SOMMAIRE

Table des matières

INTRODUCTION

1. Présentation de l'objet de recherche

Dans un monde de plus en plus mondialisé, dont la part de la population urbaine ne cesse de croître, les déplacements occupent une place centrale au quotidien. Pour les réaliser, il est possible d'utiliser pléthore de modes de transport : voiture individuelle, transports collectifs ou mobilités actives pour n'en citer que quelques-uns. Le mode de transport choisi, la question de l'itinéraire se pose. La décision peut se faire en fonction d'une multitude de critères : chemin le plus rapide, le plus court, le plus économique, etc. Différents algorithmes existent pour déterminer cet itinéraire, y compris l'algorithme de Dijkstra ou celui de Bellman-Ford.

Or, de plus en plus de trajets ont lieu en utilisant plusieurs modes de transport, ce qui amène à la notion d'intermodalité. Cela amène non seulement la question de la prise en compte des différentes caractéristiques de ces modes de transport, mais également des impacts engendrés par le changement de mode.

Cela amène à l'objet de recherche de ce projet de fin d'études, qui est de déterminer si, et comment, il est possible d'utiliser l'algorithme de Dijkstra évoqué plus haut pour calculer le plus court chemin lors d'un trajet utilisant plusieurs modes de transports, et plus particulièrement plusieurs modes de transports collectifs. L'enjeu étant de n'utiliser que le code existant de l'algorithme et de modifier uniquement les données d'entée.

2. Définitions

Algorithme de plus court chemin, graphe, arcs et nœuds

Ces algorithmes, inventés pendant la seconde moitié du XXe siècle, permettent de déterminer le chemin le plus court entre le point d'origine et le point de destination d'un trajet (dénommés par la suite origine-destination, ou O-D). Ils fonctionnent en représentant les systèmes de transport par des graphes, où une multitude d'arcs relient des nœuds. Pour un réseau routier, les arcs sont les routes et les nœuds les intersections. L'origine et la destination sont tous les deux des nœuds. Un poids est donné à chaque arc, correspondant au coût (distance, temporel, financier, environnemental, etc.) d'emprunt de ce chemin. L'algorithme de Dijkstra est un de ces algorithmes[1]. Il permet de déterminer le chemin le plus court entre une origine et une destination, ainsi que son coût total.

Dans le domaine des transports de passagers, la littérature scientifique se focalise sur le coût temporel d'emprunt des arcs. Cela est également le cas de ce projet, qui fait référence à la durée de trajet lorsque le concept de plus court chemin est abordé.

Rupture de charge et temps de latence

Le but de ces algorithmes a été tout d'abord de trouver le plus court chemin dans des déplacements monomodaux sans rupture de charge, tels que ceux réalisés en voiture.

[1] Voir code de l'algorithme en annexe

Une rupture de charge est le besoin de changer de véhicule pour poursuivre son déplacement. Elle induit un temps de latence, qui correspond au temps perdu pour le changement de véhicule. Ce temps doit alors être pris en compte dans le calcul du plus court chemin. Par exemple, dans un système de transports en commun, le temps de latence correspond au temps perdu lors d'une correspondance.

Intermodalité

La notion de rupture de charge et donc de temps de latence se retrouve dans les déplacements intermodaux, qui utilisent plusieurs modes de transport. Ces déplacements sont souvent structurés autour des transports collectifs (TC) : intermodalité voiture-TC, vélo-TC, ou même TC-TC (ex : bus-tram, ou métro-métro). Ce sont dans ces déplacements qu'il faut tenir compte du temps de latence pour calculer le plus court chemin entre une origine et une destination.

Par exemple, un trajet utilisant trois lignes de métro peut être plus court en temps de déplacement qu'un trajet utilisant uniquement deux lignes, mais s'avérer plus long en temps total, dû au temps de latence induit par les correspondances.

3. Enjeux

L'intégration des temps de latence dans les calculs de plus court chemin permet de communiquer à l'usager des informations plus précises. Cela va lui permettre de choisir son mode de transport et son trajet en connaissance de cause. De plus, pour des déplacements en transports collectifs, il a été montré que le fait de posséder des informations précises sur son déplacement réduit la part d'incertitude dans le trajet. Cela baisse le stress et le temps d'attente perçu par l'usager, et augmente sa propension à payer, ainsi qu'à utiliser ce mode de déplacement (López et Lozano, 2014).

L'enjeu d'intégration du temps de latence dans le calcul de plus court chemin dépasse ainsi la simple information à l'usager. En améliorant la perception des trajets réalisés en transports collectifs, il est possible d'envisager une hausse de leur fréquentation. D'un point de vue urbain, cela répond à deux grands enjeux : la baisse de la congestion, notamment automobile, dans et aux abords des agglomérations, consommatrice de temps ; ainsi que la diminution de l'impact environnemental des transports, réduisant la dépendance sur les énergies fossiles, ainsi que la pollution sonore, visuelle ou de l'air.

Un état de l'art sur la littérature scientifique permet de mieux cerner comment tenir compte de l'intermodalité dans le calcul de plus courts chemins. Cet état de l'art fait ressortir trois éléments : les limites de l'algorithme de Dijkstra, la manière de prendre en compte l'intermodalité, et la dépendance au temps, une troisième thématique qui s'applique davantage aux transports collectifs.

1. Problème NP-Complet et algorithme de Dijkstra

Il faut d'ores et déjà préciser que dans la littérature scientifique, l'algorithme de Dijkstra est critiqué pour sa complexité polynomiale, associée au fait qu'il résout un problème NP-Complet. Cela signifie que la vérification des solutions est assez efficace, mais que la recherche de solutions l'est bien moins ; l'efficacité correspondant à la rapidité d'exécution du calcul. Pour ce type de problème, le temps d'exécution de l'algorithme est exponentiel à la taille des données. Ainsi, Il peut vite devenir laborieux de résoudre des problèmes sur des graphes de grande taille avec Dijkstra (Dib et *al.*, 2015).

Il existe plusieurs méthodes pour atténuer voire contourner cet inconvénient, mais elles ne constituent pas l'objet de ce projet. C'est pourquoi les modèles qui seront utilisés resteront simples.

2. Prise en compte de l'intermodalité

La question du plus court chemin pour des déplacements intermodaux est traitée par des articles scientifiques depuis les années 1990 (Dib et *al.*, 2015). On distingue deux manières d'aborder le sujet : la première vise à minimiser le nombre de changements de mode, elle est surtout pertinente dans le transport de marchandises, sujets à des coûts et risques d'endommagement lors des transbordements. Cette approche peut tout de même être appliquée pour les transports collectifs, par exemple pour les personnes à mobilité réduite, pour lesquelles les changements peuvent s'avérer pénibles. La seconde manière vise à minimiser le temps de trajet, et est appliquée dans les transports collectifs.

Une grande partie des articles visent à proposer de nouveaux algorithmes de plus court chemin, pour résoudre le problème de l'intermodalité et celui de NP-Complexité de Dijkstra. Cependant, l'approche consiste à modifier les graphes utilisés, donc les données d'entrée, avant d'y appliquer ces nouveaux algorithmes. Il est ainsi possible d'appliquer Dijkstra dans la plupart de ces graphes modifiés.

Certaines méthodes introduisent des arcs de correspondance dans les graphes utilisés. Ces arcs relient des nœuds sur des modes de transport différents et leur coût d'emprunt correspond au temps de latence induit par l'intermodalité. Au niveau macroscopique, ces arcs relient les mêmes espaces par exemple pour un métro, la même station. Cependant à plus petite échelle, ils relient deux espaces distincts, dans le cas d'un métro, les quais d'une ligne et les quais d'une autre ligne dans une même station (Di Febbraro et *al.*, 1997 ; López et Lozano, 2014).

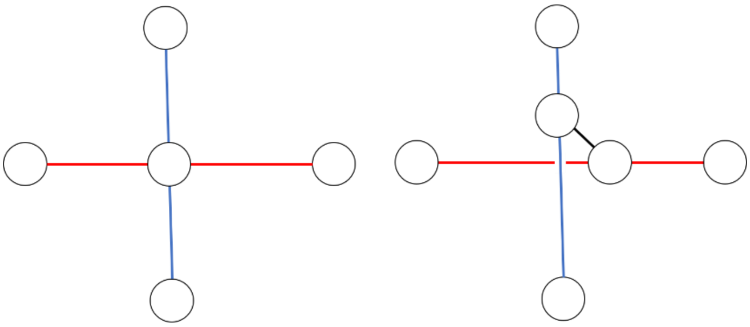

Figure 1 : Graphe sans arc de correspondance entre deux lignes de transport, bleue et rouge (gauche) et avec arc de correspondance, en noir (droite). Les cercles représentent les nœuds.

Il est possible de représenter les arcs de correspondance dans un graphique en 3-D : Chaque mode de transport est représenté dans un plan parallèle aux autres, les arcs de correspondance les lient dans la 3^{e} dimension, aux endroits où les correspondances sont possibles. Le métro est un bon exemple pour cette représentation : le niveau de la rue représente la marche et le niveau -1 le métro, les stations permettent de faire le lien entre les deux.

L'hypergraphe est une autre manière d'inclure les temps de latence. Celle-ci ne complexifie pas le graphe en y rajoutant d'autres arcs. Le graphe est divisé en sous-hypergraphes indépendants reprenant chacun une partie des nœuds. Certains nœuds peuvent appartenir à plusieurs sous-hypergraphes, permettant ainsi de les lier. Un coût est associé au changement de sous-hypergraphes.

Dans une application intermodale, les sous-hypergraphes représentent les différents modes de transports. Les nœuds communs à plusieurs sous-hypergraphes représentent les endroits où il est possible d'effectuer des correspondances d'un mode à un autre. Le coût de changement d'un sous-hypergraphe à un autre correspond au temps de latence (Dib et *al.*, 2015).

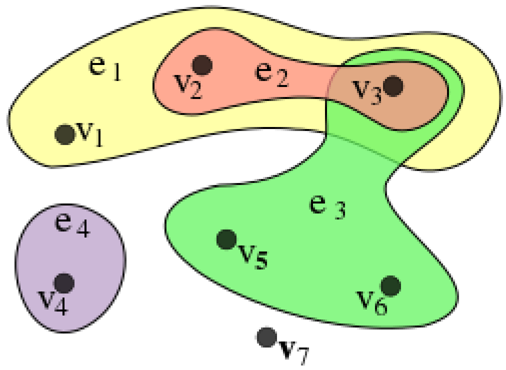

Figure 2 : Exemple d'hypergraphe. Les sous-hypergraphes e_n sont représentés par les couleurs et les nœuds v_n peuvent appartenir à plusieurs d'entre-eux

Seule l'approche de Ziliaskopoulos et Wardell (2000) s'affranchit complètement de la notion d'arc de correspondance. Elle inclut les temps de correspondance dans les nœuds, en ajoutant le temps de latence au temps de trajet si le mode d'entrée du nœud est différent de celui de sortie (López et Lozano, 2014). Cette méthode demande un algorithme spécifique, Dijkstra n'étant pas applicable.

Les modélisations des problèmes d'intermodalité qui ajoutent des arcs de correspondance ou bien représentent les problèmes sous forme d'hypergraphe ne font que modifier les données d'entrée des algorithmes de plus court chemin, qu'il s'agisse ou pas de celui de Dijkstra. Dib et *al.* (2015) le démontre bien en utilisant Dijkstra, un algorithme génétique et un algorithme de variable neighborhood search (VNS) pour le même graphe. Les résultats montrent que les deux autres algorithmes sont plus performants que Dijkstra en termes de temps de calcul (d'un facteur 700 et 515, respectivement) mais que les résultats sont très similaires, ceux trouvés par Dijkstra étant légèrement plus exacts. L'approche de Ayed et *al.* (2011), basé exclusivement sur Dijkstra dans un graphe utilisant des arcs de correspondance, tire les mêmes conclusions : les résultats de l'algorithme sont exacts mais le temps de calcul particulièrement long (636 secondes pour un réseau composé de 4000 nœuds, 15 000 arcs et utilisant 5 modes de transport) (López et Lozano, 2014).

Cet état de l'art permet de conclure qu'il est possible d'utiliser l'algorithme de Dijkstra pour déterminer le plus court chemin intermodal, en modifiant les données d'entrée de cet algorithme. Le temps de calcul reste plus élevé que pour d'autres approches avec des algorithmes différents, cependant les résultats sont tout aussi exacts.

3. Prise en compte de réseaux dynamiques et de la dépendance au temps

Les algorithmes de plus court chemin ont été conçus pour des situations statiques et pour des modes de transport privés, non dépendants du temps. C'est-à-dire pour des trajets dont le coût d'emprunt d'un arc est constant, et dont les arcs peuvent être parcourus à n'importe quel instant. Cependant, les situations étudiées ne rentrent pas dans ce cadre, et demandent alors aux algorithmes de plus court chemin de s'affranchir de ces contraintes.

Tout d'abord, les algorithmes de plus court chemin doivent tenir compte de temps de parcours dynamiques. Ceux-ci sont souvent plus importants en heure de pointe que le reste du temps, à cause de la congestion automobile. Les transports en commun en site propre (métro, tramway) ainsi que la marche ou le vélo sont moins soumis à ces effets que la voiture ou les bus. A partir de données et d'apprentissage automatique, il est possible de créer des références de temps de parcours relativement fiables qui dépendent des heures de la journée.

Le résultat est un graphe en 3 dimensions, le temps représentant cette 3^{e} dimension, les coûts d'emprunt des arcs évoluant selon l'heure. Cela ne modifie pas l'algorithme de Dijkstra, mais vient rajouter des données d'entrée et demande une heure de départ pour faire tourner l'algorithme (Di Febbraro et *al.*, 1997).

L'utilisation des algorithmes de plus court chemin pour les transports collectifs implique également de prendre en compte une contrainte propre à ces derniers : la dépendance au temps. Contrairement aux modes de transport privés tels que la voiture, le vélo ou la marche, pour lesquels les trajets peuvent avoir lieu n'importe quand, les transports collectifs sont tributaires de leurs horaires ; les trajets ne peuvent avoir lieu seulement à des instants précis. Des travaux sur cet aspect ont démontré dès les années 60 que l'algorithme de Dijkstra pouvait prendre en compte cette dépendance au temps, en utilisant des graphes temporisés. Ces graphes temporisés sont composés d'arcs ne pouvant être parcourus qu'à certains instants, ceux des trajets des transports collectifs (Cooke et Halsey, 1966 ; Dib et *al.*, 2015).

Cet aspect évolue aujourd'hui avec des lignes de transports en commun pour lesquelles le passage des véhicules est basé sur une fréquence de passage plutôt qu'un horaire, ainsi que l'intégration de données en temps réel, qui permettent d'accroitre la précision des temps d'attente et de trajet, et ainsi les informations présentées à l'usager. Ces problématiques sont traitées dans et hors du contexte de l'intermodalité, dans des articles tels que López et Lozano (2019).

PROBLEMATIQUE ET HYPOTHESES

A partir de l'objet de recherche défini et de l'état de l'art réalisé, la problématique et les hypothèses qui en découlent sont les suivantes :

1. Problématique

Alors que l'algorithme de Dijkstra ne tient pas compte des effets induits par l'intermodalité, est-il possible, en modifiant les données d'entrée de l'algorithme, de tenir compte de ces effets ? Si oui, quels seraient ces effets ?

2. Hypothèses

Sans pour autant modifier l'algorithme de Dijkstra, il est possible de prendre en compte le temps de latence induit par l'intermodalité, en changeant uniquement les données d'entrées nécessaires à cet algorithme.

L'application de ces modifications sur un réseau de transports collectifs montrerait un allongement des durées de trajet, ainsi que des chemins différents entre des couples O-D lors de la prise en compte du temps de latence induit par l'intermodalité.

Afin de prendre en compte les effets de l'intermodalité dans le calcul du plus court chemin, tout en évoluant dans le cadre fixé par la problématique, il faut modifier les données d'entrée de l'algorithme de Dijkstra, à savoir le graphe à partir duquel les chemins sont calculés.

Le modèle développé afin de modifier le graphe se place dans un système de métro. Les correspondances ont lieu entre les différentes lignes de métro, et les nœuds correspondent à des stations.

L'approche prise est similaire à celle de Ayed et *al.*, 2011, visant à partir d'un graphe existant pour introduire des arcs de correspondance aux nœuds où plusieurs lignes de métro se croisent. Ces arcs de correspondance, dont la valuation serait égale au temps de latence, seraient ainsi parcours lors de trajets empruntant plusieurs lignes de métro. Le temps de latence serait donc additionné à la durée de déplacement pour des trajets intermodaux, donc ainsi prise en compte dans la durée totale du trajet.

La méthode décrite ci-après, permettant d'obtenir le graphe avec les arcs de correspondance, a été automatisée grâce à un algorithme dont le code est en annexe.

1. Transformation du graphe

La première étape de la transformation du graphe nécessite d'identifier les nœuds correspondant aux stations de correspondance. Pour cela, on considère que tout nœud étant connecté à trois arcs ou plus est un nœud de correspondance. Il s'agit alors de décupler ce nœud pour chaque ligne de transport, puis de relier ces nœuds par des arcs de correspondance. Bien entendu, les nœuds décuplés, bien que différents sur le graphe et dans la matrice d'adjacence de celui-ci, sont physiquement au même endroit.

La seconde étape vise à modifier la matrice d'adjacence du graphe. Cette matrice d'adjacence recense toutes les relations ayant lieu dans le graphe. Avec le nouveau nœud crée, la matrice d'adjacence va être modifiée.

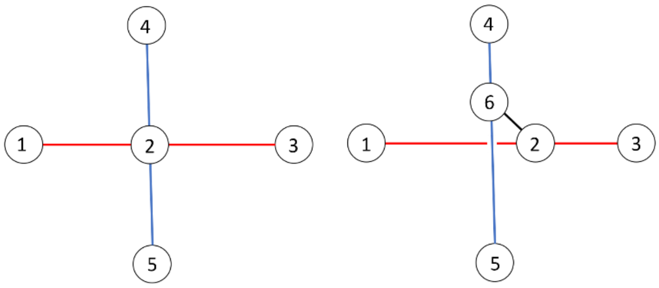

Figure 3 : Graphe originel (gauche) et modifié (droite)

Dans l'exemple ci-dessus, la matrice d'adjacence verra la transformation de deux des quatre arcs ayant pour origine ou destination le nœud 2, et la création d'un arc de correspondance. Sur la ligne bleue, le nœud 2 est remplacé par le nœud 6. Les relations [2, 4] et [2, 5] sont ainsi remplacées par les relations [6, 4] et [6, 5]. L'arc de correspondance [2, 6] est également crée.

1	2
2	3
2	4
2	5

Tableau 1 : matrice d'adjacence du graphe originel

1	2
2	3
6	4
6	5

2	6

Tableau 2 : matrice d'adjacence du graphe modifié

Enfin, la dernière étape consiste à déterminer la valuation des arcs. Les arcs [1, 2] et [2, 3] sont inchangés. Pour les arcs [2, 4] et [2, 5], remplacés par [6, 4] et [6, 5], la valuation des arcs ne change pas. Enfin, l'arc de correspondance prend une valeur aléatoire comprise entre 1 et 8 minutes. En effet, les durées de correspondance prévisionnelles dans les gares du Grand Paris Express sont comprises dans cette intervalle (Société du Grand Paris, 2015).

2. Observation des effets

L'algorithme de Dijkstra est ensuite utilisé afin de calculer les chemins les plus courts dans les deux graphes. Afin d'observer les effets sur la durée de trajet et le chemin emprunté, plusieurs outils sont utilisés :

Tout d'abord, pour la durée du trajet, une variable additionnant le coût d'emprunt de tous les arcs empruntés permet de calculer cette durée. Les résultats attendus devraient montrer une augmentation de la durée de trajet, d'autant plus importante que le trajet ne comprend de correspondances.

Quant à la différence entre les chemins empruntés, une approche graphique permet d'en évaluer une certaine partie, en observant visuellement si les chemins correspondent.

3. Premiers résultats

Le modèle est tout d'abord déployé sur un réseau théorique. Ce réseau circulaire est généré par l'application toaster network design[2], et contient volontairement un grand nombre de lignes et donc de correspondances afin de proposer plusieurs chemins entre les couples O-D.

Il est ainsi possible de mesurer les effets de l'intermodalité sur les durées de trajet. De ce réseau, on tire les résultats suivants :

	minutes	%
Allongement de durée de trajet minimal	0	0
Allongement de durée de trajet maximal	45	127
Allongement de durée de trajet moyen	21	70

Tableau 2 : tableau des résultats des durées de déplacement, pour le graphe théorique

À partir de ces chiffres sur l'allongement des durées de trajet, on constate que ceux-ci sont non négligeables. Soit, certains trajets, ceux n'utilisant qu'une seule ligne de métro, ne voient pas leur durée se rallonger, mais ceux-ci sont minoritaires. L'allongement moyen de durée d'un trajet est de 21 minutes. Au vu des durées de trajet du modèle, cela correspond à un allongement de 0,7 fois la durée sans correspondance. Au maximum, l'allongement du trajet est de 45 minutes, ce qui implique au minimum 6 correspondances. De plus, le trajet le plus allongé par rapport à la durée originale est 1,7 fois plus long à réaliser en prenant en compte les correspondances.

Ces chiffres traduisent un fort impact de la prise en compte des correspondances lors du calcul du plus court chemin. En effet, rien qu'en prenant la valeur moyenne

[2] ©Mindjid Maizia, toaster integral, 2016-2022

d'allongement de la durée du trajet, sur deux trajets quotidiens pour représenter un aller-retour domicile-travail, ces 42 minutes dévouées au temps de latence représentent près de 3% de la durée d'une journée.

L'impact sur les chemins parcourus par ces plus courts trajets est moins facilement quantifiable. Bien entendu, les trajets n'utilisant qu'une seule ligne de métro ne voient pas leurs chemins impactés. Sur les trajets où les correspondances sont nécessaires, on observe des trajets changés, pour lesquels un chemin avec moins de correspondances est privilégiés, mais aussi des trajets pour lequel le chemin reste identique. Dans ces cas, l'augmentation de durée de trajet liée aux correspondances était plus faible que la durée nécessaire à effectuer des détours pour limiter les correspondances.

Deux chemins différents pour le même trajet, sans puis avec prise en compte de l'intermodalité, sont présentés dans les figures ci-dessous. On remarque une propension à utiliser les lignes de métro circulaires lorsque le temps de latence est pris en compte.

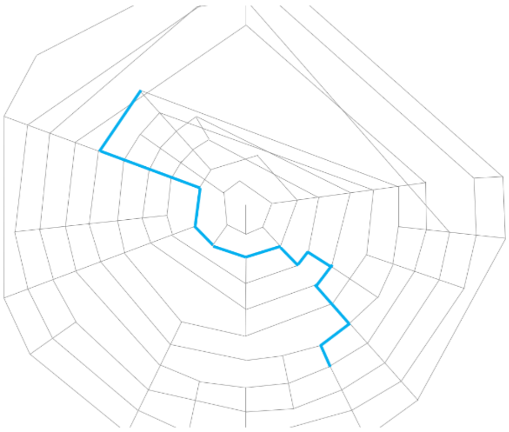

Figure 4 : Chemin parcouru pour un trajet dans le réseau théorique sans prise en compte du temps de latence

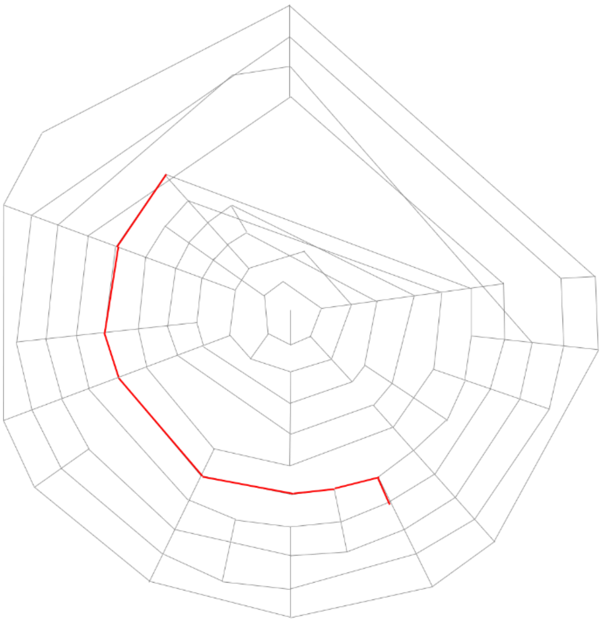

Figure 5 : Chemin parcouru pour un trajet dans le réseau théorique en prenant compte du temps de latence

4. Premières conclusions

Avec l'obtention de ces premiers résultats théoriques, force est de constater que la prise en compte du temps de latence induit par l'intermodalité a un impact non négligeable sur le calcul des plus courts chemins dans un réseau de métro. Soit, le chemin ne varie pas forcément, mais la durée de trajet s'allonge considérablement.

Le réseau utilisé ayant volontairement un grand nombre de correspondances possibles, il reste à déterminer si les effets de la prise en compte de l'intermodalité ont un aussi grand impact sur un réseau de métro existant.

APPLICATION AU CAS D'ETUDE ET RESULTATS

1. Choix du cas d'étude

Le choix du cas d'étude est important afin d'obtenir des résultats cohérents et de pouvoir les interpréter. En effet, l'objectif du projet étant de modéliser les changements de mode de transport dans le choix du plus court chemin, il convient de choisir un réseau de transports collectifs permettant un grand nombre de correspondances, et donc plusieurs trajets différents entre les origines et les destinations. Pour élaborer ce choix, le rapport entre le nombre total de stations et le nombre de stations ayant des correspondances permet de comparer différents réseaux. Plus le système est maillé et possède des correspondances, plus ce rapport est faible. Les systèmes les plus intéressants sont donc ceux qui ont une valeur la plus faible possible pour ce rapport.

Réseau de métro	Nombre de stations	Nombre de stations en correspondance	Rapport stations / correspondances
Paris	302	58	5,2
Rome	75	2	37,5
Lille	60	2	30
Montréal	73	4	18,25
Lisbonne	56	6	9,33

Tableau 3 : tableau comparatif de différents réseaux de métro

A partir du tableau comparant différents réseaux de métro, une typologie de cas est établie :

a. Des réseaux très développés

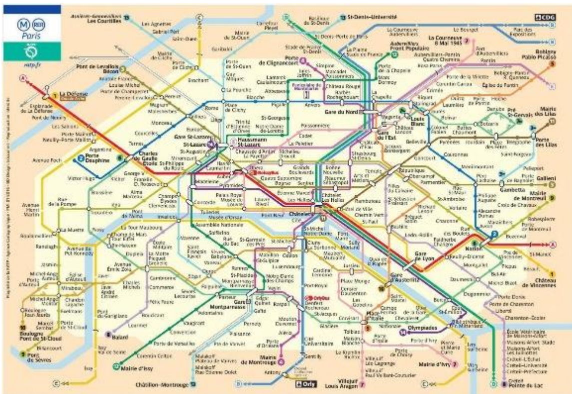

Figure 6 : Exemple de système de métro très développé (Paris)

Paris, et en règle générale les très grandes métropoles, ont des réseaux très étendus et très bien maillés, qui possèdent les rapports stations/correspondances les plus bas.

Cependant, le choix de ce type de réseau comme modèle est peu judicieux. En effet, ceux-ci sont trop étendus pour permettre une utilisation aisée de l'algorithme de Dijkstra. Leur taille imposerait de devoir modifier cet algorithme pour obtenir un temps de calcul acceptable, ce qui n'est pas l'objectif du projet.

b. Des réseaux en étoile

Figure 7 : Exemple de système de métro en étoile (Rome)

Dans ces réseaux, comme celui de Rome, les lignes ne se recoupent pas. Il existe donc un seul chemin entre chaque paire d'O-D. Il est alors uniquement possible d'observer les effets de la prise en compte de l'intermodalité sur les durées de parcours, mais pas sur le chemin emprunté.

c. Des réseaux de petite taille avec peu de correspondances

Figure 8 : Exemple de réseau de petite taille avec peu de correspondances (Lille)

Ces réseaux, de plus petite taille, comme celui de Lille, peuvent être plus facilement modélisés par Dijkstra. Cependant, ils possèdent peu de correspondances, et bien que plusieurs chemins existent entre certains couples O-D, l'utilité des modèles qui en découleraient serait limitée.

d. Des réseaux de petite taille très connectés

Figure 9 : Exemple de réseau de petite taille avec plus de correspondances (Lisbonne)

Ces réseaux, toujours de plus petite taille, possèdent davantage de lignes et de correspondances. Ce sont des réseaux modélisables avec Dijkstra et sur lesquels il est possible d'observer les effets induits par l'intermodalité. Les métros de Montréal et Lisbonne rentrent dans cette catégorie.

Le cas d'étude choisi est celui du métro de Lisbonne. En effet, ce réseau est celui de la quatrième typologie qui détient le rapport stations / stations en correspondance le plus faible.

2. Application

Le modèle utilisé sera développé à partir du plan du métro de Lisbonne, cas d'étude répondant aux critères fixés dans la section précédente. L'algorithme de Dijkstra n'étant pas modifié, c'est sur le graphe servant de données d'entrée à Dijkstra que les adaptations seront faites pour prendre en compte l'intermodalité.

Dans un premier temps, l'algorithme sera utilisé sur le graphe du réseau sans arcs de correspondance. Puis, comme lors de l'application théorique, le graphe sera modifié afin de créer des arcs de correspondance. Les durées de trajet et les chemin parcourus seront ainsi comparés.

3. Résultats et discussion

En comparant les durées de trajet obtenues en prenant compte ou non du temps de latence induit par les correspondances, les résultats suivant sont obtenus :

	minutes	%
Allongement de durée de trajet minimal	0	0
Allongement de durée de trajet maximal	12	70
Allongement de durée de trajet moyen	4,5	20

Tableau 4 : tableau des résultats des durées de déplacement, pour le graphe du métro de Lisbonne

Dans ce réseau de petite taille, on remarque que l'impact de la prise en compte du temps de latence est bien moins important que pour l'exemple théorique. Hormis les valeurs d'allongement moyennes et maximales du trajet qui sont bien plus faibles que dans cette première application, c'est surtout le pourcentage de différence de durée entre la prise en compte ou non de la correspondance qui est bien plus faible. En effet, la durée d'allongement du trajet n'est qu'augmentée de 20% en moyenne. Le trajet voyant sa durée augmenter le plus est 0,7 fois plus long en tenant compte du temps de latence, ce qui correspondait à la moyenne de l'augmentation lors de l'application sur le modèle théorique.

Les résultats obtenus viennent confirmer l'impact non négligeable de la prise en compte du temps de latence dans les durées totales de déplacements. Ces temps de latence sont en effet à prendre en compte afin de communiquer des données fiables aux usagers. Cependant, cet impact n'est pas aussi drastique qu'aurait pu le faire croire le modèle théorique. Toutefois, pour la typologie de réseaux très développés comme celui de Paris, il est tout à fait envisageable que l'impact de la prise en compte des correspondances soit plus important que dans le cas d'étude de Lisbonne.

Concernant les chemins empruntés, le réseau de métro de Lisbonne permettant moins de chemins différents entre deux couples O-D que le réseau théorique, il est bien plus compliqué de trouver un trajet dont le chemin varie avec la prise en compte de l'intermodalité. Après un tâtonnement autour d'une correspondance pouvant entrainer un chemin différent, il a été possible de trouver un trajet pour lequel le chemin à parcourir était différent.

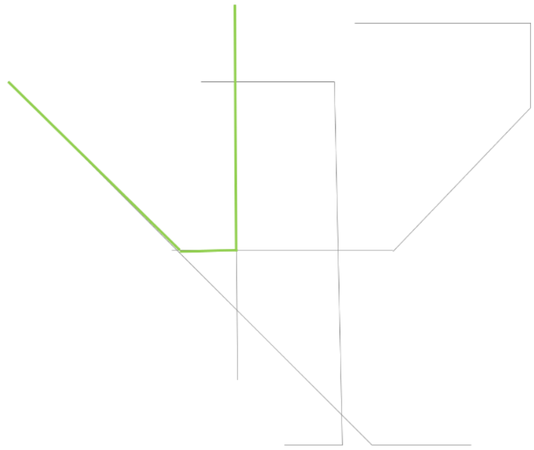

Figure 10 : Chemin parcouru pour un trajet dans le réseau du métro de Lisbonne sans prise en compte du temps de latence

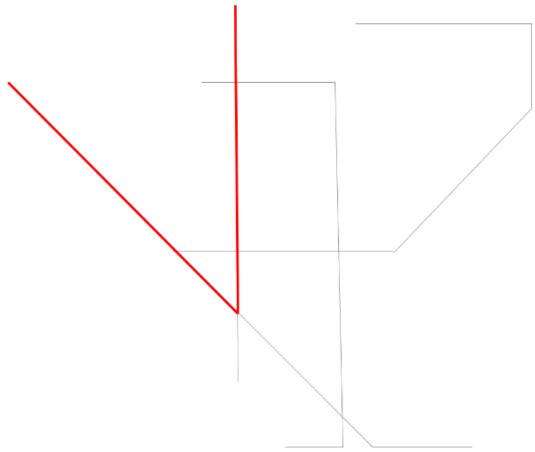

Figure 11 : Chemin parcouru pour un trajet dans le réseau du métro de Lisbonne en prenant compte du temps de latence

Il apparait ainsi que le changement de chemin lors de la prise en compte du temps de latence induit par les correspondances soit plus rare lors de l'application sur des réseaux de métro existants.

Cela reviendrait à conclure que l'impact de la prise en compte du temps de latence induit par l'intermodalité a un effet non-négligeable sur les durées de trajet, et qu'elle peut, dans certains cas, influencer le chemin emprunté. La prise en compte du temps de latence sert ainsi principalement à communiquer des informations fiables et précises à l'usager afin qu'il puisse déterminer son budget-temps à consacrer à un trajet, ainsi que le chemin à emprunter.

CONCLUSION

Le modèle élaboré et les résultats obtenus lors de son application sur le réseau de métro de Lisbonne amènent à la conclusion que l'algorithme de Dijkstra permet la prise en compte du temps de latence induit par l'intermodalité, et que les effets observés sont un rallongement du temps de parcours, ainsi que parfois, un chemin différent qui serait emprunté.

La principale limite de cette approche découle surtout de l'utilisation de l'algorithme de Dijkstra. En rajoutant les arcs de correspondance, le graphe devient plus complexe, ce qui augmente le temps de calcul. Afin d'obtenir des temps de calcul acceptables avec Dijkstra ; il faut limiter la taille des graphes et donc des réseaux modélisés.

Cela contraint aussi bien l'étendue physique des réseaux modélisables, mais également le nombre de modes de transports pouvant être pris en compte. Ce dernier point peut potentiellement venir fausser les données : par exemple, pour un itinéraire se finissant par une correspondance et un trajet d'une seule station sur une ligne de métro, cette partie peut s'avérer être plus rapide à pied ou à vélo à partir de la station de correspondance.

L'intégration de données en temps réel, évoquées dans l'état de l'art, pose également problème. La précision de ces données diminuant avec le temps, il se peut que le temps que l'algorithme effectue son calcul, les données ne soient plus valables.

Cependant, il faut noter que cette méthode de calcul de plus court chemin intermodal est facilement adaptable. Peu d'obstacles se présentent à sa mise en œuvre, tandis que les modèles peuvent facilement être mis à jour, un avantage dans des réseaux de transport en commun en constante évolution. Les résultats sont attendus comme étant fiables et précis. Le modèle développé, malgré un temps de calcul potentiellement élevé, répond ainsi au problème de résolution du plus court chemin intermodal en utilisant l'algorithme de Dijkstra.

Les partis pris par cette approche permettent d'obtenir les durées de trajet et les chemins à emprunter sur des réseaux de petite à moyenne taille. Ces informations sont fiables et précises, pouvant ainsi être communiquées à l'usager.

D'autres approches pourraient mettre en lumière d'autres phénomènes et donner d'autres informations. Comme évoqué précédemment, une approche modélisant d'autres modes de transport que les transports collectifs viendrait favoriser le mode de transport le plus rapide pour chaque tronçon du trajet. Avec ces données, on peut envisager de faciliter l'intermodalité entre les différents modes de transport, ou au contraire rendre un moyen de transport plus rapide, limitant ainsi les ruptures de charge.

Une approche dynamique, évoquée dans l'état de l'art, mettrait en lumière d'autres phénomènes. En rendant les arcs parcourables uniquement à certains instants, cette approche permet de rendre compte de la durée d'attente induite par une correspondance. Cette approche dynamique favoriserait les lignes de transport les plus fréquentes, pour lesquelles les durées d'attente sont les plus courtes. Elle permettrait également de déterminer la proportion de la durée d'attente dans la durée totale de trajet. Pour les trajets pour lesquels cette proportion serait particulièrement grande, cela pourrait indiquer qu'une coordination des horaires des différentes lignes de transport est nécessaire. Cette approche aurait pour intérêt de diminuer la durée de trajet des usagers, et ainsi de leur offrir un service plus efficace, sans pour autant nécessiter des investissements ou une augmentation de l'offre.

BIBLIOGRAPHIE

Arbalete. (2018, mai 11). Plan du métro de Rome [Illustration]. Consulté à l'adresse https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/3/35/Roma_-_mappa_metropolitana_%28schematica%29.png

Ayed, H., Galvez-Fernandez, C., Habbas, Z., & Khadraoui, D. (2011). Solving time-dependent multimodal transport problems using a transfer graph model. Computers & Industrial Engineering, 61(2), 391-401. https://doi.org/10.1016/j.cie.2010.05.018

Cooke, K. L., & Halsey, E. (1966). The shortest route through a network with time-dependent internodal transit times. Journal of Mathematical Analysis and Applications, 14(3), 493-498. https://doi.org/10.1016/0022-247x(66)90009-6

Di Febbraro, A., Pasqui, L., Sacone, S., & Serra, P. (1997). Heuristic Search for the Best Paths in an Intermodal Transportation System. IFAC Proceedings Volumes, 30(8), 245-250. https://doi.org/10.1016/s1474-6670(17)43831-6

Dib, O., Manier, M.-A., & Caminada, A. (2015). Memetic Algorithm for Computing Shortest Paths in Multimodal Transportation Networks. Transportation Research Procedia, 10, 745-755. https://doi.org/10.1016/j.trpro.2015.09.028

Kilom691. (2010, juin 20). Hypergraphe [Illustration]. Consulté à l'adresse https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/thumb/5/57/Hypergraph-wikipedia.svg/262px-Hypergraph-wikipedia.svg.png

Le Monnier de Gouville, G. (2020, 24 avril). Graphe sans arc de correpondance et graphe avec arc de correspondance [Illustration].

López, D., & Lozano, A. (2014). Techniques in Multimodal Shortest Path in Public Transport Systems. Transportation Research Procedia, 3, 886-894. https://doi.org/10.1016/j.trpro.2014.10.068

López, D., & Lozano, A. (2019). Shortest hyperpaths in a multimodal hypergraph with real-time information on some transit lines. Transportation Research Part A: Policy and Practice. https://doi.org/10.1016/j.tra.2019.09.020

Plan du métro de Lisbonne. (2019). [Illustration]. Consulté à l'adresse https://lisbonlisboaportugal.com/images/lisbon-images-2/Lisbon-metro-map.jpg

RATP. (2020). Plan du métro Parisien [Illustration]. Consulté à l'adresse https://www.ratp.fr/sites/default/files/plans-lignes/Plans-essentiels/Plan-Metro.1571994566.png

Société du Grand Paris. (2015, 26 février). Temps de correspondance prévisionnels dans les gares. Consulté à l'adresse https://www.data.gouv.fr/fr/datasets/temps-de-correspondance-previsionnels-dans-les-gares/

Ziliaskopoulos, A., & Wardell, W. (2000). An intermodal optimum path algorithm for multimodal networks with dynamic arc travel times and switching delays. European Journal of Operational Research, 125(3), 486-502. https://doi.org/10.1016/s0377-2217(99)00388-4

ANNEXES

Algorithme de Dijkstra

```
Soit un graphe G =(S,A) où :
   -  l'ensemble S est l'ensemble des sommets du graphe G
   -  l'ensemble A est l'ensemble des arcs de G tel que : si (s1, s2) est dans
      A, alors il existe une arrête depuis le nœud s1 vers le nœud s2
   -  on définit la procédure Poids (s1, s2) définie sur A qui renvoie le poids
      positif de l'arrête reliant s1 et s2, et un poids infini pour les paires
      de sommets qui ne sont pas connectées par un arc.

Soit sdeb le nœud d'origine du trajet et sfin de nœud de destination du trajet

Dijkstra(G,Poids,sdeb)
  Initialisation
  pour chaque point s de G
     faire d[s] := infini
  d[sdeb] := 0

  Q = ensemble de tous les nœuds
  tant que Q n'est pas un ensemble vide faire
        mini := infini
        sommet := -1
        pour chaque sommet s de Q
                si d[s] < mini
                alors
                        mini := d[s]
                        sommet := s
                renvoyer s1
        fin pour
      Q := Q privé de s1
      pour chaque nœud s2 voisin de s1 faire
          si d[s2] > d[s1] + Poids(s1,s2)
                alors
                        d[s2] := d[s1] + Poids(s1,s2)
                        prédécesseur[s2] := s1
      fin pour
  fin tant que

Calcul du plus court chemin de sdeb à sfin
A = suite vide
s = sfin
        tant que s != sdeb faire
        A = A + s
        s = prédécesseur[s]
        fin tant que
```

Algorithme de création des arcs de correspondance

Détermination de la liste des nœuds de correspondance :

```
n=inf(size(V,1),1);
for i = 1:size(V,1)
      n(i)=sum(A(:)==i);
end;
N=find(n>2);
```

Élaboration du graphe avec les arcs de correspondance :

```
cpt=size(V,1)+1;
ac=[];
Vr=[];
cc=[];
```

```
for n=1:numel(N);
      k = sum(A == N(n),2) > 0 ;
      a = A(k,:);
      c = C(k,:);
      L = unique(c);
      for u = 2:numel(L)
            i = (c == L(u)) ;
            b = a( i , : ) ;
            b(b==N(n)) = cpt ;
            a(i,:) = b ;
            ac = [ ac ; N(n) cpt ] ;
            Vr = [ Vr ; V(N(n),:) ] ;
            cc = [ cc ; 0 ];
            cpt = cpt+1;
      end;
      A(k,:) = a;
end;
G2.E = [ A ; ac ] ;
G2.V = [ V ; Vr ] ;
G2.C = [ C ; cc ] ;
G2.ac=ac
```

***CITERES** UMR 7324*
Cités, Territoires,
Environnement et Sociétés

Directeur de recherche :

Mindjid Maizia

Guy Le Monnier de Gouvillle
PFE/DAE5
UIT/RESEAU
2020-2021

Effet des changements de mode de transport sur la durée des parcours domicile-travail : comment mesurer les effets induits par l'intermodalité dans la mobilité domicile-travail ?

Résumé : Dans la société mondialisée actuelle, nos déplacements détiennent une place centrale dans notre quotidien. Du fait d'une population urbaine croissante, des enjeux liés au changement climatique, et du développement de nouveaux modes de transports, de plus en plus de trajets sont intermodaux. C'est-à-dire qu'ils utilisent plusieurs modes de transport entre leur origine et leur destination. Ces changements de mode entrainent des effets sur le trajet, en augmentant notamment sa durée à cause du temps de latence, durée utilisée pour effectuer la correspondance. Il faut donc prendre en compte ce temps de latence lors du calcul du plus court chemin entre une origine et une destination. L'objectif de ce projet est de déterminer comment modifier les données d'entrée de l'algorithme de Dijkstra afin de prendre en compte les temps de latence liés aux correspondances. Développant une méthode permettant de modifier le graphe d'entrée de l'algorithme de Dijkstra, ce projet vise à observer les effets de la prise en compte des temps de latence sur les durées de parcours et les itinéraires empruntés par les trajets.

Mots Clés : Intermodalité, Correspondance, Temps de latence, Transports collectifs, Algorithme de plus court chemin, Dijkstra, Graphe