HAL open science

Projet Predit Mobilletic : Analyse de la mobilité par les données billettiques Livrable5 : Evaluationdudécalagedeshorairesdel'université

Mohamed Khalil El Mahrsi, Nicolas Coulombel, Emmanuel Munch

To cite this version:

Mohamed Khalil El Mahrsi, Nicolas Coulombel, Emmanuel Munch. Projet Predit Mobilletic : Analyse de la mobilité par les données billettiques Livrable5 : Evaluationdudécalagedeshorairesdel'université. [Rapport de recherche] Ministère de l'Écologie et du Développement Durable et de l'Énergie. 2017. hal-03104433

HAL Id: hal-03104433

https://hal.science/hal-03104433v1

Submitted on 8 Jan 2021

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.

Projet Predit Mobilletic :
Analyse de la mobilité par les données billettiques

Livrable 5 :
Evaluation du décalage des horaires de l'université

1. Introduction

1.1 Inscription du livrable au sein du projet MOBILLETIC

Dans le cadre du projet MOBILLETIC, l'une des thématiques de recherche a consisté à étudier dans quelle mesure les données massives peuvent contribuer à l'évaluation de politiques publiques de transport. Traditionnellement, l'évaluation ex-post de projets (ou politiques) de transport repose sur l'utilisation d'enquêtes (comptages, enquêtes Origine-Destination, …), éventuellement conjuguées à un modèle de prévision de la demande de transport. Or la réalisation d'enquêtes soulève deux principales difficultés. La première est la faisabilité tant économique - les enquêtes ayant souvent un coût très élevé – qu'opérationnelle – la réalisation d'enquête terrain étant de plus en plus difficile à organiser, avec des délais de plus en plus longs face à la réticence croissante des gens à participer. La seconde est que face à cette première difficulté, les enquêtes ne fournissent typiquement qu'un volume limité de données. Le nombre de personnes interrogées est souvent restreint, avec une profondeur temporelle également limitée (la personne enquêtée ne devant fréquemment renseigner ses déplacements que sur une journée). Les données massives présentent l'intérêt majeur d'être en grande partie exemptes de ces difficultés. De manière générale, celles-ci sont peu onéreuses, disposent d'un fort taux de couverture et d'une grande profondeur temporelle. C'est le cas des données billettiques. En revanche, les données massives offrent souvent des informations moins précises que les enquêtes (les données billettiques sont, par exemple, anonymisées et ne contiennent donc pas d'informations socio-économiques), ce qui limite les possibilités d'analyse.

Nous allons illustrer ces différents points à travers l'évaluation du décalage des horaires de l'Université Rennes 2, que nous réaliserons à l'aide des données billettiques. En décalant les horaires de cours de la moitié des étudiants de Rennes 2 de façon à éviter que tous les étudiants prennent le métro à la même heure, la mesure vise à lisser la pointe de trafic et à réduire ainsi la congestion dans le métro. L'objectif de ce livrable est d'étudier l'impact de la mesure sur le fonctionnement du métro rennais, en analysant les heures de départ des usagers (avec ou sans décalage), et la congestion qui en résulte. Une attention particulière sera prêtée à l'influence de la variabilité quotidienne des déplacements sur les résultats. Pour ce faire, nous tirerons parti de la profondeur temporelle des données billettiques, qui permet de reproduire la même analyse sur autant de journées que souhaité (évidemment dans la limite des données disponibles).

Ce livrable correspond au livrable de la tâche 6 tel qu'indiqué dans l'annexe scientifique du projet MOBILLETIC. Bien que traitant des mêmes thèmes que le livrable prévu originellement (choix de l'heure de départ, variabilité quotidienne), nous avons choisi de légèrement en adapter le contenu. Suite aux premiers échanges avec Keolis Rennes lors du lancement du projet, il nous est en effet apparu que le décalage des horaires à l'Université Rennes 2 représentait une opportunité scientifique unique. Comme nous allons maintenant l'exposer, les mesures d'étalement des horaires de travail ont été amplement étudiées dans la littérature, mais uniquement de façon théorique (à notre connaissance). Il s'agirait donc de la première évaluation empirique d'une telle mesure (ici dans le cas d'heures de cours et non d'heures de travail, mais pour le même résultat en pratique).

1.2 Contexte scientifique

La congestion dans les systèmes de transport est source de nombreuses inefficacités économiques. Celles-ci concernent en premier lieu les conditions de transport (temps passé en congestion, inconfort, risque d'accident accru, …), mais également les activités suivant ou précédant le déplacement (retard à un rendez-vous, départ anticipé du lieu de travail en prévision des bouchons, perte de productivité liée à l'anxiété générée par la congestion, …). Dans de nombreuses métropoles, la lutte contre la congestion représente donc l'une des priorités, si ce n'est la priorité, dans le domaine des transports.[1] La solution traditionnellement employée consistait à augmenter l'offre de transport via la construction de nouvelles infrastructures. Cependant, cette méthode est en général onéreuse pour la collectivité, requiert du foncier se trouvant en quantité de moins en moins abondante en cœur d'agglomération, et pourrait même *in fine* s'avérer contre-productif à long terme en ce que l'accroissement de l'offre favoriserait la croissance du trafic (Downs 1962; Duranton et Turner 2011).

Faisant acte de ces diverses difficultés, les regards se sont en conséquence portés sur comment optimiser l'usage des infrastructures existantes à travers des mesures de gestion de la demande, nommées *Travel Demand Management (TDM) policies* en anglais. Suite aux travaux précurseurs de Vickrey (1969, 1973), la tarification de la congestion a ainsi fait l'objet d'un examen approfondi par la

[1] C'est le cas en Île-de-France, où la politique lancée par Valérie Pécresse vise à réduire la congestion routière (http://bfmbusiness.bfmtv.com/france/valerie-pecresse-s-attaque-aux-bouchons-routiers-en-ile-de-france-964919.html).

littérature économique (par exemple Arnott et al. (1993) ou Braid (1996; 1989) pour ne citer qu'eux). Le principe consiste à mieux répartir la demande de transport en incitant les usagers à décaler leur heure de départ et à voyager à des périodes moins chargées par des stratégies de tarification adaptées (aboutissant en règle générale à un péage variant dynamiquement selon le niveau de trafic attendu). Les cas de mise en œuvre demeurent rares néanmoins, du fait de la complexité technique souvent inhérente à un tel projet, et face à l'impopularité et l'incompréhension que suscitent de telles mesures. Une alternative permettant de parvenir à un résultat similaire consiste à étaler les heures de travail. L'effet sur la demande de transport est encore plus immédiat, étant produit non pas à travers un arbitrage entre l'heure d'arrivée souhaitée et le niveau du péage comme en tarifant la congestion, mais directement au niveau des préférences des usagers. Les mesures d'étalement des horaires de travail ne présentent de surcroît aucune difficulté technique, et s'avèrent – cerise sur le gâteau - peu coûteuses à mettre en œuvre puisqu'elles ne nécessitent virtuellement aucun investissement matériel, mais uniquement des réunions de préparation et de concertation. Dans la lignée de Henderson (1981), de nombreux papiers ont étudié l'impact de telles mesures d'un point de vue théorique (Arnott 2007; Arnott, Rave, et Schöb 2005; Fosgerau et Small 2014; Mun et Yonekawa 2006; Takayama 2015; Wilson 1992). Cependant, les travaux empiriques sur ce thème demeurent extrêmement rares à notre connaissance.

Ce livrable vise à combler cette lacune en étudiant le décalage des horaires de cours à l'Université Rennes 2, cas d'étude que nous allons maintenant présenter.

2. Présentation du cas d'étude

Rennes est la 3ème plus petite ville au monde à disposer d'un réseau de métro. Celui-ci est actuellement constitué d'une seule ligne, nommée ligne a.[2] D'une longueur de 9,4 km, la ligne traverse Rennes selon un axe Nord-Sud, desservant de nombreuses centralités telle que la gare SNCF, la place Sainte-Anne, et le campus Villejean de l'Université Rennes 2 (Figure 1). Le métro est un système automatique basé sur la technologie VAL (Véhicule Automatique Léger), permettant d'atteindre une vitesse commerciale de 35 km/h ainsi qu'une fréquence maximale d'un véhicule toutes les 100s (soit toutes les 1min40s). Etant donnée la courte longueur de la ligne et la vitesse commerciale élevée, la durée moyenne d'un trajet en métro est de seulement 6 minutes, sachant qu'il faut 16 à 17 minutes pour parcourir l'ensemble de la ligne.[3]

[2] Une seconde ligne (la ligne b) est actuellement en travaux, avec une mise en service prévue pour 2019.

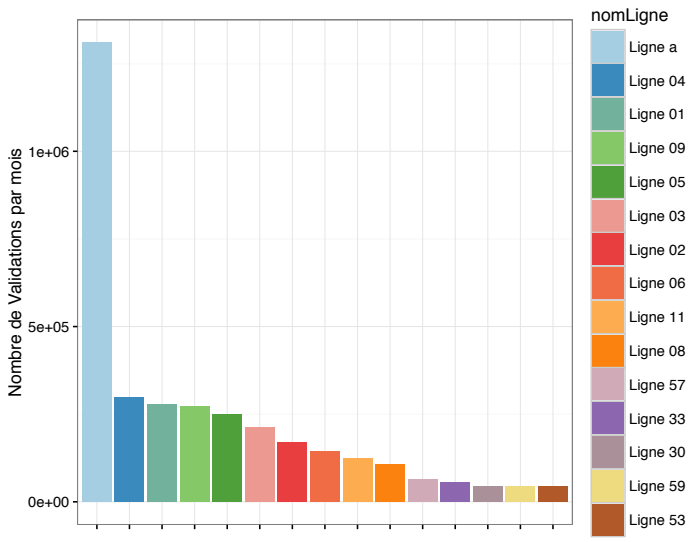
[3] Les informations présentées dans l'alinéa ont été obtenues auprès de Keolis Rennes lors de réunions de travail.

Figure 1: Plan du métro rennais

En termes de capacité, les rames de métro sont composées de 2 voitures pouvant accueillir 80 personnes chacune (22 places en station debout, 59 places en station assise, et 1 place handicapée), soit une capacité nominale totale de 160 personnes par véhicule.

Accueillant en moyenne près de 140 000 voyageurs par jour en 2014, la ligne de métro a représente la ligne de transport en commun la plus fréquentée du réseau STAR de Rennes métropole ; la seconde étant la ligne de bus 4, avec une fréquentation plus de quatre fois plus faible (Figure 2.a). La ligne a relie également les principales stations du réseau, avec en premier lieu et par ordre décroissant de fréquentation : République, Villejean-Université, Sainte-Anne et Gares (Figure 2.b).

(a)



(b)

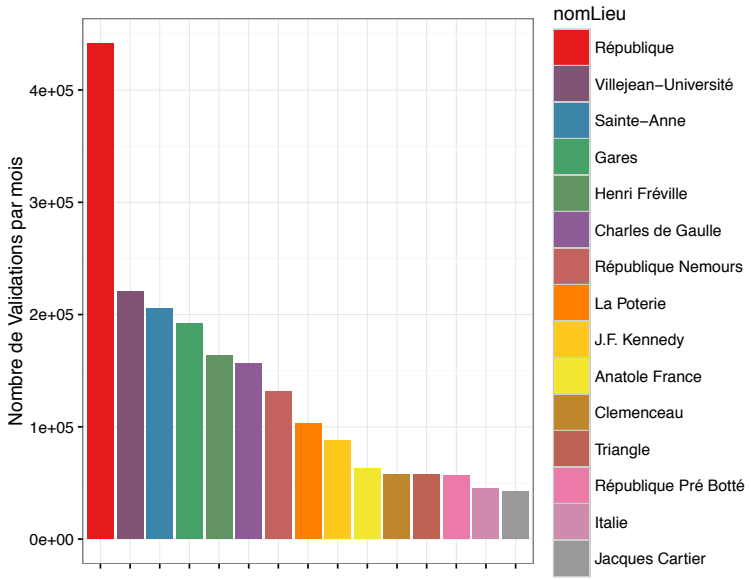


Figure 2 : (a) Nombre moyen de validations par mois pour les 15 lignes les plus fréquentées. (b) Nombre moyen de validations bus et métro par mois pour les 15 stations les plus fréquentées (avril-octobre 2014).

En dépit de la fréquence élevée permise par l'automatisation, l'unique ligne de métro de la ville n'échappe pas au phénomène classique de saturation aux heures de pointe. En 2010, la ville de Rennes et le transporteur Keolis ont réussi à identifier une des principales causes de la charge excessive des rames à l'heure de pointe du matin. D'après leurs observations, la surcharge des rames (200% de taux de remplissage à certaines stations) au moment de « l'hyperpointe » matinale est en grande partie générée par la mobilité des étudiants se rendant à l'Université de Rennes 2. En effet, alors que la totalité des étudiants commencent leur cours à 8h15, les tronçons précédant l'arrivée à l'Université se trouvent particulièrement saturés vers 8h du matin.

Cette saturation lors de l'hyperpointe génère plusieurs désagréments pour les usagers. Premièrement, un voyageur peut être amené à laisser passer un voire plusieurs métros car il n'y a plus de place à bord, provoquant un allongement des temps de parcours. Une fois à bord des rames, les usagers doivent ensuite subir l'inconfort lié à l'encombrement (inconfort pouvant revêtir plusieurs formes, détaillées dans Haywood, Koning, et Monchambert 2015). Enfin, pour les usagers (majoritairement étudiants) sortant à la station Villejean-Université, les analyses par caméra de surveillance ont révélé un problème de sécurité : l'unique escalier de sortie ne permettait pas toujours d'évacuer correctement le trop grand flux de voyageurs sortant d'un même métro avant l'arrivée du métro suivant.

Une première réponse classique pour réduire la saturation consiste à augmenter l'offre de transport, avec souvent un coût élevé pour la collectivité. Rennes Métropole et Keolis estimaient ainsi à l'époque que l'achat de 3 rames supplémentaires aurait permis de ramener la situation à un niveau acceptable, pour un investissement évalué à 12 millions d'euros. Finalement, et après plus d'un an de concertation, le Bureau des Temps de Rennes convainc en 2011 le président de l'Université qu'il peut améliorer le confort du métro en étalant les horaires de début de cours et ainsi rendre service à la collectivité et au transporteur. En 2012, il est décidé que 6000 étudiants (licence 3 et master) commenceront à 8h15 et 8000 (licence 1 et 2) à 8h30. Après un an d'expérimentation, les retours paraissent concluants puisque les usagers, tout comme les représentants du personnel universitaire et des étudiants, semblent satisfaits du changement opéré. Ces appréciations qualitatives sont corroborées par des comptages, faisant office d'évaluation ex-post de la mesure. La charge moyenne du métro aux stations situées en amont de l'Université a ainsi été comparée durant une semaine avec celle mesurée avant le décalage. Les comparaisons observées révèleront que, suite à l'instauration du décalage des horaires, la charge des rames entre 8h et 8h15 a diminué de 17% en moyenne (Reeves et Dameron 2014).

A la lumière de ces résultats, le décalage des horaires de cours sera durablement institué. Pour autant, l'évaluation des effets de cette politique temporelle ne s'appuie que sur des « retours » et sur des comptages dont la représentativité demeure limitée puisque réalisés au cours d'une unique semaine d'enquête. L'analyse des données billettiques sur une plus grande échelle de temps va nous permettre de consolider et d'approfondir l'évaluation de cette politique publique.

3. Méthodologie

Le présent travail vise à étudier les effets du décalage des horaires de cours à l'Université Rennes 2 sur le fonctionnement du métro rennais. Nous cherchons en particulier à confirmer si cette mesure a contribué à lisser l'hyperpointe, c'est-à-dire à mieux répartir les usagers sur l'heure de pointe du matin (de 7h45 à 8h30) pour limiter la saturation des rames de métro et l'affluence excessive sur les quais. Le travail vise également à établir une première évaluation socioéconomique de la mesure. Enfin, une attention particulière sera portée à la variabilité quotidienne des résultats.

Nous commençons par préciser le champ de l'étude (3.1), puis exposons la méthodologie générale (**Erreur ! Source du renvoi introuvable.**), et détaillons les différentes étapes de calcul (3.3).

3.1 Champ de l'étude

Comme indiqué en tête de partie, ce travail vise à étudier les effets du décalage des horaires de cours sur la congestion du métro. Les effets de productivité et de désynchronisation tels qu'énoncés par Henderson (1981) ne sont pas intégrés à notre analyse. Le décalage n'étant que d'un quart d'heure, nous supposons que ces effets sont de second ordre par rapport aux effets sur la congestion du métro. Concernant les effets de productivité par exemple, la mesure implique en premier lieu des étudiants et en plus faible nombre leurs professeurs, et sépare de surcroît des étudiants d'années différentes (licence 1 et 2 d'une part, licence 3 et master d'autre part). Les effets d'agglomération associés à la coprésence ou non des deux groupes séparés sont donc très probablement négligeables à l'échelle du quart d'heure, justifiant notre hypothèse.

Afin d'en limiter la complexité, nous restreignons également l'analyse aux déplacements effectués en métro. Nous ignorons donc les potentiels effets de décongestion du réseau de bus et du réseau routier. Le phénomène d'hyperpointe du métro étant à l'origine du projet de décalage des horaires de cours, nous faisons l'hypothèse que la mesure impacte au premier chef ce mode de transport, et n'affecte que marginalement les autres modes. Comme l'analyse le confirmera a posteriori dans le cas du métro (en Section 4), la mesure reste d'ampleur limitée au final (au regard de l'ensemble des déplacements de l'agglomération rennaise), de sorte que l'on peut supposer que les effets sur la

congestion routière sont à fortiori minimes car plus diffus par nature.[4] Le métro offrant un accès privilégié au campus par les transports en commun, il est de même probable que les effets sur le réseau de bus soient limités (étant comme pour la route plus diffus que les effets sur le métro). Enfin, et encore une fois au regard de l'ampleur limitée de la mesure, nous postulons que le décalage des horaires de cours à l'université n'a d'effet que sur le choix d'heure de départ des usagers du métro. Nous supposons en particulier que la mesure n'engendre ni report modal, ni demande induite. Au vu des différentes hypothèses, et en particulier de la dernière (non prise en compte du report modal et de la demande induite), les résultats obtenus représentent donc en toute vraisemblance une borne inférieure des bénéfices générés par la mesure.

Au final, la période d'analyse couvre l'ensemble des déplacements en métro, pour une période courant du 12 janvier au 10 avril 2015, à l'exclusion des week-ends et des vacances scolaires (du lundi 16 février au vendredi 20 février). Nous ne considérons par ailleurs que les déplacements ayant lieu en matinée, étant donné que la mesure n'affecte que les horaires des cours du matin.

3.2 Méthodologie générale

Conformément à la méthodologie standard d'évaluation des politiques publiques, les effets du décalage sont évalués en comparant la situation actuelle (dans laquelle les horaires de l'université ont été décalés) à la situation contrefactuelle (dans laquelle un tel décalage n'aurait pas été mis en place). Pour chaque situation - ou scénario - nous caractérisons le fonctionnement du métro et la qualité de service à l'aide de divers indicateurs, dont principalement : le taux de validation, la charge des rames, et le nombre de montée différées (fois où un usager n'a pas pu monter à bord car la rame était pleine). La situation de chaque individu est également appréhendée à travers son coût généralisé de transport ; cela nous permettra *in fine* d'esquisser une première évaluation socio-économique de la mesure.

La méthode de calcul repose sur trois éléments principaux: 1) l'analyse des données billettiques pour reproduire les déplacements en métro, 2) une procédure statistique pour détecter les étudiants,

---

[4] Le campus disposant de plusieurs accès routiers (avenue Charles Thillon, rue de Brest, et pour les étudiants venant de plus loin N136, N12, D137), de sorte que les effets potentiels de décongestion en sont réduits d'autant, contrairement au métro pour lequel il n'existe qu'une seule ligne (qui concentre donc tous les effets).

estimer l'heure de cours, et prédire l'heure de départ dans la situation contrefactuelle et 3) un modèle d'affectation pour estimer la charge des véhicules et le nombre d'usagers ne pouvant monter à bord. Une des principales originalités de ce travail réside dans la manière dont est traité le contrefactuel. Traditionnellement, la situation contrefactuelle est représentée par un groupe de contrôle. Un modèle économétrique mesure ensuite les effets de la politique publique à évaluer, en comparant le groupe traité au groupe de contrôle toutes choses égales par ailleurs. Le modèle économétrique permet en particulier de contrôler l'effet d'éventuelles différences de caractéristiques entre le groupe traité et le groupe de contrôle, ainsi que l'effet d'autres variables contextuelles pouvant varier au cours du temps. Dans le cas présent, le contrefactuel est obtenu directement par micro-simulation. Nous disposons donc pour chaque individu du coût généralisé de déplacement dans les deux situations, actuelle et contrefactuelle ; les effets du décalage peuvent alors être mesurés pour chaque individu directement comme la différence entre ces deux coûts généralisés, sans nécessiter le recours à un modèle économétrique.

Deux éléments motivent le choix de recourir à la micro-simulation et non à un modèle économétrique pour évaluer les effets du décalage. D'une part, déterminer un groupe de contrôle s'avère difficile, pour ne pas dire impossible, dans le cas d'espèce. Au sein de la population estudiantine, les étudiants de niveau licence 3 et master ont conservé les mêmes horaires qu'avant la mesure, de sorte qu'on serait tenté de les assimiler au groupe de contrôle ; le reste des étudiants - dont les horaires ont été modifiés de 8h15 à 8h30 - représenteraient le groupe traité. Cependant, comme le métro est sujet à divers phénomènes de congestion (congestion en véhicule, file d'attente pour monter dans le métro), les choix de déplacement des individus traités (les étudiants commençant à 8h30) affectent également la situation des individus non traités, de sorte qu'*in fine* tous les individus sont impactés par la mesure. Une solution possible consisterait à procéder à une évaluation avant/après, en comparant les niveaux de fréquentation du métro pour deux semaines de cours comparables, et situées à un an d'intervalle. Or, l'usage du métro varie fortement d'une année sur l'autre sous l'effet de nombreux facteurs tels que la croissance de la population, en particulier estudiantine pour le cas qui nous intéresse, l'évolution des comportements, des politiques de mobilité … Entre 2011 et 2012, la fréquentation du métro a ainsi augmenté de 6% entre 7h40 et 8h50, contre 3% en journée (Reeves et Dameron 2014). Etant donné ces multiples sources de

variation, les effets propres à la mesure risquent d'être difficiles à identifier par une simple méthode avant/après. Un second argument majeur plaidant pour l'usage de la micro-simulation réside dans la forte complexité des phénomènes de congestion (incluant la congestion en véhicule ainsi que le phénomène de file d'attente à quai). Ceux-ci incluent des fortes non-linéarités, des effets de seuil, ainsi que des effets de propagation dans l'espace et dans le temps, qui obèrent l'usage de modèles économétriques.

3.3 Méthodologie détaillée

Dans le scénario actuel avec décalage, le calcul procède en trois étapes principales (Figure 3). Après avoir choisi la journée à analyser, nous reproduisons à partir des données billettiques l'ensemble des déplacements en métro sur la matinée. Puis, nous déterminons la charge des véhicules en rapportant l'offre (table horaire, capacité des rames) à la demande (les déplacements déterminés préalablement). Enfin, nous opérons le calcul des différents indicateurs à l'aide des données obtenues.

Dans le scénario contrefactuel (sans décalage), le calcul comporte une étape préliminaire (Figure 3). Celle-ci vise à identifier les étudiants de Rennes 2 ayant été décalés, et à établir quelle aurait été leur heure de départ si le décalage n'avait pas été instauré.

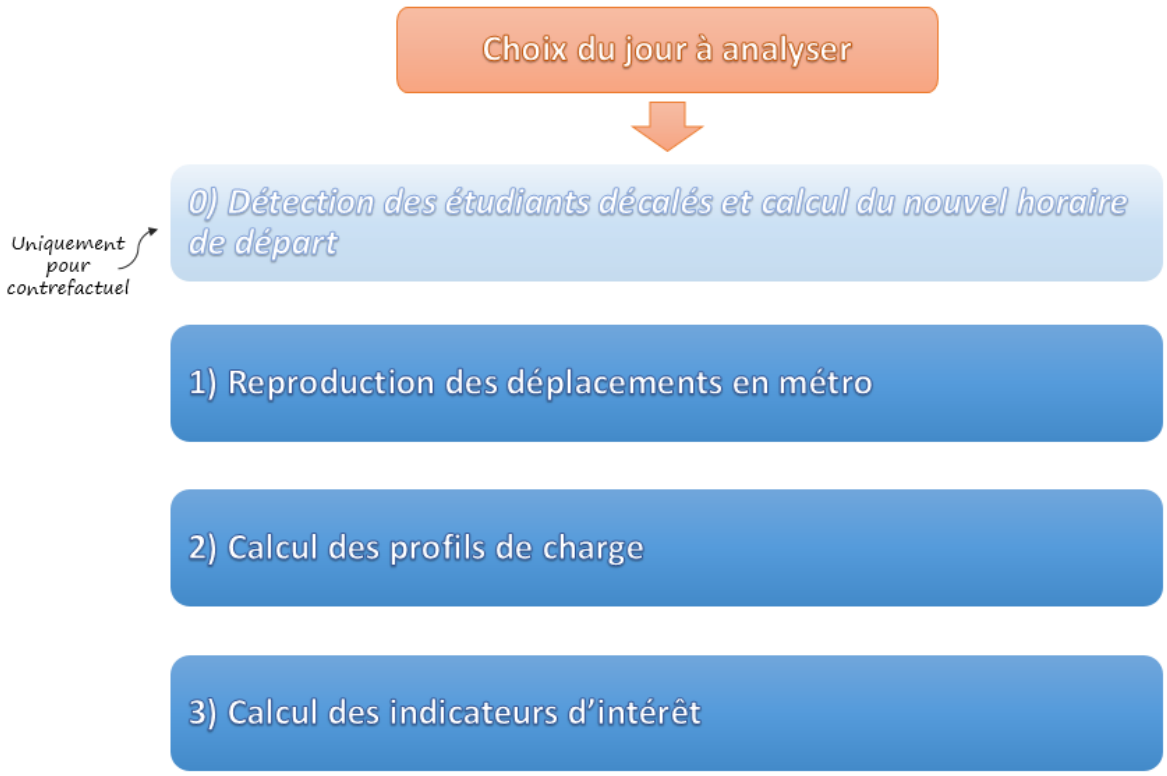


Figure 3 : Schéma des étapes de calcul pour les situations actuelle et contrefactuelle

Nous présentons maintenant chaque étape en détail.

a) Reconstitution de la demande de déplacement à l'aide des données billettiques

Considérons une matinée donnée. Pour reconstituer les déplacements en métro, nous commençons par recenser l'ensemble des validations correspondant au métro. Pour chacun de ces déplacements, nous disposons de l'origine (station de validation O), de la ligne utilisée (ligne L) et de l'heure de départ (heure de validation t_0), mais pas de la destination. Celle-ci est inférée selon un algorithme en 2 passes :

<u>1ère passe</u>

Selon une méthodologie répandue dans le cas de données billettiques (Barry et al. 2002; Trépanier, Tranchant, et Chapleau 2007), la destination est prédite en considérant le lieu soit de la prochaine validation (auquel cas on suppose que l'usager descend à une station proche dudit lieu), soit de la première validation si la validation courante correspond au dernier déplacement de la journée (auquel cas on suppose que l'usager rentre chez lui, et retourne donc près de son premier point de validation).

Dans le premier cas, soit O' la prochaine station de validation. On recherche la station de validation D la plus proche de O' sur la ligne de transport courante L. Par exemple, si l'usager a validé dans le métro à la station Gares, et que sa prochaine validation correspond à un bus, on cherchera la station de métro la plus proche de l'arrêt de bus correspondant. Si les stations D et O' sont distantes de moins de 500m, on affecte D comme destination à l'individu, sinon on rejette D et aucune destination n'est affectée.

Dans le second cas, s'il s'agit de la dernière validation de la journée et que ce n'est pas la première, on cherche la station D la plus proche de la première station H (pour *home*) de validation de la journée. Encore une fois, si D et H sont distants de plus de 500m, D est rejetée.

2nde passe

Si elle n'a pu être inférée en 1ère passe, la destination est affectée aléatoirement selon la distribution des destinations inférées avec succès lors de cette 1ère passe, conditionnellement à la station de départ. De nouveau dans le cas du métro, considérons par exemple un usager ayant validé à la station Gares, et pour lequel aucune destination n'a pu être inférée lors de la 1ère passe. On observe les destinations obtenues lors de la 1ère passe pour les autres usagers ayant également pris le métro à la station Gares. Si on observe que 15% de ceux-ci sont descendus à République, alors on considérera que notre usager a également 15% de chance de descendre à République, de même pour les autres stations.

Pour la matinée du 3 mars 2015, 75% des déplacements en métro ont été traités en une seule passe. Mais si l'on considère uniquement les étudiants de Rennes 2 (tels que détectés par notre algorithme présenté plus loin en d)), ce chiffre s'élève à 96%. La destination a donc été affectée aléatoirement (selon les probabilités observées) pour uniquement 4% des étudiants. L'algorithme de prédiction de destination semble donc particulièrement efficace dans le cas de la population estudiantine, ce qui est souhaitable car cette population est au cœur de notre analyse. Ce premier résultat pourrait traduire trois possibilités :

1) les étudiants utilisent les transports en commun plus intensément que les autres usagers, de sorte que la probabilité qu'il y ait une autre validation dans la journée serait plus forte ;

2) les étudiants sont moins multimodaux que les autres usagers. La probabilité que deux stations soient distantes de plus de 500m à cause d'un déplacement intercalaire effectué à l'aide d'un autre mode (voiture, à pied, vélo…) serait dans ce cas moins forte ;

3) les étudiants valident plus fréquemment que les autres usagers, auquel cas la probabilité que deux stations soient distantes de plus de 500m à cause d'une non-validation serait plus faible.

Bien que nous n'ayons pas pu tester ces trois hypothèses, non exclusives au demeurant, la littérature suggère que l'hypothèse 1) est la plus vraisemblable.

b) Calcul des profils de charge

Le calcul des profils de charge vise à déterminer comme évolue le niveau de charge des rames de métro de station en station, selon l'heure considérée. Ce calcul est opéré en comparant l'offre de transport en métro (fréquence, heures de passage, capacité des rames) avec la demande déterminée en étape précédente. Nous commençons par reconstituer la table horaire du métro à partir des données STAR. Chaque voyageur est alors affecté simplement au premier métro qui se présente à lui, en considérant qu'un intervalle d'une minute sépare le moment de validation et l'arrivée à quai. Si, après avoir tenu compte des descentes, la capacité disponible restante de la rame ne permet pas d'accueillir tous les usagers à quai souhaitant monter, une file d'attente se crée selon le principe FIFO (*First In First Out*, ou premier arrivé, premier sorti). Les premiers usagers qui le peuvent montent, tandis que les suivants prendront la première rame disponible.

Le calcul intègre également les cas de non-validation. Une certaine fraction des usagers ne valide pas, soit par oubli, soit par fraude. Des enquêtes terrain menées par Keolis Rennes établissent que le taux de non-validation se situe autour de 13%, et est relativement constant quel que soit l'heure de la journée et le mode de transport (bus ou métro) considérés. Les charges sont ajustées en conséquence, en augmentant toutes les montées et descentes de 13% à chaque station. Nous supposons donc implicitement que la mobilité des personnes ne validant pas est similaire à celle des autres usagers, avec en particulier une même distribution des relations origine-destination.

Une fois le calcul des profils de charge établi, nous disposons pour chaque rame circulant en matinée du nombre de voyageurs montant et descendant à chaque station, et du taux d'occupation de la rame (nombre de voyageurs à bord divisé par la capacité nominale) pour chaque interstation.

c) Calcul des indicateurs d'intérêt

A partir des résultats des précédents étapes, nous pouvons déterminer pour une ou plusieurs journées et une période de la matinée (par exemple 8h – 8h15) données plusieurs indicateurs décrivant l'usage du métro et la qualité de service, tels que : le taux de validation (en nombre de validations par minute), le niveau de charge moyen et l'écart-type, le nombre de montées différées (car le métro était plein)…

Au niveau individuel, nous pouvons également établir le coût généralisé de déplacement en métro, calculé à l'aide de la formule (standard) suivante :

$$GC = \alpha_W T_{W,1} + \sum_{Arcs\ l} \alpha_V (1 + k\, N_l) T_{V,l} + \beta (t^* - t_A)^+ + \gamma (t_A - t^*)^+ + \alpha_W T_{W,2}. \qquad (1)$$

Le coût généralisé se décompose comme la somme des termes suivants :

- le temps d'attente à quai $T_{W,1}$ multipliée par la valeur du temps d'attente α_W. Le temps d'attente est calculé comme la différence entre l'heure d'arrivée à quai (égale à l'heure de validation plus une minute d'accès au quai) et l'heure de montée dans le métro. En règle générale, le temps d'attente est inférieur à la fréquence de passage du métro à l'heure considérée, mais peut lui être supérieur si l'usager doit laisser passer un ou plusieurs métros dans des épisodes de forte congestion. Le temps d'attente étant généralement considéré comme plus pénible que le temps en véhicule, une valeur du temps propre lui est associé, typiquement plus élevée que la valeur du temps en véhicule (Wardman 2004).

- la somme des temps en véhicule $T_{V,l}$sur l'ensemble des arcs *l* empruntés lors du déplacement, multiplié par la valeur du temps en véhicule $\alpha_V(1 + k\, N_l)$. Le coefficient α_V représente la valeur standard du temps en véhicule. Le terme $1 + k\, N_l$ est un facteur traduisant la pénibilité liée à la congestion en véhicule, mesurée par le taux d'occupation N_l

(variant entre 0 et 1).[5] Nous reprenons ici une spécification linéaire du facteur de pénibilité, telle qu'obtenue par Haywood et Koning (2015) et recommandée par le rapport Quinet (Commissariat Général à la Stratégie et à la Prospective 2013).

- un coût de déshorage $\beta(t^* - t_A)^+ + \gamma(t_A - t^*)^+$. Nous reprenons ici la spécification proposée en premier par Vickrey (1969), plus tard reprise et estimée par Small (1982). Le premier terme correspond au cas où le voyageur arrive en avance à sa destination par rapport à son heure d'arrivée souhaitée t^*, et le second au cas où le voyageur arrive en retard ; le paramètre β mesurant le coût en € d'être en avance d'une minute, et γ celui d'être en retard d'une minute. Faute de données suffisantes, nous considérons par la suite que le coût de déshorage est nul ; des travaux futurs viseront à étudier s'il est possible d'intégrer ce coût.
- pour les usagers descendant à Villejean-Université, un temps d'attente à l'escalier noté $T_{W,2}$ multiplié par α_W, la valeur du temps d'attente. Le temps d'attente est calculé comme la moitié du temps nécessaire pour écouler l'ensemble des usagers sortant de la rame du métro par l'escalier, soit : ½ * nombre de descentes à Villejean-Université / débit de l'escalier.

Les deux premiers termes, le temps d'attente et le temps en véhicule, représentent des composantes classiques du coût généralisé de déplacement pour les transports en commun. Dans le cas considéré, ces deux termes reflètent chacun une dimension différente de la congestion : la congestion à quai pour le premier (file d'attente pour monter dans le métro), et la congestion en véhicule pour le second (inconfort lié à la forte densité de passagers dans la rame). Le troisième terme, le coût de déshorage, bien qu'important d'un point de vue théorique, est – comme cela a dû être fait ici - rarement intégré en pratique. Les programmes d'activité des individus, avec les heures d'arrivée souhaitées afférentes, variant sensiblement de jour en jour, il s'avère extrêmement ardu de les déterminer empiriquement. Comme dans le cas des étudiants les heures de commencement des cours peuvent servir de point de référence pour l'heure d'arrivée souhaitée, des travaux ultérieurs viseront à évaluer la faisabilité et la pertinence d'inclure le coût de déshorage dans le cas qui nous concerne. Enfin, le dernier terme traduit une spécificité de notre cas d'étude : la congestion dans

[5] Le taux d'occupation correspond au nombre de voyageurs dans la rame divisé par la capacité de la rame.

l'escalier de sortie de Villejean-Université. Comme un des objectifs du décalage des horaires consistait à réduire l'engorgement de cet escalier, nous avons cherché à refléter explicitement cet objectif dans le coût généralisé - et donc *in fine* dans l'évaluation socioéconomique de la mesure - *via* ce dernier terme.

Les valeurs des paramètres utilisés dans la fonction de coût généralisé sont issues du rapport Quinet (Commissariat Général à la Stratégie et à la Prospective 2013), fournissant les valeurs tutélaires à appliquer pour l'évaluation de projets et politiques de transport :

- $\alpha_V = 10€/h$;
- $\alpha_W = 15€/h$;
- $k = 0{,}54$;
- $\beta = \gamma = 0$.

Enfin, des mesures de terrain réalisées par Keolis Rennes nous ont permis d'estimer la valeur du débit de l'escalier de la station Villejean-Université à 1,75 personne/s.

d) Détection des étudiants et calcul de l'heure de départ dans la situation contrefactuelle.

La situation contrefactuelle correspond à un monde dans lequel le décalage des horaires de cours n'aurait pas été mis en œuvre à l'Université Rennes 2. Pour pouvoir modéliser cette situation fictive, nous avons besoin de deux éléments : 1) connaître parmi la population des usagers du métro quels sont les étudiants ayant été décalés de 8h15 à 8h30 et 2) déterminer quelle serait leur heure de départ si le décalage n'avait pas été mis en place.

Afin de résoudre le premier problème, nous le décomposons en deux sous-problèmes successifs : identifier les étudiants de Rennes 2 parmi les usagers des transports en commun, puis repérer au sein de ces étudiants quels sont ceux ayant cours à 8h30 et venant en métro.

La procédure de détection des étudiants de l'Université Rennes 2 repose sur l'analyse croisée du type d'abonnement et des pratiques de mobilité : seuls sont retenus les usagers des transports en commun ayant un abonnement typique d'un étudiant, et se rendant fréquemment sur le campus de Villejean. Les abonnements « typiques » des étudiants correspondent aux plus courants pour cette population, par rapport à la tranche d'âge de l'abonnement, ou au type de gratuité (voir Annexe

7.1).[6] Le second critère repose sur la fréquence d'utilisation des transports en commun situés à proximité du campus. Seuls sont retenus les usagers dont le taux de validation, mesuré pour les arrêts situés dans un rayon de 500m autour de l'Université et sur une longue période (plusieurs mois), dépasse un certain seuil (voir Annexe 7.2). Les usagers vérifiant ce double critère sont considérés comme étant des étudiants de l'Université Rennes 2.

Notons que la procédure d'identification des étudiants de Rennes 2 est réalisée une fois pour toute en début d'analyse. Comme elle se base sur des comportements de longue période (type d'abonnement, niveau de fréquentation du campus sur plusieurs mois), il n'est nul besoin de la relancer à chaque fois que l'on change la matinée à analyser, contrairement à la procédure suivante.

Une fois la procédure de détection des étudiants réalisée, nous procédons au second sous-problème : repérer au sein de ces étudiants quels sont ceux accédant au campus en métro et ayant cours à 8h30. Nous commençons par recenser à partir des validations les étudiants de Rennes 2 s'étant rendus sur le campus Villejean en métro pour la matinée à analyser. Pour les étudiants ainsi recensés, l'heure de cours (8h15 ou 8h30) est ensuite déterminée à partir de l'heure d'arrivée par procédure statistique (basée sur un mélange de noyaux gaussiens).[7] Les étudiants ayant cours à 8h30 sont enfin « décalés » à 8h15 pour reproduire la situation antérieure dans laquelle tout le monde débutait les cours à 8h15. En pratique, leurs heures de départ sont avancées de quinze minutes.

---

[6] La tarification variant selon l'âge de l'usager, il est possible de connaître la tranche d'âge de l'abonné dans le cas d'un abonnement standard. Concernant les abonnements à titre gratuit (à visée sociale), les étudiants y ayant droit possèdent majoritairement des abonnements gratuits de type « 9 mois », couvrant la période des cours.

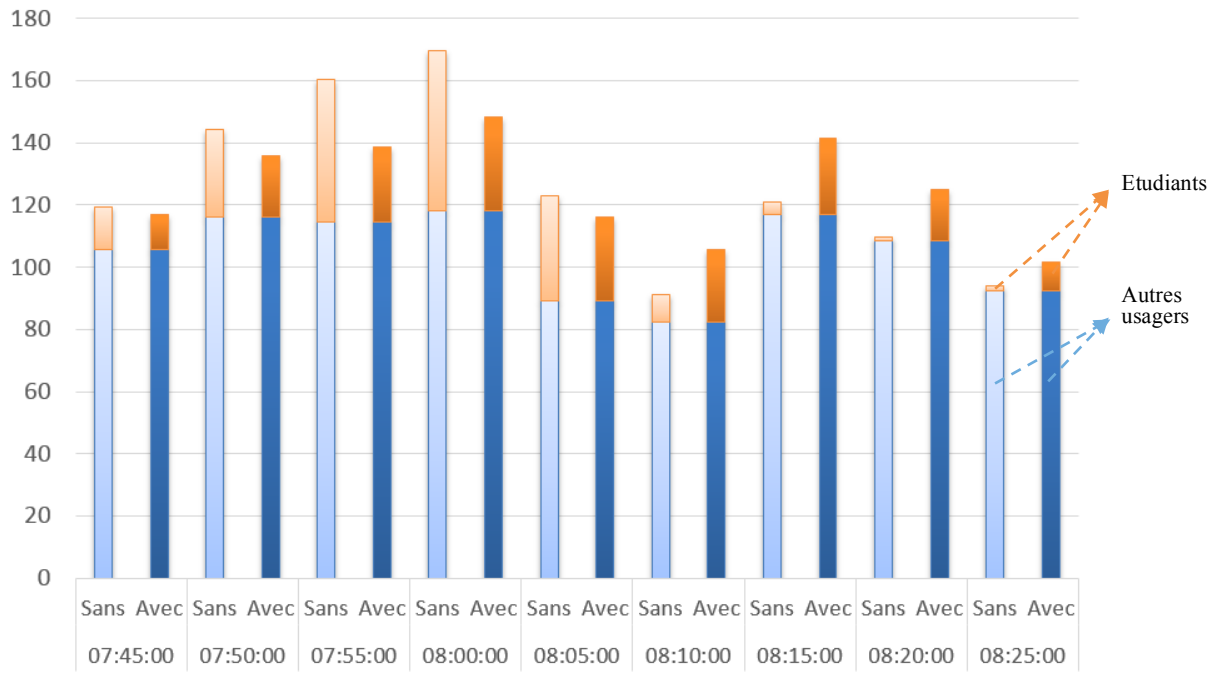
[7] Un étudiant arrivant à 8h aura une forte probabilité de commencer les cours à 8h15, un étudiant arrivant à 8h25 aura de même une forte probabilité de commencer les cours à 8h30, et enfin un étudiant arrivant à 8h15 aura une probabilité environ similaire de commencer les cours à 8h15 ou 8h30 (sachant qu'il faut quelques minutes à pied pour accéder aux salles de cours depuis la station de métro).

4. Résultats et discussion

Pour évaluer l'effet du décalage des horaires à l'université de Rennes 2, nous comparons l'état du système dans la situation actuelle (avec décalage) et dans la situation contrefactuelle (sans décalage). Pour la clarté de l'exposé, nous présenterons la situation contrefactuelle en premier afin de mieux illustrer l'effet du décalage.

4.1 Indicateurs d'usage du métro et de qualité de service

Dans la situation sans décalage, on distingue nettement l'hyperpointe avec un pic de validations à 8h. Pour la journée considérée, le taux de validation croît de 120 validations/min à 7h45 à plus de 160 validations/min à 8h00 (Figure 4). Cette hausse va de pair avec une forte proportion d'étudiants entre 7h45 et 8h10, étayant la responsabilité du pôle universitaire concernant le phénomène d'hyperpointe. Après 8h10, le nombre d'étudiants diminue, et le taux repasse en dessous de 120 validations/min. Dans la situation avec décalage, les étudiants sont mieux répartis sur l'ensemble de l'heure de pointe du matin (7h45-8h30). Ceci permet de lisser le nombre de validations, conformément au résultat attendu de la mesure. Le taux maximal diminue ainsi à 148 validations/min, entre 8h00 et 8h05.



La figure représente le nombre de validations par minute sur la ligne de métro dans le sens POT → JFK pour les situations sans décalage (colonne « Sans » en clair) et avec décalage (colonne « Avec » en

foncé), par tranche de cinq minutes. Les étudiants de Rennes 2 sont représentés sur le dessus des bâtons, les autres usagers sur le dessous.

Figure 4 : Taux de validation sur la ligne de métro à l'heure de pointe du matin (mardi 3 mars 2015)

Ce lissage des départs contribue bien à homogénéiser la charge du métro à l'heure de pointe du matin. Considérons le tronçon Anatole France (ANF) – Pontchaillou (PON) situé légèrement en amont de l'université.[8] Dans le scénario sans décalage, la charge des rames est très élevée entre 8h et 8h15, avec huit rames successives complètes (à 160 personnes/rame) pour la journée considérée (Figure 5).[9] Après 8h15, la charge baisse à moins de 120 personnes par rame. Le décalage des horaires de cours permet de mieux répartir la charge sur l'ensemble de la période, de sorte qu'une seule rame affiche complet, et non huit comme précédemment.

[8] A l'heure de pointe du matin, en bout de ligne environ 60 à 70% des usagers (principalement des étudiants) descendent à Villejean Université, et 30 à 40% à la station précédente, Pontchaillou. Pour mieux illustrer le phénomène de lissage de la charge des véhicules, nous avons donc choisi de considérer l'un des tronçons les plus critiques, à savoir entre Anatole France (la station encore précédente) et Pontchaillou.

[9] Ce chiffre correspond à la charge maximale nominale des rames: chaque rame comporte 2 wagons, pouvant chacun accueillir 21 personnes en station assise, 1 personne handicapée et 58 personnes en station debout.

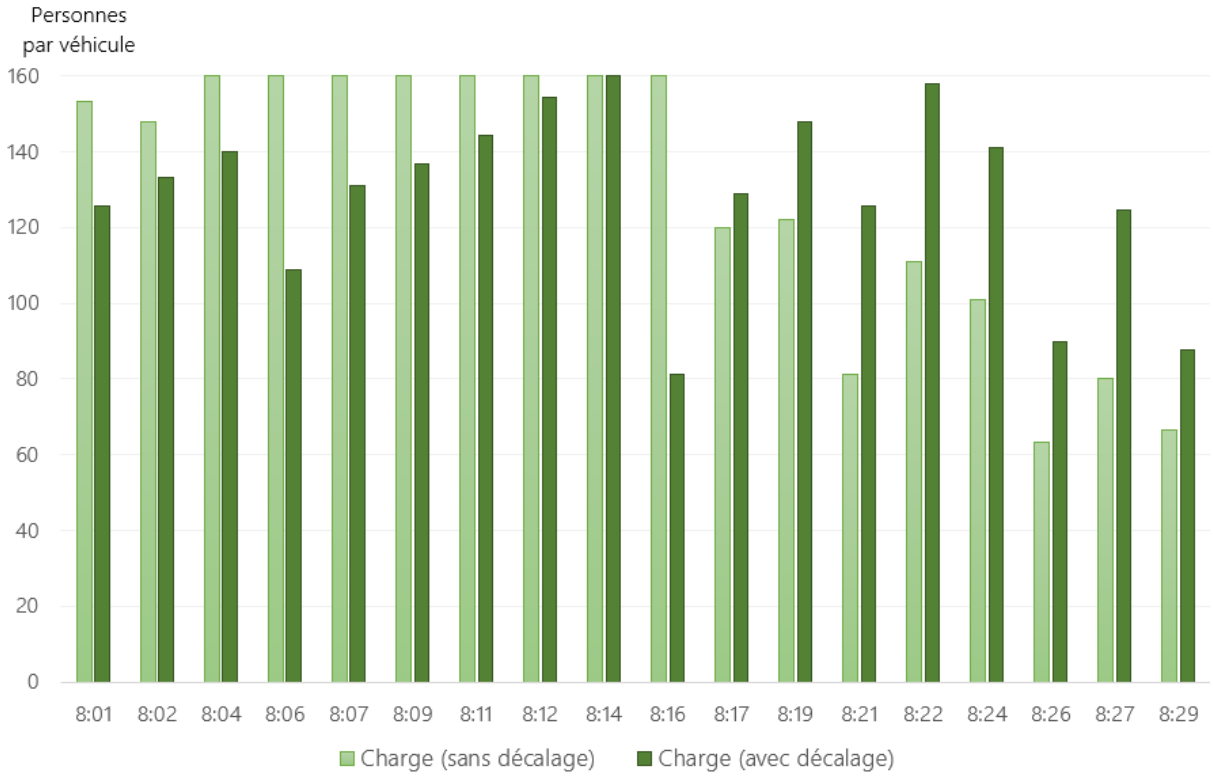
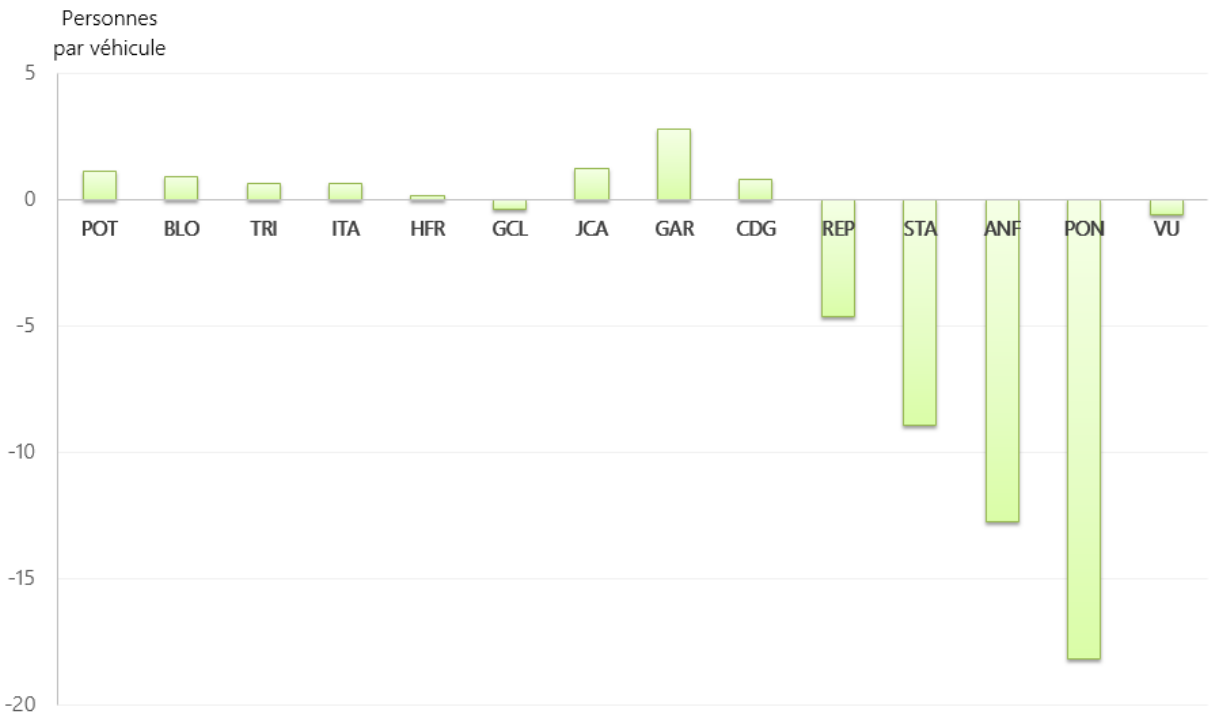


Figure 5: Effet du décalage sur la charge des rames de métro (mardi 3 mars 2015, tronçon ANF-PON)

L'analyse de la variabilité - mesurée par l'écart-type - des niveaux de charge entre 8h et 8h30 confirme ce résultat tout en le nuançant. Avec l'instauration du décalage des horaires à l'université, la variabilité décroît de manière de plus en plus prononcée au fur et à mesure que l'on s'approche de la station cible, Villejean Université (Figure 6). A l'inverse la variabilité augmente légèrement en début de ligne, mettant en exergue la complexité des effets de réseau.



La figure représente la variation de l'écart-type des niveaux de charge entre 8h et 8h30 entre le scénario avec décalage et sans décalage (σ_{Avec} - σ_{Sans}). *Par souci de lisibilité, les différents tronçons sont indexés par la station de départ uniquement, par exemple ANF pour le tronçon ANF-PON.*

Figure 6 : Effet du décalage sur la variabilité des niveaux de charge (mardi 3 mars 2015)

L'effet est également variable selon la journée considérée. Pour la semaine considérée, la réduction de l'écart-type des niveaux de charge fluctue sur le tronçon ANF-PON entre 2,1 et 12,8 personnes/rame (Tableau 1). L'effet est plus important lors des journées chargées, le mardi et le jeudi.

Tableau 1: Effet du décalage sur la variabilité des niveaux de charge (semaine du 2 au 6 mars 2015, tronçon ANF-PON)

	Lundi	Mardi	Mercredi	Jeudi	Vendredi
Variation de l'écart type (σ_{Avec} - σ_{Sans})	-2,1	-12,8	-9,5	-12,3	-9,8
Charge moyenne (avec décalage)	110,0	128,8	111,7	119,6	91,0

Pour confirmer l'effet de désaturation du métro, nous analysons un dernier indicateur de qualité de service : le nombre de montées en rame différées. Cet indicateur mesure le nombre de fois où un voyageur n'a pas pu monter dans un véhicule parce que celui-ci était complet. Dans l'exemple où 100

usagers ont laissé passer un seul métro, et 25 usagers en ont laissé passer deux, l'indicateur vaudrait : 100*1+2*25=150. Comme attendu, le décalage des horaires permet de réduire significativement le nombre de fois où un usager doit laisser passer une rame (Tableau 2). L'indicateur passe ainsi de 1782 fois à seulement 651 fois pour la journée la plus chargée (le mardi). La seule exception est le vendredi, journée pour laquelle le décalage augmente très légèrement le phénomène de saturation des trains. Le vendredi correspond à une journée faiblement chargée (Tableau 1) ; il est donc probable qu'une distribution atypique des déplacements ce jour-là soit à l'origine de ce résultat particulier.

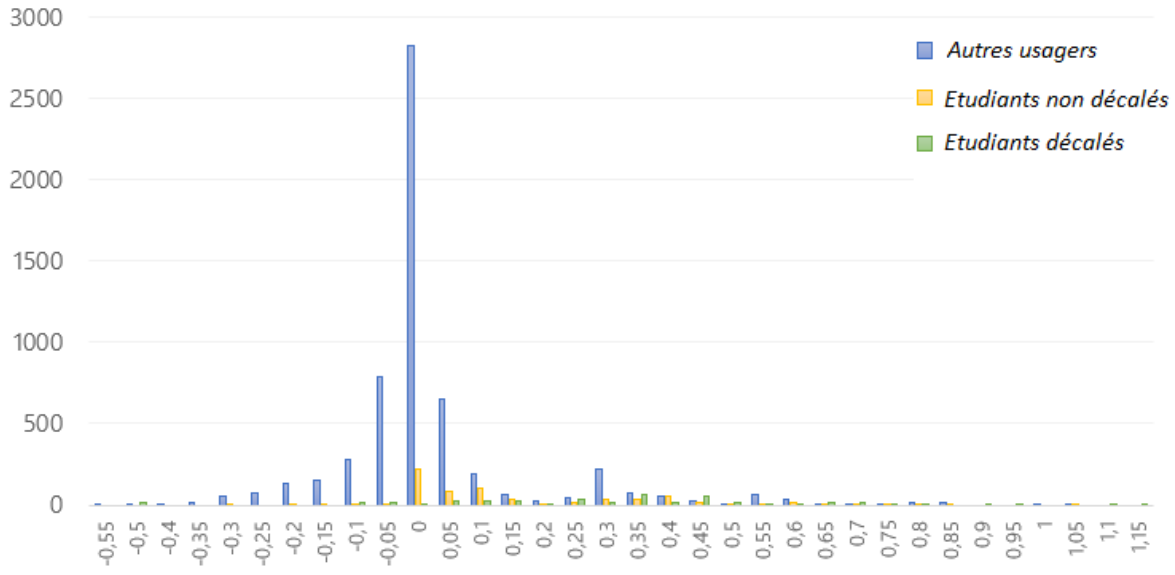
Tableau 2 : Nombre de montées différées à l'heure de pointe du matin (semaine du 2 au 6 mars 2015)

	Lundi		Mardi		Mercredi		Jeudi		Vendredi	
	Sans décalage	Avec décalage	Sans décalage	Avec décalage	Sans décalage	Avec décalage	Sans décalage	Avec décalage	Sans décalage	Avec décalage
# de montées différées	402	214	1782	651	422	304	831	472	399	423

4.2 Coût généralisé de déplacement

Nous analysons dans cette partie l'effet du décalage des horaires de cours au niveau individuel, à l'aide de l'indicateur de coût généralisé de déplacement en métro. Cela nous permettra également de dresser un premier bilan socio-économique de la mesure.

Le décalage des horaires de cours a des effets très différenciés selon la catégorie d'usager considérée. Les étudiants bénéficient amplement de la mesure, avec une distribution des gains largement positive pour les deux groupes (décalés et non décalés). La mesure s'avère par contre relativement neutre pour les autres usagers, avec une distribution des gains fortement centrée sur 0 (Figure 7).



La figure représente la distribution (en nombre d'usagers) des gains en termes de coût généralisé par tranche de 5 centimes d'euro, suite à l'instauration des heures de cours décalées. Par souci de lisibilité, les tranches sont représentées par leur borne inférieure, par exemple 0 pour la tranche [0€ ; 0,05€].

Figure 7 : Distribution des gains en termes de coût généralisé suite au décalage (mardi 3 mars 2015)

Un zoom sur la catégorie étudiante révèle que pour la journée considérée, ce sont les étudiants décalés qui bénéficient le plus (relativement) du décalage (Figure 8). La majorité de ceux-ci bénéficient de gains situés autour de 30 - 40 centimes d'euros, tandis que pour les étudiants non décalés les gains se situent en majorité entre 0 et 15 centimes d'euros.

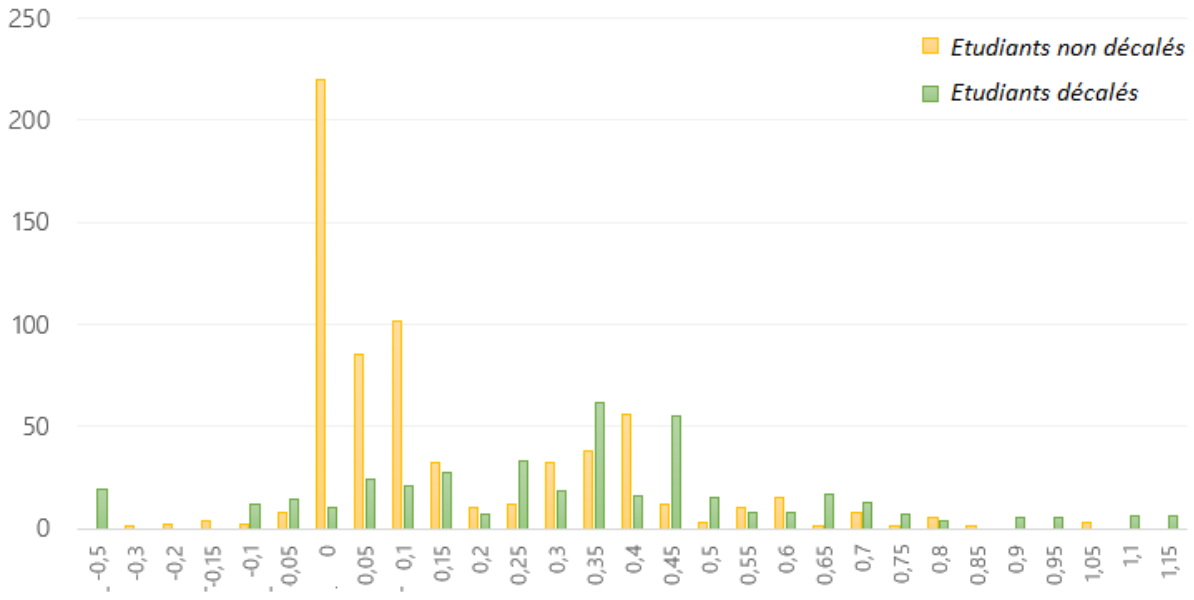


Figure 8: Distribution des gains en termes de coût généralisé suite au décalage, zoom sur la catégorie étudiante (mardi 3 mars 2015)

Pour comprendre ce premier résultat, il convient de rappeler que les mesures de décalage des horaires (de travail ou bien de cours comme ici) ne visent pas à réduire directement la congestion. Elles visent à mieux répartir la demande dans le temps, afin d'optimiser l'usage des infrastructures de transport (ici du métro). Le niveau global de la demande, à savoir le nombre d'individus souhaitant se déplacer sur la période considérée, reste le même. Etant donné que les mesures de décalage opèrent un lissage de la demande dans le temps, on comprend donc bien qu'il y ait des gagnants, mais aussi des perdants : les usagers qui voyagent vers 8h15, période relativement peu chargée avant le décalage, et désormais plus chargée suite au report (via le décalage) d'une partie de la demande étudiante sur cette période. Ceci explique pourquoi la distribution des gains est centrée sur zéro dans le cas des autres usagers. Concernant les étudiants, avant le décalage ceux-ci débutaient tous leurs cours à 8h15 et voyageaient donc sur la période la plus chargée (vers 8h), en partie par leur propre fait puisqu'ils contribuaient eux-mêmes au phénomène d'hyperpointe (Figure 4). Dans leur cas, la mesure leur a permis soit de voyager à une période moins chargée pour les étudiants décalés, soit de profiter pour les étudiants non décalés d'un allégement de la charge du métro (suite au départ plus tardif des étudiants décalés), aboutissant à une situation très majoritairement gagnants-gagnants pour ces deux groupes. Une fraction limitée des étudiants subissent néanmoins une hausse de leur

coût généralisé suite à la mesure (Figure 8). Bien que nous n'ayons pas eu le temps d'analyser ce point en détail, on peut supposer qu'il s'agit des étudiants qui partaient très tôt ou très tard.

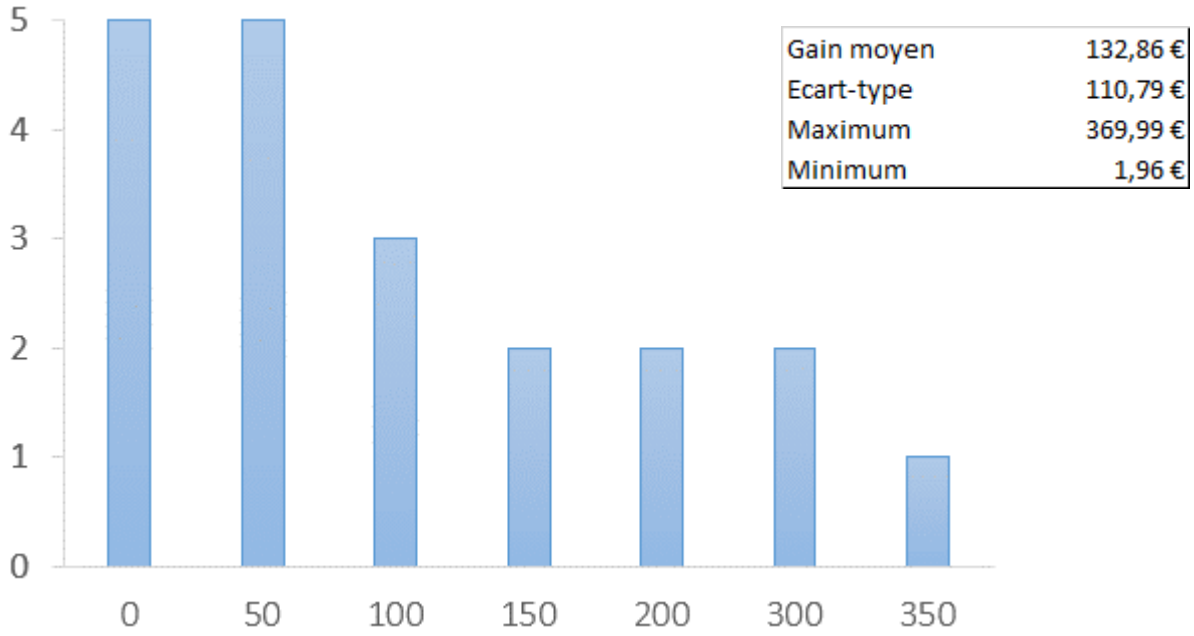
L'analyse des gains par poste de coût révèle des résultats plus surprenants. Pour la journée considérée, le décalage permet de réduire fortement les coûts de temps d'attente pour l'ensemble des usagers (Tableau 3). Ceci provient du fait qu'en lissant la demande, le décalage des horaires permet de réduire drastiquement le nombre de rames complètes (Figure 5), et par suite le nombre de montées différées (Tableau 2). De manière moins intuitive, ce report d'une partie de la demande aboutit à une forte augmentation du coût de congestion en véhicule pour les usagers non étudiants. Ceux qui voyagent à l'hyperpointe entre 7h45 et 8h subissent certes des coûts de congestion moindres grâce au décalage, mais cette baisse est effacée par la hausse du coût de congestion pour les usagers voyageant après 8h (période relativement creuse avant le décalage, mais plus chargée depuis). Ceci illustre bien l'effet de lissage, aboutissant à des gagnants et des perdants.

Tableau 3 : Décomposition des gains par poste de coût (mardi 3 mars 2015)

	TEMPS D'ATTENTE		*CONGESTION EN VEHICULE*		*SORTIE ESCALIER VILLEJEAN-UNIVERSITE*		*TOTAL*	
Heure de départ	**Autres**	**Etudiants**	**Autres**	**Etudiants**	**Autres**	**Etudiants**	**Autres**	**Etudiants**
07:00:00	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €	0,00 €
07:15:00	0,00 €	0,00 €	0,06 €	0,00 €	0,04 €	0,00 €	0,10 €	0,00 €
07:30:00	-0,42 €	0,00 €	-0,35 €	0,02 €	0,01 €	0,01 €	-0,75 €	0,03 €
07:45:00	52,50 €	25,42 €	38,59 €	9,19 €	3,54 €	3,35 €	94,63 €	37,96 €
08:00:00	198,75 €	87,08 €	-60,67 €	1,79 €	1,36 €	6,12 €	139,45 €	94,99 €
08:15:00	-21,67 €	101,25 €	-66,65 €	-6,27 €	-4,87 €	4,83 €	-93,19 €	99,81 €
08:30:00	-1,67 €	1,67 €	-4,66 €	0,37 €	-0,34 €	0,02 €	-6,67 €	2,06 €
08:45:00	0,00 €	0,00 €	1,16 €	0,27 €	0,08 €	0,06 €	1,24 €	0,33 €
Total	**227,50 €**	**215,42 €**	**-92,52 €**	**5,37 €**	**-0,17 €**	**14,40 €**	**134,81 €**	**235,18 €**

Nous analysons en dernier lieu la variabilité quotidienne des résultats. L'exercice présenté ci-dessus pour la journée du 3 mars est reproduit sur quatre semaines de cours réparties sur l'année universitaire (17 au 21 novembre 2014, 12 au 16 janvier 2015, 2 au 6 mars 2015, 30 mars au 3 avril 2015). Le gain journalier obtenu (agrégé sur l'ensemble des usagers) s'avère extrêmement volatil,

allant de 2€ à 370€ selon la journée considérée (Figure 9). Le gain moyen est de 133€, avec un écart type de 111€.



La figure représente la distribution (en nombre de jours) des gains totaux en termes de coût généralisé par tranche de cinquante euros, suite à l'instauration des heures de cours décalées. Par souci de lisibilité, les tranches sont représentées par leur borne inférieure, par exemple 0 pour la tranche [0€ ; 50€].

Figure 9 : Variabilité quotidienne des gains en termes de coût généralisé suite au décalage

Cette forte variabilité quotidienne des gains (en termes de coût généralisé) reflète celle de la demande de transport. En effet, la mesure de décalage des horaires de cours est d'autant plus efficace que :

1) la demande de transport est importante pour la journée considérée;

2) la demande des autres usagers est concentrée sur l'hyperpointe (autour de 8h).

Si la demande de transport est faible une journée donné, alors la congestion globale est moindre (moins de personnes dans les rames, moins de montées différées), de sorte que les bénéfices attendus de la mesure de décalage sont également moindres. La variabilité de la demande a plusieurs sources : saisonnière, liée au jour de la semaine (par exemple, les vendredis sont typiquement peu chargés, tandis que les mardis et les jeudis sont à l'inverse très chargés), et également découlant de la variabilité propre à chaque individu. Même pour un jour de la semaine

donné (par exemple un mardi), la demande de transport en métro varie significativement (de mardi en mardi), d'où au final la forte variabilité des gains observée.

Concernant le point 2) si, au vu de la variabilité de la demande de déplacement, la demande des autres usagers aux alentours de 8h15 s'avère plus importante que de coutume, alors les effets du décalage seront moins importants ce jour-là. En effet, les étudiants décalés seront alors reportés vers une période également chargée, réduisant d'autant les bénéficies du décalage.

La mise en évidence de la forte variabilité des résultats souligne l'intérêt des données billettiques dans notre cas particulier, et des données de type « big data » de manière plus générale, pour l'évaluation des politiques publiques. Etant donné le coût élevé des enquêtes et/ou des campagnes de comptage, les données obtenues par les méthodes traditionnelles ne couvrent souvent qu'une seule semaine, voire parfois une seule journée. Les résultats seront donc fortement dépendants de la semaine choisie, avec le risque de fortement sous-estimer ou surestimer les bénéfices de la mesure selon les cas.

Pour conclure, nous dressons un premier bilan socio-économique de la mesure à partir des éléments obtenus ; il ne s'agit pas ici de faire un calcul précis, exercice pour lequel il aurait fallu développer une méthodologie beaucoup plus lourde, mais d'obtenir un ordre de grandeur des gains liés à la mesure. Sachant qu'une année universitaire comporte 26 semaines de cours, le gain total de la mesure serait sur une année de l'ordre de 26*5*132.86 ≈ 17 000€. Le coût du décalage des horaires de cours correspond essentiellement aux réunions de préparation et de concertation autour du projet, qui représentent globalement un coût d'investissement. Bien que nous n'ayons pas obtenu les données nécessaires pour les estimer, ceux-ci sont à priori minimes par rapport aux gains sur l'horizon temporel du projet (qui bien qu'incertain, devrait perdurer pour de nombreux années vu le succès de la mesure), de sorte que nous pouvons les ignorer en première approximation. Le bilan socio-économique serait donc *in fine* égal aux gains annuels du projet, soit de l'ordre de 17 000€ par an.

Au vu de ce premier chiffre relativement modeste, notamment par rapport aux ordres de grandeur habituels pour des projets de transport (avec des gains socioéconomiques annuels le plus souvent en centaines de milliers ou en millions d'euros), il semble donc exister un hiatus entre d'un côté le

succès de la mesure auprès des différents acteurs, en premier lieu les usagers, et le bilan socioéconomique. Un premier élément de réponse réside dans le terrain étudié. Le métro rennais est de petite dimension, avec des trajets courts (6 minutes en moyenne), et une congestion d'ampleur somme toute modérée par rapport à celle observée sur certains autres réseaux métropolitains, en particulier en Île-de-France. Tous ces éléments contribuent à ce que les ordres de grandeur attendus soient plus faibles que pour d'autres réseaux de transport en commun plus importants (en dimension comme en fréquentation). Deuxièmement, les coûts de congestion ont été estimés en considérant que la valeur du temps en véhicule, et par suite le coût généralisé, est une fonction affine du niveau de charge, comme préconisé par le rapport Quinet (Commissariat Général à la Stratégie et à la Prospective 2013). Cette formulation pose doublement question. D'une part, la forme affine aboutit à une forme quadratique très faiblement convexe pour le coût social, expliquant pourquoi le lissage a un impact très limité en ces termes. D'autre part, elle donne une valeur du temps majorée de seulement 50% quand les métros sont bondés par rapport à la situation où le métro est vide. Il est possible que la formule du rapport Quinet sous-estime la pénibilité liée à voyager dans un métro bondé, en particulier quand l'usager subit cette situation de manière répétée, par rapport à un usager qui la subirait de manière occasionnelle. Troisièmement, il est possible que notre méthodologie – qui n'aborde que la variation des coûts de congestion dans le métro – ne capture pas un certain nombre de bénéfices de la mesure : possibilité de se lever plus tard pour les étudiants décalés, plus de fluidité dans les flux piétons en station…

5. Conclusions

L'évaluation du décalage des horaires à l'université de Rennes 2 à l'aide des données billettiques a confirmé les effets attendus de politiques d'étalement des horaires. Sans réduire la congestion globale (puisque la mesure ne fait que décaler certains déplacements dans le temps), le décalage permet d'étaler la demande dans le temps et ainsi de lisser la charge des véhicules. Cette mesure contribue ainsi à la fois à un meilleur emploi des ressources (i.e. des rames) et à une meilleure qualité de service, au bénéfice final de l'opérateur comme des usagers. L'analyse a néanmoins révélé une forte variabilité inter-quotidienne des effets du décalage. Toute évaluation doit prendre cette variabilité en compte, sous peine d'être entachée d'un biais important si les effets ne sont mesurés que sur une seule journée.

D'un point de vue méthodologique, ce travail confirme l'opportunité des données massives pour l'évaluation de politiques publiques. Dans le cas d'étude, le taux de couverture important et la grande profondeur temporelle des données billettiques permettent une analyse couvrant l'ensemble des usagers, et reproductible pour n'importe quelle journée pour laquelle on dispose de données. Ces deux éléments ont permis la mise en exergue des effets réseau non triviaux et de la forte variabilité inter-quotidienne, ce qu'il aurait été beaucoup plus difficile de capturer par une enquête. A l'inverse, la nature limitée des données billettiques nous a contraints à enrichir les données à l'aide de divers traitements statistiques, par exemple pour identifier les étudiants de l'université ou pour prédire les destinations des usagers, grevant d'autant la fiabilité des résultats. A ce stade, les données massives apparaissent donc comme un complément et non un substitut aux enquêtes traditionnelles.

6. Références

Arnott, Richard. 2007. « Congestion tolling with agglomeration externalities ». *Journal of Urban Economics*, Essays in Honor of Kenneth A. Small, 62 (2): 187‑203. doi:10.1016/j.jue.2007.03.005.

Arnott, Richard, Andre de Palma, et Robin Lindsey. 1993. « A Structural Model of Peak-Period Congestion: A Traffic Bottleneck with Elastic Demand ». *American Economic Review* 83 (1): 161‑79.

Arnott, Richard, Tilmann Rave, et Ronnie Schöb. 2005. « Alleviating Urban Traffic Congestion ». MIT Press Books. The MIT Press. https://ideas.repec.org/b/mtp/titles/0262012197.html.

Barry, James, Robert Newhouser, Adam Rahbee, et Shermeen Sayeda. 2002. « Origin and Destination Estimation in New York City with Automated Fare System Data ». *Transportation Research Record: Journal of the Transportation Research Board* 1817 (janvier): 183‑87. doi:10.3141/1817-24.

Braid, Ralph M. 1989. « Uniform versus peak-load pricing of a bottleneck with elastic demand ». *Journal of Urban Economics* 26 (3): 320‑27. doi:10.1016/0094-1190(89)90005-3.

———. 1996. « Peak-Load Pricing of a Transportation Route with an Unpriced Substitute ». *Journal of Urban Economics* 40 (2): 179‑97. doi:10.1006/juec.1996.0028.

Commissariat Général à la Stratégie et à la Prospective. 2013. « Evaluation socio-économique des investissements publics ». Rapports & Documents.

Downs, Anthony. 1962. « The law of peak-hour expressway congestion ». *Traffic Quarterly* 16 (3). https://trid.trb.org/view.aspx?id=694596.

Duranton, Gilles, et Matthew A. Turner. 2011. « The Fundamental Law of Road Congestion: Evidence from US Cities ». *The American Economic Review* 101 (6): 2616‑52. doi:10.1257/aer.101.6.2616.

Fosgerau, Mogens, et Kenneth A. Small. 2014. « Endogenous scheduling preferences and congestion ».

Haywood, Luke, et Martin Koning. 2015. « The distribution of crowding costs in public transport: New evidence from Paris ». *Transportation Research Part A: Policy and Practice* 77 (juillet): 182‑201. doi:10.1016/j.tra.2015.04.005.

Haywood, Luke, Martin Koning, et Guillaume Monchambert. 2015. « Crowding in Public Transport: Who Cares and Why? » SSRN Scholarly Paper ID 2707043. Rochester, NY: Social Science Research Network. https://papers.ssrn.com/abstract=2707043.

Henderson, J. Vernon. 1981. « The economics of staggered work hours ». *Journal of Urban Economics* 9 (3): 349‑64.

Mun, S.-I., et M. Yonekawa. 2006. « Flextime, Traffic Congestion and Urban Productivity ». *Journal of Transport Economics and Policy* 40 (3): 329‑58.

Reeves, Evelyne, et Catherine Dameron. 2014. « Le management des temps de la ville : l'exemple du Bureau des temps de Rennes Métropole ». présenté à Le Management de la mobilité, 4èmes journées nationales d'études, Chambéry, France, juin 17.

Small, Kenneth A. 1982. « The scheduling of consumer activities: work trips ». *American Economic Review* 72 (3): 467‑79.

Takayama, Yuki. 2015. « Bottleneck congestion and distribution of work start times: The economics of staggered work hours revisited ». *Transportation Research Part B: Methodological*. doi:10.1016/j.trb.2015.07.021.

Trépanier, Martin, Nicolas Tranchant, et Robert Chapleau. 2007. « Individual Trip Destination Estimation in a Transit Smart Card Automated Fare Collection System ». *Journal of Intelligent Transportation Systems* 11 (1): 1‑14. doi:10.1080/15472450601122256.

Vickrey, William S. 1969. « Congestion Theory and Transport Investment ». *American Economic Review* 59 (2): 251‑60.

Wardman, Mark. 2004. « Public transport values of time ». *Transport Policy* 11 (4): 363‑77. doi:10.1016/j.tranpol.2004.05.001.

Wilson, Paul W. 1992. « Residential location and scheduling of work hours ». *Journal of Urban Economics* 31 (3): 325‑36. doi:10.1016/0094-1190(92)90060-X.

7. Annexe

7.1 Liste des abonnements « étudiants »

La liste des abonnements retenus lors de l'étape de détection des étudiants est la suivante :

- "Abonnés -20 ans"
- "Abonnés -20 ans PA"
- "Abonnés 20-26 ans"
- "Abonnés 20-26 ans PA"
- "Gratuité 9 mois"
- "Uzuël + jeune Mensuel"
- "UNIPASS Jeune mensuel Z1"
- "Uzuël + jeune Hebdo"
- "Uzuël +/++ jeune Mensuel TGV"
- "UNIPASS Jeune heb Z2"
- "UNIPASS Jeune hebdo Z1"
- "Uzuël +/++ jeune Hebdo TGV"
- "Uzuël+ jeune Mensuel TGV"
- "Uzuël+ Mensuel Jeune Promo"
- "Uzuël +/++ Jeune Hebdo TGV"
- "Uzuël+ Mensuel Jeune Promo TGV"
- "Uzuël +/++ Jeune Hebdo"
- "Illenoo Mensuel + Etud.Apprent"
- "Illenoo Hebdo + Etud. Apprenti"

7.2 Cartographie des stations dans un rayon de 500m autour de l'Université

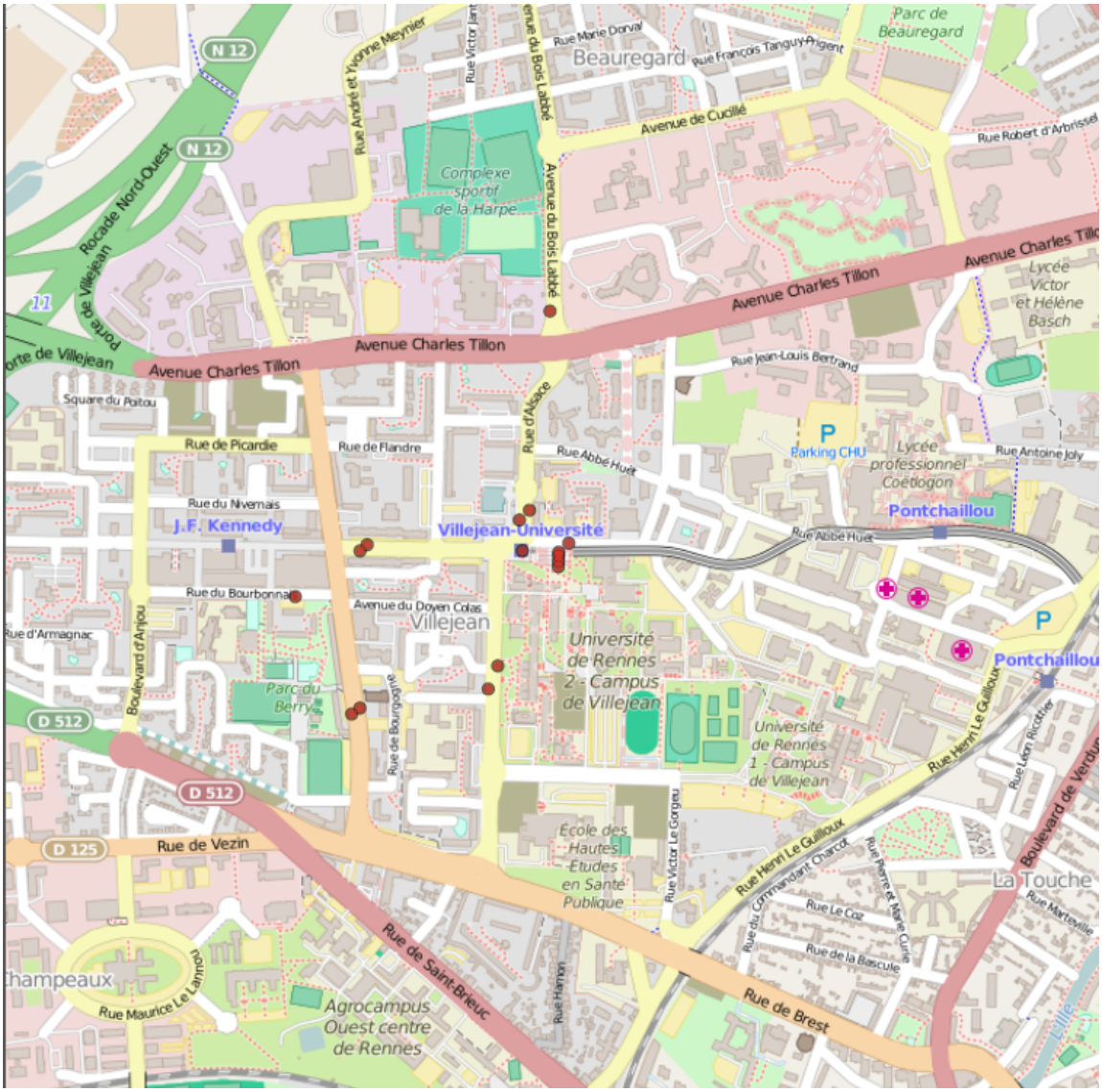


Figure 10 : Stations de transport en commun situées dans un rayon de 500m autour de l'Université Rennes 2