

Évaluation de l'indicateur d'accessibilité des drones-taxis en milieu urbain, application sur Paris intramuros

Vincent Bernard, sous la direction de Mindjid Maïzia

Polytech Tours, Département Aménagement et Environnement, 35 Allée Ferdinand de Lesseps, 37200 Tours

Avertissements

Cette recherche a fait appel à des lectures, enquêtes et interviews. Tout emprunt à des contenus d'interviews, des écrits autres que strictement personnel, toute reproduction et citation, font systématiquement l'objet d'un référencement. L'auteur (les auteurs) de cette recherche a (ont) signé une attestation sur l'honneur de non plagiat.

Formation par la recherche, Projet de Fin d'Etudes en génie de l'aménagement et de l'environnement

La formation au génie de l'aménagement et de l'environnement, assurée par le département aménagement et environnement de l'Ecole Polytechnique de l'Université de Tours, associe dans le champ de l'urbanisme, de l'aménagement des espaces fortement à faiblement anthropisés, l'acquisition de connaissances fondamentales, l'acquisition de techniques et de savoir faire, la formation à la pratique professionnelle et la formation par la recherche. Cette dernière ne vise pas à former les seuls futurs élèves désireux de prolonger leur formation par les études doctorales, mais tout en ouvrant à cette voie, elle vise tout d'abord à favoriser la capacité des futurs ingénieurs à :

- Accroître leurs compétences en matière de pratique professionnelle par la mobilisation de connaissances et de techniques, dont les fondements et contenus ont été explorés le plus finement possible afin d'en assurer une bonne maîtrise intellectuelle et pratique,
- Accroître la capacité des ingénieurs en génie de l'aménagement et de l'environnement à innover tant en matière de méthodes que d'outils, mobilisables pour affronter et résoudre les problèmes complexes posés par l'organisation et la gestion des espaces.

La formation par la recherche inclut un exercice individuel de recherche, le projet de fin d'études (P.F.E.), situé en dernière année de formation des élèves ingénieurs. Cet exercice correspond à un stage d'une durée minimum de trois mois, en laboratoire de recherche, principalement au sein de l'équipe Dynamiques et Actions Territoriales et Environnementales de l'UMR 7324 CITERES à laquelle appartiennent les enseignants-chercheurs du département aménagement.

Le travail de recherche, dont l'objectif de base est d'acquérir une compétence méthodologique en matière de recherche, doit répondre à l'un des deux grands objectifs :

- Développer toute ou partie d'une méthode ou d'un outil nouveau permettant le traitement innovant d'un problème d'aménagement
- Approfondir les connaissances de base pour mieux affronter une question complexe en matière d'aménagement.

Afin de valoriser ce travail de recherche nous avons décidé de mettre en ligne sur la base du Système Universitaire de Documentation (SUDOC), les mémoires à partir de la mention bien.

Résumé

Le transport aérien par drone-taxi en milieu urbain actuellement en phase de test pourrait apporter une nouvelle dimension au transport en ville. Ce rapport donne une première approche de la potentielle accessibilité qu'offrirait ce nouveau mode de transport, en comparaison avec le réseau routier. Il sera également montré comment peut varier l'indicateur d'accessibilité de ce nouveau réseau de transport, en fonction des contraintes qui pourront peser sur le drone-taxi, lui empêchant d'utiliser l'espace aérien dans son intégralité.

Mots-clefs

drone-taxi, vitesse, indicateur d'accessibilité, transport, Paris, mobilité, durée

1 Introduction

1.1 Contexte du drone-taxi

Le transport aérien de personne par drone-taxi n'est actuellement effectif dans aucune ville, mais pourrait le devenir très rapidement, au vu des nombreuses

firmes travaillant sur ce sujet et des nombreux investissements effectués dans ce sens. Dubaï souhaite par exemple disposer d'un service de drones-taxis d'ici 2022, Paris explore aussi cette idée avec en ligne de mire les Jeux Olympiques de 2024. Le cabinet de consultation Oliver Wyman estime entre 60 et 90 le nombre de villes qui seront dotées d'un tel service en 2035 (COROT, 2019). Ce mode de transport révolutionnerait le transport actuel en ville, en s'affranchissant

des contraintes du sol, et en empruntant l'espace aérien, jusqu'ici délaissé en milieu urbain. Ceci rendrait sur le papier le drone-taxi potentiellement plus rapide que n'importe quel transport terrestre. Les flottes de drones-taxis seraient autonomes, et se rechargeraient électriquement avec des batteries, évitant donc le rejet de gaz à effet de serre, dont le secteur des transports est le deuxième contributeur derrière la production d'énergie et l'électricité. La législation doit s'adapter et proposer un cadre d'action pour un tel nouveau mode de transport, ce qui ne sera probablement pas chose aisée, les simples drones de loisirs étant actuellement complètement interdit en milieu urbain par exemple. L'EASA (Agence Européenne de la Sécurité Aérienne) se penche déjà sur ce nouveau sujet, elle a présenté le 15 octobre 2018 une proposition de loi qui a pour but de déterminer les performances, les mesures de sécurité et les règles de vol, entre autres, des drones transportant des passagers (EASA, 2019).

Pour un passager, le coût d'utilisation du drone-taxi devrait se rapprocher de celui du taxi ou VTC. Les exemples de trajets aéroports – centre-ville, souvent cités par les firmes, devraient avoir un tarif légèrement moins onéreux en drone-taxi qu'en taxi / VTC. Cependant ces deux services ne sont pas tout à fait comparables, en effet il est actuellement très difficilement imaginable de voir le drone-taxi effectuer un service de transport en porte-à-porte comme le font les taxis, de par leur importante surface d'emprise au sol, incompatible avec la desserte en porte-à-porte en tout lieu au vu des spécificités du milieu urbain. L'implantation de stations – ou vertiports – aux endroits stratégiques de la ville semble plus probable, un prototype de « voloport » de la firme Volocopter a même déjà été présenté en novembre 2019 à Singapour (MCNABB, 2019).

Enfin, l'implantation du service de drone-taxi en milieu urbain ne se fera probablement pas sur l'ensemble de l'espace aérien. Les drones-taxis sont en effet susceptible d'apporter des nuisances sonores et pourraient fortement impacter la vie privée de la population. Ils devront probablement garder une certaine distance aux terrains privés et façades d'immeuble, et seront probablement interdits de survol de lieu tels les installations militaires, hôpitaux, centres de repos, monuments historiques, ce qui pourrait dégrader la qualité de service du drone-taxi, en allongeant les déplacements.

1.2 Revue des méthodes d'analyse d'accessibilité

Le drone-taxi, toute nouvelle forme de mobilité encore en phase de test, ne possède pas de littérature propre à son sujet permettant d'analyser la potentielle accessibilité d'un tel réseau. Du fait que ce service n'existe pas encore, il est impossible de se reposer sur un exemple précis d'une quelconque ville pour mener des études d'accessibilité postérieures à la mise en place du service. Aucune étude prévisionnelle n'est accessible non plus, bien que les villes pionnières telles Dubaï ou Paris, souhaitant mettre en place ce service sous peu, doivent travailler en ce moment même dessus. Toutes les incertitudes propres à cette nouvelle forme de mobilité urbaine ne viennent également pas faciliter l'analyse de son accessibilité.

Il est donc dès lors possible de se reporter sur des méthodes d'analyse d'accessibilité déjà effectuées pour d'autres modes de transport. Les études d'accessibilité d'un territoire, d'une nouvelle ligne de tramway ou d'un nouveau mode de transport ne manquent pas. Mais tout d'abord, notons que le terme d'accessibilité peut être utilisé pour diverses approches, il peut avoir plusieurs sens et est composé de plusieurs dimensions. Il est souvent question « d'estimation multicritère de l'accessibilité » (RICHER et PALMIER, 2012). L'aspect temporel est tout le temps pris en compte dans ses différentes études d'accessibilité, mais il y a également des aspects de l'ordre du social, qui dans le cas de notre étude sur le drone-taxi ne vont pas nous intéresser.

Nous devons donner un cadrage théorique pour l'analyse de l'accessibilité du drone-taxi, explicitant la manière dont nous allons traiter le problème. Nous souhaitons étudier son accessibilité en terme de temps de parcours des itinéraires qu'un réseau de drone-taxi pourrait offrir. C'est l'indicateur topologique d'accessibilité, également appelé « indicateur de Shimbel » qui va nous permettre d'évaluer l'accessibilité du réseau. L'indicateur d'accessibilité d'une zone étant égale à la somme des distances séparant cette zone des autres secteurs, la zone la plus accessible est donc celle possédant l'indicateur d'accessibilité le plus petit. La somme des indicateurs d'accessibilité de ces zones nous donne donc l'indicateur d'accessibilité du réseau. (MAIZIA, sd)

Plusieurs méthodes se basent sur cet indicateur d'accessibilité. La méthode PTAL (Public Transport Accessibility Level), effectue une « mesure

précise et détaillée de l'accessibilité d'un point sur le réseau de transport public » en tenant également compte des temps d'accès à pied au service et de sa disponibilité. (RICHER et PALMIER, 2012). MUSLIW, outil de mesure de l'accessibilité multimodale se base également sur l'indicateur de Shimbel, en prenant en compte les horaires de passages des transports en commun, permettant d'analyser la performance spatio-temporelle du système. D'autres critères comme la pénibilité peuvent être combinés pour une mesure plus réaliste.

Ces méthodes sont précises et adaptées à leur cas d'étude. Cependant, pour le nôtre, celui du drone-taxi, nous allons adopter une approche calculatoire dynamique, permettant de calculer l'indicateur d'accessibilité d'un réseau dont nous allons modifier les composantes.

1.3 Objectif de ce document

L'objectif de ce document est de comparer dans un premier temps les indicateurs d'accessibilité d'un réseau routier et d'un réseau de drone-taxi. Nous partons de l'hypothèse que le réseau de drone-taxi permet une meilleure accessibilité en terme de durée, il s'agit de démontrer cela mathématiquement, via la théorie des graphes et l'algorithme de Dijkstra notamment, qui permet de résoudre le problème des plus courts chemins.

Dans la deuxième partie, nous allons ensuite agir sur ce réseau de drone-taxi, le « dégrader », afin de voir jusqu'à quel point son accessibilité reste supérieure au réseau routier. Un drone-taxi peut dans la théorie effectuer un déplacement direct, à vol d'oiseau entre deux points, et dispose de la totalité de l'espace aérien pour se déplacer. Si ceci était entièrement possible à l'échelle d'une ville, l'accessibilité du drone-taxi serait maximisée. Cependant, les contraintes urbaines évoquées précédemment (zones de survol interdites, respect de la vie privée) pourraient remodeler cet espace aérien et le diminuer, diminuant de fait l'accessibilité du drone-taxi. Le but de notre manipulation est de simuler ces contraintes et de voir l'impact qu'elles pourraient avoir.

2 Méthodologie

2.1 Modèle théorique de calcul d'accessibilité

Nous allons mobiliser des éléments de théorie des graphes pour comparer les accessibilités du réseau routier et du drone-taxi.

2.1.1 Calcul de l'indicateur d'accessibilité

Pour obtenir l'indicateur d'accessibilité de n'importe quel réseau, nous définissons tout d'abord ce réseau en indiquant les coordonnées de ces nœuds, ainsi que les arcs, permettant de définir quels nœuds sont reliés entre eux. Ceci nous permet d'obtenir la matrice d'adjacence du réseau. Le calcul de la distance euclidienne entre deux nœuds formant un arc nous permet d'obtenir la longueur de cet arc, dans le cas d'un réseau de drone-taxi :

Distance euclidienne : $D_{BA} = \sqrt{(x_A - x_B)^2 + (y_A - y_B)^2}$ avec les coordonnées $A(x_A, y_A)$ et $B(x_B, y_B)$

Cette dernière formule nous permet d'obtenir la matrice des coûts, qui indique le coût pour aller d'un point A à un point B en drone. Pour l'instant, le coût est ici une distance. Ce qui nous intéresse est un coût en durée. Connaissant la longueur de chaque arc, il nous suffit d'affecter une vitesse à chacun d'entre eux pour obtenir la durée de parcours affectée à ces arcs.

On définit les nœuds (origine) dont on souhaite calculer l'indicateur d'accessibilité par rapport à d'autres nœuds (destination). Dans notre cas, souhaitant obtenir l'indicateur d'accessibilité de tout le réseau, on définit tous les nœuds de notre réseau comme origine et destination. C'est ensuite via l'algorithme de Dijkstra, qui permet de calculer les plus courts chemins, que l'on obtient la matrice des durées minimales pour que chaque Origine atteigne sa Destination. La somme de ces durées nous donne notre indicateur d'accessibilité, plus celui-ci est petit, moins la durée pour relier chaque nœud à tous les autres nœuds est grande, et donc plus le réseau est accessible. [Annexe 1 pour voir le système logique associé]

2.1.2 Dégénération de l'indicateur d'accessibilité

La tâche précédente sera effectuée pour deux réseaux différents. Le but étant de comparer le réseau routier et le réseau de drone-taxi. Pour faire une comparaison juste, les nœuds origines et destinations seront les mêmes, mais la configuration du réseau changera. En effet notre réseau de drone-taxi permet - dans un premier temps - de relier nos nœuds avec la distance euclidienne car ceux-ci empruntent la voie aérienne (théoriquement) complètement libre, tandis que le réseau routier va emprunter les axes routiers. Nous obtiendrons donc deux indicateurs d'accessibilité différents.

Si notre hypothèse s'avère juste, à savoir que notre réseau de drone-taxi est plus accessible que le réseau routier, nous pourrions donc passer à la deuxième étape.

Nous souhaitons voir jusqu'à quel point notre réseau de drone-taxi peut être dégradé, tout en restant plus accessible que le réseau routier. Le but est d'observer l'impact des potentiels obstacles au déploiement des drones-taxis sur l'espace aérien, en d'autre mot, analyser jusqu'à quel « degré d'obstacle » que l'on va nommer seuil, notre réseau de drone-taxi reste plus accessible que le réseau routier. Il s'agira simplement d'appliquer une contrainte de seuil sur les arcs de nos réseaux. Par exemple si nous choisissons un seuil de 900, tous les arcs qui auront une valeur inférieure (ou supérieure selon ce que « seuil » signifie : fréquentation, longueur, taux de nuisance provoquées...) seront retirés du réseau, permettant d'obtenir une nouvelle accessibilité, le but étant de voir jusqu'à quel seuil l'accessibilité du réseau drone-taxi deviendra égale à celle du réseau routier. [Annexe 2 pour voir le système logique associé]

2.2 Application du modèle : variables prises en compte

Dans un premier temps, pour obtenir les indicateurs d'accessibilité de nos deux réseaux, seulement deux variables vont changer d'un réseau à l'autre. Les origine-destination seront les mêmes, mais le réseau les reliant sera différent, il s'agit donc de la première variable qui sera modifiée. Le réseau de drone-taxi empruntera l'espace aérien pour ces itinéraires, ceux-ci se feront directement via la distance euclidienne. Dans le cas du réseau routier, la voiture doit emprunter un autre chemin, celui suivant le réseau routier, et doit donc passer par des nœuds supplémentaires, qui ne seront ni des origines ni des destinations. Ensuite, la vitesse appliquée à chaque tronçon va également varier selon le réseau, un drone-taxi avec dans un premier temps aucune contrainte sur les itinéraires qu'il devra prendre, aura une vitesse moyenne supérieure à celle de la voiture.

Dans un second temps, une fois que nous aurons obtenu les indicateurs d'accessibilité, celui du réseau routier étant supérieur à celui du réseau drone-taxi si notre hypothèse s'avère exacte, nous nous focaliserons sur le réseau drone-taxi uniquement, en essayant de voir jusqu'à quel degré nous devons appliquer des contraintes sur ce réseau pour que son indicateur d'accessibilité devienne supérieur à celui du réseau routier. Ici, seul le seuil variera, l'idée étant qu'il permettra de supprimer des arcs du réseau drone-taxi. Nous avons décidé que les arcs à supprimer seraient, pour notre première méthode, ceux dont la fréquentation serait la moins importante, ce qui permettrait de nuire à un nombre d'usager le plus faible possible. Nous avons donc produit un modèle gravitaire afin d'estimer la répartition de la fréquentation des drones-taxis selon les zones choisies, qui sera explicitée par la suite. Pour notre seconde méthode, nous retirerons les arcs les plus longs, ce qui permettra de réduire les nuisances provoquées par le drone, au plus grand nombre d'habitant (en faisant l'hypothèse que la densité de Paris est uniforme). Même si, cependant, les nuisances subies par l'autre partie des habitants seront plus fortes du fait d'un nombre de drone plus important (qui se seront reportés sur les espaces de vol restants).

Dans la théorie, nous souhaiterions supprimer les arcs de notre réseau drone-taxi selon ces deux méthodes, jusqu'à ce que son indicateur d'accessibilité soit égal à celui du réseau routier.

3 Cas d'étude : Paris intramuros

Nous avons choisi la ville de Paris comme cas d'étude pour plusieurs raisons. Dans un premier temps et pour rappel, la ville est légitime à l'implantation d'un service de drone-taxi car elle développe en ce moment le projet de « service de mobilité aérienne urbaine » via la RATP associé à Airbus, et envisage des premiers vols commerciaux pour les JO 2024. De plus, il s'agit d'une ville française que nous connaissons, ce qui nous facilitera la tâche pour son traitement en général. Il nous sera plus aisé de récupérer les données que nous souhaitons utiliser et les principaux fichiers SIG de la ville, susceptibles de nous intéresser, sont facilement accessibles (Data Gouv, 2016). Nous nous sommes limités aux strictes frontières de la ville de Paris pour des questions de temps et capacités de calculs trop importants qu'aurait nécessité un traitement de la région Île-de-France, bien que des pôles générateurs de déplacements comme La Défense et les aéroports Roissy-Charles de Gaulle et Orly auraient été légitimes à intégrer. Pour choisir les nœuds qui constitueront les origine-destination de nos réseaux, nous avons choisi des pôles générateurs de déplacement. Nous avons donc défini 6 nœuds situés aux stations de métro et RER les plus fréquentées de Paris : la Gare du Nord et la Gare de l'Est (que nous avons regroupé en un seul nœud), la Gare de Lyon, Les Halles, La Gare Montparnasse, la Gare Saint-Lazare, et l'Arc de Triomphe.

La constitution de notre réseau routier s'est logiquement faite via le réseau routier actuel de la ville de Paris. Après traitement de fichier SIG, nous avons uniquement gardé les routes accessibles à la voiture pour constituer le réseau routier. Pour le réseau de drone-taxi, nous avons créé de nouvelles routes, qui permettent de relier un à un et par une ligne droite, les 6 nœuds définis. Pour le réseau routier, nous avons affecté à chaque tronçon routier (chaque arc) la vitesse de 14,1 km/h, qui correspond à la vitesse moyenne d'une voiture à Paris en 2017 (Observatoire des déplacements à Paris, 2017). Pour le drone-taxi sa vitesse de croisière atteindrait environ 120 km/h pour la majorité des constructeurs. Les durées de décollage, d'atterrissage, et d'accélération pourraient être négligeable dans le cadre de long déplacement, comme La Défense - Aéroport Roissy-Charles de Gaulle de 30 km par exemple. Cependant, elles ne le sont pas dans le cadre de déplacements intramuros à Paris, du fait de la faible distance de ces déplacements qui irait de 2 à 6 km dans notre cas. Nous approximerons la vitesse moyenne du drone dans ce cas à 60 km/h.

Ensuite, pour la deuxième étape qui consiste à savoir jusqu'à quel point nous pouvons dégrader notre réseau drone-taxi pour que son indicateur d'accessibilité soit égal à celui du réseau voiture, nous nous basons sur la fréquentation des arcs de notre réseau, afin de supprimer les arcs les moins fréquentés. Pour ceci nous avons dû calculer la fréquentation de notre réseau de drone-taxi, via le modèle gravitaire. Les données de fréquentation des stations métro / RER de nos nœuds concernés nous ont permis d'avoir la proportion de flux émis et reçus par stations, et donc de distribuer la demande.

4 Résultats

Les résultats présentés ci-dessous sont uniquement basés sur le cas d'étude présenté précédemment.

4.1 Calcul de l'indicateur d'accessibilité

L'indicateur d'accessibilité obtenu pour le réseau routier est de 510,4 minutes, soit 8h30.

	Les Halles	Gare Montparnasse	Gare du Nord - Gare de l'Est	Gare de Lyon	Gare Saint-Lazare	Arc de Triomphe
Les Halles	0	14,1	10,7	12,6	10,3	17,4
Gare Montparnasse	14,1	0	22,9	20,2	17,8	17,9
Gare du Nord - Gare de l'Est	10,7	22,9	0	14,3	13,7	23,2
Gare de Lyon	12,6	20,2	14,3	0	21,7	28,5
Gare Saint-Lazare	10,3	17,8	13,7	21,7	0	9,6
Arc de Triomphe	17,4	17,9	23,2	28,5	9,6	0
Somme des durées des chemins les plus courts (indicateur d'accessibilité) :					510,4 minutes	
					8,51 heures	

Figure 1: Matrice des durées (en minutes) pour effectuer les déplacements sur le réseau routier

L'indicateur d'accessibilité obtenu pour le réseau drone est de 108,6 minutes, soit 1h49.

	Les Halles	Gare Montparnasse	Gare du Nord - Gare de l'Est	Gare de Lyon	Gare Saint-Lazare	Arc de Triomphe
Les Halles	0	3,0	2,0	3,0	1,9	3,5
Gare Montparnasse	3,0	0	5,0	3,9	3,9	4,0
Gare du Nord - Gare de l'Est	2,0	5,0	0	3,8	2,4	4,5
Gare de Lyon	3,0	3,9	3,8	0	4,9	6,4
Gare Saint-Lazare	1,9	3,9	2,4	4,9	0	2,0
Arc de Triomphe	3,5	4,0	4,5	6,4	2,0	0
Somme des durées des chemins les plus courts (indicateur d'accessibilité) :					108,6 minutes	
					1,81 heures	

Figure 2 : Matrice des durées (en minutes) pour effectuer les déplacements sur le réseau drone-taxi

Pour notre cas d'étude, on observe comme l'on pouvait s'y attendre, que le réseau de drone-taxi possède un indicateur d'accessibilité nettement inférieur à celui du réseau routier. Celui-ci est 4,7 fois moins important, ce qui signifie que le drone-taxi sera en moyenne 4,7 fois plus rapide qu'une voiture pour effectuer un même trajet.

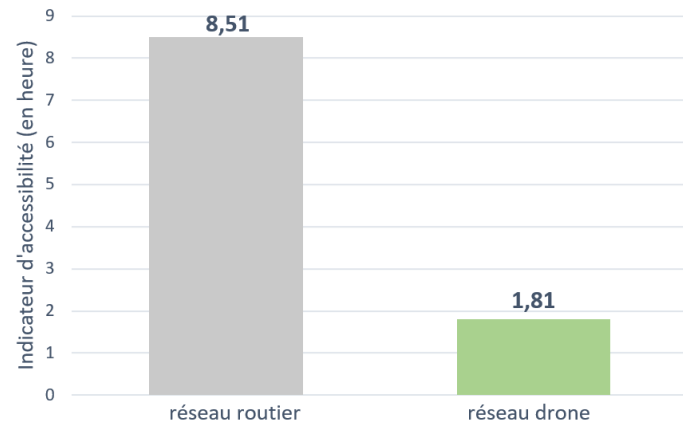


Figure 3: Indicateurs d'accessibilité du réseau routier et du réseau drone-taxi

	Les Halles	Gare Montparnasse	Gare du Nord - Gare de l'Est	Gare de Lyon	Gare Saint-Lazare	Arc de Triomphe
Les Halles	0%	1,68%	6,01%	4,12%	2,56%	1,00%
Gare Montparnasse	1,56%	0%	3,37%	2,31%	1,44%	0,56%
Gare du Nord - Gare de l'Est	7,61%	4,58%	0%	11,23%	6,98%	2,72%
Gare de Lyon	4,51%	2,71%	9,71%	0%	4,13%	1,61%
Gare Saint-Lazare	2,52%	1,52%	5,44%	3,72%	0%	0,90%
Arc de Triomphe	0,89%	0,54%	1,93%	1,32%	0,82%	0%
						somme : 100%

Figure 4: Répartition des flux sur le réseau drone-taxi

4.2 Dégradation de l'indicateur d'accessibilité via la variation de certaines variables

Pour pouvoir retirer des arcs de notre réseau et ainsi le dégrader, nous avons premièrement affecté à nos arcs des valeurs correspondant à un pourcentage de la fréquentation par rapport à la fréquentation totale du réseau. Nous nous sommes basés sur les fréquentations des stations métro / RER de chaque station, ce qui nous a donné la répartition de flux visible figure 4, via le modèle gravitaire.

Une fois les fréquentations de chaque arc obtenues, nous avons pu enlever un à un les arcs de notre réseau, selon la logique suivante « on enlève les arcs dont la fréquentation est la plus faible ». De cette manière, on souhaite voir combien d'arc nous devons retirer de notre réseau pour obtenir une accessibilité de 8h30, égale au réseau routier. Notre réseau étant constitué de peu de nœuds (6), nous avons finalement constaté qu'à partir d'un certain nombre d'arcs enlevés, notre réseau ne permet pas de rejoindre tous les points à partir de n'importe quel autre point. L'indicateur d'accessibilité devient par définition infini.

La courbe ci-dessous nous montre la valeur de l'indicateur d'accessibilité selon les arcs que l'on va retirer.

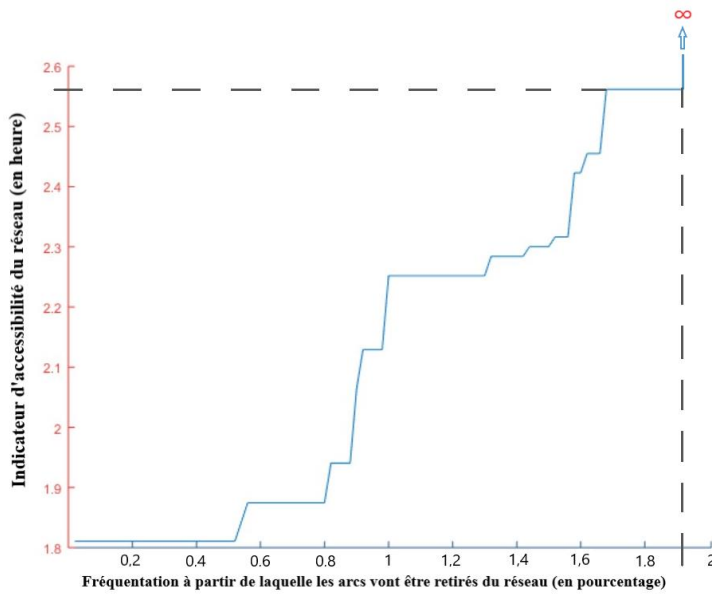


Figure 5 : Indicateur d'accessibilité du réseau drone-taxi en fonction de la fréquentation des arcs que l'on enlève du réseau

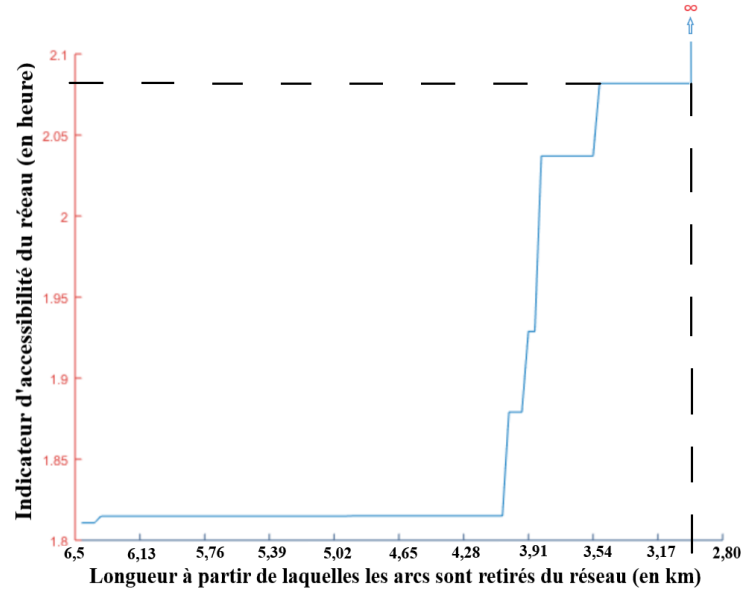


Figure 6 : Indicateur d'accessibilité du réseau drone-taxi en fonction de la longueur des arcs que l'on enlève du réseau

(ou ne lui permettrait plus d'émettre). [Annexe 4 pour visualiser le graphe correspondant]

4.3 Analyse des résultats

4.3.1 Calcul de l'indicateur d'accessibilité

Premièrement, concernant la différence entre les indicateurs d'accessibilité du réseau routier (8h30) et du réseau drone-taxi (1h49 heures), 2 variables viennent expliquer ce résultat. Tout d'abord, la longueur du réseau n'est pas identique pour les 2 réseaux, le drone-taxi permet un déplacement direct entre deux points, en ligne droite via l'espace aérien. Le réseau routier ne permet pas un déplacement aussi direct, et après comparaison de la longueur totale pour effectuer les plus courts chemins pour ces deux réseaux, on se rend compte que le réseau routier est 10% plus long que le réseau drone-taxi. À vitesse moyenne égale, une voiture mettrait donc 10% de temps de plus que le drone-taxi à effectuer un même déplacement.

Cependant il s'avère par le calcul que le réseau drone-taxi n'est pas 1,1 mais bien 4,7 fois plus accessible que le réseau routier. Ceci s'explique par la vitesse moyenne, qui diffère selon les deux réseaux. La vitesse moyenne d'une voiture dans Paris étant estimée à 14,1 km/h, et celle du drone étant estimée à 60 km/h, c'est bien grâce à l'écart entre les vitesses que la différence entre les indicateurs d'accessibilité se produit en grande partie. Les durées des chemins les plus courts sont donc plus importantes via le réseau routier que via le réseau drone-taxi. Notre finalité, l'indicateur d'accessibilité, nous donnant la somme de ces chemins, est donc plus important pour le réseau routier que pour le réseau drone-taxi.

4.3.2 Dégradation de l'indicateur d'accessibilité via la variation de certaines variables

Dans les deux cas où l'on cherche à dégrader l'indicateur d'accessibilité, selon la fréquentation des arcs puis selon leur longueur, celui-ci augmente en effet graduellement jusqu'à un certain seuil où il tend vers l'infini. Ceci s'explique par le fait que, notre réseau étant relativement petit (6 nœuds), le moment où il ne permet plus la desserte de tous nos nœuds arrive assez rapidement. À ce moment, le réseau reste connexe, mais comme ces arcs sont orientés, certains nœuds peuvent émettre mais pas recevoir, les rendant donc inaccessibles. De plus dans le premier cas, lorsqu'on enlève les arcs les moins fréquentés, les arcs liés à l'Arc de Triomphe sont rapidement tous retirés, du fait des plus faibles forces d'attractions et d'émissions que celui-ci produit par

On se rend compte que lorsque l'on retire tous les arcs dont la proportion de fréquentation est inférieure ou égale à 1,93%, l'accessibilité tend vers l'infini. Ceci s'explique par le fait que le réseau ne permet plus de rejoindre l'un des nœuds (Arc de Triomphe) via les autres nœuds. Le dernier arc que l'on puisse retirer en évitant cela possède une proportion de fréquentation de 1,68%. Il est donc possible de retirer 12 arcs (cases jaunies dans le tableau précédent), et la proportion de leur fréquentation est dans l'ordre, la suivante : 0,54%, 0,56%, 0,82%, 0,89%, 0,9%, 1%, 1,32%, 1,44%, 1,52%, 1,56%, 1,61%, 1,68% et correspondent dans l'ordre aux arcs suivants : Arc de Triomphe – Gare Montparnasse, Gare Montparnasse – Arc de Triomphe, Arc de Triomphe – Gare Saint-Lazare, Arc de Triomphe – Les Halles, Gare Saint-Lazare – Les Halles, Les Halles – Arc de Triomphe, Arc de Triomphe – Gare de Lyon, Gare Montparnasse – Gare Saint-Lazare, Gare Saint-Lazare – Gare Montparnasse, Gare Montparnasse – Les Halles, Gare de Lyon – Arc de Triomphe, et Les Halles – Gare Montparnasse. On obtient un indicateur d'accessibilité de 2h33. Le retrait de l'arc suivant, dont la proportion de fréquentation est égale à 1,93%, Arc de Triomphe – Gare du Nord / Gare de l'Est rendrait le nœud Arc de Triomphe inaccessible. [Annexe 3 pour visualiser le graphe correspondant]

Nous avons expérimenté une autre méthode de retrait des arcs dont la logique est « on retire les arcs les plus longs », dont les résultats de la variation de l'indicateur d'accessibilité sont visibles figures 7.

Via cette méthode, on obtient un indicateur d'accessibilité inférieur, égal à 2h05. Nous n'avons dans ce cas-là pas besoin de la méthode gravitaire pour exprimer les fréquentations des stations car on ne s'en sert pas. On peut avec cette méthode enlever jusqu'à 18 arcs, c'est-à-dire les arcs dont la longueur est supérieure à 2,98 km, avant de rendre inaccessibles certaines stations et de rendre l'indicateur d'accessibilité égal à l'infini. Ici, le retrait des arcs va se faire de manière géométrique par rapport à la matrice des distances entre chaque origine-destination (voir cases hachurées dans le tableau précédent), étant donné que ces distances sont les mêmes que l'on aille dans un sens ou dans l'autre. Dans l'ordre les arcs retirés sont donc : les 2 liant Arc de Triomphe – Gare de Lyon, les 2 liant Gare du Nord / Gare de l'Est – Gare Montparnasse, les 2 liant Gare Saint-Lazare – Gare de Lyon, les 2 liant Arc de Triomphe – Gare du Nord, les 2 liant Arc de Triomphe – Gare Montparnasse, Gare Saint-Lazare – Gare Montparnasse, les 2 liant Gare de Lyon – Gare Montparnasse, les 2 liant Gare de Lyon – Gare du Nord / Gare de l'Est, et les 2 liant Arc de Triomphe – Les Halles. Le retrait de l'arc suivant, Les Halles – Gare de Lyon (ou Gare de Lyon – Les Halles) d'une longueur de 2,98 km, rendrait inaccessible le nœud Gare de Lyon

rapport aux autres stations. Dans le deuxième cas où on retire les arcs les plus longs, les arcs liés aux Halles ont tendance à rester, ces arcs étant plus courts, du fait de la position centrale des Halles sur le réseau.

5 Conclusion

Premièrement, dans l'analyse de l'évolution de l'indicateur d'accessibilité, lorsque nous retirons les arcs les moins fréquentés, nous faisons comme si le fait de retirer un arc du réseau n'avait pas d'impact sur le reste de la fréquentation du réseau. Cependant lorsqu'on retire un arc et donc la fréquentation qui lui est associée, il faut répartir au moins une partie de sa fréquentation sur les autres arcs du réseau. Une méthode de modèle gravitaire dynamique pourrait contrecarrer ce problème, en réattribuant une partie de la fréquentation de l'arc que l'on retire, à d'autres arcs proches permettant un déplacement similaire, issus du même nœud ou de nœuds alentours selon leurs forces d'attractions et d'émissions.

Notre première méthode de retrait des arcs a une autre limite, car comme nous avons pu le voir, la station Arc de Triomphe n'est plus accessible aux bout d'un certains nombres d'arcs retirés. Cette méthode de retraits des arcs affecte plus particulièrement le retrait des arcs liés aux nœuds les moins attractifs ou émetteurs de population dans un cas, ce qui a pour conséquence de rendre des nœuds rapidement inaccessibles.

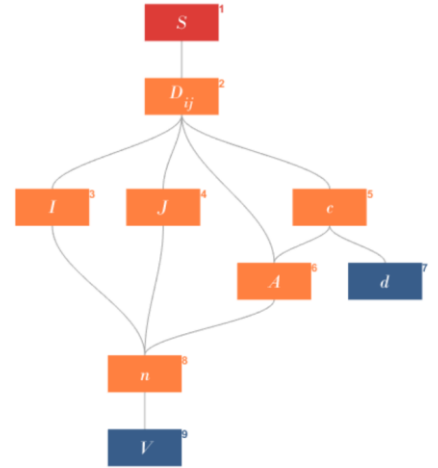
Nos deux méthodes de retrait des arcs peuvent se rapporter à un objectif global de réduction de l'espace aérien pour réduire toutes sortes de nuisances causées par le drone, et plus particulièrement notre deuxième méthode, qui retire les arcs les plus longs, en faisant l'hypothèse que ceux-ci causent le plus de nuisance à la population car ils concernent plus d'habitants. Cependant, la notion de nombre de personnes impactées ne suffit pas, il faudrait également savoir à quelle « puissance » celle-ci est impactée, un drone-taxi par heure passant devant une fenêtre, n'ayant pas le même impact sur la vie privée que cent drones-taxis par heure. Il faudrait donc également prendre en compte la fréquentation pour retirer ces arcs. Mais là encore, une limite apparaît, car le retrait des arcs les plus nuisibles, reporterait ces nuisances sur d'autres arcs. Il faudrait donc un système dynamique permettant de retirer des arcs du réseau pour minimiser l'impact des drones-taxis sur la vie privée, à l'aide d'une unité que l'on appellerait « puissance totale des nuisances sur la vie privée ».

Notre étude nous aura permis d'avoir une première approche de l'accessibilité d'un potentiel réseau de drone-taxi implanté dans une ville. Cette accessibilité est dans notre cas 4,7 fois supérieure à celle du réseau routier. De plus, il ne s'agit ici que de déplacements relativement courts dans Paris intramuros (2 à 6 km), ayant un effet de réduction de la vitesse moyenne (60 km/h dans notre cas), car les phases d'atterrissage / décollage et d'accélération / décélération ne sont pas négligeables. Au contraire, des liaisons plus longues comme Aéroport Roissy-Charles de Gaulle – Paris Centre (d'une longueur de 23 km, et qui serait probablement l'une des liaisons les plus attendus) où la distance sur laquelle le drone-taxi pourrait voler à sa vitesse de croisière (environ 120 km/h) serait plus importante, permettrait d'augmenter la vitesse moyenne, et d'accroître la meilleure accessibilité offerte par le réseau drone-taxi que par le réseau routier.

Annexe 1 : Système permettant de calculer l'accessibilité d'un réseau complet

$$S = \text{accessibilite}(V, d)$$

Calcul de l'accessibilité d'un réseau complet



Vincent BERNARD

Figure 3 : Système logique permettant de calculer l'indicateur d'accessibilité d'un réseau complet

Indicateur d'accessibilité (somme des chemins les plus courts) en h

$$1 \quad S = \sum (D_{ij})$$

Chemins les plus courts pour relier i à j en km

$$2 \quad D_{ij} = \text{dijkstra}(A, c, I, J)$$

Ensemble des origines

$$3 \quad I = (1 : n)$$

Ensemble des destinations

$$4 \quad J = (1 : n)$$

Matrice des coûts en fonction de la distance en km

$$5 \quad c = [A, d]$$

Matrice d'adjacence du réseau complet

$$6 \quad A = \text{proprete}(n)$$

Durée de parcours pour chaque arc en min

$$7 \quad 1.9398 \leq d \leq 6.3824$$

Nombre de nœuds du réseau

$$8 \quad n = \text{card}(V)$$

Coordonnées des sommets du réseau

$$9 \quad 2.2958 \leq V \leq 48.8783$$

Figure 4: Variables du système logique

% Généré automatiquement par toaster systems - Copyright : Mindjid Maizia - PolyTech Tours 2018
 % L'auteur n'est nullement responsable des éventuelles erreurs de fonctionnement de
 % l'application
 % Tout usage des produits toaster doit être signalé par la référence :
 % Mindjid Maizia, toaster integral, tools for model computing, PolyTech Tours, 2016-2022

```
V = input.V ;
d = input.d ;
n = F126986816 ( V ) ;
A = F814723686 ( n ) ;
I = F567779031 ( n ) ;
J = F316320497 ( n ) ;
c = F91606263 ( A , d ) ;
D_i_j = F3555447 ( A , I , J , c ) ;
S = F379941220 ( D_i_j ) ;
output.n = n ;
output.A = A ;
output.I = I ;
output.J = J ;
output.c = c ;
output.D_i_j = D_i_j ;
output.S = S ;
```

```
function n = F126986816 ( V )
% Nombre de noeuds du réseau
n = size(V,1);
end

function A = F814723686 ( n )
% Matrice d'adjacence du réseau complet
[i,j]=meshgrid(1:n,1:n);
A=[i(:) , j(:)];
A(i(:) == j(:),:)=[];
end
```

```
function I = F567779031 ( n )
% Ensemble des origines
I=1:n;
end
```

```
function J = F316320497 ( n )
% Ensemble des destinations
J=1:n;
end
```

```
function c = F91606263 ( A , d )
% Matrice des coûts en fonction de la distance
c=[A,d];
end
```

```
function D_i_j = F3555447 ( A , I , J , c )
% Chemins les plus courts pour relier I à J
D_i_j=inf;
if ~isempty(A)
D_i_j=dijkstra( A , c , I , J);
end
end
```

```
function S = F379941220 ( D_i_j )
% Indicateur d'accessibilité (somme des chemins les plus courts)
S=sum(D_i_j(:))/60;
end
```

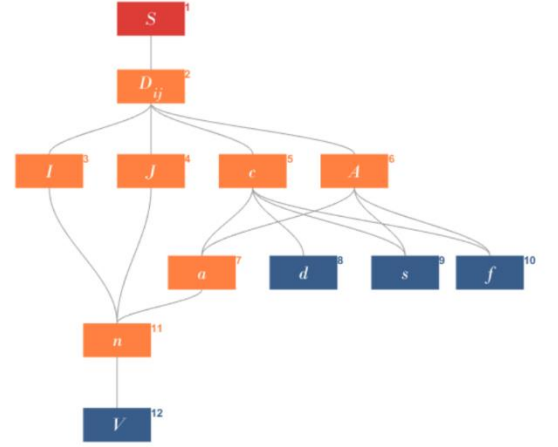
end
 % Copyright : Mindjid MAIZIA 2016-2022 , PolyTech Tour

Figure 9 : Code du système logique

Annexe 2 : Système permettant de calculer l'accessibilité d'un réseau selon un seuil d'arcs à retirer

$S = \text{accessibiliteSeuil}(V, d, s, f)$

Calcul de l'accessibilité d'un réseau complet en fonction d'un seuil



Vincent BERNARD

Figure 10: Système logique permettant de calculer l'indicateur d'accessibilité d'un réseau complet auquel des arcs ont été retirés selon un seuil

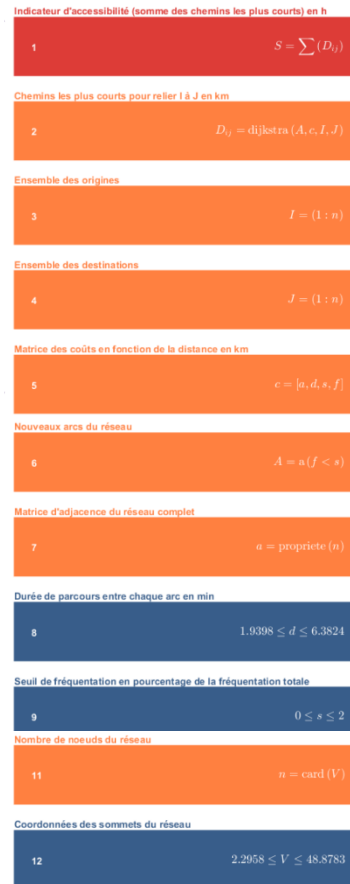


Figure 11: Variables du système logique

Annexe 3 : Comparaison entre le réseau drone-taxi avant et après le retrait d'arcs

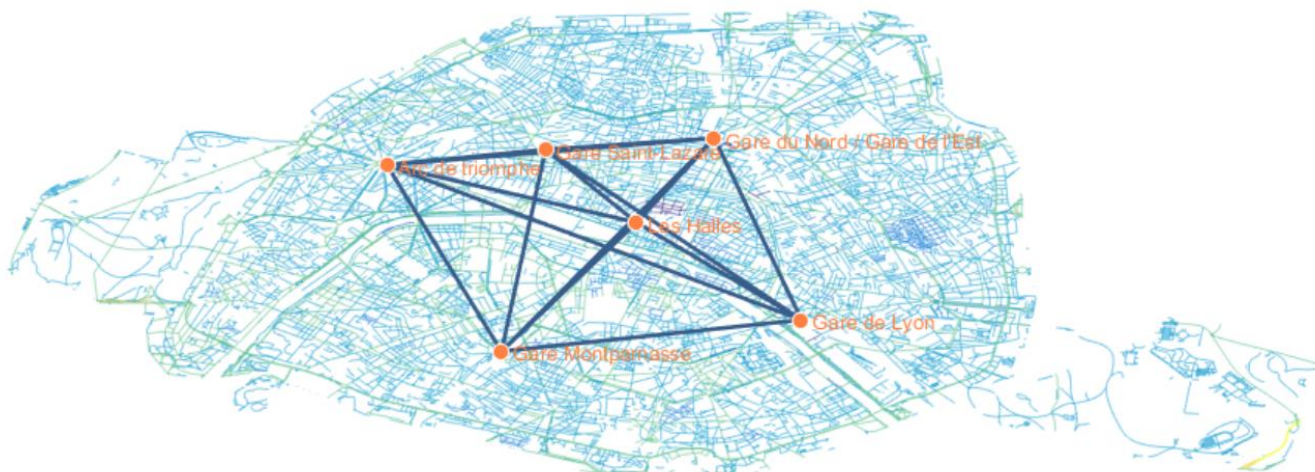


Figure 12: Réseau complet de drone-taxi à Paris

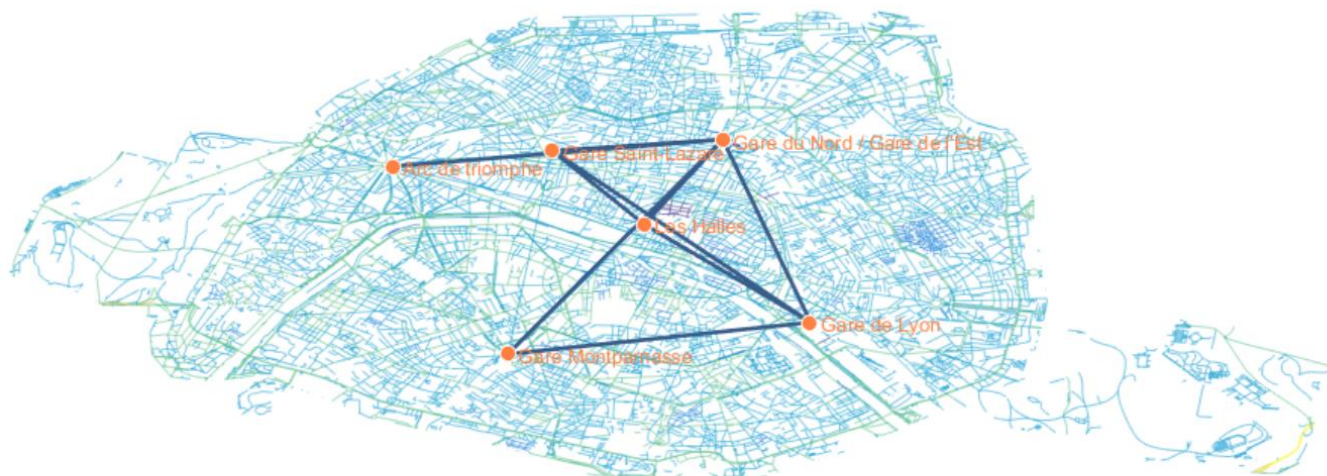


Figure 13: Réseau de drone-taxi auquel ont été retirés tous les arcs d'une proportion de fréquentation inférieur ou égale à 1,93%

Invisible sur les figures, chaque arc visible du réseau se compose en fait de 2 arcs superposés, orientés inversement. Par exemple pour l'arc visible Gare Montparnasse – Gare de Lyon, il y a également un arc superposé à celui-ci, dont le déplacement est dans le sens inverse, de Gare de Lyon à Gare Montparnasse. L'arc restant entre Arc et Triomphe et Gare Saint-Lazare après le retrait de tous les arcs d'une proportion de fréquentation inférieure ou égale à 1,93%, ne permet que le déplacement à partir de l'Arc de Triomphe vers la Gare Saint-Lazare, autrement dit, l'Arc de Triomphe n'est plus accessible via les autres stations.

Annexe 4 : Réseau drone-taxi après le retrait d'arcs d'une longueur inférieure à 3,5 km

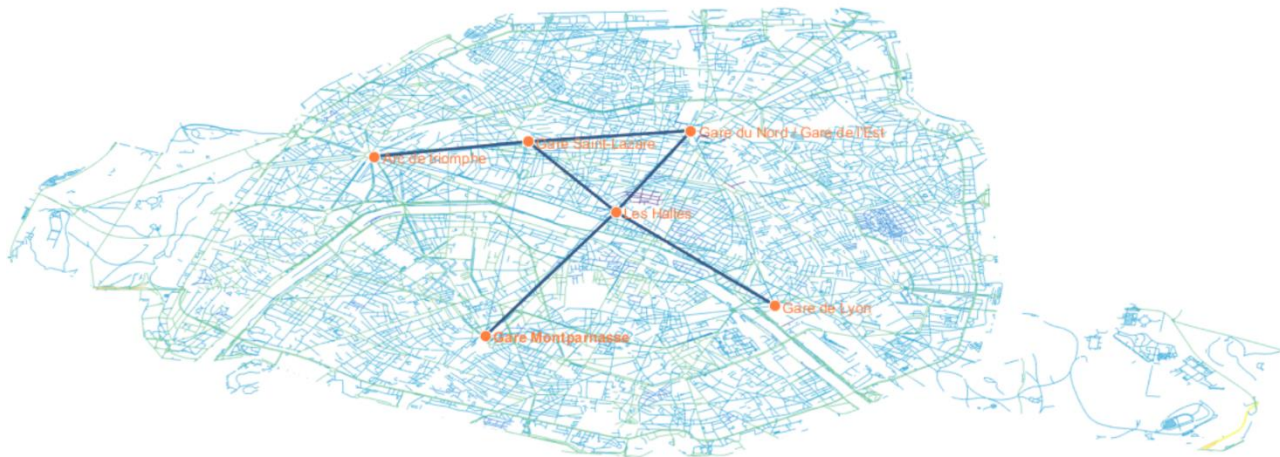


Figure 14 : Réseau de drone-taxi auquel ont été retirés tous les arcs d'une longueur supérieure à 2,98 km hormis l'un des deux arcs liant Les Halles – Gare de Lyon

Cette figure nous montre le réseau de drone auquel ont été retirés tous les arcs d'une longueur supérieure à 2,98 km hormis l'un des deux arcs liant Les Halles – Gare de Lyon. Cette configuration permet actuellement au réseau de fonctionner. Cependant, avec le retrait du prochain arc le plus long, correspondant aux deux arcs liant Les Halles – Gare de Lyon, l'accessibilité deviendrait nulle, car dans un cas (retrait de Les Halles - Gare de Lyon), la Gare de Lyon ne pourrait qu'émettre des passagers, et dans l'autre cas (retrait de Gare de Lyon – Les Halles), celle-ci ne pourrait qu'en recevoir.

6 Bibliographie

COROT, Léa. « Plus de 60 villes seront dotées de services de taxis volants en 2035, selon le cabinet Oliver Wyman ». L'Usine Digitale [en ligne], n°, 2019 [Consulté le 11 Décembre 2019]. Disponible à l'URL : <https://www.usine-digitale.fr/article/plus-de-60-villes-seront-dotees-de-services-de-taxis-volants-en-2035-selon-le-cabinet-oliver-wyman.N901639>

Data Gouv [Consulté le 11 Décembre 2019]. Disponible à l'URL : <https://www.data.gouv.fr/fr/datasets/carte-des-departements-2-1/>

EASA, SPECIAL CONDITION Vertical Take-Off and Landing (VTOL) Aircraft [2019]. Disponible à l'URL : <https://www.easa.europa.eu/sites/default/files/dfu/SC-VTOL-01.pdf>

MAIZIA, Mindjid. *Systèmes urbains et transports*. Cours en ligne : Polytech Tours. Disponible à l'URL : https://b0ad29e6-fb46-404d-8ea1-52cfaa356ac6.filesusr.com/ugd/3f240d_dff5469de7a24d73a5a57c799e8f0423.pdf

MCNABB, Miriam. « This is Real : A Full-Scale Air Taxi VoloPort in Singapore ». Dronelife, 2019, [Consulté le 11 Décembre 2019]. Disponible à l'URL : <https://dronelife.com/2019/10/21/this-is-real-a-full-scale-air-taxi-voloport-in-singapore/>

Observatoire des déplacements à Paris. *Le bilan des déplacements en 2017 à Paris*. [en ligne] [Consulté le 11 Décembre 2019]. Disponible à l'URL : http://temis.documentation.developpement-durable.gouv.fr/docs/Temis/0033/Temis-0033289/8724_2017.pdf

RICHER, Cyprien et PALMIER, Patrick. *Mesurer l'accessibilité territoriale par les transports collectifs : Proposition méthodologique appliquée aux pôles d'excellence de Lille Métropole*. Rapport en ligne : Département de géographie de l'Université Laval, 2012. Disponible à l'URL : <https://halshs.archives-ouvertes.fr/halshs-00798642/document>