois services fictifs selon la distance d'éloignement à l'arrêt

La figure ci-dessus permet d'illustrer de manière triviale l'impact sensible du passage à l'inverse imposé par cette méthode. Tout en permettant de raisonner en fréquence, ce qui permet une analyse plus naturelle des résultats en termes d'accessibilité (plus la fréquence augmente et la distance diminue, plus le service est accessible), ce passage à l'inverse entraîne un effet de proximité non négligeable pour les services aux fréquences élevées. Il est alors intéressant de remarquer que la proximité immédiate d'un arrêt de métro par rapport à un centroïde a un impact fort mais finalement très localisé. Cette analyse permet donc d'observer que la fréquence de passage joue un rôle particulièrement sensible dans le calcul de l'indice d'accessibilité en fonction de la distance.

2.2.3 Propositions d'améliorations de la méthode

Afin de limiter les valeurs excessives d'indices d'accessibilité qui biaiserait le modèle, voici deux propositions d'améliorations visant à contrer cet effet. Ces améliorations n'ont pas été appliquées sur le modèle existant car cela pourrait représenter un biais dans les résultats finaux, ce qui rendrait impossible la comparaison avec le modèle de TFL. Ces améliorations du modèle ne sont que des pistes et nécessiteraient un travail approfondi indépendant pour être efficacement mis en place, ce qui n'est pas l'objet de ce rapport.

- La première solution qui vient à l'esprit pour contrer ce phénomène serait de proposer un effet de seuil sur la distance, c'est-à-dire imposer une distance minimale en dessous de laquelle on considère qu'il n'est pas possible qu'un centroïde soit aussi proche d'un arrêt. Par exemple on pourrait fixer une valeur seuil de 50 mètres, si la distance mesurée est inférieure à ce seuil, la valeur de seuil est attribuée par défaut. Cela permettrait de fixer un « garde-fou » sur les résultats obtenus pour l'indice d'accessibilité sans trop dénaturer le calcul du modèle. Il est important de préciser que cette solution ne s'impose seulement à cause de la

méthode de calcul de la distance, qui est géographique alors que cela devrait être suivant un itinéraire piéton.

- Une deuxième solution pouvant être envisager est d'inclure au calcul de l'équivalent fréquence porte-à-porte une grandeur physique négative ayant des valeurs très faibles sur les courtes distances. On pourrait alors penser à une forme logarithmique de la distance ou du temps d'accès qui serait susceptible de modéliser l'aspect binaire des individus.
- La troisième proposition est une amélioration du modèle qui complexifierait les calculs, il s'agirait de définir la distance d'accessibilité d'un service suivant la fréquence de passage qu'il propose. En effet, en plus du mode proposé par le service, la distance d'accessibilité est avant tout déterminée par la fréquence de passage du service, un individu sera prêt à marcher plus longtemps s'il sait qu'il va attendre moins longtemps à l'arrêt. Cet aspect du modèle représente un travail à part entière car il sous-entend des études sur l'utilité ou le choix modal.

L'ensemble de ces travaux réalisés sur les données de la Métropole Européenne de Lille ont permis de calculer les différents niveaux de PTAL sur l'ensemble du territoire. L'enchaînement des étapes une fois la matrice de distances calculée a été réalisé grâce au langage algorithmique Python, ce qui permet une ré-employabilité sur un autre territoire avec un autre jeu de données.

2.3 Evaluations des résultats obtenus sur le territoire de la MEL

Grâce à l'ensemble de ces caractéristiques et méthodes de calculs il a été possible de construire l'indice d'accessibilité de chaque entité (carré de 100m par 100m. En utilisant le tableau de la Figure 1, il a ensuite été possible de produire une carte sur le même schéma que celle de la Figure 2 avec QGIS 2.18.26. Cette carte de PTAL est présentée sur la Figure 6 ci-dessous pour le territoire de la MEL.

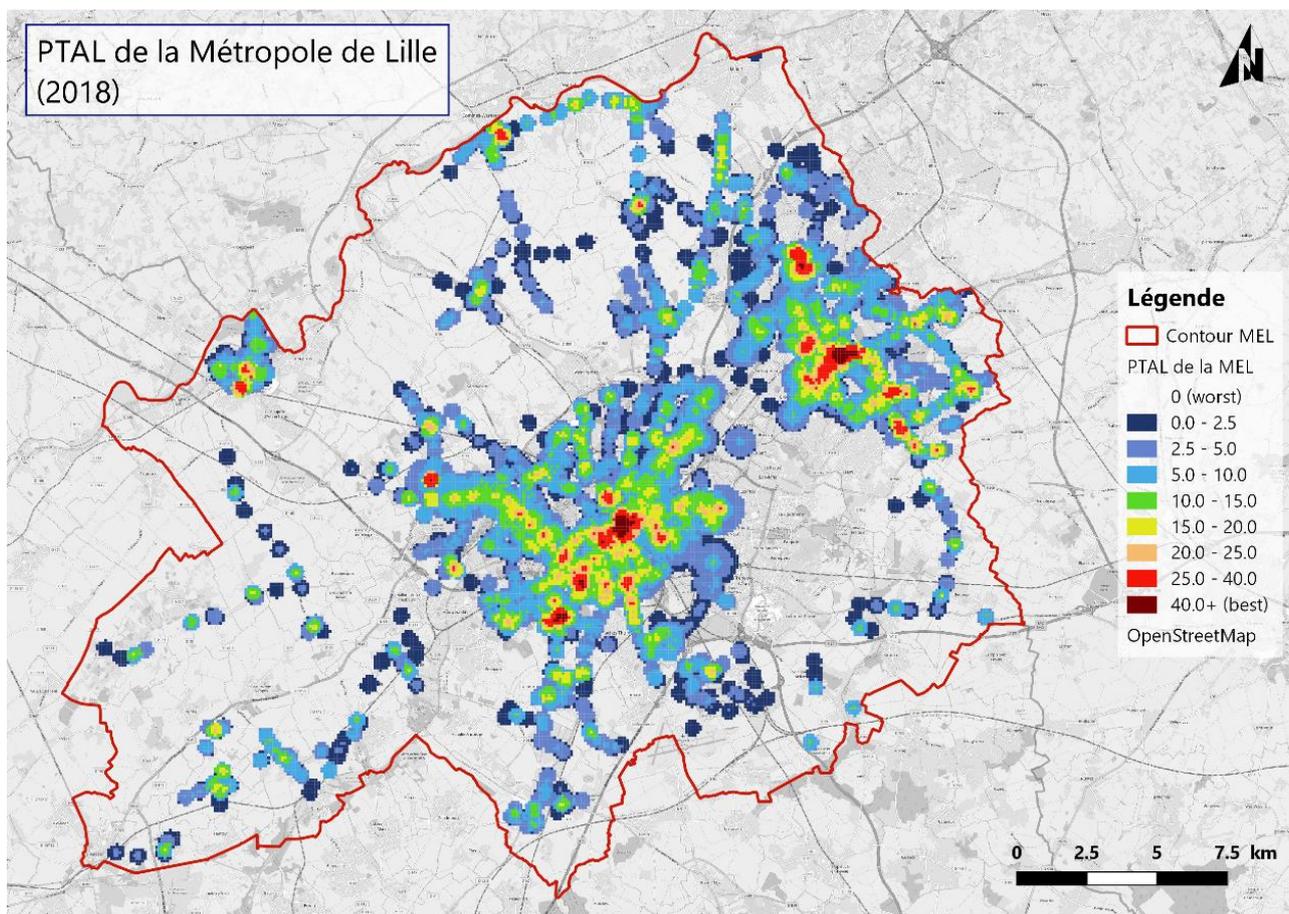


Figure 6 : Représentation cartographique du PTAL sur le territoire de la MEL

On remarque de prime abord que le territoire de la Métropole Européenne de Lille semble moins bien desservi que le Grand Londres par les transports en communs malgré sa superficie bien moindre (647,7 km², soit un peu moins de trois fois plus petit). Cela s'explique par le faible nombre de modes lourds sur le réseau lillois par rapport au réseau londonien, modes lourds qui sont souvent associés à des fréquences élevées. Les secteurs les mieux desservis sont les secteurs connectés au métro en plus d'autres services (bus ou tramway) tels que les gares de Lille Flandres et Lille Europe par exemple.

Pour pousser un peu plus loin la comparaison entre les deux modèles (TFL et celui construit pour la MEL), on remarque que le modèle londonien présente une bien meilleure couverture du territoire avec une superficie bien plus faible de zones sans aucun accès aux transports en communs (i.e. PTAL de niveau 0). De plus, on trouve un effet centre-périphérie bien plus marqué dans le modèle de TFL, avec le centre de Londres au niveau 6b et une décroissance de PTAL progressive vers les extérieurs avec quelques localités de niveau 6 (des gares essentiellement). On peut expliquer cela en partie par le fait que le réseau du Grand Londres est bien plus étendu que celui de la métropole de Lille, en outre la périphérie de Londres est plus densément peuplée ce qui permet la mise en place de moyens de transport plus efficaces pour écouler ces flux (économies d'échelle). Autrement, la distance d'accessibilité des services de bus, bien plus présents en périphérie, présente un facteur deux entre les deux modèles (en faveur de Londres), ce qui peut expliquer la superficie plus faible de zones sans accès aux transports en communs. Il est par ailleurs important de rappeler que dans le

modèle de la MEL, les TER¹⁴ n'ont pas été modélisés, ce qui peut représenter un biais supplémentaire par rapport au modèle de TFL.

Ces résultats ne présentent pas d'aberration concernant la densité de la desserte du réseau *ILEVIA*, ce qui conforte l'idée que le PTAL peut être un indicateur robuste même sur un territoire différent que celui pour lequel il a été créé : ce modèle semble tout à fait transposable.

De plus, on peut noter que l'implantation d'un arrêt de métro seul ne suffit pas à faire accéder une entité au niveau 6, on le remarque nettement sur les arrêts de métro au Nord-Ouest de Lille. En outre, les entités au niveau 6b disposent au moins d'un accès à deux modes lourds (métro et/ou tramway) comme sur les secteurs des gares, Roubaix ou Tourcoing.

Maintenant que nous avons compris comment se construit l'indice d'accessibilité et par conséquent le PTAL, nous allons nous intéresser aux limites de cet indicateur compte tenu de sa nature, mais aussi concernant les différents aspects techniques rencontrés.

2.4 Les limites théoriques et pratiques du PTAL

2.4.1 Les limites théoriques

La classification PTAL permet de donner un bon aperçu de la densité de l'offre de transports publics sur un territoire, en revanche il présente des limites clairement identifiables, ne serait-ce que durant la phase de calcul. Il est probable que certains des biais évoqués ci-dessous ne soient que le reflet du caractère encore expérimental de cet indicateur d'accessibilité, c'est-à-dire le fait que cet indicateur n'ait été construit que sur des territoires bien particuliers (Londres, Royaume-Uni ; Ahmedabad, Inde ; Surat, Inde). D'autant plus que ces territoires présentent des caractéristiques communes sur leurs réseaux de transports en communs car ils sont tous inspirés du modèle de transport anglo-saxon.

Le premier élément frappant dans la construction du PTAL est l'absence de la notion d'utilité dans l'utilisation des transports en communs. En effet, dans ce modèle on ne considère à aucun moment le choix de service des individus ou le besoin plus ou moins marqué pour chacun d'utiliser un type de service. Intégrer ces notions serait synonyme d'envisager les déplacements des individus dans leur intégralité, concrètement cela impliquerait de faire intervenir la notion de choix modal et de réaliser une étape d'affectation (i.e. envisager un modèle à quatre étapes). Or cet indicateur se veut simpliste et transparent et cette étape complexifierait grandement les calculs en incluant de nombreuses données socio-économiques ainsi que des algorithmes de calculs privés (comme ceux des logiciels PTV Visum ou CUBE par exemple). Globalement les choix des individus n'interviennent pas dans ce modèle car on construit un indicateur spatial d'accès à un réseau et non pas un indicateur se basant sur des itinéraires. En effet, cet indicateur utilise le territoire comme donnée d'entrée et non des individus.

Deuxièmement, dans la lignée de la remarque précédente, on peut remarquer que la vitesse de chaque mode ou les temps de parcours ne sont pas intégrés au modèle. De même que la desserte des lignes, c'est-à-dire qu'un bus qui passe toutes les 5 minutes pour aller dans une banlieue voisine aura plus de poids dans le modèle qu'un tramway qui passe toutes les 10 min pour se rendre au centre-ville, à distance égale entre l'arrêt et l'entité. Même si le choix modal des individus n'est pas

¹⁴ Transports Express Régionaux

pris en compte dans le modèle de par sa nature, la desserte des lignes est un élément structurant pour les réseaux qui mériterait d'être prise en compte. On pourrait penser à un facteur temps supplémentaire pour les lignes qui ne desservent pas ou peu une liste des centres d'intérêt du territoire d'étude. Néanmoins, cet aspect semble limité par le fait que généralement les lignes les plus performantes (modes lourds et fréquences élevées) sont souvent celles qui desservent le plus de centres d'intérêts, cela reviendrait à biaiser l'indicateur en favorisant encore plus les lignes structurantes des réseaux.

Troisièmement, la connectivité des lignes n'est pas non plus prise en compte, ce qui reste problématique dans la mesure où les réseaux s'organisent de plus en plus selon un archétype en « *hub and spokes* ». De plus, les différents modes ne sont pas toujours dissociés (car n'existant pas forcément dans les modèles de transports publics anglo-saxons), par exemple un BHNS¹⁵ devrait avoir un facteur de fiabilité plus faible qu'un bus classique, si son itinéraire en site propre en fait un mode plus fiable qu'un simple bus. L'utilisation des fichiers GTFS ne permet pas d'accéder à ce niveau de détail, mais une certaine connaissance du réseau pourrait permettre d'effectuer cette distinction, reste à savoir quel facteur de fiabilité attribuer au BHNS.

Quatrièmement, le confort et la praticabilité des différents modes ou arrêt n'est pas prise en compte, en effet les individus ont tendances à privilégier les modes qui leurs paraissent les plus « pratiques ». Par exemple, une zone bien desservie par 4 lignes de bus vétustes pourra avoir un meilleur PTAL qu'une zone desservie seulement par un tramway tout neuf, mais aux yeux des habitants de la zone, un tramway sera bien souvent synonyme d'une meilleure accessibilité car c'est un mode lourd.

On observe ainsi que la construction de l'indice d'accessibilité présente des biais théoriques connus inhérents à construction, qui se veut lisible et axée sur le territoire. On retrouve ici le parti pris de la construction de cet indicateur, qui est d'exclure les individus des calculs. On remarque alors que cela simplifie effectivement les calculs, et même plus car cela permet de rendre accessible cet indicateur au grand public, sans nécessiter de licence logiciel particulière, mais qu'en contrepartie cela oblige à omettre tout un pan de la base théorique spécifique aux transports inhérents à la notion d'utilité et des choix des individus. Voyons maintenant quelles sont les limites pratiques, découvertes lors de la construction de cet indicateur.

2.4.2 Les limites pratiques

Bien que les limites théoriques de l'indicateur puissent être discutées de par leur nature même, il existe aussi des biais que l'on observe lors de la construction de l'indicateur qui sont parfois compliqués à résoudre sans intervention extérieure. Le manque de certaines données ou la possibilité de réaliser certaines opérations en sont des exemples typiques, mais ici nous allons plutôt nous intéresser aux biais techniques rencontrés lors des travaux présentés dans ce document.

L'utilisation de fréquence qui nécessite un passage à l'inverse engendre des effets de proximité à prendre en compte. En effet, dans la construction du modèle on découpe le territoire d'étude en carré de 100m par 100m, qu'il est ensuite nécessaire de modéliser par un unique point pour calculer des distances. Pour cela on utilise le centre géographique de chaque entité (non-pondéré), or il est possible que selon cette définition un arrêt soit très proche d'un centroïde, ce qui se traduit par un

¹⁵ Bus à Haut Niveau de Service

temps d'accès très court au service depuis le centroïde. Comme il a été possible de le constater sur la Figure 5 précédemment, pour un service ayant une fréquence élevée cela peut être synonyme d'une valeur d'indice d'accessibilité très élevée.

La remarque précédente est intrinsèquement liée à la méthode choisie pour mesurer les distances entre centroïdes et arrêts. Dans la mesure où les données sur les cheminements piétons n'étaient pas disponibles en SIG pour le territoire d'étude, il n'a pas été possible de calculer un itinéraire de marche à pied et un temps de déplacement fin entre chaque centroïde et les arrêts disponibles. La solution de remplacement a été de calculer des distances « à vol d'oiseau » entre ces différents points, donnant alors lieux à ces effets de proximité mentionnés précédemment. Cependant, la complexité de cette phase de calcul est toujours discutable, car il est toujours possible d'affiner ces temps de parcours, ne serait-ce que par le choix de raccordement du centroïde au réseau pédestre mais il existe aussi de nombreuses autres variables comme la congestion piétonne, les traversées de carrefours, le temps d'accès au réseau (i.e. le temps pour un individu de sortir de chez lui), la position du centroïde dans l'entité, etc...

Les temps de parcours ne sont malheureusement pas les seuls biais de cette étude, il existe aussi une limite importante qui concerne les fréquences associées aux services de transports. En effet, comme nous avons pu le voir précédemment, cette donnée a été extraite via un traitement des fichiers GTFS du réseau. Pour la plupart des réseaux de transports publics en France, ces fichiers sont disponibles en libre-service et actualisés régulièrement afin de refléter le plus fidèlement possible l'état d'un réseau à un instant t . La méthode proposée dans ce document consiste à choisir une date de référence capable de rendre compte de l'état du service sur un jour ouvrable de base. Or le choix de cette date de référence n'est pas anodin, en effet la plupart des réseaux aujourd'hui subissent régulièrement des travaux de modernisation ou d'entretien ainsi que des événements prévus qui viennent perturbés le passage des services. Les fichiers GTFS étant censés rendre compte de l'ensemble de ces perturbations sur les réseaux, cela complexifie grandement le choix d'une date de référence, d'autant plus que pour chaque état du service est associé un PTAL, c'est-à-dire que chaque modification des fichiers GTFS est synonyme d'une modification des résultats du PTAL.

Ainsi, nous avons vu que le PTAL est un indicateur qui modélise la densité de service offerte par un réseau de transport en commun sur un territoire. Cependant, nous avons pu remarquer que cet indicateur se construit sur une base théorique omettant volontairement une partie des recherches dans le domaine des transports (i.e. la notion d'utilité et l'aspect des choix individuels). Ce cadre se construit donc sur une approche purement territoriale et il est nécessaire de le garder à l'esprit lors des analyses de résultats, car il ne va pas être possible de mettre le PTAL en relation avec des variables ne présentant pas une approche territoriale. En outre, nous avons observé qu'il existait d'autres biais inhérents à la méthode mise en place pour la construction de l'indicateur, ces derniers sont connus mais ne sont pour autant pas neutralisable dans l'immédiat, la connaissance de leur impact permet d'éviter d'apporter des conclusions trop hâtives sur certains résultats.

Maintenant que nous nous avons une bonne connaissance de l'outil mis en place, que ce soit dans sa construction autant que sur ses limites, il est possible d'interpréter les résultats obtenus et de les mettre en relation avec des variables extérieures au modèle mais endogènes à la notion d'accessibilité aux transports publics. Cette troisième partie du travail s'axera sur la mise en place d'un outil d'aide à la décision basé sur les résultats du PTAL.

3. Vers un outil d'aide à la décision

Afin d'améliorer les processus décisionnels dans le cadre de choix de projets de transports publics, je propose que l'on s'intéresse à l'utilisation du PTAL comme un élément discriminatoire entre les projets. Il s'agit donc de pouvoir déterminer dans un premier temps des niveaux de PTAL pour chaque entité selon les différents projets et par la suite comparer une situation *en projet* et une situation *hors projet*. Ce travail va nous permettre d'observer quelles seront les éventuelles différences en termes de niveau d'accessibilité pour les projets, mais aussi de pouvoir localiser sous SIG quels sont les bénéficiaires de ces projets. Ensuite grâce à des jeux de données socio-économiques géolocalisés (INSEE à l'échelle IRIS), il va être possible de qualifier les zones bénéficiaires de chaque projet, afin d'enrichir la comparaison.

Le code python utilisé pour traiter tous les résultats présentés dans cette partie est disponible à l'**Annexe 2 : Code python d'exploitation des résultats** (page 61).

3.1 La comparaison du PTAL dans les projets

3.1.1 Présentation des projets testés

Pour permettre de réaliser un premier choix dans les projets proposés, il est nécessaire dans un premier temps de calculer une nouvelle fois un PTAL sur la MEL comme décrit dans la partie 2 mais cette fois-ci en y ajoutant un projet. Pour pouvoir intégrer le projet en question au calcul du PTAL, il est nécessaire d'avoir les informations suivantes :

- La géolocalisation des arrêts du projet
- Le mode considéré pour ce projet (possibilité de tester des variantes de mode)
- La fréquence de passage associée au service
- Le nom du projet (peu importe lequel, mais il en faut un)

Afin de simplifier la démarche pour l'utilisateur, le script python permet d'utiliser une matrice des distances entre services et entités unique au projet, il n'est pas nécessaire de recalculer toute la matrice de distance associée au mode en fusionnant les couches vecteurs des différents arrêts via un logiciel SIG. Ainsi le script python va permettre d'obtenir directement le PTAL calculé pour le scénario de base *hors projet* et le scénario *en projet*. Le fichier de sortie se présente sous la forme d'un tableur avec pour chaque entité identifiée, l'AI *hors projet* et l'AI *en projet*. En utilisant QGIS il est alors possible de rebasculer ces résultats sous forme géographique grâce à la correspondance des identifiants d'entités. En effet, les calculs ne sont pas réalisés de manière géolocalisée, mais à part puis réintégré au modèle géolocalisé.

Dans l'optique de mettre en application ces éléments théoriques, j'ai décidé de comparer plusieurs scénarios fictifs de nouveaux services sur le territoire de la MEL. Chaque projet a été testé pour trois modes différents, associés à trois fréquences :

- Métro avec une fréquence de 1 minute et 30 secondes
- Tramway avec une fréquence de 6 minutes
- Bus avec une fréquence de 12 minutes

Au total se sont trois projets avec trois alternatives chacun qui ont été testés, ce qui représente neuf scénarios différents au total. Ces trois projets sont tous issus des études de concertation de la MEL, puisque seules les routes étaient disponibles, le choix a été fait de placer un arrêt tous les 500 mètres pour chaque projet. Ce choix peut être contestable d'un point de vue théorique, car un service de

bus ne possèdera pas le même écartement inter-stations qu'un métro, en effet les objectifs de dessertes ne sont pas les mêmes. Néanmoins, ceci est une mise en application fictive et ce choix a permis un gain de temps de calcul considérable en divisant par trois le nombre de matrices de distances à produire (élément le plus chronophage du processus de calcul). Voici donc les descriptions de chaque projet de ligne suivis d'une carte (cf. Figure 7) permettant de visualiser la localisation des arrêts :

1. Le premier projet appelé SFLC est une liaison longue de plus de 30 kilomètres traversant la métropole du Nord au Sud en reliant les communes de Seclin (au Sud de la MEL), Faches-Thumesnil, Lille et Comines (au Nord de la MEL, à la limite de la frontière belge). Ce projet passe par le cœur de ville tout en désenclavant les centres urbanisés des extrêmes nord et sud de la métropole.
2. Le projet HLLM est une ligne de 12,5 kms qui permet une liaison d'un ensemble de communes urbanisées de l'ouest de la métropole avec des zones de forte attractivité à proximité de la citadelle de Lille. Il relie les communes d'Haubourdin, Loos, Lille (avec un passage par Port de Lille et la Citadelle) et La Madeleine (quartier à dominante résidentielle réhabilité du nord-est de la métropole).
3. Un troisième que nous appellerons Y est une liaison courte de 10 kms desservant des centres d'intérêt du Sud de Lille tels que la gare de Haubourdin, Eurasanté et Porte de Douai (connexion métro ligne 2).

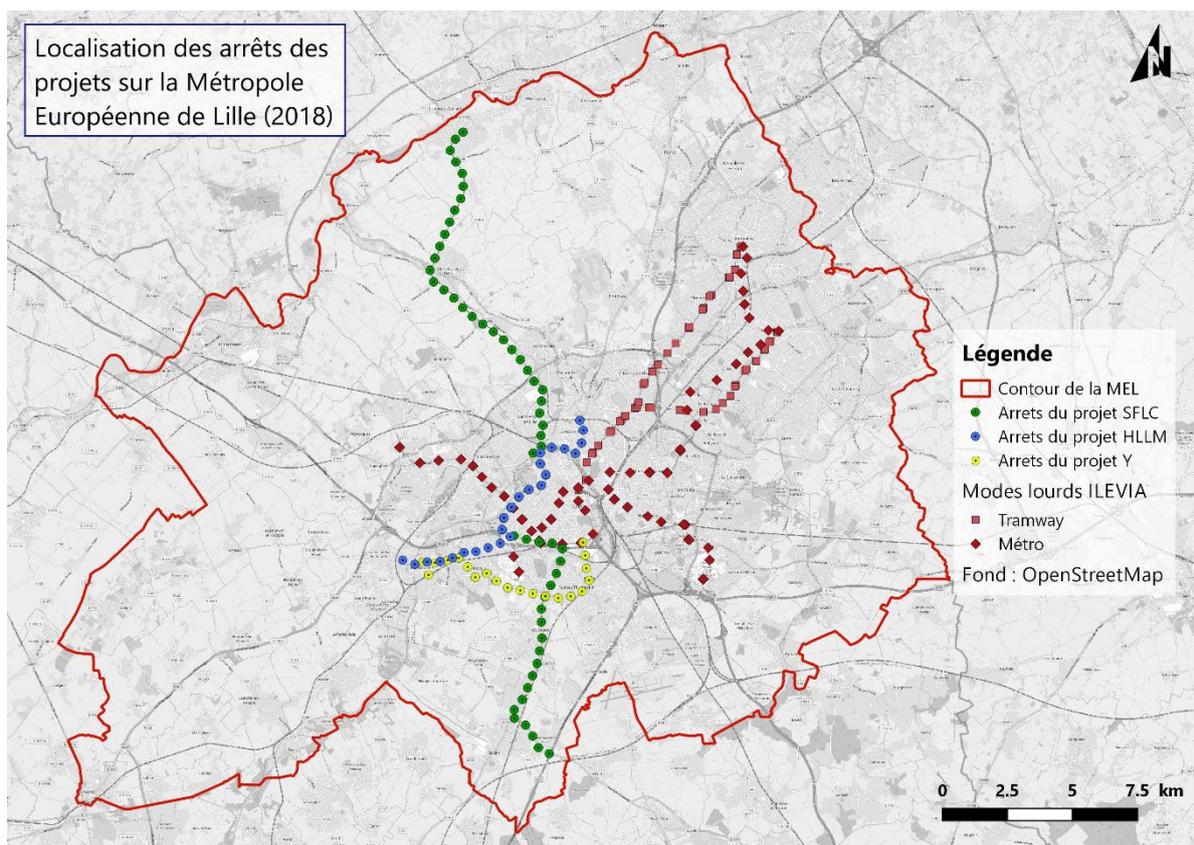


Figure 7 : Disposition des arrêts des différents projets et des modes lourds déjà existants sur la MEL (2018)

Ces trois projets affichent des aires de chalandise qui ne sont pas indépendantes, en effet le projet SFLC présente un tronçon commun avec le projet HLLM sur le contournement de la Citadelle et le passage par Port de Lille, et ce dernier dessert la même zone de l'ouest de la métropole que le projet Y. Ces points communs ainsi que les coûts associés à ces différents projets permettent de déduire qu'il serait mal avisé d'essayer de combiner ces différents projets entre eux, il va donc être

nécessaire de faire un choix exclusif et ce sera tout l'objet de cette partie, en utilisant le PTAL pour y parvenir.

3.1.2 Calculs et interprétations qualitatives des résultats

Ainsi pour chaque projet, un nouveau PTAL a été calculé pour chaque scénario, le scénario hors projet avait déjà été calculé dans la Partie 2.2 sur la Figure 6. Ces nouveaux résultats permettent de mettre en évidence des zones où l'indice d'accessibilité a été amélioré, ce sont ces zones qui vont nous intéresser dans cette analyse. En effet, chaque service de transport public a dans cette modélisation une aire d'influence qui lui est propre, celle-ci étant intrinsèquement liée à sa distance d'accessibilité et par conséquent au mode.

Le nombre conséquent de scénarios envisagés dans cette partie (neuf au total) ne permet pas de présenter toutes les productions cartographiques dans ce rapport, ce qui aurait finalement peu d'intérêt technique. Il est donc proposé de ne présenter que des exemples de productions cartographiques possibles, les détails chiffrés des résultats obtenus pour cette étude seront présentés dans les paragraphes suivants. Les représentations exposées ici ne sont qu'un moyen d'illustrer le travail réalisé dans le but d'explorer les possibilités offertes par la création d'un tel outil d'aide à la décision.

De ce fait, nous nous intéresserons au cas du projet Y, car sa configuration courte se prête particulièrement aux productions cartographiques. Voici donc sur la Figure 8 le niveau d'indice d'accessibilité de l'ensemble des entités de la métropole en situation de projet.

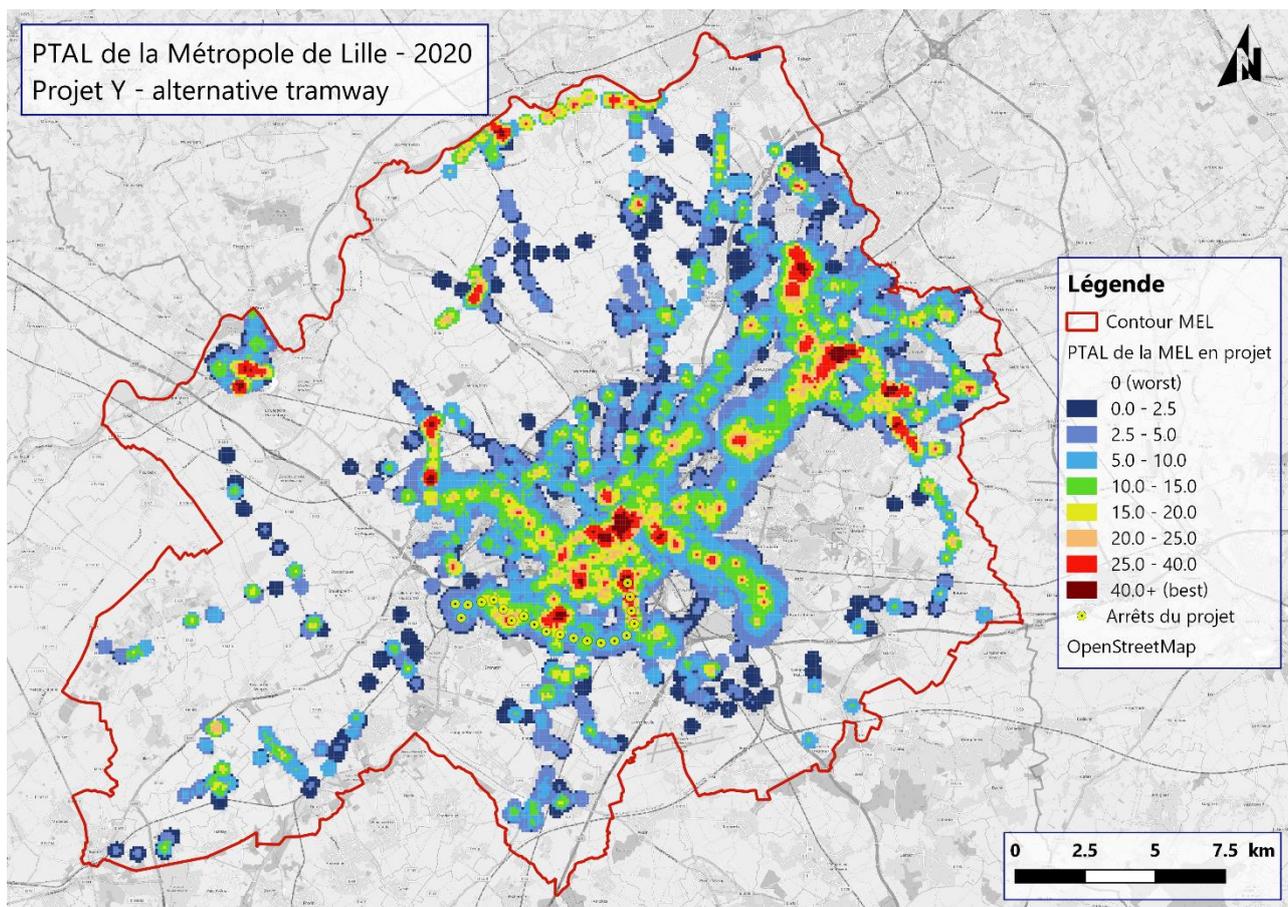


Figure 8 : PTAL de la MEL pour le projet Y avec l'alternative tramway

Cette représentation ne propose pas d'intérêt technique particulier, elle permet simplement d'illustrer le travail réalisé en présentant un résultat concret. L'aspect présentant un intérêt pour l'aide

à la décision consiste à comparer les différences d'indices d'accessibilité induits par les projets. Ainsi la Figure 9 présente les écarts en indice d'accessibilité produits par les trois alternatives de modes du projet Y. L'échelle de couleur a été conservée, c'est donc la même que celle présentée sur la Figure 1 de la partie 2.1. En effet, dans la mesure où ces projets sont des créations de lignes, ils sont installés la plupart du temps dans des zones non accessibles pour ce mode, ce qui maximise leur efficacité du point de vue de l'accessibilité.

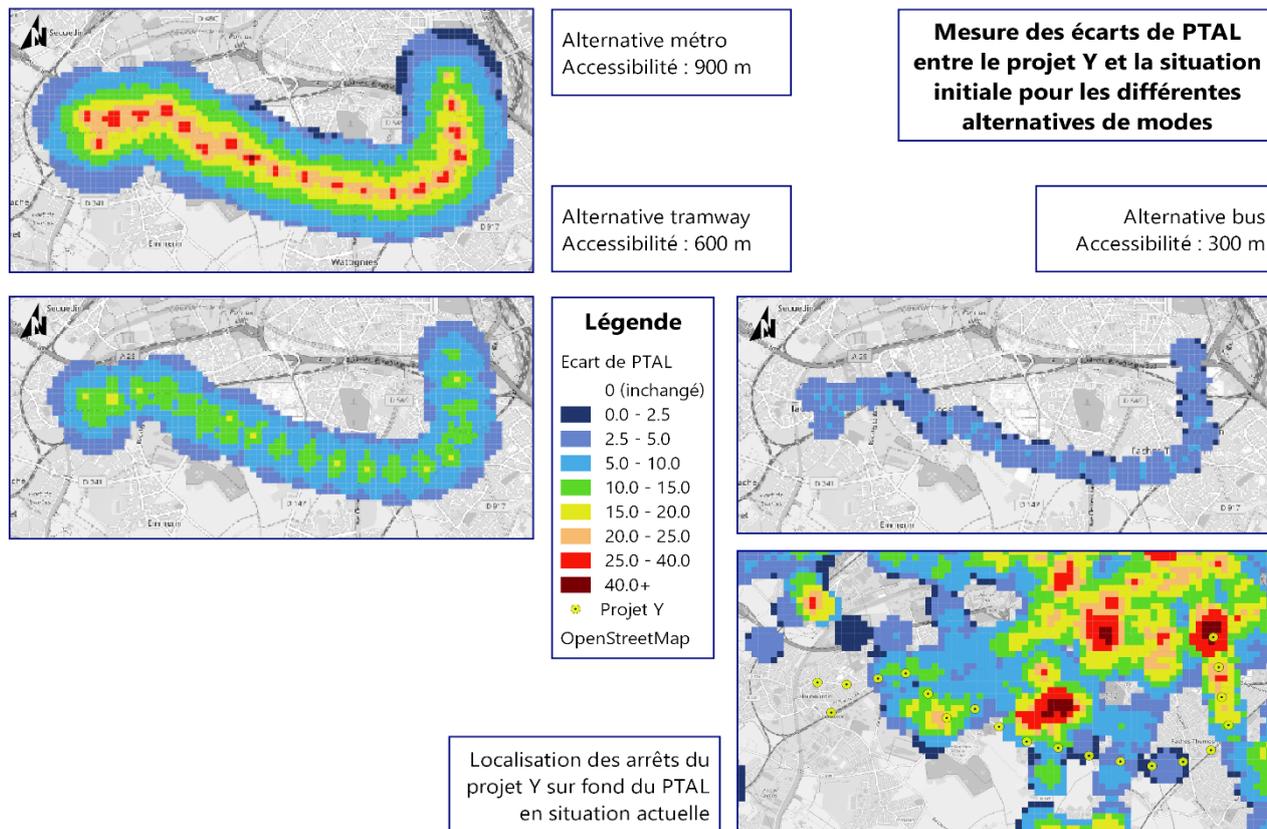


Figure 9 : Mesure des écarts en indice d'accessibilité par rapport à la situation initiale pour les trois alternatives du projet Y

Cette représentation permet de constater l'impact direct de l'ajout d'un service de transport public sur un territoire plus ou moins vierge. On remarque alors nettement sur l'arrêt le plus au Nord de l'alternative métro que la non-concurrence du mode d'un projet maximise son efficacité d'un point de vue de l'indice d'accessibilité. En effet, comme nous l'avons vu lors de la construction du PTAL, lorsque deux services sont en concurrence sur un même mode, un poids double est affecté à l'équivalent fréquence (même grandeur physique que l'indice d'accessibilité) du service le plus performant sur l'entité. Cette pondération reflète notamment le choix exclusif des services par les individus, car un individu exploite rarement plusieurs services différents d'un même mode, de plus cela permet de limiter l'effet des lignes en double sens, dans la mesure où les deux sens sont envisagés comme des services différents.

Les cartographies présentées ci-dessus permettent une analyse qualitative des situations de projet, cela permet d'observer les zones qui semblent le plus impactées par le passage du nouveau service. Typiquement on observe un phénomène de diffusion rayonnant autour des arrêts définis qui dépend du mode et de la fréquence testés pour le projet, l'alternative tramway permet alors d'observer que la variation de PTAL associée au projet subit une décroissance en fonction de la distance d'éloignement à l'arrêt. C'est une conséquence directe du passage à l'inverse dans le calcul de l'équivalent fréquence porte-à-porte, par ailleurs on aperçoit concrètement sur la Figure 9 un

effet de proximité mentionné plus tôt dans ce document : une seule entité présente un PTAL de dernier niveau (6b). En s'y intéressant de plus près, on remarque qu'elle présente un PTAL de dix points plus élevé que les autres entités à proximité directe des arrêts, en effet le centroïde de cette entité se situe à 6 mètres seulement de l'arrêt. On atteint bien sur ce point une des limites de cette modélisation, même si des propositions pour contrer cette effet ont été proposée dans la partie 2.2.3.

3.1.3 Interprétations quantitatives et processus décisionnel

Maintenant qu'une interprétation qualitative a été fournie, il va s'agir d'agrèger les résultats par projet et par alternatives afin de pouvoir les comparer en fonction de leur impact sur l'ensemble du territoire d'étude. Pour cela, plusieurs indicateurs vont être utilisés afin de comparer les effets bruts des projets sur le PTAL du territoire. Puisque les différents projets proposés sont de longueurs différentes, il est intéressant de comparer ces différentes alternatives par arrêt. D'autre part, il est aussi pertinent de s'intéresser aux entités dont le PTAL augmente d'une catégorie, on s'intéressera donc aux entités dont l'indice d'accessibilité augmente de plus de cinq points.

Les indicateurs d'impact moyen par arrêt puis par entité représentent respectivement, la somme des augmentations d'indice d'accessibilité sur l'ensemble des zones divisée par le nombre d'arrêts, et ce même résultat rapporté au nombre d'entités impactés par le projet. Ces deux indicateurs permettent d'établir des ratios d'efficacité des projets sur l'accessibilité. Ensuite, les indicateurs d'entités impactées par arrêt permettent de déterminer le nombre moyen d'entités affectées par le projet par arrêt. Ces résultats permettent de constater la pertinence du tracé du projet, un tracé en ligne droite sera privilégié par ces indicateurs car il touchera plus d'entités différentes. Les résultats des différents indicateurs envisagés sont disponibles dans le Tableau 4 ci-dessous, pour chaque indicateur la valeur la plus intéressante a été mise en gras.

Tableau 4 : Comparaison de l'impact des différents scénarios sur l'indice d'accessibilité

Scénario	Arrêts	Impact moyen	Par arrêt	Par entité	% Entités impactées	Par arrêt	% Entités impactées > 5	Par arrêt
<i>HLLM métro</i>	25	23.4	2 067	0.94	3.3%	88.2	2.6%	70.0
<i>HLLM tramway</i>	25	16.0	906	0.64	2.1%	56.7	1.6%	41.6
<i>HLLM bus</i>	25	7.1	179	0.28	1.0%	25.2	0.1%	3.2
Y métro	20	22.5	2 090	1.12	2.8%	93.0	2.2%	72.5
<i>Y tramway</i>	20	15.7	919	0.79	1.8%	58.5	1.3%	42.7
<i>Y bus</i>	20	7.0	179	0.35	0.8%	25.4	0.1%	2.6
SFLC métro	63	23.7	2 084	0.38	8.4%	87.8	7.2%	75.4
<i>SFLC tramway</i>	63	16.0	916	0.25	5.5%	57.3	4.2%	43.7
<i>SFLC bus</i>	63	7.5	191	0.12	2.4%	25.3	0.3%	3.1

On observe ici que les modes lourds sont particulièrement privilégiés dans cette analyse, car ils permettent de toucher plus d'entités du fait d'une distance d'accessibilité plus importante. On

remarque également que les différences sont assez limitées pour un même mode selon les différents scénarios lorsque les résultats sont ramenés au nombre d'arrêts. De manière générale cette analyse permet de vérifier la pertinence des différents tracés, une forme de tracé sinueuse présentant de nombreuses correspondances avec d'autres lignes de tramway se verra défavoriser par rapport aux autres scénarios. Cette analyse favorise les tracés en ligne droite ne présentant aucune concurrence sur le mode envisagé. En effet, ainsi les aires d'influences sur l'accessibilité de chaque arrêt est le moins possible en concurrence avec celles d'autres arrêts.

D'après les résultats de ce tableau, on peut voir que deux scénarios semblent sortir du lot : le projet Y en métro et le projet SFLC en métro. Le premier semble présenter des résultats intéressants sur l'impact moyen par arrêt et par entité impactée, de plus il semble atteindre le plus d'entités différentes par arrêt déployé. Le second propose une couverture bien plus étendue sur le territoire, ce que l'on peut imputer au nombre d'arrêts bien plus élevés (trois fois plus nombreux que sur le projet Y), néanmoins il possède le nombre d'entités impactées de plus de cinq points par arrêt le plus élevé, ce qui peut s'expliquer par le fait que ce projet dessert un grand nombre d'entités vierges de toute accessibilité aux transports publics.

Afin de comparer ces différents scénarios de manière plus précise il aurait été nécessaire de réaliser un chiffrage de chaque alternative. En effet, cette étude complémentaire aurait permis de pouvoir rapporter les indicateurs par euros investis plutôt que par arrêt. Même si dans le cas présent, il s'agit de différentes alternatives mais pour les mêmes modes et les mêmes fréquences de passage, des différences topologiques ou d'occupation du sol peuvent faire varier sensiblement le prix des infrastructures ou les coûts d'exploitation.

L'analyse de l'impact des projets sur l'indice d'accessibilité ne permet pas d'aller plus loin dans les analyses de comparaison. On voit cependant qu'il manque un aspect essentiel commune à tout projet de transport en commun à cette méthode de choix : la demande. En observant seulement l'offre proposée, on met de côté la moitié de la problématique. Ce qui représente un biais non négligeable dans tout processus décisionnel et en particulier dans ce cas-ci. La suite de cette partie sera donc dédiée à l'intégration de la demande dans ce modèle. Nous nous intéresserons à deux motifs principaux des déplacements : le domicile et le travail.

3.2 Présentation du territoire d'étude : la Métropole Européenne de Lille

Avant de présenter des analyses sur un territoire, il est tout d'abord nécessaire de le connaître. C'est pourquoi les prochains paragraphes seront consacrés à une description de la Métropole Européenne de Lille à travers des caractéristiques socio-économiques. Nous allons donc étudier ce territoire à travers trois éléments : la population, les emplois et le prix moyen de l'immobilier au mètre carré. Pour chacun de ceux-ci, nous allons décrire la manière dont ils sont construits afin d'être adapté à chaque entité.

3.2.1 La population dans la métropole

Concernant le nombre d'habitants d'un territoire, l'INSEE met à disposition un certain nombre de jeux de données en libre accès. Ces différences résident principalement dans l'échelle à laquelle ces données sont disponibles, en allant du plus large au plus précis : la commune, l'IRIS et les données carroyées. L'échelle de la commune présente généralement les données les plus récentes, mais engendre une perte d'information non-négligeable en ne différenciant pas les quartiers densément peuplés, par exemple la ville de Lille ne présente qu'une seule zone alors qu'elle est bien plus densément peuplée que les communes de l'Ouest de la métropole. Pour pallier ce phénomène,

l'INSEE a développé un découpage du territoire appelé IRIS qui correspond à un maillage de plus en plus fin à mesure que la densité augmente, dans la limite de conserver la confidentialité des données. Ainsi le zonage IRIS correspond au découpage communal sauf dans les zones où il est possible d'agrèger plus de 2000 habitants dans chaque sous-zone. Le dernier découpage possible correspond aux données carroyées qui reprend une logique similaire aux données IRIS mais où l'échelle la plus fine est un carré de 200 m par 200 m, néanmoins ce type de données n'est plus produit depuis 2011 pour des soucis d'anonymisation des données. Ainsi l'échelle la plus appropriée pour ce modèle, qui permette d'avoir à la fois d'avoir du sens suivant le découpage en entité de 100 m par 100 m et d'avoir des données assez récentes, était le zonage IRIS.

C'est à partir de ce zonage que la répartition entre les entités a été réalisée, c'est-à-dire que la population d'une zone IRIS, une fois obtenue, était divisé par le nombre de centroïdes présents sur cette même zone et cette valeur était ensuite affectée à chaque entité. Ce redécoupage à l'échelle des entités du modèle permet de mettre en lien la population avec l'indice d'accessibilité de chaque entité. Le résultat de cette agrégation de données puis redécoupage est disponible sur la Figure 10 ci-dessous.

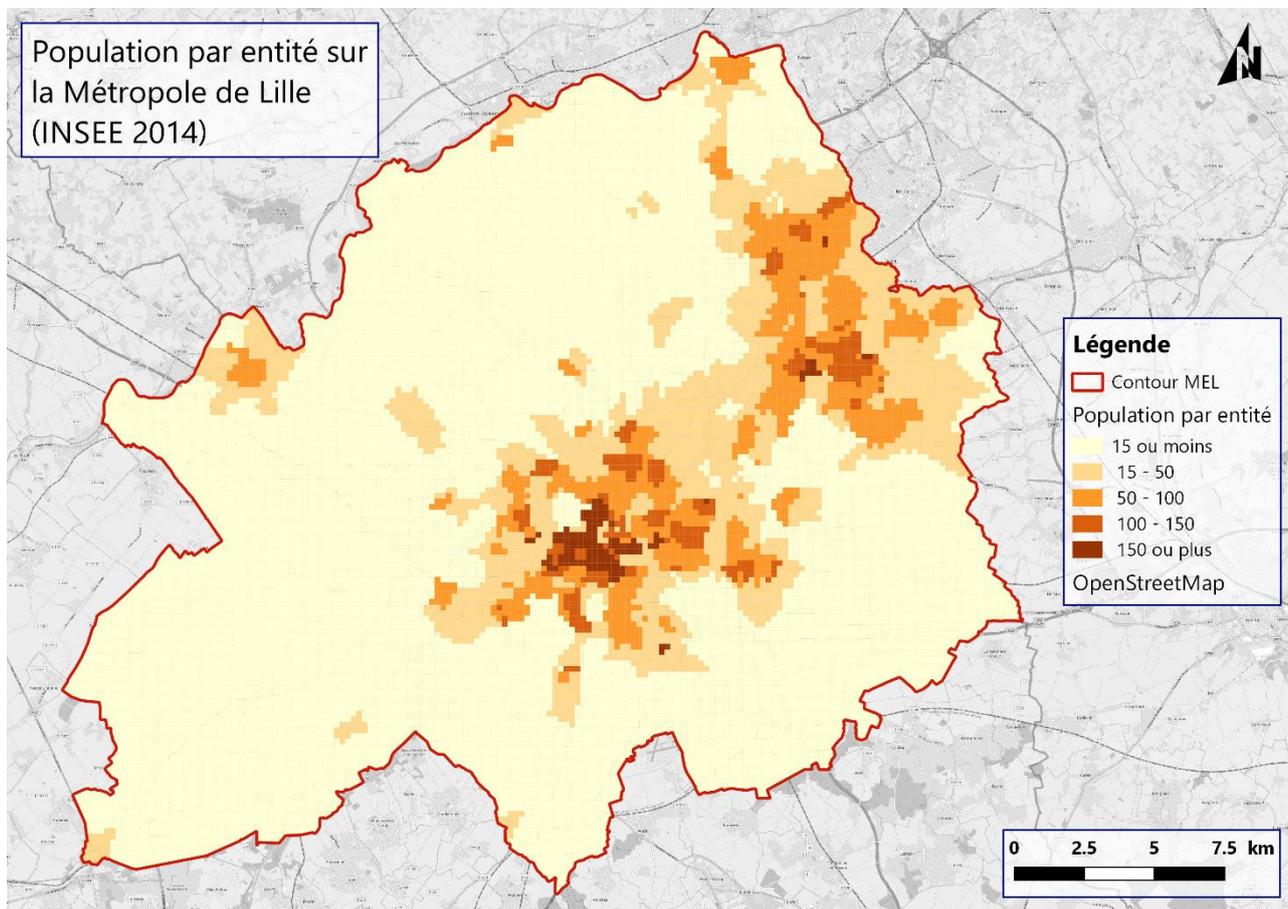


Figure 10 : Population par entité du modèle sur la MEL (INSEE 2014)

Les données de l'INSEE datant de 2014, il a été nécessaire de trouver un moyen d'actualiser ces données de population, dans un premier temps pour correspondre à l'année d'évaluation du réseau et par la suite pour renseigner les scénarios envisagés. Pour réaliser cela, le coefficient de

croissance démographique de la métropole fourni par l'INSEE¹⁶ a été utilisé, calculé sur la période entre 2011 et 2016, il traduit une variation annuelle moyenne de +0,42 %. Il suffisait alors de la population en 2014 par ce coefficient autant de fois que d'année d'écart avec l'année d'horizon souhaitée (dans un premier temps 2019, puis 2025 pour les projets). Sachant qu'en 2016 la population totale de la MEL était de 1 143 572 habitants (INSEE), cette méthode approxime cette population à 1 158 042 habitants en 2019, si on compare ce résultat avec la somme de la population de toutes les entités (1 152 896 habitants) on trouve un écart en variation de +0,45% en faveur du modèle. On peut donc conclure sur le fait que le modèle surestime légèrement la population dans la métropole.

3.2.2 Les emplois dans la métropole

La deuxième entrée socio-économique de ce modèle sont les emplois, car une zone comportant des emplois est une zone qui attire des flux, selon la même logique qu'une zone avec des habitants émet des flux. Dans les deux cas, plus ces données sont importantes, plus la zone va nécessiter une bonne connectivité pour capter ces flux. Le nombre d'emplois contenus dans chaque entité a été estimé via le fichier SIREN de la MEL disponible sur son open data¹⁷. Ce fichier géolocalise la totalité des entreprises de la métropole, il apporte aussi différentes informations sur chacune d'entre elles dont une tranche du nombre d'employés. De ce fait, seul les établissements ouverts et employeurs en 2019 ont été retenus dans la base de données, ce qui représente 31 923 entreprises au total.

Une fois ces entreprises géolocalisées, il a fallu estimer le nombre d'emplois alimentés par chacune d'entre elles. Pour cela, j'ai utilisé la tranche du nombre de salariés fourni dans le fichier SIREN et en ai extrait la moitié puis ajouté un (pour le directeur), par exemple pour une entreprise comprenant entre 6 et 9 salariés le nombre d'emplois équivalent serait de : $\frac{6+9}{2} + 1 = 8,5$. Ensuite, une fois le nombre d'emplois équivalent obtenu par entreprise, il a été nécessaire de modéliser ce que cela représentait pour chaque centroïde. La solution proposée a donc été de réutiliser le zonage IRIS vu auparavant pour la population en appliquant la méthode suivante :

1. Ajouter la somme du nombre d'emplois équivalents de toutes les entreprises à chaque zone
2. Diviser par le nombre d'entités présent sur chaque zone (selon la même technique que pour la population)

Ce résultat a par la suite été actualisé selon le taux d'évolution annuel du nombre d'emplois sur la métropole de la même manière que pour la population, ce taux d'évolution a été calculé sur la base du nombre d'emplois sur la métropole entre 2011 et 2016 fourni par l'INSEE (même source que pour le paragraphe précédent sur la population), il est pour autant deux fois moins élevé avec +0,23 % par an en moyenne. Cette actualisation annuelle a notamment été nécessaire pour envisager des scénarios prospectifs, bien que cette variation soit équitablement répartie sur l'ensemble du territoire d'étude.

La Figure 11 ci-dessous présente les résultats de cette méthode d'estimation du nombre d'emplois par entité sur une carte de la métropole. On remarque que la répartition des emplois sur le territoire semble correspondre à la concentration des activités, avec un nombre important

¹⁶ Voir : <https://www.insee.fr/fr/statistiques/2011101?geo=EPCI-245900410>, consulté le 22/05/2019

¹⁷ Source : <https://opendata.lillemetropole.fr/explore/dataset/base-sirene-v3/information>, consulté le 06/07/2019

d'emplois sur la ville de Lille et sa banlieue proche qui se prolonge vers Roubaix et Tourcoing. L'importante concentration d'emplois au Nord de Lille correspond bien à une zone d'activité importante regroupant de nombreuses entreprises employeuses (selon les données *Google Maps* et *Open Street Map*).

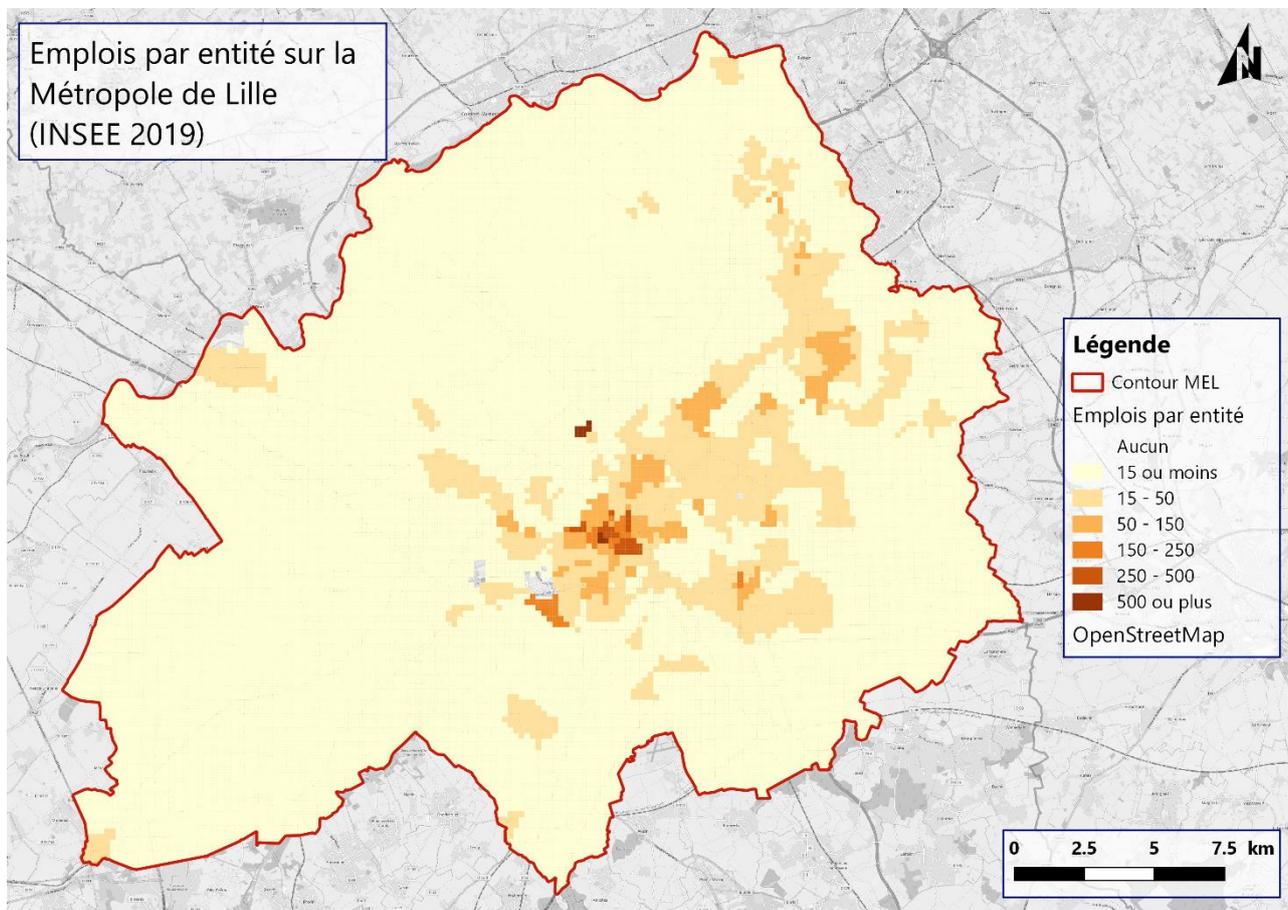


Figure 11 : Nombre d'emplois par entité sur la MEL (SIREN 2019)

Cette méthode présente un certain niveau d'incertitude sur le nombre d'emplois effectivement occupés dans les entreprises, mais de manière générale c'est un résultat difficile à estimer du fait des emplois temporaires d'une durée inférieure à un an plein (stagiaires, intérimaires, prestataires, etc...). Ainsi en 2016, l'INSEE recense 512 224 emplois, actualisés à 515 820 en 2019 via le taux de variation annuel calculé précédemment, le modèle quant à lui comptabilise 574 767 emplois, ce qui représente un écart de +11,4 %. Cet écart est significatif et il est nécessaire de le prendre en compte dans les analyses détaillées dans les paragraphes suivants. Cependant, si l'on considère les résultats cartographiques, on peut suggérer que cette erreur semble répartie sur l'ensemble du territoire, ce qui laisse penser que ces données restent exploitables malgré cet écart.

3.2.3 Le prix de l'immobilier dans la métropole

Le troisième volet de données socio-économiques est celui du prix de l'immobilier. Bien qu'un lien direct avec l'accessibilité aux transports publics soit un vaste sujet de la littérature scientifique en économie des transports, il n'en reste pas moins qu'il est admis que l'implantation des arrêts de transports publics ait un impact sur le prix de l'immobilier à proximité. C'est pourquoi l'introduction du prix de l'immobilier dans ce modèle poursuit deux objectifs : le premier étant d'asseoir un peu plus la pertinence du PTAL comme un indicateur d'accessibilité viable, et le second est de pouvoir entamer un travail expérimental sur l'augmentation des prix de l'immobilier sur les différents scénarios proposés. En effet, si une causalité significative est mise en évidence entre l'indice

d'accessibilité et les prix du loyer pour chaque entité ou chaque zone IRIS, il serait ensuite possible de reprendre les différents coefficients obtenus par une régression linéaire et de les appliquer aux indices d'accessibilité calculés sur chaque entité pour chaque scénario. De cette manière, il serait alors possible d'envisager l'indice d'accessibilité comme une variable socio-économique dans les calculs d'économie des transports (par exemple, les bilans socio-économiques).

Pour réaliser cette analyse, il faut obtenir en donnée d'entrée une estimation géolocalisée des prix moyen du bâti au mètre carré. Comme tout un chacun pourrait aisément le deviner, cela représente la plus grande difficulté de ce travail. Néanmoins, la métropole de Lille dispose ici d'un atout facilitant grandement le travail, mais qui présente aussi un biais non-négligeable qui sera décrit ci-après. En effet, on peut trouver l'open data de la métropole un recensement géolocalisé de l'ensemble des demandes de valeurs foncières¹⁸. Cette base de données permet une distinction des actes notariaux par année et par type d'acte, de telle sorte qu'il a été possible de ne sélectionner seulement les actes de ventes de 2017 à 2018 (sélectionner un nombre plus important d'années était compliqué aux vues du nombre importants d'entrées). De plus, pour chaque vente était spécifiée la valeur foncière ainsi que la somme des surfaces associées (possibilité de lots multiples), la complexité étant la distinction entre la surface du terrain et la surface bâtie. En effet, ces deux surfaces ne s'évaluent pas de la même manière et ne permettent pas de distinguer leurs poids respectifs dans la valeur finale accordée au bien.

Dans la mesure où ce rapport est en lien avec les transports publics et que les impacts des projets de transport sur le prix de l'immobilier ont principalement étaient réalisés dans les milieux urbains, nous allons nous intéresser seulement à la surface bâtie. Il est important de préciser que ce choix représente le biais majeur de cette étude sur le prix de l'immobilier, pour les raisons évoquées dans le paragraphe précédent. La méthode opérationnelle a donc été la suivante :

1. Diviser toutes les valeurs foncières par la surface bâtie de chaque transaction
2. Prendre la moyenne de toutes ces évaluations sur chaque zone IRIS (auparavant utilisées pour la population et les emplois)
3. Attribuer ce résultat à l'ensemble des entités modélisées présentes sur la zone

Ce qui a permis d'obtenir un prix moyen au mètre carré pour chaque zone IRIS et chaque entité (ce résultat pour toutes les entités d'une même zone IRIS). Comme il a été averti précédemment, les actes de ventes incluant un grand terrain présente pour certains des résultats incohérents (prix au mètre carré supérieurs à 100 000 €/m²), qui ont été supprimés dans la mesure du possible.

Les résultats de cette méthode sont présentés sur la Figure 12 ci-dessous. On peut voir que globalement le prix de l'immobilier semble plus élevé dans le centre de Lille et dans les zones possédant un PTAL élevé (nord-est de la banlieue lilloise), malgré une baisse des prix notable dans les banlieues les plus à l'est de Tourcoing et Roubaix, ce qui correspond au ressenti que l'on peut avoir sur la métropole. Néanmoins, il subsiste quelques exceptions incohérentes au sud-ouest de Lille où il n'y a pas de raisons valables (hormis le biais du modèle) qui explique des prix aussi élevés dans ce secteur.

¹⁸ Source : <https://opendata.lillemetropole.fr/explore/dataset/demande-de-valeurs-foncieres/information/>

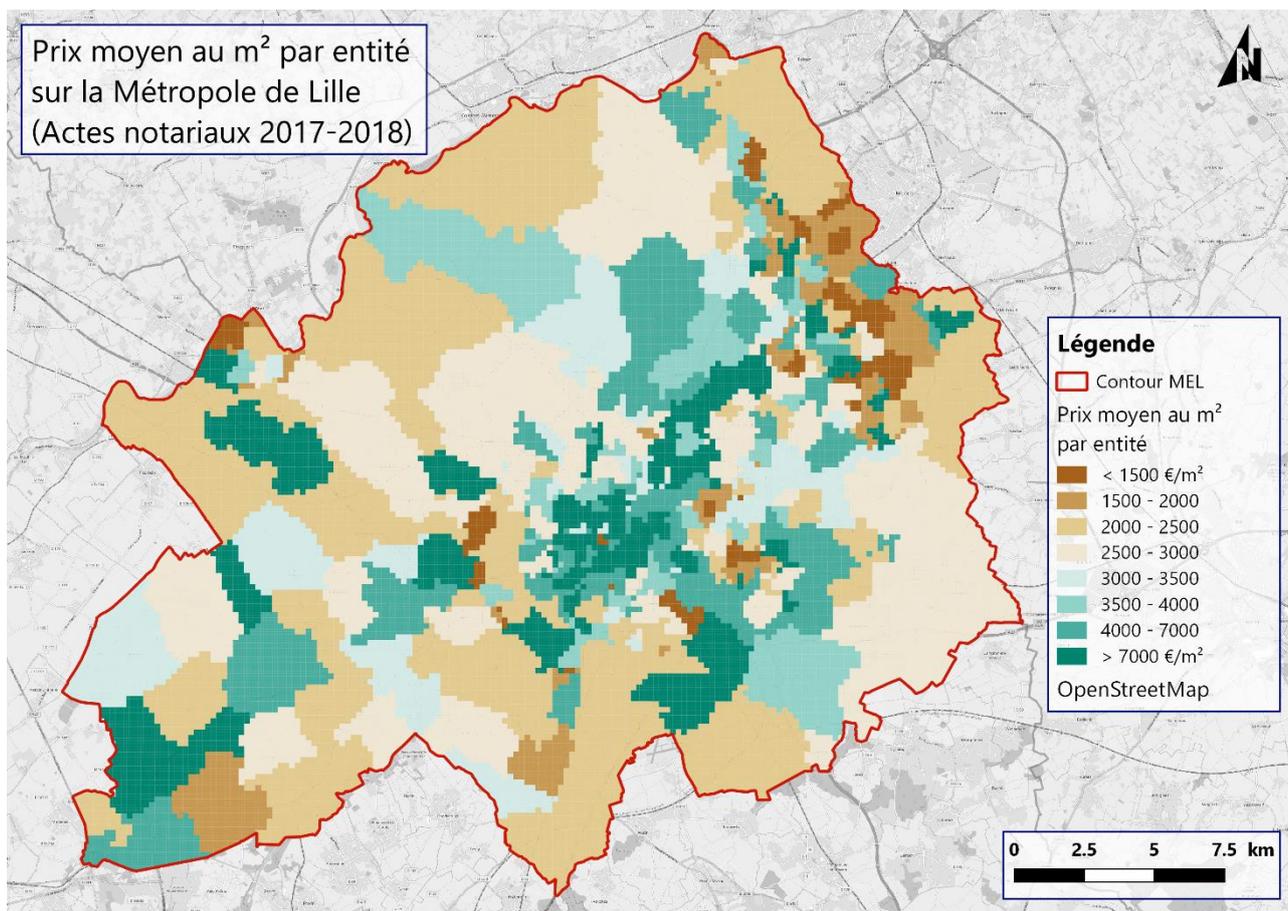


Figure 12 : Prix moyen de l'immobilier au m² par entité sur la MEL (Open Data MEL 2017-2018)

Ainsi, maintenant que les différents jeux de données socio-économiques liés à cette étude ont été présentés, il va être possible de les mettre en lien avec les résultats obtenus avec le modèle sur l'indice d'accessibilité. Ceci permettant de créer une discrimination supplémentaire entre les différents scénarios mais aussi de pouvoir établir des relations de corrélations entre ces éléments afin de réaffirmer la solidité de l'indicateur utilisé.

3.3 Couplage des résultats aux données socio-économiques

3.3.1 Les résultats du modèle en situation actuelle

L'économie des transports modélise bien souvent les déplacements comme liés à des motifs, en identifiant de surcroît des pôles générateurs ou attracteurs de flux. En intégrant les densités de population et d'emplois au modèle, on utilise les deux motifs généralement les plus utilisés dans les déplacements : le domicile et le travail. En mettant en relation ces données avec les résultats sur l'indice d'accessibilité en situation actuelle (cf. Figure 6, page 26), il est alors possible de modéliser la pertinence du choix de maillage du réseau ILEVIA sur sa couverture du territoire. Dans cette partie, il ne va plus être question de raisonner sur les entités créées pour le modèle, mais sur les zones IRIS utilisées pour agréger les données socio-économiques. Ceci afin de limiter les effets de colinéarité dues à la répartition des données sur chaque entité. Pour permettre l'utilisation de l'indice d'accessibilité avec l'échelle des zones IRIS, celui-ci va être moyenné géographiquement pour chaque zone, de cette manière une correspondance a été sauvegardée entre entités et zones IRIS.

Pour mettre en évidence ce résultat, nous allons régresser l'indice d'accessibilité moyen pour chaque zone IRIS avec les densités d'emplois et de populations au kilomètre carré. Le résultat de cette régression est disponible sur le Tableau 5 ci-dessous.

Tableau 5 : Régression linéaire de l'indice d'accessibilité sur les densités de population et d'emplois

$R^2 = 45 \%$	Coefficient	Probabilité de Student
<i>Constante</i>	2,49	0,00 %
Densité de population	$0,72 \cdot 10^{-3}$	0,00 %
Densité d'emplois	$0,51 \cdot 10^{-3}$	0,00 %

Le résultat de cette régression est concluant, comme on aurait pu l'anticiper aux vues des présentations des différents indicateurs réalisées précédemment. Il apparaît que ces deux variables expliquent à elles seules près de 45% de la variance de l'indice d'accessibilité et qu'elles soient toutes deux significatives, dans la mesure où la probabilité du F de Fisher est inférieure à 0.001% et que les probabilités de Student soient toutes très faibles. Les valeurs des coefficients semblent indiquer que plus les densités de population et d'emplois augmentent, plus l'indice d'accessibilité augmente, ce qui explique que la concentration de population et d'emplois favorise la mise en place de hauts niveaux de services pour les transports publics de la métropole de Lille.

La non-significativité de cette régression aurait pu indiquer trois problèmes : les jeux de données socio-économiques étaient mauvais (ce qui aurait pu être le cas aux vues des écarts constatés), ou les hypothèses faites lors de la construction du PTAL auraient dégradées les qualités de l'indicateur en tant que reflet de l'accessibilité en transports en communs, ou simplement que les choix politiques d'implantation des lignes de transports en communs n'étaient pas motivées par la concentration des activités.

Maintenant que l'indice d'accessibilité moyen des zones IRIS a été expliqué à l'aide des données socio-économiques, il va s'agir de retourner le problème afin d'essayer d'expliquer le prix moyen de l'immobilier sur chaque zone. Après plusieurs tentatives infructueuses, notamment dues au jeu de données sur les prix de l'immobilier qui présentait des résultats incohérents sur certaines zones (ces observations ont donc été supprimées de l'analyse), il s'est avéré que la régression linéaire la plus explicative était celle qui expliquait le logarithme (en base 10) des prix par l'indice d'accessibilité et la densité des emplois¹⁹. Les résultats de cette régression sont présentés dans le Tableau 6 ci-dessous, il est cependant important de mettre en garde le lecteur sur le fait que ce résultat n'est peut-être qu'une heureuse coïncidence des jeux de données.

¹⁹ Il se trouve que durant mes recherches, je n'ai jamais réussi à comprendre pourquoi la densité de population n'était pas une variable explicative des prix de l'immobilier (peut-être est-ce une autre preuve de l'incohérence du jeu de données...)

Tableau 6 : Régression linéaire du logarithme (base 10) du prix de l'immobilier moyen sur l'indice d'accessibilité et la densité d'emplois

$R^2 = 14 \%$	Coefficient	Probabilité de Student
Constante	3,42	0,00 %
Indice d'accessibilité	$3,30 \cdot 10^{-3}$	4,02 %
Densité d'emplois	$0,01 \cdot 10^{-3}$	0,00 %

Les résultats de cette régression linéaire semblent montrer que les variables sont explicatives, car les valeurs associées aux probabilités de Fisher et de Student sont toutes inférieures au seuil des 5%. Néanmoins, celles-ci expliquent moins de 15% de la variance du prix de l'immobilier et une grande partie de cette explication semble prise par la constante, même s'il est difficile d'interpréter la valeur des coefficients du fait du passage au logarithme. Cependant, le signe des coefficients semble trouver une explication rationnelle dans le fait que la concentration des emplois et l'accessibilité élevée aux transports publics peuvent expliquer une augmentation des prix de l'immobilier sur la zone, ce qui paraît cohérent avec les critères que l'on peut avoir lors de la recherche de biens immobiliers.

Les résultats obtenus sur ces deux régressions semblent indiquer que les valeurs des jeux de données et de l'indice d'accessibilité ont des comportements cohérents avec les résultats admis du domaine de l'économie des transports. Ceci conforte l'idée selon laquelle ce modèle pourrait être un facteur décisionnel dans le choix entre différents projets de transport public, qui fait l'objet de la partie suivante.

3.3.2 Les résultats du modèle sur les scénarios prospectifs

Maintenant que nous avons constaté la pertinence relative de la représentation de la demande dans le modèle, il va être question de pouvoir comparer les différents scénarios prospectifs suivant leurs impacts sur ces données socio-économiques. Pour cela il va s'agir de travailler sur les entités du modèle, en s'intéressant en particulier aux entités dont l'accessibilité a été améliorée. L'objectif de cette partie va donc être de qualifier de manière plus précise les zones directement affectées par le projet, notamment en termes d'emplois et de population. Nous allons donc analyser séparément ces deux aspects dans un premier temps, puis les réunir dans un second temps. Cette analyse est en lien direct avec l'analyse proposée précédemment dans la partie 3.1.3, qui portait uniquement sur l'indice d'accessibilité.

Le nombre d'habitant réparti sur chaque entité a été obtenu via le calcul détaillé dans la partie 3.2.1, il va maintenant s'agir de comparer l'impact des différents scénarios au regard de la population présente sur chaque entité. Pour cela, il est possible de comparer la somme des habitants des entités pour lesquels l'indice d'accessibilité a été amélioré par le passage du projet, on s'intéressera en particulier aux entités pour lesquels le PTAL a été augmenté d'un niveau (cela correspond pour les catégories moyennes à une augmentation de l'indice d'accessibilité de 5 points). Les indicateurs de population touchée par arrêt permettent ainsi de comparer le nombre d'habitants moyens impactés par le passage du projet. Les résultats de cette étude sont disponibles dans le Tableau 7 ci-dessous.

Tableau 7 : Impact des différents scénarios par rapport à la population habitant les entités

Scénario	Arrêts	Impact moyen	% Population touchée	Par arrêt	% Population touchée > 5	Par arrêt
HLLM métro	25	23.4	12.2%	5 891	9.9%	4 783
<i>HLLM tramway</i>	25	16.0	8.2%	3 938	6.1%	2 956
<i>HLLM bus</i>	25	7.1	3.7%	1 804	0.6%	270
Y métro	20	22.5	6.9%	4 171	5.2%	3 117
<i>Y tramway</i>	20	15.7	4.5%	2 739	3.2%	1 910
<i>Y bus</i>	20	7.0	1.9%	1 146	0.2%	99
SFLC métro	63	23.7	14.9%	2 862	12.1%	2 329
<i>SFLC tramway</i>	63	16.0	9.4%	1 793	6.9%	1 314
<i>SFLC bus</i>	63	7.5	4.1%	777	0.6%	110

De la même manière que dans la partie 3.1.3, les résultats les plus intéressants de chaque indicateur ont été mis en évidence en gras. On remarque encore une fois dans ce tableau que deux scénarios semblent se détacher, on retrouve ici le scénario SFLC métro et HLLM métro. Du fait de la longueur du projet, le premier se distingue par le nombre d'habitants et d'emplois de la métropole qui sont affectés par le projet. Tandis que le second est bien plus intéressant par arrêt, ce qui signifie que ce projet dessert des zones plus densément peuplées que les autres projets. On peut aussi retrouver cette conclusion en observant que le projet HLLM présente le maximum de population touchée par arrêt par mode (métro, tramway, bus). En l'état, le projet HLLM présente un léger avantage par rapport au projet SFLC dans la mesure où il arrive en deuxième position sur le pourcentage de population touchée, alors le projet SFLC est plus loin derrière HLLM sur la population desservie par arrêt. En effet, malgré sa longueur plus de deux fois moindre, le projet HLLM métro touche près d'un huitième de la population totale de la MEL projetée en 2025, là où le projet SFLC métro en affecte un peu moins d'un sixième. Pour le projet HLLM métro, le potentiel attractif d'un arrêt pour le motif « Domicile » est proche de 6 000 personnes, soit près de deux fois plus que pour le projet SFLC métro.

Maintenant que nous avons observé le potentiel attractif des différents scénarios selon le nombre d'habitants affectés par le projet, il va s'agir d'évaluer ce même potentiel suivant le second motif fixé : le travail. Pour cela, nous allons reprendre les résultats du nombre d'emplois estimés par entité obtenus dans la partie 3.2.2 que nous allons exploiter de la même manière que la population. C'est-à-dire en nous intéressant aux emplois répartis sur les entités dont l'indice d'accessibilité a été amélioré. On retrouve ici des indicateurs par arrêt qui permettent de comparer le nombre d'emplois moyens impactés par arrêt selon les scénarios. Les résultats de cette étude sont disponibles dans le Tableau 8 ci-dessous.

Tableau 8 : Impact des différents scénarios par rapport aux emplois des entreprises les entités

Scénario	Arrêts	Impact moyen	% Emplois touchés	Par arrêt	% Emplois touchés > 5	Par arrêt
HLLM métro	25	23.4	6.4%	3 111	4.3%	2 072
<i>HLLM tramway</i>	25	16.0	3.6%	1 718	2.6%	1 240
<i>HLLM bus</i>	25	7.1	1.5%	735	0.2%	73
<i>Y métro</i>	20	22.5	3.5%	2 084	2.5%	1 489
<i>Y tramway</i>	20	15.7	2.1%	1 256	1.3%	779
<i>Y bus</i>	20	7.0	0.6%	341	0.0%	26
SFLC métro	63	23.7	8.5%	1 623	6.6%	1 261
<i>SFLC tramway</i>	63	16.0	5.6%	1 067	4.7%	893
<i>SFLC bus</i>	63	7.5	3.2%	613	0.4%	79

Tout d'abord, il est important de rappeler qu'en terme d'ordre de grandeur du modèle le nombre d'emplois sur la métropole en 2025 est plus de deux fois moins important que le nombre d'habitants. Ce qui correspond globalement au rapport observé en 2016 par l'INSEE sur la métropole lilloise, avec une légère surestimation du nombre d'emplois dans le modèle présenté ici. On retrouve ici une prédominance des projets HLLM métro et SFLC métro, il est intéressant de constater que l'on peut ici dresser des conclusions très similaires aux résultats observés sur la population, tant sur les pourcentages d'emplois affectés que sur le nombre d'emplois moyen touché par arrêt. On peut néanmoins noter que selon ce modèle, les projets semblent privilégier les zones d'habitations plutôt que les zones d'activités. En effet, les pourcentages d'emplois touchés par les projets sont en moyennes près de deux fois inférieurs aux pourcentages du nombre d'habitants touchés. Ainsi, le scénario HLLM métro semble se détacher ici aussi des autres scénarios aux vues du nombre d'emplois touchés par arrêt.

Ces deux analyses portées sur la demande associée aux différents scénarios dissocient les motifs étudiés, cependant le potentiel attractif d'une ligne de transport public nécessite d'examiner tous les motifs. Ici, puisque seulement deux motifs sont disponibles, nous allons nous intéresser à la combinaison de ces deux motifs : c'est-à-dire la somme des emplois et des habitants impactés par le projet. Les résultats de cette observation sont présentés dans le Tableau 9 ci-dessous.

Tableau 9 : Impact des différents scénarios par rapport à la somme de la population et des emplois des entités

Projet	Arrêts	Impact moyen	% Population & Emplois	Par arrêt	% Population & Emplois > 5	Par arrêt
HLLM métro	25	23.4	12.6%	9 002	9.6%	6 855
<i>HLLM tramway</i>	25	16.0	7.9%	5 656	5.9%	4 196
<i>HLLM bus</i>	25	7.1	3.5%	2 539	0.5%	343
<i>Y métro</i>	20	22.5	7.0%	6 255	5.1%	4 606
<i>Y tramway</i>	20	15.7	4.5%	3 995	3.0%	2 689
<i>Y bus</i>	20	7.0	1.7%	1 487	0.1%	125
SFLC métro	63	23.7	15.8%	4 485	12.6%	3 590
<i>SFLC tramway</i>	63	16.0	10.1%	2 861	7.8%	2 207
<i>SFLC bus</i>	63	7.5	4.9%	1 390	0.7%	190

De manière logique, il existe une certaine corrélation entre les valeurs du Tableau 9 et celles des Tableau 7 et Tableau 8, dont le lien apparaît comme une somme pondérée des deux tableaux précédents. C'est donc sans grande surprise que l'on y voit se détacher les scénarios HLLM métro et SFLC métro, mais cette fois les écarts observés sont plus marqués. Ainsi le scénario HLLM métro affecte potentiellement 9 000 habitants et emplois par arrêt, dont plus de 6 800 de manière significative (augmentation de l'indice d'accessibilité de plus de 5 points).

La méthode de comparaison proposée dans cette partie vise à favoriser les projets qui impactent positivement des zones à forte densité de population et d'emplois. En effet, dans la mesure où l'ensemble des entités possèdent la même surface et que les valeurs obtenues par zone IRIS ont été distribuées par entité, les notions de nombre par entité ou de densité sont équivalentes. Donc suivant cette analyse, le projet HLLM métro semble se détacher nettement selon le potentiel attractif pour les motifs « Domicile » et « Travail » car son aire de chalandise contient des zones plus densément peuplées et actives que les autres projets.

En mettant en relation ces résultats avec ceux observés sur l'indice d'accessibilité dans le Tableau 4 de la partie 3.1.3, on remarque que le projet HLLM métro ne dénote pas par rapport aux autres projet en termes d'efficacité, bien que ce ne soit pas le plus efficace sur l'augmentation de l'indice d'accessibilité.

L'analyse des scénarios réalisée dans cette partie a permis d'obtenir des indicateurs concrets de l'impact des projets de transport sur l'accessibilité et sur la pertinence des tracés. Ces résultats ont été obtenus en mettant en regard l'augmentation de l'indice d'accessibilité de chaque entité et différents jeux de données socio-économiques du territoire d'étude. Néanmoins cette étude présente une limite majeure : elle ne donne aucun avantage aux modes plus légers tels que le tramway et le bus. Car en termes d'accessibilité aux transports publics, le métro reste en effet le mode le plus efficace, grâce à sa vitesse commerciale très élevée et à sa capacité de transport non-négligeable.

Cependant il existe un dernier point permettant de différencier les scénarios entre eux : l'investissement financier. Bien que cela reste une question centrale pour les collectivités locales, la complexité du chiffrage d'un projet de transport est telle que cela constituerait un travail d'une toute

autre nature. Les investissements réalisés pour les projets de transports publics pour un même mode en France présentent une variabilité importante et des coûts kilométriques tout aussi variables. C'est pourquoi le travail présenté dans la partie suivante arrive en dernière position, du fait des approximations non-négligeables qui sont faites afin de mener cette analyse à terme.

3.3.3 Analyse économétrique simplifiée et perspectives d'améliorations

Dans cette partie, l'élément central de l'analyse est aussi l'élément limitant de cette opération, il s'agit du coût linéaire d'une infrastructure de transport. En effet, cet élément reste une question centrale à la fois pour les collectivités mais aussi pour les entreprises de travaux publics chargées de réaliser ces infrastructures. Le chiffrage d'un projet est un travail colossal en soit et nécessite une connaissance fine du territoire et d'un nombre important de variables, ce qui ferait sortir cette analyse du cadre proposé pour ce mémoire. Néanmoins, les résultats d'une telle étude sont trop importants pour être mis de côté, ne serait-ce que le fait qu'il représente usuellement près de la moitié de la note attribuée aux propositions des marchés publics et qu'il représente l'un des facteurs les plus limitants pour les collectivités. En effet, sans cela toutes les communes posséderaient un métro et ce travail perdrait de son intérêt.

L'argent public présente un coût d'opportunité non négligeable pour les collectivités, celles-ci ne disposent que d'une enveloppe annuelle limitée qui doit être répartie entre l'ensemble des postes de dépenses entrant dans ses domaines de compétences (comme l'éducation, la santé, etc...). Il est clair que l'argent qui est investie dans le domaine du transport ne l'est pas dans les autres domaines, ce qui pose la question de la rentabilité d'un projet. En économie des transports cette question reprise par une large domaine de la littérature scientifique et économique qui met en avant l'aspect de la monétarisation des bienfaits apportés par un projet de transport.

Dans le cadre plus restreint de ce mémoire, il est compréhensible que l'ensemble de ces points ne puissent être abordés dans une étude économétrique. C'est pourquoi cette partie va être axée sur la simplicité du modèle proposée, afin de fournir éventuellement une alternative succincte aux bilans socio-économiques, qui sont obligatoire pour chaque projet de transport public. Pour cela nous allons utiliser l'un des indicateurs les plus simples des études économétriques : la rentabilité par euro investi. Ce type d'indicateur possède l'avantage de différencier simplement les projets selon des critères qui conservent une certaine lisibilité.

L'élément pivot de cette partie est donc de déterminer le coût de chaque projet puis de rapporter ce coût à différents indicateurs. Ce coût a été déterminé de manière plutôt arbitraire en choisissant un coût linéaire moyen des infrastructures selon les modes et en l'étendant selon la longueur de chaque projet. Cette méthode a été adoptée afin d'éviter la complexité et la disponibilité des études de chiffrage des différents scénarios envisagés. Dans le cas d'une étude concrète menée avec cet outil d'aide à la décision, un chiffrage de chaque scénario est souhaitable comparée aux approximations réalisées ici. Le coût linéaire moyen d'une infrastructure a été déterminée selon différentes sources²⁰, mais cela reste un choix arbitraire car il très difficile d'estimer ces coûts, ils sont

²⁰ Sources, consultées le 10/08/2019 :

<http://transporturbain.canalblog.com/pages/le-tramway-pas-plus-cher-que-le-bhns/28045679.html>

https://www.lemonde.fr/mobilite/article/2012/11/23/le-tram-en-bout-de-course_1794319_1653095.html

https://www.cerema.fr/system/files/documents/2018/12/rapport_referentiel_MYC_V2_siteCerema.pdf

en effet liés à chaque projet et ils possèdent tous des spécificités propres. Ainsi les coût kilométriques envisagés sont les suivants :

- Pour le métro : 90 M€/km, cela correspond à la fourchette haute des projets de VAL (cas des deux lignes de métro lilloises) mais à la fourchette basse des projets de métro lourds.
- Pour le tramway : 22 M€/km, cela correspond à la fourchette haute des projets de tramway.
- Pour le bus : 6 M€/km, cela correspond à une fourchette plutôt moyenne des projets de BHNS mais cette valeur est dépendante de la partie du tracé réalisé en site propre.

Selon les ordres de grandeurs indiqués dans le document du Cerema²¹ : « En investissement, 1 km métro = 5 km de tramway = 25 km de BHNS ». Ici ces ordres de grandeurs ne sont pas tout à fait respectés car ceux-ci prennent en compte les coûts d'exploitations, qui sont ici exclus de l'analyse car ils complexifieraient grandement le calcul (dépendant de la fréquence, du mode et de la longueur de la ligne exploitée). Cependant on reste dans des ordres de grandeur acceptables si on ne considère que l'infrastructure.

De cette manière il a été possible de rapporter le coût de chaque projet en fonction de son mode et de sa longueur, aux différents indicateurs vus dans les parties précédentes. Ainsi il est possible de produire des indicateurs tels que l'augmentation d'indice d'accessibilité total par million d'euros investis. Les résultats de cette étude sont présentés dans le Tableau 10 ci-dessous, ici aussi les résultats les plus intéressants ont été mis en évidence en gras.

Tableau 10 : Obtention de l'impact moyen de chaque scénario sur l'indice d'accessibilité par million d'euros investis

Scénario	Coût moyen (M€/km)	Longueur (km)	Coût du projet (M€)	Impact moyen	Par M€ investi
HLLM métro	90	12.5	1 125	23.4	45.9
HLLM tramway	22	12.5	275	16.0	82.3
HLLM bus	6	12.5	75	7.1	59.7
Y métro	90	10	900	22.5	46.4
Y tramway	22	10	220	15.7	83.5
Y bus	6	10	60	7.0	59.6
SFLC métro	90	31.5	2 835	23.7	46.3
SFLC tramway	22	31.5	693	16.0	83.3
SFLC bus	6	31.5	189	7.5	63.5

http://www.electionsmunicipales2014.fr/rennes_nathalieappere_proposition_appere-construire-une-seconde-ligne-de-metro

<http://www.lyon-en-lignes.org/forum/viewtopic.php?t=7525>

²¹ Centre d'Etude et d'expertise sur les Risques, l'Environnement, la Mobilité et l'Aménagement.

Lien source, consulté le 10/08/2019 :

https://www.cerema.fr/system/files/documents/2018/12/rapport_referentiel_MYC_V2_siteCerema.pdf

Selon l'indicateur de l'augmentation moyenne de l'indice d'accessibilité par million d'euros investis, les scénarios Y tramway et SFLC tramway se détachent des autres scénarios. Cela illustre le fait que ces projets sont les plus rentables du point de vue de l'augmentation de l'accessibilité sur le territoire d'étude. Cependant, il est important de préciser que ces résultats sont soumis à une élasticité forte par rapport au coût moyen de l'infrastructure, tout en sachant que cette valeur est la variable avec le moins de confiance de cette modélisation. On observe par ailleurs que cet aspect de la modélisation semble favoriser en premier le mode tramway, puis le mode bus, bien que leurs impacts moyens soient plus faibles que le métro. De manière générale l'objectif de cet étude complémentaire est de pondérer les différents modes en fonction de leur coût financier, afin de faire ressortir un aspect global de coût d'opportunité pour les collectivités. Certes un mode lourd tel que le métro est très avantageux en termes d'accessibilité, mais il reste particulièrement onéreux par rapport aux autres modes considérés (du fait de son caractère souterrain notamment).

Selon la suite naturelle de cette étude, nous allons maintenant rapporter le coût des différents scénarios par rapport aux emplois et à la population. Il va donc être question de mettre en évidence le nombre d'emplois et d'habitants impactés par le projet par million d'euros investis. Les résultats de cette étude sont disponibles dans le Tableau 11 ci-dessous.

Tableau 11 : Obtention de la population et des emplois impactés par chaque projet par million d'euros investis

Scénario	Coût du projet (M€/km)	% Population & Emplois	Par M€ investi	% Population & Emplois > 5	Par M€ investi
HLLM métro	1 125	12.6%	200	9.6%	152
HLLM tramway	275	7.9%	514	5.9%	381
HLLM bus	75	3.5%	846	0.5%	114
Y métro	900	7.0%	139	5.1%	102
Y tramway	220	4.5%	363	3.0%	244
Y bus	60	1.7%	496	0.1%	42
SFLC métro	2 835	15.8%	100	12.6%	80
SFLC tramway	693	10.1%	260	7.8%	201
SFLC bus	189	4.9%	463	0.7%	63

On remarque alors que les scénarios les plus favorisés par cette étude sont les alternatives tramway et bus du tracé HLLM. L'alternative bus semble toucher une demande par million d'euros investis bien plus élevée que les autres scénarios avec 846 emplois et habitants par million d'euros investis. Tandis que l'alternative tramway touche 381 emplois et habitants par million d'euros investis pour toutes les entités dont le niveau d'accessibilité augmente sensiblement (de 5 points), contre seulement 114 pour l'alternative bus. On remarque ici que le bus semble favorisé par la population et les emplois touchés par millions d'euros investis totaux, tandis que le tramway est plutôt favorisé par les emplois et la population touchés par une augmentation de plus de cinq points de l'indice d'accessibilité.

Les résultats de ces indicateurs semblent dessiner le fait que ces projets et ces alternatives semblent avant tout correspondre à un choix. L'alternative qui apparaît comme la plus rentable

économiquement pour améliorer l'accessibilité semble être le tramway, et le tracé qui semble le plus correspondre à la demande est le HLLM. Par ailleurs, si l'on compare les différentes alternatives tramway sur les résultats des Tableau 4 et Tableau 9 des parties précédentes, le projet HLLM est observé comme l'un des plus viables parmi les trois projets. En effet, les résultats des alternatives métro et du projet SFLC semblent fortement contraindiquées si on inclut le coût du projet dans le modèle. Nonobstant la qualité du chiffrage qui est approximative, la conclusion qui ressort de cette partie économétrique est que les alternatives métro semblent être trop onéreuses pour ce qu'elles apportent au territoire, de même que les projets trop longs tels que SFLC.

Conclusion

Cette étude, malgré ses biais et ses limites, se conclut sur le fait que l'utilisation du PTAL en tant qu'outil d'aide à la décision reste complémentaire mais non exhaustive. En effet, cette étude met en évidence que malgré la multitude d'indicateurs géolocalisés qu'il est possible d'analyser, l'élément du coût reste néanmoins un élément non négligeable dans le choix de projet. En excluant le coût de l'analyse de projet, on laisse le champ libre à des projets irréalisables malgré leur forte valeur ajoutée sur l'accessibilité du territoire. Cela reste donc un outil utile à toute fin de comparaison mais qui ne saurait se positionner en tant que force de proposition, concevoir un projet autour de son impact sur l'accessibilité paraît contraindiqué. En effet, le fait de se baser sur un indicateur non relié à la demande et aux flux peut laisser voir apparaître des projets encore une fois incohérents.

La prochaine étape de construction de cette indicateur serait de pouvoir déterminer un objectif d'accessibilité à atteindre pour chaque entité en fonction de ses caractéristiques économiques. Ce qui a déjà été entamé lors de la régression des densités de population et d'emplois sur l'indice d'accessibilité. Cette approche pourrait ainsi permettre d'apercevoir les zones présentant un déficit ou un surplus d'accessibilité aux transports en communs. L'objectif étant de permettre alors aux collectivités de mesurer la cohérence territoriale de leur accessibilité aux transports en communs.

L'indicateur du *Public Transport Accessibility Level* peut alors être observé comme un bon moyen de communication pour les collectivités locales, en leur proposant un indicateur facile à mettre en place tout en possédant une certaine transparence pour les citoyens. De plus, cet indicateur permet de modéliser de manière satisfaisante l'impact sur l'accessibilité d'un projet de transport, en localisant les zones impactées par le projet. L'indice d'accessibilité ainsi construit, devient particulièrement pertinent dans les projets de restructuration de réseau, où certaines zones sont susceptibles de perdre en accessibilité pour en gagner d'autant plus ailleurs. Cela permettrait d'illustrer de manière concrète les impacts de projets d'augmentation de fréquence d'une ligne, ou de changement d'itinéraire par exemple.

Par ailleurs, les applications de l'indice d'accessibilité peuvent être élargis à d'autres domaines. Par exemple, avec un jeu de données plus élaboré sur les prix moyens de l'immobilier par zone, il serait possible de prévoir l'augmentation des loyers d'une zone en fonction de l'impact sur l'accessibilité d'un futur projet de transport. Pour cela il suffirait de prendre les résultats de la régression linéaire et d'appliquer les coefficients obtenus aux valeurs des différentes variables en situation future. Autrement, dans la mesure où l'indice d'accessibilité correspond physiquement à une fréquence, il serait alors envisageable de le transformer en temps ce qui permettrait de le monétariser via la valeur du temps et ainsi de l'intégrer à un bilan socio-économique.

Pour conclure, le PTAL possède des propriétés larges et ouvre des perspectives vastes du fait de sa facilité de prise en main et de ses nombreuses applications. Par exemple, la mairie de Londres l'utilise afin de prévoir la pression sur le stationnement des différentes zones du Grand Londres. Les possibilités offertes par cet indicateur sont vastes pour le domaine des transports et elles ne demandent qu'à être testées.

Bibliographie

- Clifton, Kelly et Handy, Susan. 2001.** Evaluating neighbourhood accessibility. *Journal of Transportation and Statistics*, pp. 67-78.
- Geurs, Karst and Van Wee, Bert. 2004.** Accessibility evaluation of land-use and transport strategies: review and research directions. *Journal of Transport Geography*, pp. 127-140.
- Hansen, Walter. 1959.** How Accessibility Shapes Land Use. *Journal of the American Institute of Planners*. 1959, Vol. 25.
- Inayathusein, Aliasgar et Cooper, Simon. 2018.** *London's Accessibility Indicators: Strengths, Weaknesses, Challenges*. Paris : s.n., 2018. International Transport Forum.
- Transport for London; Mayor of London. 2015.** *Assessing transport connectivity in London*. Londres : Transport for London, p. 60.
- Wu, Belinda et Hine, Julian. 2003.** A PTAL approach to measuring changes in bus service accessibility. *Transport Policy*, pp. 307-320.
- Yigitcanlar, Tan, et al. 2007.** A GIS-based land use and public transport accessibility indexing model. *Australian Planner*, pp. 30-37.
- Morris, Dumble, Wigan. 1978.** Accessibility indicators for transport planning, *Transportation research A 13*, pp 91-109.
- Linneker B. J., Spence N. A. 1992.** Accessibility measures compared in an analysis of the impact of the M25 London Orbital Motorway on Britain. *Environment and Planning A 24*, pp. 1137-1154.
- Lucas-Gabrielli V., Nestrigue, C. and Coldefy, M. 2016.** Analyse de sensibilité de l'accessibilité potentielle localisée (APL). *Document de travail n°70*, Irdes.
- Pirie G. H. 1979.** Measuring accessibility: a review and proposal. *Environment and Planning A11*, pp. 299-312.
- Raux C., Mercier A., Ovtracht N. 2008.** Evaluation économique des politiques de transport et indicateurs d'accessibilité spatiale : l'apport des SIG. *Cybergeo, Systèmes, Modélisation, Géostatistiques*, article 435.
- Song S. 1996.** Some tests of alternative accessibility measures: a population density approach. *Land Economics 72 (No 4)*, pp. 474-482.
- Geurs K. T., Ritsema Van Eck J.R., 2001.** Accessibility measures: review and applications. Evaluation of accessibility impacts of land-use transport scenarios, and related social and economics impacts. Rivm, Utrecht University.
- Gutiérrez J., Condeço-Melhorado A., Martin J. C. 2010.** Using accessibility indicators and GIS to assess spatial spillovers of transport infrastructure investment. *Journal of Transport Geography 18*, pp. 141-152.
- Halden D. 2002.** Using accessibility measures to integrate land use and transport policy in Edinburgh and the Lothians. *Transport Policy 9*, pp. 313-324.
- Handy, S.L., Niemeier, D. A. 1997.** Measuring Accessibility: an exploration of issues and alternatives. *Environment and Planning A29*, pp.1175-1194.

Bouzouina L., Delgado J. C., Emmerich G. 2014. Inégalités d'accessibilité à l'emploi en transport collectif urbain : deux décennies d'évolutions en banlieue lyonnaise. *Revue d'Économie Régionale & Urbaine*, pp. 33-61.

Mercier A. 2008. Accessibilité et évaluation des politiques de transport en milieu urbain : le cas du tramway strasbourgeois. *Economies et finances*. Université Lumière - Lyon II.

Annexes

Annexe 1 : Code python d'exploitation des GTFS et de calcul de l'indice d'accessibilité

```
# -*- coding: utf-8 -*-
"""
Created on Sun Jul 21 16:53:54 2019

@author: Baptiste CORDHOMME

Algorithme d'extraction des fichiers GTFS permettant, après un traitement externe avec QGIS
(matrice des distances), d'obtenir les niveaux de PTAL d'un territoire
"""

### INITIALISATION
print(" ----- ")
import datetime
import time
from os import path as os_path
repertoire = os_path.abspath(os_path.split(__file__)[0])
repertoire_GTFS = repertoire + "\\Data brute\\gtfs\\"
repertoire_data_modifiee = repertoire + "\\Data modifiée\\"
repertoire_sorties = repertoire + "\\Résultats\\"

print("PHASE D'INITIALISATION")
#Demandes de calculs
projets_calculés=[]
proj=input("Quel projet voulez-vous ajouter au calcul ?"+"\\n")
while proj != 'aucun' :
    if len(projets_calculés) > 0 :
        test_mod=input("Même mode que précédemment ? (o/n)+"\\n')
        if test_mod == 'n' :
            mod=input("Quel(s) mode(s) souhaitez-vous calculer pour ce projet (sep=',')
?"+"\\n")
            modes=mod.split(',')
            test_freq=input("Même fréquence que précédemment ? (o/n)+"\\n')
            if test_freq == 'n' :
                freq=input("Avec quelle(s) fréquence(s) (sep=',') ?"+"\\n")
                frequences=freq.split(',')
            else :
                mod=input("Quel(s) mode(s) souhaitez-vous calculer pour ce projet (sep=',') ?"+"\\n")
                modes=mod.split(',')
                freq=input("Avec quelle(s) fréquence(s) (sep=',') ?"+"\\n")
                frequences=freq.split(',')

            if len(modes) != len(frequences) :
                print("Chaque mode n'est pas associé à une fréquence, veuillez recommencer la saisie")
            else :
                for mode in modes :
                    index=modes.index(mode)
                    frequence=float(frequences[index])
                    projet=[mode,proj,frequence]
                    projets_calculés.append(projet)
        proj=input("Quel projet voulez-vous ajouter au calcul ?"+"\\n")
print(" ----- ")
```

```

debut_calcul = time.time()

dateref=20190521 #Le mardi 21 mai 2019

def durée(start,end,date=dateref) :
    date=str(date)
    year=int(date[:4])
    month=int(date[4:6])
    day=int(date[6:])
    for heure in [start,end] :
        elems=heure.split(':')
        hour=int(elems[0])
        minute=int(elems[1])
        second=int(elems[2])
        if heure == start :
            depart = datetime.datetime(year,month,day,hour,minute,second)
        elif heure == end :
            arrivee = datetime.datetime(year,month,day,hour,minute,second)

    delta = arrivee - depart
    return delta

### EXTRACTION DES GTFS
print("PHASE D'EXTRACTION DES GTFS")
print("La date de référence choisie est le : "+str(dateref))

services_dateref=set()
with open(repertoire_GTFS+"calendar_dates.txt") as calendar_dates :
    next(calendar_dates)
    for ligne in calendar_dates :
        data=ligne.strip().split(',')
        service_id=data[0]
        date=int(data[1])
        exception_type=int(data[2])

        #Si le service a été ajouté à la date de référence
        if exception_type == 1 and date == dateref :
            services_dateref.add(service_id)

routes_id_to_names={}
routes_id_to_types={}
with open(repertoire_GTFS+"routes.txt") as routes :
    next(routes)
    for ligne in routes :
        data=ligne.strip().split(',')
        route_id=data[0]
        route_short_name=data[2]
        route_long_name=data[3]
        routes_id_to_names[route_id]=[route_short_name,route_long_name]
        route_type=data[5]
        routes_id_to_types[route_id]=route_type

routes_dateref=set()
trips_dateref=set()
trips_to_routes={}
with open(repertoire_GTFS+"trips.txt") as trips :
    next(trips)
    for ligne in trips :
        data=ligne.strip().split(',')
        route_id=data[0]
        service_id=data[1]
        trip_id=data[2]

```

```

trip_headsign=data[3]
direction=int(data[5])

#On crée un dico de correspondance entre missions et routes
route_type=routes_id_to_types[route_id]
trips_to_routes[trip_id]=[route_id,direction,route_type,trip_headsign]

#Si le service est présent à la date de référence
if service_id in services_dateref :
    trips_dateref.add(trip_id)
    if route_id not in routes_dateref :
        routes_dateref.add(route_id)

heures_depart_routes={}
stops_to_routes={}
with open(repertoire_GTFS+"stop_times.txt") as stop_times :
    next(stop_times)
    for ligne in stop_times :
        data=ligne.strip().split(',')
        trip_id=data[0]
        departure_time=data[2]
        stop_id=data[3]
        stop_sequence=int(data[4])

        route=trips_to_routes[trip_id]
        route_id=route[0]
        direction=route[1]
        route=str(route_id)+' '+str(direction)

        if stop_id not in stops_to_routes :
            stops_to_routes[stop_id]=[route]
        elif stop_id in stops_to_routes :
            routes=stops_to_routes[stop_id]
            if route not in routes :
                stops_to_routes[stop_id].append(route)

        if trip_id in trips_dateref :
            if stop_sequence <= 1 : #1er arrêt de la chaîne

                if route not in heures_depart_routes :
                    heures_depart_routes[route]=[departure_time]
                elif route in heures_depart_routes :
                    heures_depart_routes[route].append(departure_time)

sortie_frequence = open(repertoire_sorties+'routes_to_frequence.csv', 'w')
sortie_frequence.write("route_id;sens;frequence"+'\n')
route_to_freq={}
for route in heures_depart_routes :
    route_id=route[0]
    direction=route[1]
    intervalles=[]
    heure_prec="00:00:00"
    liste_horaires=sorted(heures_depart_routes[route])
    if len(liste_horaires) >= 2 : #Plusieurs missions par jour
        for heure in liste_horaires :
            elems=heure.split(':')
            h=int(elems[0])
            if h == 24 :
                heure="00"+heure[2:]
            if heure == liste_horaires[0] :
                heure_prec=heure
            elif heure_prec != heure and h >= 7 and h <= 18 :

```

```

        intervalles.append(durée(heure_prec,heure).seconds)
        heure_prec=heure
    elif len(liste_horaires) == 1 : #Une seule mission par jour
        intervalles=[24.0*60*60]

    nb_intervalles=len(intervalles)
    if nb_intervalles == 0 :
        frequence = 0.0
    else :
        frequence=sum(intervalles)/nb_intervalles
        frequence=frequence/60
    route_to_freq[route]=frequence
    sortie_frequence.write(route+';'+str(frequence)+'\n')

sortie_frequence.close()

sortie_stops=open(repertoire_sorties+'stops_to_routes_GTFS.csv','w')

with open(repertoire_GTFS+"stops.txt") as stops :
    next(stops)
    sortie_stops.write("stop_id;lat;lon;mode;stop_name;routes"+'\n')
    for ligne in stops :
        data=ligne.strip().split(',')
        stop_id=data[0]
        stop_code=data[1]
        stop_name=data[2]
        stop_lat=data[4]
        stop_lon=data[5]

        try :
            liste_routes=stops_to_routes[stop_id]
        except KeyError :
            liste_routes=[]

        mode='NC'
        for route in liste_routes :
            route_id=route.split(',')[0]
            route_type=routes_id_to_types[route_id]
            if mode == 'NC' :
                mode = route_type
            elif int(mode) > int(route_type) :
                print("/!\ Plusieurs modes pour l'arrêt : "+stop_name)
                print("    Priorité au mode le plus lourd : "+route_type)
                mode = route_type
            elif mode == route_type :
                mode = route_type

        routes=str(liste_routes).strip()
        routes=routes.strip('[').strip(']')
        routes=routes.replace("'",'')

        sortie_stops.write(stop_id+';'+stop_lat+';'+stop_lon+';'+mode+';'+
            stop_name+';'+routes+'\n')
sortie_stops.close()

#On ajoute les arrêts revérifiés à la main
with open(repertoire_data_modifiee+'Arrets_ILEVIA.csv','r') as arrets_verifies :
    next(arrets_verifies)
    for ligne in arrets_verifies :
        data=ligne.strip().split(';')
        stop_id = data[0]
        routes = data[-1]

```

```

elem_type = 'route'
liste_routes = []
for elem in routes.split(',') :
    elem=elem.strip()
    if elem_type == 'route' :
        elem_route = elem
        elem_type = 'sens'
    elif elem_type == 'sens' :
        route = elem_route + ',' + elem
        liste_routes.append(route)
        elem_type = 'route'

if len(liste_routes) > 0 :
    if stop_id not in stops_to_routes :
        stops_to_routes[stop_id] = liste_routes
    else :
        known_routes = stops_to_routes[stop_id]
        for route in liste_routes :
            if route not in known_routes :
                stops_to_routes[stop_id].append(route)

print(" ----- ")
### CALCUL DU PTAL
print("PHASE DE CALCUL DU PTAL")

repertoire_donnees=repertoire+'\\Data modifiée\\'

v_map=1.1 #m/s

types_to_accessibility={} #en mètres
types_to_accessibility['3']=300.0 #Bus
types_to_accessibility['0']=600.0 #Tramway ou métro léger
types_to_accessibility['1']=900.0 #Métro

types_to_fiability={} #en minutes
types_to_fiability['3']=2.0 #Bus
types_to_fiability['0']=1.0 #Tramway ou métro léger
types_to_fiability['1']=0.5 #Métro

def calcul_EDF(dist,route_type,freq,v_map=1.1) :
    accessibility = types_to_accessibility[route_type]
    fiability = types_to_fiability[route_type]

    if dist <= accessibility : #On vérifie que le service est bien accessible
        SAP=(dist/v_map)/60 #Calcul du Service Access Point en min
        SWT=0.5*freq #Calcul du Scheduled Waiting Time
        AWT=fiability #Calcul du Average Waiting Time
        TAT=SAP+SWT+AWT #Calcul du Total Access Time
        EDF=30/TAT #Calcul du Equivalent Door Frequency
    else:
        EDF=0.0 #On choisit une valeur par défaut si le service n'est pas accessible

    return EDF

for proj in projets_calculés :
    #Extraction des détails du projet calculé
    if proj == []:
        test_projet=0
        mode_projet=''
        nom_projet=''
        freq_projet=0.0

```

```

else:
    test_projet=1
    mode_projet=proj[0]
    nom_projet=proj[1]
    freq_projet=proj[2]
#Initialisation des dictionnaires de calcul
ID_to_AI_bus={}
ID_to_AI_tram={}
ID_to_AI_metro={}
ID_to_AI_autres={}
centroïdes_vus=set()
#Obtention de la liste des EDF pour le projet seul
if test_projet :
    ID_to_AI_projet={}
    ID_to_liste_EDF={}
    with open(repertoire_donnees + 'distArrets_'+nom_projet+'.csv','r') as dist_projet :
        next(dist_projet)
        liste_EDF_projet=[]
        ID_old=0
        for ligne in dist_projet :
            data=ligne.strip().split(',')
            centroïde=data[0]
            stop_id=data[1]
            distance=float(data[2])

            if ID_old == 0 :
                liste_EDF_projet=[]
            elif ID_old != centroïde :
                ID_to_liste_EDF[ID_old]=liste_EDF_projet
                liste_EDF_projet=[]

            route_type=mode_projet
            freq=freq_projet
            EDF=calcul_EDF(distance,route_type,freq)
            liste_EDF_projet.append(EDF)

            ID_old = centroïde
#Calcul de l'AI pour chaque centroïde
with open(repertoire_donnees + 'dist_ilevia.csv','r') as dist_ilevia :
    next(dist_ilevia)
    liste_EDF_bus=[]
    liste_EDF_tram=[]
    liste_EDF_metro=[]
    liste_EDF_autres=[]
    ID_old=0
    unknown_routes=set()
    for ligne in dist_ilevia :
        data=ligne.strip().split(',')
        centroïde=data[0]
        stop_id=data[1]
        distance=float(data[2])
        ID_new=centroïde

        try :
            liste_routes=stops_to_routes[stop_id]
        except KeyError :
            liste_routes=[]

        if ID_old==0: #On exclut le cas de la première itération
            liste_EDF_bus=[]
            liste_EDF_tram=[]
            liste_EDF_metro=[]

```

```

liste_EDF_autres=[]
elif ID_new != ID_old : #Si on change de centroïde
#On agrège les listes d'EDF pour chaque mode dans un seul objet
listes_EDF=[liste_EDF_bus,liste_EDF_tram,liste_EDF_metro,liste_EDF_autres]
modes=['3','0','1','NC']
#On vérifie s'il y a un projet
if test_projet :
#Si oui on essaye d'aller chercher la liste d'EDF pour le centroïde
try :
liste_EDF_projet=ID_to_liste_EDF[ID_old]
except KeyError :
liste_EDF_projet=[] #Sinon elle est prise comme vide
#On ajoute la liste des EDF du projet aux autres listes d'EDF
listes_EDF.append(liste_EDF_projet)
modes.append(mode_projet)
#On parcourt cet unique objet pour le centroïde
index=0
for liste_EDF_mode in listes_EDF :
index=listes_EDF.index(liste_EDF_mode,index)
#Si on est sur le mode en projet mais pas sur le projet lui-même
if modes[index] == mode_projet and index + 1 < len(listes_EDF) :
#On ajoute la liste d'EDF du mode à la liste d'EDF du projet
listes_EDF[-1]+=liste_EDF_mode
#On vérifie que chaque élément est non-nul...
if len(liste_EDF_mode) > 0 :
#On calcule l'EDF maximal pour chaque mode
maxi_EDF_mode=max(liste_EDF_mode)
#On en déduit l'Accessibility Index [AI] pour chaque mode
AI_mode_ID = maxi_EDF_mode + 0.5*(sum(liste_EDF_mode) - maxi_EDF_mode)
else : #...sinon on lui donne une valeur par défaut
AI_mode_ID = 0.0
#On affecte ensuite au centroïde l'AI correspondant au mode

if index == 0 :
ID_to_AI_bus[ID_old]=AI_mode_ID
elif index == 1 :
ID_to_AI_tram[ID_old]=AI_mode_ID
elif index == 2 :
ID_to_AI_metro[ID_old]=AI_mode_ID
elif index == 3 :
ID_to_AI_autres[ID_old]=AI_mode_ID
elif test_projet and index == 4 :
ID_to_AI_projet[ID_old]=AI_mode_ID
#On réinitialise ensuite la liste des EDF pour chaque mode
liste_EDF_bus=[]
liste_EDF_tram=[]
liste_EDF_metro=[]
liste_EDF_autres=[]
#On parcourt la liste des routes passant à cet arrêt
for route in liste_routes :
route_id=route.split(',')[0]
route_type=routes_id_to_types[route_id]
try :
freq=route_to_freq[route]
except KeyError :
if route_id in routes_dateref :
if route not in unknown_routes :
print("/!\ La route "+route+" n'a pas de fréquence associée")
print(" Fréquence associée par défaut : 0.0")
unknown_routes.add(route)
freq=0.0
#Pour chaque route on construit l'Equivalent Door Frequency [EDF]

```

```

    EDF=calcul_EDF(distance,route_type,freq)
    #Que l'on garde en mémoire pour le centroïde suivant le mode
    if route_type == '3' : #La ligne est un bus
        liste_EDF_bus.append(EDF)
    elif route_type == '0' : #La ligne est un tram
        liste_EDF_tram.append(EDF)
    elif route_type == '1' : #La ligne est un métro
        liste_EDF_metro.append(EDF)
    else : #Le mode n'est pas référencé
        liste_EDF_autres.append(EDF)
        print("Mode non référencé : "+route_type)
        print("EDF = "+str(EDF))

    if centroide not in centroides_vus :
        centroides_vus.add(centroide)
    ID_old=ID_new #On garde en mémoire le dernier centroïde traité

fichier_sortie=open(repertoire_sorties+'AI_projet_'+nom_projet+'_'+mode_projet+'.csv','w')
fichier_sortie.write("ID;AI;AI_"+nom_projet+'\n')
for ID in centroides_vus :
    try :
        AI_bus = ID_to_AI_bus[ID]
    except KeyError :
        AI_bus = 0.0
    try :
        AI_tram = ID_to_AI_tram[ID]
    except KeyError :
        AI_tram = 0.0
    try :
        AI_metro = ID_to_AI_metro[ID]
    except KeyError :
        AI_metro = 0.0
    try :
        AI_autres = ID_to_AI_autres[ID]
    except KeyError :
        AI_autres = 0.0
    try:
        AI_proj = ID_to_AI_projet[ID]
    except KeyError :
        AI_proj = 0.0
    liste_AI=[AI_bus,AI_tram,AI_metro,AI_autres,AI_proj]
    modes=['3','0','1','NC']
    AI=0.0
    AI_projet=0.0
    for mod in modes :
        index=modes.index(mod)
        if mod == mode_projet :
            AI+=liste_AI[index]
            AI_projet+=liste_AI[-1]
        else :
            AI+=liste_AI[index]
            AI_projet+=liste_AI[index]

    fichier_sortie.write(ID+';'+str(AI)+';'+str(AI_projet)+'\n')

fichier_sortie.close()
print(" * L'AI a bien été calculé pour le projet "+nom_projet+' ; '+mode_projet)
print("   Les résultats sont disponibles dans le fichier : ")
print("   "+repertoire_sorties+'AI_projet_'+nom_projet+'_'+mode_projet+'.csv')

print(" ----- ")

```

```

fin_calcul=time.time()
temps_calcul=str(round(fin_calcul-debut_calcul))
print(temps_calcul+" sec de calculs pour "+str(len(projets_calcules))+" projets calculés")

```

Annexe 2 : Code python d'exploitation des résultats

```

# -*- coding: utf-8 -*-
"""
Created on Sat May 18 11:57:02 2019

@author: cordh
"""
#%% INITIALISATION
print(" ----- ")
print("PHASE D'INITIALISATION")
import time

#Identification des chemins systèmes pour aller chercher les fichiers
from os import path as os_path
repertoire = os_path.abspath(os_path.split(__file__)[0])
chemin_resultats = repertoire + '\\Résultats\\'
chemin_datamod = repertoire + '\\Data modifiée\\'

#Demandes de calculs
projets_calcules=[]
proj=input("Quel projet voulez-vous ajouter au calcul ?"+"\\n")
while proj != 'aucun' :
    if len(projets_calcules) > 0 :
        test_mod=input("Même mode que précédemment ? (o/n)+"\\n")
        if test_mod == 'n' :
            mod=input("Quel(s) mode(s) souhaitez-vous calculer pour ce projet (sep=',')
?"+"\\n")
            modes=mod.split(',')
            test_freq=input("Même fréquence que précédemment ? (o/n)+"\\n")
            if test_freq == 'n' :
                freq=input("Avec quelle(s) fréquence(s) (sep=',') ? "+"\\n")
                frequences=freq.split(',')
            else :
                mod=input("Quel(s) mode(s) souhaitez-vous calculer pour ce projet (sep=',') ?"+"\\n")
                modes=mod.split(',')
                freq=input("Avec quelle(s) fréquence(s) (sep=',') ? "+"\\n")
                frequences=freq.split(',')

            if len(modes) != len(frequences) :
                print("Chaque mode n'est pas associé à une fréquence, veuillez recommencer la saisie")
            else :
                for mode in modes :
                    index=modes.index(mode)
                    frequence=float(frequences[index])
                    projet=[mode,proj,frequence]
                    projets_calcules.append(projet)
        proj=input("Quel projet voulez-vous ajouter au calcul ? "+"\\n")
print(" ----- ")

debut_calcul = time.time()

def nettoyage(data):
    data_clean=[]
    for texte in data :
        if texte==' ' and texte == data[1] :

```

```

    texte='NC'
    elif texte==' ' :
        texte='0.0'
    elif texte[0]=='"' and texte[-1]=='"':
        texte=texte.strip('"')
    data_clean.append(texte)
return data_clean

#%%LECTURE DU FICHER SOURCE DES DONNEES DE POPULATION

print("Lecture du fichier source : '"+centroides_IRIS_pop_prixm2_SIREN.csv')

croissance_demo_MEL=0.422594175/100
croissance_emplois_MEL=0.2334781840/100
horizon=2025
print("L'année d'étude est fixée à : "+str(horizon))

pop_totale_MEL=0.0
pop_totale_MEL_horizon=0.0
emplois_totaux_MEL=0.0
emplois_totaux_MEL_horizon=0.0
nb_centroides_NR=0
centroides_NR=set()
ID_to_data={}
IRIS_to_data={}
ID_to_IRIS={}
with open(chemin_datamod + 'centroides_IRIS_pop_prixm2_SIREN.csv','r') as centroides :
    next(centroides)
    for ligne in centroides :
        data=ligne.strip().split(',')
        data=nettoyage(data)
        ID=data[0]
        code_IRIS=str(data[1])
        nom_IRIS=data[2]
        if code_IRIS != 'NC' :
            pop_IRIS=float(data[3])
            nb_centroides_IRIS=float(data[4])
            surf_moy_bati_vendue=float(data[5])
            surf_moy_terrain_vendue=float(data[6])
            prix_moy_m2=float(data[7])
            prix_moy_transaction=float(data[8])
            nb_transactions_17_18=float(data[9])
            nb_eq_emplois=float(data[10])

            pop_centro=pop_IRIS/nb_centroides_IRIS
            pop_centro_horizon=pop_centro*((1+croissance_demo_MEL)**(horizon-2014))
            pop_totale_MEL+=pop_centro
            pop_totale_MEL_horizon+=pop_centro_horizon
            emplois_centro=nb_eq_emplois/nb_centroides_IRIS
            emplois_centro_horizon=emplois_centro*((1+croissance_emplois_MEL)**(horizon-
2019))

            emplois_totaux_MEL+=emplois_centro
            emplois_totaux_MEL_horizon+=emplois_centro_horizon
            ID_to_data[ID]=[pop_centro,pop_centro_horizon,emplois_centro,
                emplois_centro_horizon,prix_moy_m2]

            ID_to_IRIS[ID]=code_IRIS
            pop_IRIS_horizon = pop_IRIS * ((1+croissance_demo_MEL)**(horizon-2014))
            emplois_IRIS = nb_eq_emplois
            emplois_IRIS_horizon = emplois_IRIS * ((1+croissance_emplois_MEL)**(horizon-
2019))

            IRIS_to_data[code_IRIS]=[pop_IRIS,pop_IRIS_horizon,emplois_IRIS,
```

```

        emplois_IRIS_horizon,prix_moy_m2]
    else :
        centroides_NR.add(ID)
        nb_centroides_NR+=1

nb_centroides_R=str(len(ID_to_data))
nb_centroides=str(len(ID_to_data)+nb_centroides_NR)
print(nb_centroides_R+" centroïdes sont renseignés sur les 66 155 au total")
print(nb_centroides+" centroïdes sont détectés par le programme")

#%%PHASE DE CALCUL
resultats_scenarios=[]
for proj in projets_calcules :
    #Extraction des détails du projet calculé
    if proj == []:
        test_projet=0
        nom_projet=''
        mode_projet=''
    else:
        test_projet=1
        mode_projet=proj[0]
        nom_projet=proj[1]
        freq_projet=proj[2]

    print("  Calculs réalisés pour le projet : "+nom_projet+' ; mode : '+mode_projet)
    print(" * Lecture du fichier source AI : "+'AI_projet_'+nom_projet+'_'+mode_projet+'.csv')
    #Extraction des AI du projet
    ID_to_AI={}
    with open(chemin_resultats + 'AI_projet_'+nom_projet+'_'+mode_projet+'.csv','r') as
AI_projet :
        next(AI_projet)
        for ligne in AI_projet :
            data=ligne.strip().split(';')
            data=nettoyage(data)
            ID=data[0]
            ID_to_AI[ID]=data[1:]
            if proj == projets_calcules[0] and ID not in centroides_NR :
                ID_to_data[ID].append(data[1])

if len(ID_to_AI)==66155 :
    print("  Le programme détecte bien les "+str(len(ID_to_AI))+ " centroïdes")
elif len(ID_to_AI)>66155 :
    print("  Le programme détecte "+str(len(ID_to_AI)-66155)+" centroïdes en trop")
else:
    print(str(66155-len(ID_to_AI))+ " centroïdes ne sont pas détectés par le programme")

#Initialisation des indicateurs
nb_pos=0
nb_neg=0
nb_pos_5=0
nb_egal=0
somme_diff=0
pop_pos=0
pop_pos_5=0
pop_neg=0
pop_egal=0
emplois_pos=0
emplois_pos_5=0
emplois_neg=0
emplois_egal=0
stockage_calculs=[]
IRIS_to_listeAI={}

```

```

IRIS_to_listeAI_projet={}
#On parcourt la liste des centroides identifiés
for ID in ID_to_data :
    data=ID_to_data[ID]
    AI=float(ID_to_AI[ID][0])
    AI_projet=float(ID_to_AI[ID][1])
    diff=AI_projet-AI
    somme_diff+=diff
    pop=data[1]
    emplois=data[3]

    if diff>5:
        nb_pos+=1
        nb_pos_5+=1
        pop_pos+=pop
        pop_pos_5+=pop
        emplois_pos+=emplois
        emplois_pos_5+=emplois
    elif diff>0:
        nb_pos+=1
        pop_pos+=pop
        emplois_pos+=emplois
    elif diff<0:
        nb_neg+=1
        pop_neg+=pop
        emplois_neg+=emplois
    else:
        nb_egal+=1
        pop_egal+=pop
        emplois_egal+=emplois

    somme_diff+=diff
    stockage_calculs.append([ID,AI,AI_projet,diff])
    ID_to_data[ID].append(AI_projet)

    code_iris = ID_to_IRIS[ID]
    if code_iris not in IRIS_to_listeAI :
        IRIS_to_listeAI[code_iris]=[AI]
    else :
        IRIS_to_listeAI[code_iris].append(AI)
    if code_iris not in IRIS_to_listeAI_projet :
        IRIS_to_listeAI_projet[code_iris]=[AI_projet]
    else :
        IRIS_to_listeAI_projet[code_iris].append(AI_projet)

if proj == projets_calculs[0] :
    for code_iris in IRIS_to_listeAI :
        listeAI=IRIS_to_listeAI[code_iris]
        moy_AI=sum(listeAI)/len(listeAI)
        IRIS_to_data[code_iris].append(moy_AI)
    for code_iris in IRIS_to_listeAI_projet :
        listeAI_projet=IRIS_to_listeAI_projet[code_iris]
        moy_AI_projet=sum(listeAI_projet)/len(listeAI_projet)
        IRIS_to_data[code_iris].append(moy_AI_projet)

print(" *      Ecriture      dans      le      fichier      de      sortie      :
"+'calculs_'+nom_projet+'_'+mode_projet+'.csv')
    with open(chemin_resultats+'calculs_new_'+nom_projet+'_'+mode_projet+'.csv','w') as
calculs :
    calculs.write("ID;AI_2019;AI_projet;diff_projet"+"\n")
    for ligne in stockage_calculs :
        long=len(ligne)

```

```

        index=0
        while index < long-1 :
            elem=ligne[index]
            calculs.write(str(elem)+';')
            index+=1
        elem=ligne[-1]
        calculs.write(str(elem)+'\n')

    print("      *      Ecriture      dans      le      fichier      de      sortie      :
'+logs_new_'+nom_projet+'_'+mode_projet+'.txt')
    with open(chemin_resultats+'logs_new_'+nom_projet+'_'+mode_projet+'.txt','w') as logs :
        logs.write(" - PARAMETRES DE CALCUL - "+"\\n")
        logs.write("Calculs réalisés pour le projet : "+nom_projet+"\\n")
        logs.write("Le mode considéré pour le projet est : "+mode_projet+"\\n")
        logs.write("La fréquence de passage choisie est : "+str(freq_projet)+" min"+"\\n")
        logs.write("Fichier source AI : '"+AI_projet_'+nom_projet+'.csv'+""\\n")
        logs.write("Fichier source DSE : '"+centroides_IRIS_pop_prixm2_SIREN.csv'+""\\n")
        logs.write("Année d'horizon du projet : "+str(horizon)+"\\n")
        logs.write("Taux de croissance démographique annuel MEL (INSEE, 2011-2016) :
"+str(croissance_demo_MEL)+"\\n")
        logs.write("Taux de croissance emplois annuel MEL (INSEE, 2011-2016) :
"+str(croissance_demo_MEL)+"\\n")
        logs.write(" - RESULTATS CALCULES - "+"\\n")
        logs.write("Zones      impactées      positivement      :      "+str(nb_pos)+'
('+str(round((nb_pos/66154)*100,2))+'%)+'+"\\n")
        logs.write("Zones      impactées      négativement      :      "+str(nb_neg)+'
('+str(round((nb_neg/66154)*100,2))+'%)+'+"\\n")
        logs.write("Zones impactées positivement de plus de 5 : "+str(nb_pos_5)+'
('+str(round((nb_pos_5/66154)*100,2))+'%)+'+"\\n")
        logs.write("Zones      non-impactés      :      "+str(nb_egal)+'
('+str(round((nb_egal/66154)*100,1))+'%)+'+"\\n")
        logs.write("Population      impactée      positivement      :      "+str(round(pop_pos,0))+
('+str(round((pop_pos/pop_totale_MEL)*100,2))+'%)+'+"\\n")
        logs.write("Population      impactée      négativement      :      "+str(round(pop_neg,0))+
('+str(round((pop_neg/pop_totale_MEL)*100,2))+'%)+'+"\\n")
        logs.write("Population      impactée      de      plus      de      5      :      "+str(round(pop_pos_5,0))+
('+str(round((pop_pos_5/pop_totale_MEL)*100,2))+'%)+'+"\\n")
        logs.write("Population      non-impactée      :      "+str(round(pop_egal,0))+
('+str(round((pop_egal/pop_totale_MEL)*100,2))+'%)+'+"\\n")
        logs.write("Emplois      impactés      positivement      :      "+str(round(emplois_pos,0))+
('+str(round((emplois_pos/emplois_totaux_MEL)*100,2))+'%)+'+"\\n")
        logs.write("Emplois      impactés      négativement      :      "+str(round(emplois_neg,0))+
('+str(round((emplois_neg/emplois_totaux_MEL)*100,2))+'%)+'+"\\n")
        logs.write("Emplois      impactés      de      plus      de      5      :      "+str(round(emplois_pos_5,0))+
('+str(round((emplois_pos_5/emplois_totaux_MEL)*100,2))+'%)+'+"\\n")
        logs.write("Emplois      non-impactés      :      "+str(round(emplois_egal,0))+
('+str(round((emplois_egal/emplois_totaux_MEL)*100,2))+'%)+'+"\\n")

    with open(chemin_resultats+'logs_new_'+nom_projet+'_'+mode_projet+'.txt','r') as logs :
        for ligne in logs :
            print(" "+ligne.strip('\n'))

resultat_projet=[somme_diff,nb_pos,nb_neg,nb_pos_5,nb_egal,pop_pos,pop_neg,pop_pos_5,pop_ega
l,emplois_pos,emplois_neg,emplois_pos_5,emplois_egal]
resultats_scenarios.append(resultat_projet)

print(" --- ")
inter_calcul=time.time()
temps_inter=round(inter_calcul-debut_calcul,1)
print("Temps intermédiaire de calcul : "+str(temps_inter)+" sec")
print(" --- ")

```

```

### COMPILATION DES DONNEES
print("Compilation des données par IRIS")
print("Ecriture dans le fichier de sortie : '"+donnees_IRIS+'.csv')
with open(chemin_resultats+'donnees_IRIS'+'.csv','w') as donnees_IRIS :

donnees_IRIS.write("code_iris;pop_IRIS;pop_IRIS_horizon;emplois_IRIS;emplois_IRIS_horizon;pr
ix_moy_m2;AI_2019;")
#On complète l'en-tête en fonction des differents projets calculés
index=0
for proj in projets_calcules :
#Extraction des détails du projet calculé
if proj == [] :
    nom_projet=''
    mode_projet=''
else :
    mode_projet=proj[0]
    nom_projet=proj[1]
donnees_IRIS.write('AI_'+nom_projet+'_'+mode_projet)
if index+1 < len(projets_calcules) :
    donnees_IRIS.write(';')
else :
    donnees_IRIS.write('\n')
index+=1

for code_iris in IRIS_to_data :
liste_data = IRIS_to_data[code_iris]
donnees_IRIS.write(str(code_iris)+';')
index=0
for elem in liste_data :
    donnees_IRIS.write(str(elem))
    if index+1 < len(liste_data) :
        donnees_IRIS.write(';')
    else :
        donnees_IRIS.write('\n')
    index+=1
print(" --- ")

print("Compilation des données par centroïde")
print("Ecriture dans le fichier de sortie : '"+donnees_centroides+'.csv')
with open(chemin_resultats+'donnees_centroides'+'.csv','w') as donnees_centroides :

donnees_centroides.write("ID;pop_centro;pop_centro_horizon;emplois_centro;emplois_centro_hor
izon;prix_moy_m2;AI_2019;")
#On complète l'en-tête en fonction des differents projets calculés
index=0
for proj in projets_calcules :
#Extraction des détails du projet calculé
if proj == [] :
    nom_projet=''
    mode_projet=''
else :
    mode_projet=proj[0]
    nom_projet=proj[1]
donnees_centroides.write('AI_'+nom_projet+'_'+mode_projet)
if index + 1 < len(projets_calcules) :
    donnees_centroides.write(';')
else :
    donnees_centroides.write('\n')
    index+=1

for ID in ID_to_data :

```

```

liste_data = ID_to_data[ID]
donnees_centroides.write(str(ID)+';')
index=0
for elem in liste_data :
    donnees_centroides.write(str(elem))
    if index+1 < len(liste_data) :
        donnees_centroides.write(';')
    else :
        donnees_centroides.write('\n')
    index+=1
print(" --- ")

print("Création d'un fichier de comparaison des scénarios")
print("Ecriture dans le fichier de sortie : "+'comparaison_scenarios'+'.csv')

with open(chemin_resultats+'comparaison_scenarios'+'.csv','w') as comparaison_scenarios :
    comparaison_scenarios.write("Population           totale           MEL           actualisée
;"+str(pop_totale_MEL_horizon)+'\n')
    comparaison_scenarios.write("Emplois           totaux           MEL           actualisés
;"+str(emplois_totaux_MEL_horizon)+'\n')

comparaison_scenarios.write("nom_projet;mode;freq;somme_diff;nb_pos;nb_neg;nb_pos_5;nb_egal;
pop_pos;pop_neg;pop_pos_5;pop_egal;emplois_pos;emplois_neg;emplois_pos_5;emplois_egal"+'\n')
for i in range(len(projets_calcules)) :
    #Extraction des détails du projet calculé
    proj=projets_calcules[i]
    if proj == []:
        test_projet=0
        nom_projet=''
        mode_projet=''
    else:
        test_projet=1
        mode_projet=proj[0]
        nom_projet=proj[1]
        freq_projet=str(proj[2])
        ligne=nom_projet+';'+mode_projet+';'+freq_projet+';

    resultat_projet=resultats_scenarios[i]
    for elem in resultat_projet :
        ligne+=str(elem)+';'
    ligne=ligne[:-1]+'\\n'

    comparaison_scenarios.write(ligne)

print(" ----- ")
print("Fin de traitement")
fin_calcul=time.time()
temps_calcul=str(round(fin_calcul-debut_calcul))
print(temps_calcul+" sec de calculs pour "+str(len(projets_calcules))+ " projets calculés")

```

Annexe 3 : Résultat de l'interpréteur python au code présenté en annexe 1

```

runfile('C:/Users/cordh/Desktop/PTAL+
wdir='C:/Users/cordh/Desktop/PTAL+ Lille')

```

Lille/Exploitation

GTFS.py',

```

-----
PHASE D'INITIALISATION

```

Quel projet voulez-vous ajouter au calcul ?

HLLM

Quel(s) mode(s) souhaitez-vous calculer pour ce projet (sep=',') ?

1,0,3

Avec quelle(s) fréquence(s) (sep=',') ?

1.5,6,12

Quel projet voulez-vous ajouter au calcul ?

Y

Même mode que précédemment ? (o/n)

o

Même fréquence que précédemment ? (o/n)

o

Quel projet voulez-vous ajouter au calcul ?

SFLC

Même mode que précédemment ? (o/n)

o

Même fréquence que précédemment ? (o/n)

o

Quel projet voulez-vous ajouter au calcul ?

aucun

PHASE D'EXTRACTION DES GTFS

La date de référence choisie est le : 20190521

/!\ Plusieurs modes pour l'arrêt : Square Flandres (Lezennes)

Priorité au mode le plus lourd : 1

/!\ Plusieurs modes pour l'arrêt : Marbrerie

Priorité au mode le plus lourd : 1

/!\ Plusieurs modes pour l'arrêt : Mairie D'Hellemmes

Priorité au mode le plus lourd : 1

/!\ Plusieurs modes pour l'arrêt : Square Flandres (Lezennes)

Priorité au mode le plus lourd : 1

/!\ Plusieurs modes pour l'arrêt : Marbrerie

Priorité au mode le plus lourd : 1

/!\ Plusieurs modes pour l'arrêt : Bourgogne

Priorité au mode le plus lourd : 1

/!\ Plusieurs modes pour l'arrêt : Bourgogne

Priorité au mode le plus lourd : 1

/!\ Plusieurs modes pour l'arrêt : Cte Scientifique

Priorité au mode le plus lourd : 1

/!\ Plusieurs modes pour l'arrêt : Cte Scientifique

Priorité au mode le plus lourd : 1

PHASE DE CALCUL DU PTAL

/!\ La route 905,1 n'a pas de fréquence associée

Fréquence associée par défaut : 0.0

/!\ La route 966,1 n'a pas de fréquence associée

Fréquence associée par défaut : 0.0

* L'AI a bien été calculé pour le projet HLLM ; 1

Les résultats sont disponibles dans le fichier :

C:\Users\cordh\Desktop\PTAL+ Lille\Résultats\AI_projet_HLLM_1.csv

/!\ La route 905,1 n'a pas de fréquence associée

Fréquence associée par défaut : 0.0

/!\ La route 966,1 n'a pas de fréquence associée

```
Fréquence associée par défaut : 0.0
* L'AI a bien été calculé pour le projet HLLM ; 0
  Les résultats sont disponibles dans le fichier :
  C:\Users\cordh\Desktop\PTAL+ Lille\Résultats\AI_projet_HLLM_0.csv
/!\ La route 905,1 n'a pas de fréquence associée
  Fréquence associée par défaut : 0.0
/!\ La route 966,1 n'a pas de fréquence associée
  Fréquence associée par défaut : 0.0
* L'AI a bien été calculé pour le projet HLLM ; 3
  Les résultats sont disponibles dans le fichier :
  C:\Users\cordh\Desktop\PTAL+ Lille\Résultats\AI_projet_HLLM_3.csv
/!\ La route 905,1 n'a pas de fréquence associée
  Fréquence associée par défaut : 0.0
/!\ La route 966,1 n'a pas de fréquence associée
  Fréquence associée par défaut : 0.0
* L'AI a bien été calculé pour le projet Y ; 1
  Les résultats sont disponibles dans le fichier :
  C:\Users\cordh\Desktop\PTAL+ Lille\Résultats\AI_projet_Y_1.csv
/!\ La route 905,1 n'a pas de fréquence associée
  Fréquence associée par défaut : 0.0
/!\ La route 966,1 n'a pas de fréquence associée
  Fréquence associée par défaut : 0.0
* L'AI a bien été calculé pour le projet Y ; 0
  Les résultats sont disponibles dans le fichier :
  C:\Users\cordh\Desktop\PTAL+ Lille\Résultats\AI_projet_Y_0.csv
/!\ La route 905,1 n'a pas de fréquence associée
  Fréquence associée par défaut : 0.0
/!\ La route 966,1 n'a pas de fréquence associée
  Fréquence associée par défaut : 0.0
* L'AI a bien été calculé pour le projet Y ; 3
  Les résultats sont disponibles dans le fichier :
  C:\Users\cordh\Desktop\PTAL+ Lille\Résultats\AI_projet_Y_3.csv
/!\ La route 905,1 n'a pas de fréquence associée
  Fréquence associée par défaut : 0.0
/!\ La route 966,1 n'a pas de fréquence associée
  Fréquence associée par défaut : 0.0
* L'AI a bien été calculé pour le projet SFLC ; 1
  Les résultats sont disponibles dans le fichier :
  C:\Users\cordh\Desktop\PTAL+ Lille\Résultats\AI_projet_SFLC_1.csv
/!\ La route 905,1 n'a pas de fréquence associée
  Fréquence associée par défaut : 0.0
/!\ La route 966,1 n'a pas de fréquence associée
  Fréquence associée par défaut : 0.0
* L'AI a bien été calculé pour le projet SFLC ; 0
  Les résultats sont disponibles dans le fichier :
  C:\Users\cordh\Desktop\PTAL+ Lille\Résultats\AI_projet_SFLC_0.csv
/!\ La route 905,1 n'a pas de fréquence associée
  Fréquence associée par défaut : 0.0
/!\ La route 966,1 n'a pas de fréquence associée
  Fréquence associée par défaut : 0.0
* L'AI a bien été calculé pour le projet SFLC ; 3
  Les résultats sont disponibles dans le fichier :
  C:\Users\cordh\Desktop\PTAL+ Lille\Résultats\AI_projet_SFLC_3.csv
-----
80 sec de calculs pour 9 projets calculés
```

Annexe 4 : Résultat de l'interpréteur python au code présenté en annexe 2

```

runfile('C:/Users/cordh/Desktop/PTAL+ Lille/Exploitation resultats_v2.py',
wdir='C:/Users/cordh/Desktop/PTAL+ Lille')
-----
PHASE D'INITIALISATION

Quel projet voulez-vous ajouter au calcul ?
HLLM

Quel(s) mode(s) souhaitez-vous calculer pour ce projet (sep=',') ?
1,0,3

Avec quelle(s) fréquence(s) (sep=',') ?
1.5,6,12

Quel projet voulez-vous ajouter au calcul ?
Y

Même mode que précédemment ? (o/n)
o

Même fréquence que précédemment ? (o/n)
o

Quel projet voulez-vous ajouter au calcul ?
SFLC

Même mode que précédemment ? (o/n)
o

Même fréquence que précédemment ? (o/n)
o

Quel projet voulez-vous ajouter au calcul ?
aucun
-----
Lecture du fichier source : centroides_IRIS_pop_prixm2_SIREN.csv
L'année d'étude est fixée à : 2025
66085 centroïdes sont renseignés sur les 66 155 au total
66155 centroïdes sont détectés par le programme
  Calculs réalisés pour le projet : HLLM ; mode : 1
  * Lecture du fichier source AI : AI_projet_HLLM_1.csv
  Le programme détecte bien les 66155 centroïdes
  * Ecriture dans le fichier de sortie : calculs_HLLM_1.csv
  * Ecriture dans le fichier de sortie : logs_new_HLLM_1.txt
  - PARAMETRES DE CALCUL -
  Calculs réalisés pour le projet : HLLM
  Le mode considéré pour le projet est : 1
  La fréquence de passage choisie est : 1.5 min
  Fichier source AI : AI_projet_HLLM.csv
  Fichier source DSE : centroides_IRIS_pop_prixm2_SIREN.csv
  Année d'horizon du projet : 2025
  Taux de croissance démographique annuel MEL (INSEE, 2015) : 0.00422594175
  - RESULTATS CALCULES -
  Zones impactées positivement : 2205 (3.33%)
  Zones impactées négativement : 0 (0.0%)
  Zones impactées positivement de plus de 5 : 1751 (2.65%)
  Zones non-impactés : 63880 (96.6%)

```

Population impactée positivement : 147265.0 (12.77%)
 Population impactée négativement : 0 (0.0%)
 Population impactée de plus de 5 : 119581.0 (10.37%)
 Population non-impactée : 1060371.0 (91.97%)
 Emplois impactés positivement : 77773.0 (13.53%)
 Emplois impactés négativement : 0 (0.0%)
 Emplois impactés de plus de 5 : 51797.0 (9.01%)
 Emplois non-impactés : 505093.0 (87.88%)

Temps intermédiaire de calcul : 2.2 sec

Calculs réalisés pour le projet : HLLM ; mode : 0
 * Lecture du fichier source AI : AI_projet_HLLM_0.csv
 Le programme détecte bien les 66155 centroïdes
 * Ecriture dans le fichier de sortie : calculs_HLLM_0.csv
 * Ecriture dans le fichier de sortie : logs_new_HLLM_0.txt
 - PARAMETRES DE CALCUL -
 Calculs réalisés pour le projet : HLLM
 Le mode considéré pour le projet est : 0
 La fréquence de passage choisie est : 6.0 min
 Fichier source AI : AI_projet_HLLM.csv
 Fichier source DSE : centroides_IRIS_pop_prixm2_SIREN.csv
 Année d'horizon du projet : 2025
 Taux de croissance démographique annuel MEL (INSEE, 2015) : 0.00422594175
 - RESULTATS CALCULES -
 Zones impactées positivement : 1417 (2.14%)
 Zones impactées négativement : 0 (0.0%)
 Zones impactées positivement de plus de 5 : 1041 (1.57%)
 Zones non-impactés : 64668 (97.8%)
 Population impactée positivement : 98450.0 (8.54%)
 Population impactée négativement : 0 (0.0%)
 Population impactée de plus de 5 : 73903.0 (6.41%)
 Population non-impactée : 1109186.0 (96.21%)
 Emplois impactés positivement : 42956.0 (7.47%)
 Emplois impactés négativement : 0 (0.0%)
 Emplois impactés de plus de 5 : 30988.0 (5.39%)
 Emplois non-impactés : 539910.0 (93.94%)

Temps intermédiaire de calcul : 3.4 sec

Calculs réalisés pour le projet : HLLM ; mode : 3
 * Lecture du fichier source AI : AI_projet_HLLM_3.csv
 Le programme détecte bien les 66155 centroïdes
 * Ecriture dans le fichier de sortie : calculs_HLLM_3.csv
 * Ecriture dans le fichier de sortie : logs_new_HLLM_3.txt
 - PARAMETRES DE CALCUL -
 Calculs réalisés pour le projet : HLLM
 Le mode considéré pour le projet est : 3
 La fréquence de passage choisie est : 12.0 min
 Fichier source AI : AI_projet_HLLM.csv
 Fichier source DSE : centroides_IRIS_pop_prixm2_SIREN.csv
 Année d'horizon du projet : 2025
 Taux de croissance démographique annuel MEL (INSEE, 2015) : 0.00422594175
 - RESULTATS CALCULES -
 Zones impactées positivement : 630 (0.95%)
 Zones impactées négativement : 0 (0.0%)
 Zones impactées positivement de plus de 5 : 80 (0.12%)
 Zones non-impactés : 65455 (98.9%)
 Population impactée positivement : 45103.0 (3.91%)
 Population impactée négativement : 0 (0.0%)
 Population impactée de plus de 5 : 6738.0 (0.58%)
 Population non-impactée : 1162532.0 (100.84%)

Emplois impactés positivement : 18367.0 (3.2%)
 Emplois impactés négativement : 0 (0.0%)
 Emplois impactés de plus de 5 : 1831.0 (0.32%)
 Emplois non-impactés : 564499.0 (98.21%)

Temps intermédiaire de calcul : 4.5 sec

Calculs réalisés pour le projet : Y ; mode : 1
 * Lecture du fichier source AI : AI_projet_Y_1.csv
 Le programme détecte bien les 66155 centroïdes
 * Ecriture dans le fichier de sortie : calculs_Y_1.csv
 * Ecriture dans le fichier de sortie : logs_new_Y_1.txt
 - PARAMETRES DE CALCUL -
 Calculs réalisés pour le projet : Y
 Le mode considéré pour le projet est : 1
 La fréquence de passage choisie est : 1.5 min
 Fichier source AI : AI_projet_Y.csv
 Fichier source DSE : centroides_IRIS_pop_prixm2_SIREN.csv
 Année d'horizon du projet : 2025
 Taux de croissance démographique annuel MEL (INSEE, 2015) : 0.00422594175
 - RESULTATS CALCULES -
 Zones impactées positivement : 1860 (2.81%)
 Zones impactées négativement : 0 (0.0%)
 Zones impactées positivement de plus de 5 : 1450 (2.19%)
 Zones non-impactés : 64225 (97.1%)
 Population impactée positivement : 83422.0 (7.24%)
 Population impactée négativement : 0 (0.0%)
 Population impactée de plus de 5 : 62333.0 (5.41%)
 Population non-impactée : 1124214.0 (97.51%)
 Emplois impactés positivement : 41681.0 (7.25%)
 Emplois impactés négativement : 0 (0.0%)
 Emplois impactés de plus de 5 : 29780.0 (5.18%)
 Emplois non-impactés : 541185.0 (94.16%)

Temps intermédiaire de calcul : 5.7 sec

Calculs réalisés pour le projet : Y ; mode : 0
 * Lecture du fichier source AI : AI_projet_Y_0.csv
 Le programme détecte bien les 66155 centroïdes
 * Ecriture dans le fichier de sortie : calculs_Y_0.csv
 * Ecriture dans le fichier de sortie : logs_new_Y_0.txt
 - PARAMETRES DE CALCUL -
 Calculs réalisés pour le projet : Y
 Le mode considéré pour le projet est : 0
 La fréquence de passage choisie est : 6.0 min
 Fichier source AI : AI_projet_Y.csv
 Fichier source DSE : centroides_IRIS_pop_prixm2_SIREN.csv
 Année d'horizon du projet : 2025
 Taux de croissance démographique annuel MEL (INSEE, 2015) : 0.00422594175
 - RESULTATS CALCULES -
 Zones impactées positivement : 1170 (1.77%)
 Zones impactées négativement : 0 (0.0%)
 Zones impactées positivement de plus de 5 : 853 (1.29%)
 Zones non-impactés : 64915 (98.1%)
 Population impactée positivement : 54789.0 (4.75%)
 Population impactée négativement : 0 (0.0%)
 Population impactée de plus de 5 : 38196.0 (3.31%)
 Population non-impactée : 1152847.0 (100.0%)
 Emplois impactés positivement : 25120.0 (4.37%)
 Emplois impactés négativement : 0 (0.0%)
 Emplois impactés de plus de 5 : 15574.0 (2.71%)
 Emplois non-impactés : 557745.0 (97.04%)

```

---
Temps intermédiaire de calcul : 6.8 sec
---
  Calculs réalisés pour le projet : Y ; mode : 3
* Lecture du fichier source AI : AI_projet_Y_3.csv
  Le programme détecte bien les 66155 centroïdes
* Ecriture dans le fichier de sortie : calculs_Y_3.csv
* Ecriture dans le fichier de sortie : logs_new_Y_3.txt
  - PARAMETRES DE CALCUL -
  Calculs réalisés pour le projet : Y
  Le mode considéré pour le projet est : 3
  La fréquence de passage choisie est : 12.0 min
  Fichier source AI : AI_projet_Y.csv
  Fichier source DSE : centroides_IRIS_pop_prixm2_SIREN.csv
  Année d'horizon du projet : 2025
  Taux de croissance démographique annuel MEL (INSEE, 2015) : 0.00422594175
  - RESULTATS CALCULES -
  Zones impactées positivement : 508 (0.77%)
  Zones impactées négativement : 0 (0.0%)
  Zones impactées positivement de plus de 5 : 51 (0.08%)
  Zones non-impactés : 65577 (99.1%)
  Population impactée positivement : 22927.0 (1.99%)
  Population impactée négativement : 0 (0.0%)
  Population impactée de plus de 5 : 1978.0 (0.17%)
  Population non-impactée : 1184709.0 (102.76%)
  Emplois impactés positivement : 6819.0 (1.19%)
  Emplois impactés négativement : 0 (0.0%)
  Emplois impactés de plus de 5 : 518.0 (0.09%)
  Emplois non-impactés : 576047.0 (100.22%)

```

```

---
Temps intermédiaire de calcul : 8.0 sec
---
  Calculs réalisés pour le projet : SFCL ; mode : 1
* Lecture du fichier source AI : AI_projet_SFCL_1.csv
  Le programme détecte bien les 66155 centroïdes
* Ecriture dans le fichier de sortie : calculs_SFCL_1.csv
* Ecriture dans le fichier de sortie : logs_new_SFCL_1.txt
  - PARAMETRES DE CALCUL -
  Calculs réalisés pour le projet : SFCL
  Le mode considéré pour le projet est : 1
  La fréquence de passage choisie est : 1.5 min
  Fichier source AI : AI_projet_SFCL.csv
  Fichier source DSE : centroides_IRIS_pop_prixm2_SIREN.csv
  Année d'horizon du projet : 2025
  Taux de croissance démographique annuel MEL (INSEE, 2015) : 0.00422594175
  - RESULTATS CALCULES -
  Zones impactées positivement : 5533 (8.36%)
  Zones impactées négativement : 0 (0.0%)
  Zones impactées positivement de plus de 5 : 4749 (7.18%)
  Zones non-impactés : 60552 (91.5%)
  Population impactée positivement : 180317.0 (15.64%)
  Population impactée négativement : 0 (0.0%)
  Population impactée de plus de 5 : 146714.0 (12.73%)
  Population non-impactée : 1027319.0 (89.11%)
  Emplois impactés positivement : 102265.0 (17.79%)
  Emplois impactés négativement : 0 (0.0%)
  Emplois impactés de plus de 5 : 79468.0 (13.83%)
  Emplois non-impactés : 480601.0 (83.62%)

```

```

---
Temps intermédiaire de calcul : 9.4 sec
---
  Calculs réalisés pour le projet : SFCL ; mode : 0

```

```

* Lecture du fichier source AI : AI_projet_SFCL_0.csv
  Le programme détecte bien les 66155 centroïdes
* Ecriture dans le fichier de sortie : calculs_SFCL_0.csv
* Ecriture dans le fichier de sortie : logs_new_SFCL_0.txt
  - PARAMETRES DE CALCUL -
  Calculs réalisés pour le projet : SFCL
  Le mode considéré pour le projet est : 0
  La fréquence de passage choisie est : 6.0 min
  Fichier source AI : AI_projet_SFCL.csv
  Fichier source DSE : centroides_IRIS_pop_prixm2_SIREN.csv
  Année d'horizon du projet : 2025
  Taux de croissance démographique annuel MEL (INSEE, 2015) : 0.00422594175
  - RESULTATS CALCULES -
  Zones impactées positivement : 3607 (5.45%)
  Zones impactées négativement : 0 (0.0%)
  Zones impactées positivement de plus de 5 : 2750 (4.16%)
  Zones non-impactés : 62478 (94.4%)
  Population impactée positivement : 112987.0 (9.8%)
  Population impactée négativement : 0 (0.0%)
  Population impactée de plus de 5 : 82771.0 (7.18%)
  Population non-impactée : 1094649.0 (94.95%)
  Emplois impactés positivement : 67231.0 (11.7%)
  Emplois impactés négativement : 0 (0.0%)
  Emplois impactés de plus de 5 : 56255.0 (9.79%)
  Emplois non-impactés : 515635.0 (89.71%)

```

Temps intermédiaire de calcul : 10.7 sec

```

  Calculs réalisés pour le projet : SFCL ; mode : 3
* Lecture du fichier source AI : AI_projet_SFCL_3.csv
  Le programme détecte bien les 66155 centroïdes
* Ecriture dans le fichier de sortie : calculs_SFCL_3.csv
* Ecriture dans le fichier de sortie : logs_new_SFCL_3.txt
  - PARAMETRES DE CALCUL -
  Calculs réalisés pour le projet : SFCL
  Le mode considéré pour le projet est : 3
  La fréquence de passage choisie est : 12.0 min
  Fichier source AI : AI_projet_SFCL.csv
  Fichier source DSE : centroides_IRIS_pop_prixm2_SIREN.csv
  Année d'horizon du projet : 2025
  Taux de croissance démographique annuel MEL (INSEE, 2015) : 0.00422594175
  - RESULTATS CALCULES -
  Zones impactées positivement : 1592 (2.41%)
  Zones impactées négativement : 0 (0.0%)
  Zones impactées positivement de plus de 5 : 196 (0.3%)
  Zones non-impactés : 64493 (97.5%)
  Population impactée positivement : 48974.0 (4.25%)
  Population impactée négativement : 0 (0.0%)
  Population impactée de plus de 5 : 6960.0 (0.6%)
  Population non-impactée : 1158662.0 (100.5%)
  Emplois impactés positivement : 38598.0 (6.72%)
  Emplois impactés négativement : 0 (0.0%)
  Emplois impactés de plus de 5 : 5007.0 (0.87%)
  Emplois non-impactés : 544268.0 (94.69%)

```

Temps intermédiaire de calcul : 12.4 sec

```

Compilation des données par IRIS
Ecriture dans le fichier de sortie : donnees_IRIS.csv

```

```

Compilation des données par centroïde
Ecriture dans le fichier de sortie : donnees_centroides.csv

```

Fin de traitement

16 sec de calculs pour 9 projets calculés

Annexe 5 : Equivalence entre les routes et les fréquences associées

ROUTE ID	SENS	FREQUENCE
21R	0	0.0
23R	0	0.0
24R	0	0.0
26R	0	110.0
26R	1	150.0
27R	1	60.0
27R	0	66.0
29R	0	115.8
29R	1	115.3
69R	0	58.8
69R	1	58.9
75R	1	115.0
75R	0	100.0
77R	1	131.0
77R	0	98.3
20R	0	0.0
28R	1	116.7
28R	0	116.7
70R	1	86.7
70R	0	91.7
76	0	26.6
76	1	25.5
87	1	29.0
87	0	27.7
89	1	29.6
89	0	29.4
918	0	1440.0
918	1	1440.0
921	0	1440.0
921	1	1440.0
928	1	1440.0
928	0	65.0
929	1	19.0
929	0	1440.0
930	1	1440.0
930	0	55.0
CITA	1	27.3
CITA	0	28.3
CITH	0	31.3
17	1	15.3

17	0	15.4
52	0	17.4
52	1	17.2
33	1	20.0
33	0	19.5
C11	0	59.9
C11	1	60.5
L6	0	11.1
L6	1	11.1
32	1	18.3
32	0	18.8
967	0	60.0
967	1	65.0
15	1	14.1
15	0	13.7
68	0	42.8
CO3	0	26.5
CO3	1	26.1
65	1	72.0
65	0	82.5
Z1	1	97.0
Z1	0	131.3
Z2	0	53.3
Z2	1	67.0
Z3	0	37.5
Z3	1	143.3
Z4	1	258.7
Z4	0	139.0
910	1	64.0
910	0	75.0
911	1	32.5
911	0	61.0
919	0	1440.0
919	1	1440.0
923	0	1440.0
923	1	60.0
924	0	63.0
924	1	65.0
939	0	1440.0
939	1	65.0
941	0	1440.0
941	1	1440.0
964	0	1440.0
964	1	35.0
901	0	1440.0
901	1	55.0
906	1	1440.0
906	0	1440.0
907	0	62.0
907	1	65.0

908	0	1440.0
908	1	65.0
913	0	33.0
913	1	55.0
914	0	60.0
914	1	1440.0
916	0	1440.0
916	1	55.0
917	0	4.0
917	1	55.0
920	0	48.0
920	1	75.0
927	0	1440.0
927	1	65.0
938	1	5.0
938	0	62.5
978	0	305.0
978	1	160.8
C10	0	40.3
915	0	1440.0
915	1	55.0
81	1	110.3
81	0	24.0
934	1	1440.0
934	0	1440.0
942	0	1440.0
942	1	65.0
943	1	1440.0
943	0	65.0
25R	0	26.5
25R	1	85.0
966	0	61.0
84	0	34.3
84	1	29.0
937	0	11.0
937	1	201.7
22R	0	0.0
61R	0	120.3
61R	1	151.7
62R	0	69.3
62R	1	84.0
64R	0	125.0
64R	1	179.0
65R	1	110.0
65R	0	90.0
74R	1	60.0
74R	0	60.0
933	1	20.0
933	0	60.0
988	0	1440.0

988	1	270.0
MWR	0	45.3
MWR	1	39.8
912	0	1440.0
912	1	1440.0
C8	1	40.0
C8	0	40.0
61	1	73.3
61	0	83.9
62	1	122.0
62	0	117.5
64	1	81.7
64	0	88.8
ME1	0	2.0
ME1	1	2.0
ME2	0	2.6
ME2	1	2.6
932	0	14.0
932	1	37.5
975	0	1440.0
975	1	60.0
945	1	9.5
945	0	55.0
71	0	5.4
71	1	5.1
66	1	26.6
66	0	25.5
CO1	1	27.0
CO1	0	27.3
18	0	13.8
18	1	13.7
Z8	0	78.0
922	0	110.7
922	1	109.3
L91E	0	60.0
L91E	1	62.5
80	1	47.5
80	0	49.0
82	1	36.9
82	0	41.3
50	1	19.8
50	0	19.4
935	1	23.5
935	0	30.0
CO2	1	20.0
CO2	0	19.6
926	0	167.5
926	1	112.0
30	0	25.8
30	1	27.0

58	0	27.6
58	1	25.5
L91	0	24.5
L91	1	24.1
CITT	1	19.7
CITT	0	20.1
36	0	28.0
36	1	26.7
60E	0	102.9
60E	1	93.6
13	0	13.8
13	1	14.5
931	0	1440.0
931	1	1440.0
16	0	15.0
16	1	15.2
9	0	11.1
NVL	0	15.0
75	1	122.0
75	0	99.2
86	0	32.1
86	1	30.0
944	1	10.0
944	0	27.5
903	0	1440.0
903	1	1440.0
904	0	1440.0
904	1	1440.0
905	0	1440.0
34	1	20.2
34	0	20.4
35	0	21.8
35	1	21.7
L4	0	6.3
L4	1	12.3
L1	0	12.3
L1	1	12.3
L99	0	21.3
L99	1	18.2
L92	1	21.2
L92	0	19.6
L2	0	11.3
L2	1	11.2
CIT5	1	11.3
CIT5	0	11.1
Z6	1	112.6
Z6	0	70.5
10	1	12.7
10	0	13.1
12	0	10.0

12	1	10.1
88	0	48.3
88	1	45.3
L90	0	27.3
L90	1	22.7
C9	0	14.2
L3	1	9.4
L3	0	9.3
55	0	30.4
55	1	29.6
51	0	25.6
51	1	26.4
940	0	1440.0
940	1	1440.0
L7	1	11.1
L7	0	10.7
CITL	0	18.0
CITL	1	18.0
67	1	48.4
67	0	45.9
14	1	13.6
14	0	13.5
L8	1	12.7
L8	0	12.4
902	0	16.8
902	1	27.5
909	0	1440.0
909	1	65.0