
Rapport de stage individuel

4^{ème} année

Prospective long terme (2030-2050) de la ponctualité des transports en commun lourds Parisiens

Autorité de la Qualité de Service dans les Transports
Tour Séquoia, 1 Place Carpeaux, 92055 La Défense



Tuteur entreprise :
Alain Sauvant
Directeur AQST

Vincent Bernard
IUT
2018-2019

Tuteur académique :
Hervé Baptiste

Table des matières

Introduction	3
Présentation de la structure d'accueil	5
Historique et taille	5
Activités et objectifs	5
Matériels et méthodes utilisés	8
Explications préalables à la description des méthodes utilisées	8
Calendrier de mon premier mois de stage	11
Etape 1 : Collecte des données de base	12
Etape 2 : Relevé des taux de ponctualité et calculs de pertes économiques associés	13
Etape 2.1 : Ponctualité en heure de pointe.....	13
Etape 2.2 : Ponctualité en heure creuse	16
Etape 3 : Calcul du gain de temps sur un trajet dû à une vitesse améliorée et gains socio-économiques associés.....	20
Etape 3.1 : Calcul du gain de temps sur un trajet entier si la ligne devenait automatique	20
Etape 3.2 : Calcul du gain de temps sur un trajet moyen de voyageur si la ligne devenait automatique.....	21
Etape 3.3 : Calcul du gain de temps total sur une ligne si elle devenait automatique	21
Etape 3.4 : Calcul du gain socio-économique sur une ligne si elle devenait automatique.....	22
Etape 4 : Calcul du gain socio-économique portant sur la sécurité en cas d'automatisation de ligne de métro.....	22
Etape 5 : Calcul du coût d'automatisation par ligne.....	24
Etape 5.1 : Calcul de l'investissement pour automatisation (hors achat de matériel roulant)	24
Etape 5.2 : Calcul de l'investissement à effectuer sur le matériel roulant	25
Etape 5.3 : Calcul de l'investissement à effectuer pour les portes palières	25
Etapas X : Suite du stage.....	26
Résultats et discussion.....	26
Conclusion	27
Bibliographie.....	28
Annexe 1 : Tableau Excel	29

Introduction

Étant en deuxième année du cycle ingénieur de l'école Polytech Tours au Département Aménagement du territoire et de l'Environnement, je devais à l'issue de cette année valider une expérience professionnelle d'au moins 12 semaines. Étant intéressé par les transports et ayant déjà pu effectuer un stage dans cette branche, c'est naturellement que je me suis dirigé vers un organisme traitant de ce sujet. J'ai donc effectué ce stage à l'Autorité de la Qualité de Service dans les Transports (AQST) qui traite comme son nom l'indique de la qualité de service dans les transports, et essaye de proposer des voies d'améliorations. Ce stage est prévu du 28 Mai au 20 Août 2019. La date de rendu du rapport de stage étant le 28 Juin, j'ai donc effectué 4 semaines complètes de stage. Ce rapport traduit ce que j'ai fait jusque-là ainsi que les attendus / prévisions pour la suite de mon stage.

Le sujet proposé par l'AQST était adapté à mes attentes : j'ai dû donner une approche de la qualité de service à long terme (2030-2050) dans les transports collectifs réguliers de voyageurs. Ma démarche était centrée sur les transports en commun lourds, parisiens principalement, (métro, RER, train) pour donner une vision possible pour l'amélioration de leur ponctualité. L'une des idées était une comparaison avec les meilleures pratiques mondiales dans ce domaine afin d'en tirer des enseignements et idées. Un aperçu rapide concernant les autres modes de transports, et sur d'autres dimensions de la qualité de service que celle de la ponctualité était aussi envisagé.

La ponctualité concernant les transports en commun lourds regroupe plusieurs caractéristiques et voies d'amélioration différentes, mon travail a donc consisté à étudier étape par étape les différentes voies pouvant contribuer à une amélioration de la ponctualité.

- J'ai dans un premier temps pris connaissance du sujet qu'est le réseau de transport du métro parisien mais également du RER et plus globalement des trains TER ou TGV et leur ponctualité associée, par une revue de littérature traitant du sujet dans sa globalité, avec une variété de différents documents.
- À la suite de ces lectures, mon premier travail a consisté à aborder l'une des dimensions importantes pour l'amélioration de la ponctualité, qui est l'automatisation des métros parisiens (en réseau fermé), avec une étude des technologies possibles et leurs coûts associés pour en donner une vision de la tendance des évolutions (étape à laquelle je suis arrivé à l'heure d'écrire ce rapport de stage).
- Pour la suite de mon stage, je m'attarderais à l'effet d'autres dispositifs du métro comme les portes palières, les largeurs de portes de métro, les gestes métiers et leurs possibles impacts sur la ponctualité du métro, toujours en étudiant ce qui se fait de mieux dans ce domaine pour en ressortir des enseignements. Les grands étapes pour aboutir à diverses échéances de vision de performance à long terme seront également examinées (travaux temporaire, impacts sur les personnels et sur les lignes concernées).

- La question de la ponctualité pour les trains (de banlieues Parisiennes, des grands axes TGV ou grands axes interurbains) sera aussi abordée bien que plus complexe du fait de la multi-activité de ces lignes (réseau ouvert), imposant des contraintes additionnelles. Les cas de lignes isolées, puis isolables du reste du réseau seront principalement étudiés.

L'ensemble de ce travail a pour but d'être présenté à l'HCQST (Haut Comité de la Qualité de Service dans les Transports), composé de plusieurs représentants d'associations (détaillé dans la partie « Présentation de la structure d'accueil ») pour lequel l'AQST organise plusieurs réunions chaque années sur les différents volets de la qualité de service dans les transports. Ceci afin que les organismes exploitants répondent aux questions soulevées par les résultats trouvés lors des diverses études (mon sujet étant la ponctualité des transports en commun lourds par exemple) afin de permettre une amélioration continue des services.

Présentation de la structure d'accueil

Historique et taille

L'AQST, créée par décrets n°2012-211 du 14 Février 2012 et 2012-216 du 15 Février 2012, est un organisme placé au sein du Conseil Général de l'Environnement et du Développement Durable (CGEDD) du ministère de la transition écologique et solidaire. L'AQST est constituée par une équipe de 4 personnes, mais est appuyée par le ministère pour la communication, la logistique, l'informatique, et accueille tout au long de l'année des stagiaires chargés de travailler sur les différentes problématiques gérées par l'organisme.

Activités et objectifs

L'AQST se charge de :

- diffuser des informations statistiques régulières sur la qualité de service dans les transports, en particulier leur ponctualité et leur régularité
- veiller à la qualité de l'information fournie aux voyageurs
- informer les voyageurs de leurs droits
- contribuer à améliorer les dispositifs de traitement des réclamations et de médiation
- réaliser ou faire réaliser des études ou sondages de satisfaction
- faire toute proposition utile pour l'amélioration de la qualité de service

Ceci dans le champ de la qualité de service regroupant les thématiques de : l'offre de service, l'accessibilité, les informations, la durée, l'attention portée au client, le confort, la sécurité et l'impact environnemental.

L'un des bandeaux de présentation sur le site de l'AQST définit de manière générale les missions et rôles de l'AQST de la manière suivante :

Missions et rôle de l'AQST

L'Autorité de la qualité de service dans les transports (AQST) veille à l'amélioration de la qualité de service, notamment la régularité et la ponctualité, dans les transports de voyageurs et à la qualité de l'information diffusée aux voyageurs en situation normale comme en situation dégradée ou perturbée.

Figure 1 : Capture d'écran d'un bandeau de présentation des missions et rôle de l'AQST sur le site de l'organisme (Source : site de l'AQST)

Le rôle de l'AQST est donc, via diverses études et recherches menées au cours de l'année, de proposer des voies d'améliorations de la qualité de service dans les transports au Haut Comité de la Qualité de Service dans les Transports (HCQST). Le HCQST réunit des représentants des acteurs de tous les modes de transport de voyageur. Il comprend 37 membres groupés en 4 collèges :

- Des parlementaires et les représentants des collectivités publiques :

- deux députés et deux sénateurs
 - deux représentants du ministre chargé des transports
 - un représentant du ministre chargé de la consommation
 - un représentant de l'Association des régions de France
 - un représentant de l'Assemblée des départements de France
 - un représentant de l'Association des maires des grandes villes de France
 - un représentant du Groupement des autorités responsables des transports
 - un représentant du Syndicat des transports d'Ile-de-France
- Des représentants des opérateurs
 - un représentant de la Fédération nationale de l'aviation marchande
 - un représentant du Board of airlines representatives
 - un représentant du Syndicat des compagnies aériennes autonomes
 - un représentant d'Armateurs de France
 - trois représentants de l'Union des transports publics
 - un représentant de l'Union des aéroports français
 - un représentant de la Fédération nationale des transports de voyageurs
 - un représentant de l'Union des ports de France)
- Des représentants des consommateurs et usagers des transports
 - neuf membres d'associations représentatives de consommateurs et d'usagers des transports
 - un représentant de l'association des paralysés de France
- Des personnalités qualifiées
 - un représentant du Centre d'études sur les réseaux, les transports, l'urbanisme et les constructions publiques
 - une personnalité choisie en raison de sa compétence dans le domaine de l'évaluation de la qualité des services publics
 - trois enseignants-chercheurs désignés en raison de leur compétence en matière de transports

Les rassemblements de l'HCQST à hauteur de 4 réunions par an ont pour but de mettre les services de transports publics « sous tension ». Elle présente la situation en cours et propose certaines pistes d'améliorations selon la thématique évoquée. Les présentations reposent globalement sur le travail et recherches des stagiaires au sein de l'AQST.

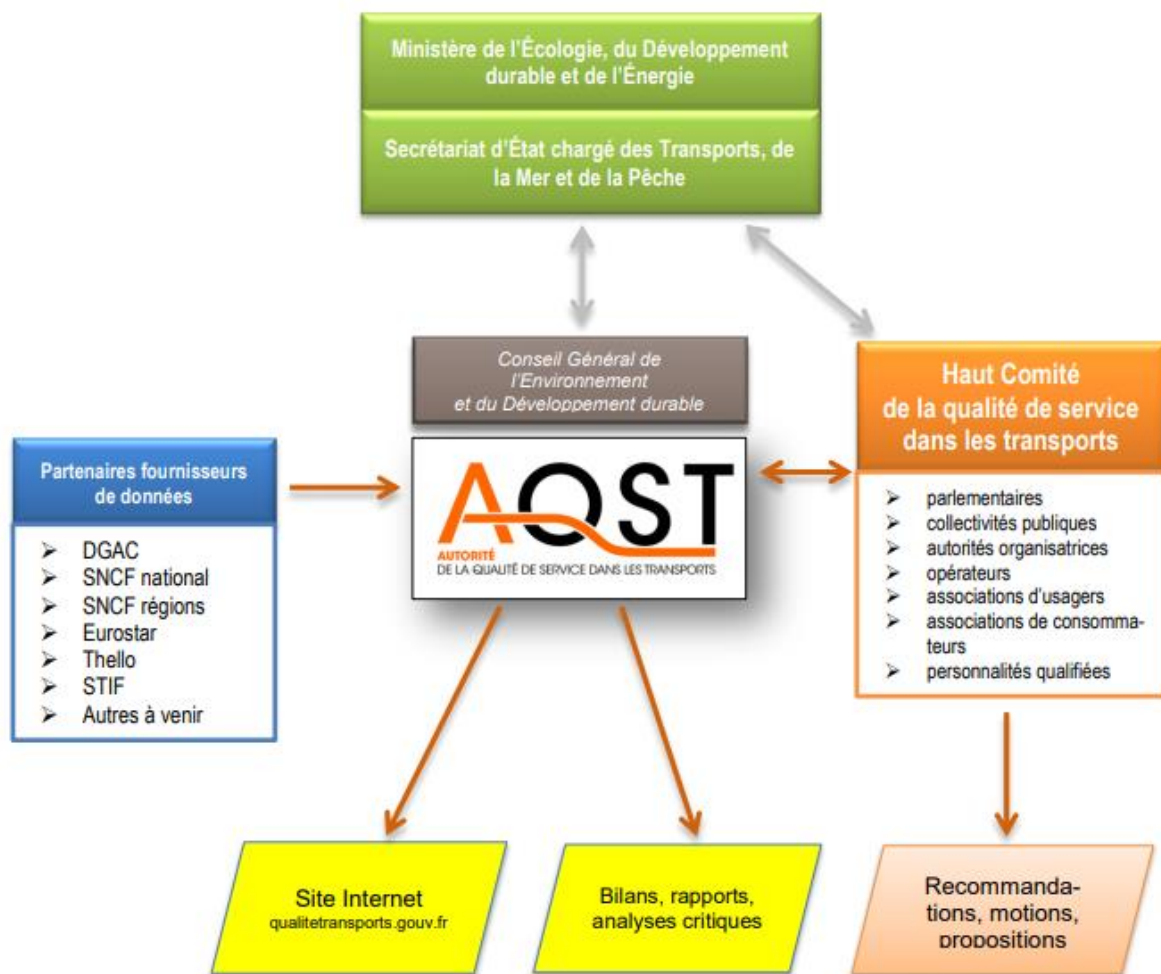


Figure 2 : Diagramme repositionnant l'AQST dans son contexte et montrant les liens avec ses partenaires (Source : site de l'AQST)

Matériels et méthodes utilisés

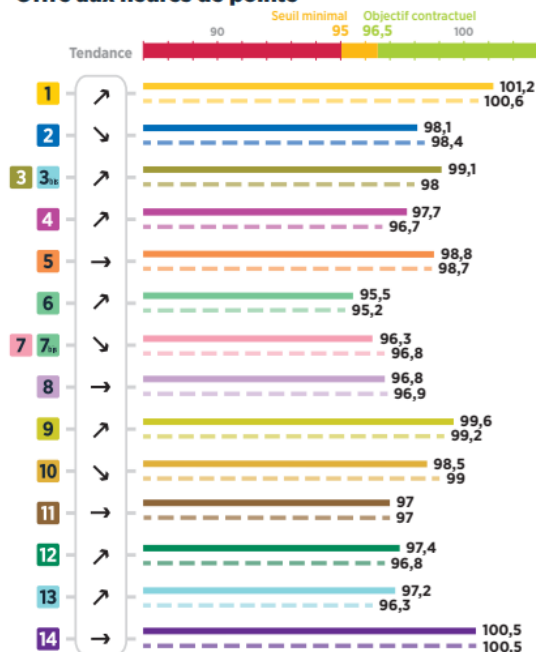
Explications préalables à la description des méthodes utilisées

Afin d'être au point sur le sujet que j'allais étudier pour ce stage, j'ai commencé par effectuer une revue de littérature pendant les deux premières semaines. J'ai donc lu une variété de documents traitant de l'historique du réseau ou de différentes lignes, de l'automatisation des trains, des diverses technologies possibles et de leurs coûts associés, de leur fonctionnement technique. J'ai également pu lire plusieurs travaux de benchmarking comparant les réseaux de transport en commun lourds dans le monde, et des cas spécifiques à l'étranger, mais aussi des communiqués des organismes représentants de transport (SNCF, RATP) ou de l'Autorité Organisatrice des Transports (AOT) en Île-De-France, Île-De-France Mobilités. Des schémas directeurs des lignes de transports, des projets pour les années à venir, ou encore des propositions de think thanks (regroupement d'experts) faisaient également parti de mes lectures. Avec mes recherches personnelles menées en parallèle, concernant des précisions ou des interrogations à la suite de ces lectures, tout cela m'a permis une réelle auto-formation sur le sujet afin de pouvoir l'étudier et en discuter avec toutes les clés en mains. Les documents m'ont été fournis par mon tuteur professionnel. J'ai donc, avec tout cela, pu avoir une première approche de mon sujet d'étude et développer une culture sur le sujet. Beaucoup de questions me sont également venues, et à la fin de cette revue de littérature, nous avons pu nous entretenir avec mon tuteur professionnel pour répondre à mes interrogations et définir ce qui allait suivre concernant le stage.

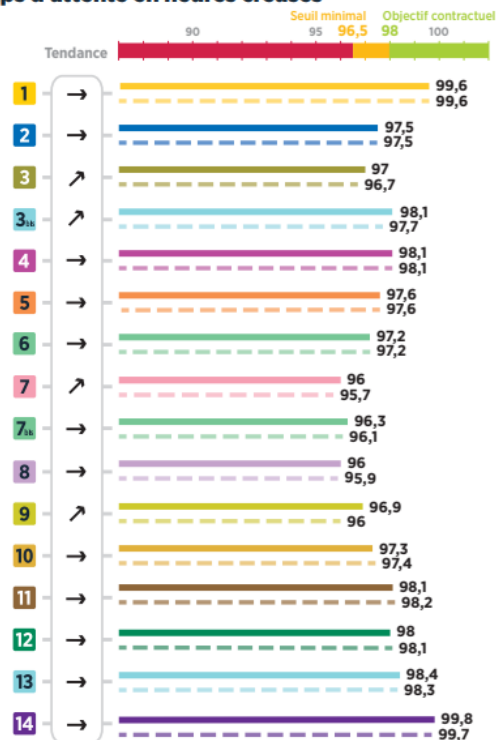
La seconde étape de mon stage consistait à évaluer à quel point une automatisation complète ou partielle des lignes du réseau métropolitain parisien pouvait avoir un bon impact socio-économique. L'idée étant donc de proposer un scénario viable d'automatisation (complète ou partielle selon les particularités des lignes) pour le long terme, mais surtout essayer d'accélérer cette tendance vers l'automatisation qui semble être à première vue une voie toute tracée pour l'amélioration de la ponctualité. Pour l'instant 2 des 14 lignes du métro parisien sont complètement automatisées (la ligne 14 depuis 1998 et la ligne 1 depuis 2011) et la ligne 4 est en cours d'automatisation. Des discussions semblent également être en cours pour la ligne 13. L'objectif de mon étude est donc de donner des faits démontrant l'attrait socio-économique, et les bienfaits pour la qualité de service d'accélérer cette tendance vers l'automatisation. Cette tendance, qui, si elle suit le rythme actuel d'automatisation des lignes, permettrait une automatisation totale des lignes parisiennes seulement dans une cinquantaine d'année. J'ai donc mené une étude de l'apport socio-économique basée en partie sur l'automatisation des lignes 1 et 14 du métro parisien et de leurs coûts associés. Chaque trimestre, Île-De France Mobilité fournit un bulletin de la qualité de service indiquant les résultats de ponctualité. Le but était de se servir de ses résultats, afin qu'après plusieurs méthodes de calcul je puisse donner une approche de la perte socio-économique due au manque de ponctualité.

Méto La ponctualité sur les lignes exploitées par la RATP

Offre aux heures de pointe



Temps d'attente en heures creuses



Comment lire les graphiques ?

- Moyenne janvier-décembre 2017
- - - Moyenne janvier-décembre 2016

Tendance par rapport à la même période de l'année 2016 :

- ↗ Ponctualité en progression
- ↘ Ponctualité en baisse
- Ponctualité stable

- Le **seuil minimal** est le niveau en dessous duquel les transporteurs ont un malus.
- L'**objectif contractuel** est le niveau qui permet aux transporteurs de bénéficier du bonus maximum.
- Entre ces deux niveaux, le bonus est progressif.

L'**indicateur d'offre aux heures de pointe** donne le pourcentage du nombre réel de métros en circulation aux heures de pointe par rapport au service commandé. Les métros qui ne peuvent pas circuler aux heures de pointe compte-tenu des contraintes particulières de cette période sont principalement reportés sur la période d'heure creuse qui lui succède.

L'**indicateur de temps d'attente en heures creuses** correspond au pourcentage de voyageurs ayant attendu moins que l'intervalle de référence.

Figure 3 : Capture d'écran du bulletin d'information de la qualité de service du 4^{ème} semestre 2017 (n°31) provenant d'Île-De-France Mobilités (Source : Ile-De-France Mobilités)

Les indicateurs utilisés pour la ponctualité par Île-De-France Mobilités sont différents selon qu'ils concernent l'heure de pointe ou l'heure creuse. En heure de pointe, l'indicateur montre le pourcentage de métros s'étant présenté sur le nombre qui a été commandé. On observe de très bons taux pour les lignes automatisées (lignes 1 et 14), qui par l'automatisation permet d'éviter la majorité des problèmes survenant sur une ligne en temps normal. Les taux pour les lignes automatisées vont même au-delà de 100%, ce qui indique simplement que plus de métros se sont présentés en station en heure de pointe que ce qui était commandé. On remarque par ailleurs, toujours du côté heure de pointe, que toutes les lignes ont un bon pourcentage de ponctualité, toujours au-dessus du seuil minimal de 95% et ce depuis 2014. Concernant l'heure creuse, l'indicateur définit le pourcentage de voyageurs ayant attendu

leur métro d'une durée inférieure à l'intervalle de référence (différent selon le type de ligne et également selon le moment de la journée). Les lignes de métros automatisées ont là encore de très bons taux de ponctualité. Les lignes non automatisées gardent un taux moins bon mais tout de même presque toujours au-dessus du seuil minimal de 96,5% demandé par Île-De-France Mobilités. En première approche on peut penser que ces résultats sont globalement très bons et que l'apport des lignes automatisées est moindre. Mais il peut être également mis en parallèle à d'autres réseaux comme celui de Hong Kong qui se vante d'obtenir un taux moyen de ponctualité de 99,9%. Mais ces taux de ponctualité non égaux à 100% doivent surtout être remis dans leur contexte, aussi petit soit le pourcentage de personnes n'ayant pas eu leur train à l'heure, ceci engendrera une perte socio-économique, la valeur du temps d'un voyageur perdant une heure de son temps suite à des retards imprévus étant estimée à 45€/heure. C'est pourquoi il est intéressant d'étudier l'impact socio-économique que peuvent procurer les lignes du métro parisien si elles atteignent un niveau de 100%, ce qui est l'objet de mon étude.

Dans cette démarche, j'ai donc collecté diverses données pour évaluer la perte socio-économique engendrée par chacune des lignes. Toutes les données rentrées dans le tableur Excel et avec les formules adaptées ont pu donner une approche de cette perte socio-économique (tout sera détaillé dès la page 12, et un récapitulatif de ce tableur est disponible en Annexe 1). Pour chaque ligne de métro, les données suivantes ont été collectées : nombre de voyageurs, longueur et temps de parcours de la ligne, taux de ponctualité en heure creuse et en heure de pointe, parcours moyen d'un voyageur dans le métro, parcours total des voyageurs dans le métro sur une année, etc...

Toutes ces données ont permis d'obtenir le nombre d'heures perdues par an par les voyageurs et d'évaluer une perte socio-économique concernant l'heure de pointe et l'heure creuse. Le gain de temps de temps procuré par une automatisation a également un bon impact socio-économique. L'objectif principal est de savoir si l'investissement à fournir pour automatiser les lignes sera ensuite couvert par les apports socio-économiques qu'il engendre, en un mot si le projet est viable ou non. Pour ceci il a fallu évaluer à combien se chiffrait une automatisation de ligne de métro existante. Des données comme la diminution des coûts d'exploitation, le nombre de rame de métro à acheter pour permettre d'atteindre le nombre de métro requis à l'heure, ainsi que l'investissement moyen au km pour automatiser une ligne de métro ont également été nécessaire pour une bonne approche socio-économique. J'ai également dû m'auto-former à quelques principes d'économie afin de pouvoir parfaire les calculs. Les méthodes que j'ai utilisées pour tous ces calculs seront présentées dès la page 12 et les résultats sont présentés dans la partie suivante « Résultats et discussion ».

Calendrier de mon premier mois de stage

Ci-après un calendrier de mon emploi du temps à l'AQST lors de mon premier mois de stage.

Lundi	Mardi	Mercredi	Jeudi	Vendredi	Samedi	Dimanche
	28 MAI Présentation, Entrevue avec tuteur professionnel	29	30 FÉRIÉ	31 MAI	1 JUIN	2
3	4	5	6	7	8	9
10 FÉRIÉ	11	12	13	14 Entrevue avec tuteur professionnel	15	16
17	18	19	20 Réunion HCQST	21	22	23
24	25	26	27	28 Date de rendu du rapport de stage	29	30

 : Temps dédié à de la prise de connaissance du sujet, lecture d'articles et divers documents.

 : Temps dédié à des premières recherches et calculs en cas d'automatisation des lignes du métro parisien (analyse socio-économique).

Éléments ponctuels notés en **gras** au jour correspondant.

Les « entrevues avec tuteur professionnel » annotées sont celles correspondant à des moments où nous avons discuté en profondeur des objectifs et éléments concernant la suite du stage. Nous avons à plusieurs reprises eu d'autres échanges concernant des questions ponctuelles, que je n'ai pas répertoriés ici.

Etape 1 : Collecte des données de base

Lignes	[unité]	1	2	3	3bis	4	5	6	7
Nombre de voyageurs (2018)	[million voy/an]	180,7	109,1	99,0	1,7	152,2	114,0	115,1	136,0
Longueur	[km]	16,4	12,3	11,7	1,3	11,5	14,6	13,7	19,2
Temps de parcours	[min]	35	34	32	4	29	35	32	48
Vitesse moyenne du métro	[km/h]	28	22	22	20	24	25	26	24

Lignes	[unité]	7bis	8	9	10	11	12	13	14	Somme
Nombre de voyageurs (2018)	[million voy/an]	3,6	107,8	143,0	46,4	47,8	85,4	135,7	87,4	1564,7
Longueur	[km]	3,1	23,4	19,6	11,6	6,3	15,3	17	8,6	205,6
Temps de parcours	[min]	8	52	52	29	15	38	38	15	Vitesse moyenne
Vitesse moyenne du métro	[km/h]	22	27	23	24	26	24	27	36	26

Figure 4 : Données de bases collectées sur le tableur Excel

J'ai tout d'abord collecté les données de base de chaque ligne de métro. Les nombres de voyageurs par an et la longueur des lignes sont répertoriés chaque années et disponibles sur le site de l'Observatoire de la Mobilité en Île-De-France (OMNIL). Le temps de parcours est la moyenne de 3 données récupérées via différentes sources (qui avait la même valeur à 1 minute près en général). Ces 3 sources étaient : les horaires de passage des premiers et derniers trajets diffusées de chaque ligne par la RATP, il suffit donc de prendre le temps entre le premier (ou dernier) passage à la première station et celui à la dernière station terminus (lorsque aucun autre métro ne part en milieu de ligne en même temps que le premier) pour obtenir un temps de parcours de la ligne. La seconde source était Google Maps et son indication de temps de trajet, la dernière était Wikipédia. L'image suivante indique la légende des cases présentes dans le tableau et indique donc les lignes automatisées (1 et 14), en cours d'automatisation (4), avec une automatisation partielle (3, 5, 9), avec une automatisation moindre (2, 6, 7, 8, 10, 11, 12, 13). Les lignes bis peuvent présenter des résultats erronés suite à des données soit anciennes ou indisponibles, soit calculés avec une trop grosse marge d'erreur. Les dernières lignes de légende s'appliqueront aux prochains éléments du tableau.

	Automatisée
	En cours d'automatisation
	Automatisation partielle
	Automatisation moindre
	Lignes bis pouvant présenter de faux résultats dans la suite du tableau
	Elements à re-vérifier
	Ne s'applique pas à la ligne
	Investissements déjà réalisés

Figure 5 : Légende du tableur Excel

Etape 2 : Relevé des taux de ponctualité et calculs de pertes économiques associés

Etape 2.1 : Ponctualité en heure de pointe

Lignes		[unité]	1	2	3	3bis	4	5	6	7
Heure de pointe	Ponctualité en heure de pointe (2017)	[% de métros commandés en circulation en hdp]	101,2	98,1	99,1	99,1	97,7	98,8	95,5	96,3
	Temps perdu sur un trajet entier par un métro (hdp)	[min/voy]	-0,4	0,6	0,3	0,0	0,7	0,4	1,4	1,8
	Temps perdu sur un trajet moyen de voyageur (hdp)	[sec/voy]	-8	16	8	9	18	9	33	29
	Temps perdu sur un trajet moyen de voyageur (hdp)	[min/voy]	-0,13	0,27	0,13	0,14	0,31	0,15	0,55	0,48
	Temps perdu au total sur la ligne (hdp)	[million h/an]		0,2	0,1	0,0	0,4	0,1	0,5	0,5
	Perte économique (hdp)	[million €/an]		10,8 €	4,5 €	0,1 €	16,8 €	6,2 €	22,7 €	23,5 €
			7bis	8	9	10	11	12	13	14
Heure de pointe	Ponctualité en heure de pointe (2017)	[% de métros commandés en circulation en hdp]	96,3	96,8	99,6	98,5	97	97,4	97,2	100,5
	Temps perdu sur un trajet entier par un métro (hdp)	[min/voy]	0,3	1,6	0,2	0,4	0,4	1,0	1,1	-0,1
	Temps perdu sur un trajet moyen de voyageur (hdp)	[sec/voy]	31	22	3	11	22	20	19	-3
	Temps perdu sur un trajet moyen de voyageur (hdp)	[min/voy]	0,52	0,37	0,06	0,19	0,36	0,33	0,32	-0,04
	Temps perdu au total sur la ligne (hdp)	[million h/an]	0,0	0,3	0,1	0,1	0,1	0,2	0,4	
	Perte économique (hdp)	[million €/an]	0,7 €	14,3 €	2,8 €	3,2 €	6,2 €	10,2 €	15,8 €	

Figure 6 : Tableur Excel présentant les données relevées et calculées en heure de pointe

La seconde étape consistait à relever les taux de ponctualité et d'effectuer les premiers calculs de perte socio-économique associés. Les taux de ponctualité sont rendu publics avec un bulletin d'information trimestriel de la ponctualité diffusé par Île-De-France Mobilités. La suite détaille les calculs effectués. Ici, le taux de ponctualité en heure de pointe (défini par Île-De-France Mobilité) correspond au pourcentage de métros s'étant présentés en heure de pointe sur le nombre qui a réellement été commandé (moyenne de l'année 2017 ici).

Etape 2.1.1 : Calcul du temps perdu sur un trajet entier

Le temps perdu sur un trajet entier en heure de pointe pour chaque ligne est le pourcentage de la ponctualité de la ligne multiplié par son temps de parcours (en émettant l'hypothèse que si un taux de ponctualité est égal à 90% par exemple, un trajet moyen verra son temps de parcours augmenté de 10%, soit multiplié par 1,1). Le cas suivant est celui de la ligne 1 qui est déjà automatisée et a donc un taux de ponctualité en heure de pointe de plus de 100%.

Temps de parcours	[min]	35
Vitesse moyenne du métro	[km/h]	28
Ponctualité en heure de pointe (2017)	[% de métros commandés en circulation en hdp]	101,2
Temps perdu sur un trajet entier par un métro (hdp)	[mi]	$=((100-F11)/100)*F9$

Figure 7 : Détail du calcul pour le temps perdu sur un trajet entier par un métro en heure de pointe

Etape 2.1.2 : Calcul du temps perdu sur un trajet moyen de voyageur

Le temps perdu sur un trajet moyen de voyageur est simplement le temps perdu sur un trajet entier multiplié par le pourcentage réel de la ligne qu'un voyageur parcourt (un voyageur parcourt rarement une ligne dans son intégralité à chaque trajet). Il a été répertorié en 2018 que la moyenne du parcours effectué par un voyageur dans le métro est de 5,2 km. (L'hypothèse ici est donc que pour chaque ligne, un usager moyen parcourt 5,2 km. Ce qui pose problème pour les lignes bis qui ne sont pas plus longues que 3,1 km)

Longueur	[km]	16,4
Temps de parcours	[min]	35
Vitesse moyenne du métro	[km/h]	28
Ponctualité en heure de pointe (2017)	[% de métros commandés en circulation en hdp]	101,2
Temps perdu sur un trajet entier par un métro (hdp)	[min/voy]	-0,4
Temps perdu sur un trajet moyen de voyageur (hdp)	[sec/voy]	-8
Temps perdu sur un trajet moyen de voyageur (hdp)	[min/voy]	=F12*(SA\$15/F5)

Parcours moyen dans le métro par voyageur (2018)
[km]
5,2

Figure 8 : Détail du calcul pour le temps perdu sur un trajet moyen de voyageur (en minutes/voyageur) par un métro en heure de pointe

Temps perdu sur un trajet moyen de voyageur (hdp)	[sec/voy]	=F14*60
Temps perdu sur un trajet moyen de voyageur (hdp)	[min/voy]	-0,13

Figure 9 : Détail de la conversion du temps perdu sur un trajet moyen de voyageur de minutes en secondes

Etape 2.1.3 : Calcul du temps perdu au total sur la ligne (en heure de pointe)

Pour obtenir le total d'heures perdues par an sur chaque ligne, il suffit de multiplier le temps moyen perdu par voyageurs (converti en heure) par le total de voyageurs par an. Or, le nombre de voyageurs par an (indiqué dans la toute première ligne du tableau) représente les voyageurs en heure de pointe et en heure creuse. Il a donc fallu calculer le pourcentage de personnes se déplaçant en heure de pointe et en heure creuse. Voici un diagramme représentant la répartition journalière des présents dans le métro un jour ouvrable d'hiver en 2014.

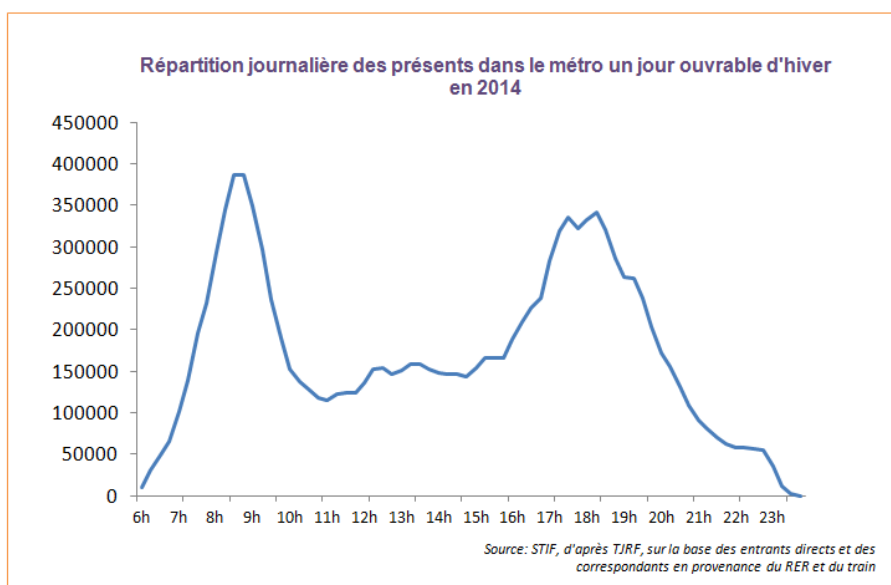


Figure 10 : Diagramme représentant la répartition journalière des présents dans le métro un jour ouvrable d'hiver en 2014 (Source : Île-De-France Mobilité)

Ce diagramme m'a permis de déduire le pourcentage de personnes prenant le métro en heure de pointe et celui des personnes le prenant en heure creuse. L'heure de pointe ne concerne qu'un quart du temps d'exploitation du métro (de 7h30 à 9h30 puis de 16h30 à 19h30 sur une exploitation commençant à 5h et finissant à 1h du matin) mais représente 48,1% de la fréquentation.

Le temps perdu par voyageur en moyenne (converti en heure) multiplié par le nombre de voyageurs par an, à nouveau multiplié par le pourcentage de personnes prenant le métro en heure de pointe nous donne bien le total d'heures perdues par an (en émettant l'hypothèse que chaque ligne a exactement le taux moyen de voyageurs en heure de pointe et heure creuse).

Lignes	[unité]	1	2	
Nombre de voyageurs (2018)	[million voy/an]	180,7	109,1	
Longueur	[km]	16,4	12,3	
Temps de parcours	[min]	35	34	
Vitesse moyenne du métro	[km/h]	28	22	
Ponctualité en heure de pointe (2017)	[% de métros commandés en circulation en hdp]	101,2	98,1	
Temps perdu sur un trajet entier par un métro (hdp)	[min/voy]	-0,4	0,6	
Temps perdu sur un trajet moyen de voyageur (hdp)	[sec/voy]	-8	16	
Temps perdu sur un trajet moyen de voyageur (hdp)	[min/voy]	-0,13	0,27	
Temps perdu au total sur la ligne (hdp)	[million h/an]		$= (G14/60) * G4 * \$A\24	

Taux de voyageur	
Heure de pointe	Heure creuse
[%]	
48,1%	51,9%

Figure 11 : Détail du calcul du temps perdu au total chaque année sur une ligne en heure de pointe

Etape 2.1.4 : Calcul de la perte économique engendrée

La perte économique engendrée par ce total d'heures perdues est simplement le nombre total d'heures perdues par an, multiplié par la valeur du temps pour un voyageur en cas de retard (qui est multiplié par un coefficient 3 par rapport au temps normal).

Temps perdu au total sur la ligne (hdp)	[million h/an]		0,2	0,1
Perte économique (hdp)	[million €/an]		=G15*3\$5	4,5 €

Valeur du temps pour un voyageur	
en temps normal	en cas de retard
[€/h]	
15	45

Figure 12 : Détail du calcul de la perte économique par ligne par an en heure de pointe

Etape 2.2 : Ponctualité en heure creuse

Lignes		[unité]	1	2	3	3bis	4	5	6	7
Heure creuse	Ponctualité en heure creuse (2017)	Pourcentage voyageurs ayant attendu moins que l'intervalle de référence (3 min hdp, 6 min h c, 10 min en soirée)	99,6	97,5	97	98,1	98,1	97,6	97,2	96
	Temps perdu sur un trajet entier par un métro (hc)	[min/voy]	-0,1	0,6	0,7	0,0	0,4	0,6	0,7	1,6
	Temps perdu sur un trajet moyen de voyageur (hc)	[sec/voy]	-2	16	20	12	10	13	16	26
	Temps perdu sur un trajet moyen de voyageur (hc)	[min/voy]	0,0	0,3	0,3	0,2	0,2	0,2	0,3	0,4
	Temps perdu au total sur la ligne (hc)	[million h/an]	0,0	0,3	0,3	0,0	0,2	0,2	0,3	0,5
	Perte économique (hc)	[million €/an]	-2,0	11,3	12,7	0,1	9,8	9,7	11,7	22,9

			7bis	8	9	10	11	12	13	14
Heure creuse	Ponctualité en heure creuse (2017)	Pourcentage voyageurs ayant attendu moins que l'intervalle de référence (3 min hdp, 6 min h c, 10 min en soirée)	96,3	96	96,9	97,3	98,1	98	98,4	99,8
	Temps perdu sur un trajet entier par un métro (hc)	[min/voy]	0,3	1,7	1,3	0,6	0,2	0,5	0,4	-0,1
	Temps perdu sur un trajet moyen de voyageur (hc)	[sec/voy]	26	23	20	16	9	10	7	-2
	Temps perdu sur un trajet moyen de voyageur (hc)	[min/voy]	0,4	0,4	0,3	0,3	0,1	0,2	0,1	0,0
	Temps perdu au total sur la ligne (hc)	[million h/an]	0,0	0,4	0,4	0,1	0,1	0,1	0,1	0,0
	Perte économique (hc)	[million €/an]	0,6	16,1	18,8	4,7	2,8	5,7	5,8	-1,4

Figure 13 : Tableau Excel présentant les données relevées et calculées en heure creuse

La démarche pour calculer la perte économique en heure creuse est exactement la même que celle effectuée pour l'heure de pointe. L'indicateur utilisé ici pour la ponctualité en heure creuse indique le pourcentage de personnes ayant attendu moins que l'intervalle de référence donné, différent pour chaque lignes et horaires de l'heure creuse (avec en moyenne un intervalle de 6 minutes en heure creuse quelconque et 10 minutes en heure creuse de soirée).

Les principes de calculs suivants sont les mêmes que ceux détaillés pour l'heure de pointe, veuillez vous référer au texte correspondant s'il y a difficulté de compréhension des captures d'écran.

Etape 2.2.1 : Calcul du temps perdu sur un trajet entier

Le principe de calcul du temps perdu pour l'heure creuse est le même que pour l'heure de pointe. À la différence qu'ici on ne prend pas un taux de ponctualité de référence de 100% en cas d'automatisation, les moyennes de ponctualité en heure creuse des métros automatisés de Paris (moyenne par année depuis qu'ils sont automatisés) indiquant un taux de ponctualité de 99,3%, on prend donc ce taux, en émettant l'hypothèse que ce serait le taux moyen de ponctualité en heure creuse de toutes les lignes. On émet à nouveau l'hypothèse que si un taux de ponctualité est égal à 90% par exemple, un trajet moyen verra son temps de parcours augmenté de 10%, soit multiplié par 1,1. Ce qui semble néanmoins moins pertinent que l'heure de pointe au vu des indicateurs utilisés.

Temps de parcours	[min]	35	34
Vitesse moyenne du métro	[km/h]	28	22
Ponctualité en heure de pointe (2017)	[% de métros commandés en circulation en hdp]	101,2	98,1
Temps perdu sur un trajet entier par un métro (hdp)	[min/voy]	-0,4	0,6
Temps perdu sur un trajet moyen de voyageur (hdp)	[sec/voy]	-8	16
Temps perdu sur un trajet moyen de voyageur (hdp)	[min/voy]	-0,13	0,27
Temps perdu au total sur la ligne (hdp)	[million h/an]		0,2
Perte économique (hdp)	[million €/an]		10,8 €
Ponctualité en heure creuse (2017)	Pourcentage voyageurs ayant attendu moins que l'intervalle de référence (3 min hdp, 6 min h c, 10 min en soirée)	99,6	97,5
Temps perdu sur un trajet entier par un métro (hc)	[min/voy]	$= (S_{A49} - G_{17}) / 100 \cdot G_9$	

Moyenne de la ponctualité en heure creuse des métros automatisés depuis qu'ils le sont
[%]
99,3

Figure 14 : Détail du calcul pour le temps perdu sur un trajet entier par un métro en heure creuse

Etape 2.2.2 : Calcul du temps perdu sur un trajet moyen de voyageur

Principe identique à celui de l'heure de pointe.

	Longueur	[km]	16,4	12,3
	Temps de parcours	[min]	35	34
	Vitesse moyenne du métro	[km/h]	28	22
Heure de pointe	Ponctualité en heure de pointe (2017)	[% de métros commandés en circulation en hdp]	101,2	98,1
	Temps perdu sur un trajet entier par un métro (hdp)	[min/voy]	-0,4	0,6
	Temps perdu sur un trajet moyen de voyageur (hdp)	[sec/voy]	-8	16
	Temps perdu sur un trajet moyen de voyageur (hdp)	[min/voy]	-0,13	0,27
	Temps perdu au total sur la ligne (hdp)	[million h/an]		0,2
	Perte économique (hdp)	[million €/an]		10,8 €
Heure creuse	Ponctualité en heure creuse (2017)	Pourcentage voyageurs ayant attendu moins que l'intervalle de référence (3 min hdp, 6 min h c, 10 min en soirée)	99,6	97,5
	Temps perdu sur un trajet entier par un métro (hc)	[min/voy]	-0,1	0,6
	Temps perdu sur un trajet moyen de voyageur (hc)	[sec/voy]	-2	16
	Temps perdu sur un trajet moyen de voyageur (hc)	[min/voy]	=G18*(S\$A\$15/G5)	

Parcours moyen dans le métro par voyageur (2018)
[km]
5,2

Figure 15 : Détail du calcul pour le temps perdu sur un trajet moyen de voyageur (en minute / voyageur) par un métro en heure creuse

Etape 2.2.3 : Calcul du temps perdu au total sur la ligne (en heure creuse)

Principe identique à celui de l'heure de pointe. On multiplie cette fois-ci le pourcentage de fréquentation en heure creuse à la fréquentation totale. En émettant à nouveau l'hypothèse que chaque ligne a exactement le taux moyen de voyageurs en heure de pointe et heure creuse.

	Nombre de voyageurs (2018)	[million voy/an]	180,7	109,1	
	Longueur	[km]	16,4	12,3	
	Temps de parcours	[min]	35	34	
	Vitesse moyenne du métro	[km/h]	28	22	
Heure de pointe	Ponctualité en heure de pointe (2017)	[% de métros commandés en circulation en hdp]	101,2	98,1	
	Temps perdu sur un trajet entier par un métro (hdp)	[min/voy]	-0,4	0,6	
	Temps perdu sur un trajet moyen de voyageur (hdp)	[sec/voy]	-8	16	
	Temps perdu sur un trajet moyen de voyageur (hdp)	[min/voy]	-0,13	0,27	
	Temps perdu au total sur la ligne (hdp)	[million h/an]		0,2	
	Perte économique (hdp)	[million €/an]		10,81	4
Heure creuse	Ponctualité en heure creuse (2017)	Pourcentage voyageurs ayant attendu moins que l'intervalle de référence (3 min hdp, 6 min h.c., 10 min en soirée)	99,6	97,5	
	Temps perdu sur un trajet entier par un métro (hc)	[min/voy]	-0,1	0,6	
	Temps perdu sur un trajet moyen de voyageur (hc)	[sec/voy]	-2	16	
	Temps perdu sur un trajet moyen de voyageur (hc)	[min/voy]	0,0	0,3	
	Temps perdu au total sur la ligne (hc)	[million h/an]		=G4*\$B\$24*G20/60	

Taux de voyageur	
Heure de pointe	Heure creuse
[%]	
48,1%	51,9%

Figure 16 : Détail du calcul du temps perdu au total chaque année sur une ligne en heure creuse

Etape 2.2.4 : Calcul de la perte économique engendrée

Principe identique à celui de l'heure de pointe.

Temps perdu au total sur la ligne (hc)	[million h/an]	0,0	0,3
Perte économique (hc)	[million €/an]	-2,0	=G21*\$B\$5

Valeur du temps pour un voyageur	
en temps normal	en cas de retard
[€/h]	
15	45

Figure 17 : Détail du calcul de la perte économique par ligne par an en heure creuse

Etape 3 : Calcul du gain de temps sur un trajet dû à une vitesse améliorée et gains socio-économiques associés

L'automatisation permettrait en plus d'un gain en ponctualité, un petit gain de temps dû à une augmentation de la vitesse (qui serait gérée automatiquement et de la manière la plus adaptée possible, permettant une accélération et un freinage au moment adéquat). Ce gain de temps permet également un gain socio-économique que j'ai essayé de calculer, dans le cas où toutes les lignes seraient automatisées.

	Lignes	[unité]	1	2	3	3bis	4	5	6	7
Si augmentation vitesse commerciale	Gain de temps sur le trajet si automatisation	[min/voy]		3,4	1,6	0,2	2,9	1,8	3,2	4,8
	Gain de temps sur un trajet moyen de voyageur si automatisation	[min/voy]		1,4	0,7	0,8	1,3	0,6	1,2	1,3
	Gain de temps total sur la ligne	[million h/an]		2,6	1,2	0,0	3,4	1,2	2,3	2,9
	Gain économique (Temps trajet amélioré)	[million €/an]		39,2 €	17,4 €	0,3 €	50,5 €	17,8 €	35,0 €	44,0 €

			7bis	8	9	10	11	12	13	14
Si augmentation vitesse commerciale	Gain de temps sur le trajet si automatisation	[min/voy]	0,8	5,2	2,6	2,9	1,5	3,8	3,8	
	Gain de temps sur un trajet moyen de voyageur si automatisation	[min/voy]	1,4	1,1	0,7	1,3	1,2	1,3	1,2	
	Gain de temps total sur la ligne	[million h/an]	0,1	2,1	1,6	1,0	1,0	1,8	2,6	
	Gain économique (Temps trajet amélioré)	[million €/an]	1,2 €	30,8 €	24,7 €	14,8 €	14,3 €	27,2 €	39,2 €	

Figure 18 : Tableau Excel présentant les gains de temps et les gains économiques possibles si les lignes étaient automatisées

Etape 3.1 : Calcul du gain de temps sur un trajet entier si la ligne devenait automatique

Les résultats de la ligne 1 ont démontré que le gain de vitesse quand la ligne est devenue automatique était de l'ordre de 10%. J'ai donc émis l'hypothèse que chaque ligne ne bénéficiant actuellement que d'une automatisation moindre pourrait voir leur vitesse augmentée de 10% après automatisation, à l'image de la ligne 1. Concernant les lignes bénéficiant déjà d'une automatisation partielle, j'ai émis d'un gain de vitesse de seulement 5%.

Pour calculer le gain de temps d'un voyageur s'il parcourt toute la ligne, on multiplie simplement le temps de parcours par le pourcentage d'amélioration de vitesse adapté.

Vitesse gagnée si automatisation (sur base de la L1) sur une ligne bénéficiant :	
d'une automatisation moindre	d'une automatisation partielle
[%]	
10%	5%

Temps de parcours	[min]	35	34	32
Gain de temps sur le trajet si automatisation	[min/voy]		$=\$A\$40 * G9$	1,6

Figure 19 : Détail du calcul du gain de temps sur un trajet complet d'une ligne si celle-ci venait à être automatisée

Etape 3.2 : Calcul du gain de temps sur un trajet moyen de voyageur si la ligne devenait automatique

Pour connaître le gain de temps moyen par voyageur, on utilise à nouveau la donnée concernant le parcours moyen d'un voyageur lorsqu'il prend le métro en Île-De-France. On multiplie le gain de temps sur un trajet complet par le pourcentage de la ligne qu'un voyageur effectue réellement en moyenne (en émettant à nouveau l'hypothèse que pour chaque ligne, un usager parcourt 5,2 km en moyenne).

Longueur	[km]	16,4	12,3	11,7
Gain de temps sur le trajet si automatisation	[min/voy]		3,4	1,6
Gain de temps sur un trajet moyen de voyageur si automatisation	[min/voy]		$=H24 * (\$A\$15 / H5)$	

Parcours moyen dans le métro par voyageur (2018)
[km]
5,2

Figure 20 : Détail du calcul du gain de temps sur un trajet moyen effectué par un voyageur

Etape 3.3 : Calcul du gain de temps total sur une ligne si elle devenait automatique

Pour calculer le gain de temps total que l'on pourrait obtenir si la ligne était automatique, il suffit de multiplier le gain de temps moyen par voyageur (converti en heure) par le nombre de voyageurs.

Nombre de voyageurs (2018)	[million voy/an]	180,7	109,1	99,0
Gain de temps sur un trajet moyen de voyageur si automatisation	[min/voy]		1,4	0,7
Gain de temps total sur la ligne	[million h/an]		2,6	$=H25/60 * H4$

Figure 21 : Détail du calcul du gain de temps total sur la ligne si elle devenait automatique

Etape 3.4 : Calcul du gain socio-économique sur une ligne si elle devenait automatique

Pour calculer le gain socio-économique sur une ligne si elle devenait automatique, on multiplie le gain total d'heures dont pourrait bénéficier la ligne si elle devenait automatique à la valeur du temps attribué à un voyageur en Île-De-France en temps normal.

Gain de temps total sur la ligne	[million h/an]		2,6	1,2
Gain économique (Temps trajet amélioré)	[million €/an]		39,2 €	=H26*\$A\$5

Valeur du temps pour un voyageur	
en temps normal	en cas de retard
[€/h]	
15	45

Figure 22 : Détail du calcul du gain économique sur une ligne si elle devenait automatique

Etape 4 : Calcul du gain socio-économique portant sur la sécurité en cas d'automatisation de ligne de métro

Lignes	[unité]	1	2	3	3bis	4	5	6	7
Gain économique (Sécurité améliorée)	[million €/an]		36,7 €	33,3 €	0,6 €	51,2 €	38,3 €	38,7 €	45,7 €

		7bis	8	9	10	11	12	13	14
Gain économique (Sécurité améliorée)	[million €/an]	1,2 €	36,3 €	48,1 €	15,6 €	16,1 €	28,7 €	45,6 €	

Figure 23 : Tableau Excel présentant les gains socio-économiques possibles portant sur la sécurité si les lignes étaient automatisées

Afin d'évaluer le potentiel gain socio-économique lié à une amélioration de la sécurité, il a fallu relever le nombre de blessés / morts dans le métro en moyenne par année, et le nombre de blessés / morts qu'une ligne automatisée pourrait éviter. Je suis parti de l'hypothèse qu'une ligne automatisée ne provoquerait aucun blessé ou mort (ce qui est le cas des lignes 1 et 4 depuis qu'elles sont automatisées). Ceci est dû principalement à la pose de portes palières le bord des quais de métros automatisés, qui empêche toute intrusion sur la voie. Après avoir trouvé le nombre précis de blessés et morts par an depuis 2005, ainsi que de suicides et tentatives de suicide, j'ai émis l'hypothèse que les suicides et tentatives de suicides ne seraient pas évités par une ligne de métro automatique (avec la sous-hypothèse, très tranchante, qu'une personne souhaitant se suicider trouverait un autre moyen de le faire s'il n'était plus possible de le faire avec un métro). N'ayant pas trouvé beaucoup d'autres sources concordantes, j'ai également pris par précaution le nombre de morts et de blessés (hors

tentative de suicide) correspondant à la moyenne basse de ce que j'avais pu trouver (j'avais trouvé une moyenne d'entre 20 et 40 morts par an dans le métro par exemple). Cela a également pu ajuster mon hypothèse suivante, qui est que la quasi-totalité des morts dans le métro l'ont été suite à une chute sur les voies (qui serait donc maintenant évité par la présence de porte palières). Enfin pour trouver un résultat du gain socio-économique, il faut attribuer une valeur de la vie et une valeur d'un blessé. Ces nombres existent déjà, la valeur de la vie statistique (VVS) en France étant de 3 000 000 €. La valeur d'un blessé grave correspond à 15% de la VVS, soit 450 000 €, et celle d'un blessé léger à 2% de la VVS, soit 60 000 €. En l'absence de détails précis concernant les blessés, j'ai émis l'hypothèse (par précaution) que les blessés dans le métro ne seraient que légers. Le gain économique total si toutes les lignes étaient automatisées et si elles évitaient tous les morts et blessés actuels, est donc la somme du nombre de mort multiplié par la VVS, ainsi que la somme du nombre de blessé multiplié par la valeur d'un blessé léger.

Nombre moyen (bas) des morts par an (hors suicides)	Valeur de la vie statistique	Nombre moyen (bas) des blessés	Valeur d'un blessé léger	Valeur d'un blessé grave
[morts/an]	[million €/vie]	[blessés/an]	[million €/blessé]	[million €/blessé]
20	3 €	6269	0,06 €	0,45 €
Gain économique par rapport aux nb de morts / blessés évités		[million €/an]	=L49*K49+J49*I49	

Figure 24: Calcul du gain socio-économique possible portant sur la sécurité si les lignes étaient automatisées

J'ai ensuite fait l'hypothèse que la part de responsabilité des lignes était proportionnel à leur nombre de voyageurs par an sur le nombre de voyageur total du métro parisien. J'ai donc multiplié le gain économique total par la proportion en voyageurs de chaque lignes.

Nombre de voyageurs (2018)	[million voy/an]	180,7	109,1	99,0	1,7	152,2
Gain économique par rapport aux nb de morts / blessés évités	[million €/an]	436 €				
						Nb total de voyageurs (sans L1 et L14) 1296,6
Gain économique (Sécurité améliorée)	[million €/an]		36,7 €	33,3 €		=(J4/\$W\$4)*\$F\$50

Figure 24: Calcul du gain socio-économique (concernant la sécurité) par lignes si elles étaient automatisées

Etape 5 : Calcul du coût d'automatisation par ligne

	Lignes	[unité]	1	2	3	3bis	4	5	6	7
Coût automatisat ion	Investissement pour automatisation (hors achat de matériel roulant)	[million €]	150 €	246 €	234 €	26 €	Investissements déjà effectués, chiffres exacts inconnus	292 €	274 €	384 €
	Investissement pour achat de matériel roulant	[million €]	400 €		Déjà investis MF19 (prévu 2028)	Déjà investis MF19 (prévu 2026)				Déjà investis MF19 (prévu 2029)
	Investissement portes palières	[million €]	22,5 €	16,9 €	16,1 €	1,8 €		20,0 €	18,8 €	26,3 €
	Investissement total pour automatisation	[million €]	573 €	263 €	250 €	28 €		312 €	293 €	410 €

			7bis	8	9	10	11	12	13	14
Coût automatisat ion	Investissement pour automatisation (hors achat de matériel roulant)	[million €]	62 €	468 €	392 €	232 €	126 €	306 €	340 €	ligne automatisée dès sa mise en service, donc ne s'applique pas à des comparaisons
	Investissement pour achat de matériel roulant	[million €]	Déjà investis MF19 (prévu 2025)	Déjà investis MF19 (prévu 2029)		Déjà investis MF19 (prévu 2024)	Déjà investis MF14 (prévu 2022)	Déjà investis MF19 (prévu 2026)	Déjà investis MF19 (prévu 2028)	
	Investissement portes palières	[million €]	4,3 €	32,1 €	26,9 €	15,9 €	8,6 €	21,0 €	23,3 €	
	Investissement total pour automatisation	[million €]	66 €	500 €	419 €	248 €	135 €	327 €	363 €	

Figure 25 : Tableau Excel présentant une estimation des investissements totaux à faire pour une automatisation des lignes

Ce tableau est encore incomplet, certaines cases restent vides, et reposent sur des hypothèses assez larges qu'il conviendra d'affiner dans la suite de mon stage. La ligne 1 est la seule à avoir été automatisée en cours d'exploitation, elle reste donc la seule référence concernant les coûts à mettre en œuvre pour l'automatisation des autres lignes. Estimer l'investissement total pour une automatisation complète des lignes de métro implique plusieurs calculs d'investissements présentés aux points suivants.

Etape 5.1 : Calcul de l'investissement pour automatisation (hors achat de matériel roulant)

D'après un expert du ferroviaire, automatiser une ligne de métro coûterait 20 millions d'euros par km (sans prendre en compte le matériel roulant qui doit être adapté pour parcourir une ligne automatisée, et sans prendre en compte la pose de portes palières). Le coût de la ligne 1 a été deux fois moins cher au kilomètre que les 20 millions d'euros évoqués, mais par précaution j'ai pris la valeur la plus haute, sous réserve que la ligne 1 a peut-être eu des facilités de mise en place.

Il a donc simplement fallu multiplier la longueur de chaque ligne par 20 pour obtenir l'investissement à effectuer pour automatiser les lignes.

Longueur	[km]	16,4	12,3
Investissement pour automatisation (hors achat de matériel roulant)	[million €]	150 €	=20*G5

Figure 26 : Calcul de l'investissement économique à effectuer pour automatiser des lignes

Etape 5.2 : Calcul de l'investissement à effectuer sur le matériel roulant

Concernant cette partie, il faut savoir dans un premier temps que la RATP a récemment signé un contrat de 8,3 milliards d'euros pour la livraison de 338 rames de métro (soit la moitié du parc actuel) qui s'effectuera entre 2024 et 2040, pour les lignes 3, 3bis, 7, 7bis, 8, 10, 12 et 13, dont les rames iront remplacer les plus anciennes rames des autres lignes. Cet investissement a été effectué dans un souci de rénovation des lignes, et non pas pour une automatisation immédiate des lignes, bien qu'il soit inscrit dans le cahier des charges que les rames doivent être automatisables. J'ai donc estimé que cet investissement ne devait pas intervenir dans le calcul socio-économique permettant de savoir s'il est rentable d'automatiser les lignes de métro, car cet investissement n'a pas été fait spécifiquement pour automatiser des lignes. Ceci explique donc la mention « déjà investis MF19 (nom du modèle de rame) » dans le tableau, qui peut donc s'apparenter à un zéro en terme de valeur (avec l'hypothèse que ces rames ne coûterait rien à automatiser, ce qui est faux). Je n'ai pas encore effectué d'estimation pour les dernières lignes qui ne bénéficieront pas encore de nouvelle rame, mais ceci pourrait se calculer par un produit en croix concernant le nombre de rame acheté pour la ligne 1, en gardant à l'idée également que le parc de rame de métro doit de toute manière être rénové/changé fréquemment.

Etape 5.3 : Calcul de l'investissement à effectuer pour les portes palières

Concernant l'investissement à effectuer pour l'installation de portes palières, je me suis simplement basé sur le coût de pose des portes palières de la ligne 1 et les ai ramenés au kilomètre. J'ai donc fait l'hypothèse que cela impliquerait le même investissement au kilomètre pour chaque ligne (ce qui est faux, certaines lignes non automatisées possèdent déjà des portes palières en raison d'une fréquentation très forte comme la ligne 13, ce qui allègerait les coûts ; et certaines rames sont également plus ou moins longues que les rames de la ligne 1, ce qui impliquerait plus ou moins de pose de portes palières au kilomètre. De plus, certaines lignes ont par exemple un taux moins élevé de stations au kilomètre (un intervalle plus grand entre station), qui implique donc moins de portes palières au kilomètre).

Le coût de l'investissement pour les portes palières est donc le prix de la pose de portes palières au kilomètre (sur la base de la ligne 1), multiplié par le nombre de km de chaque ligne.

Longueur	[km]	16,4	12,3	11,7	1,3
Coût pose porte palière (base L1)					
[million € / km]					
1,37					
Investissement portes palières	[million €]	22,5 €	16,9 €	16,1 €	=1,37*15

Figure 27 : Calcul de l'investissement économique à effectuer pour la pose de portes palières

Etapes X : Suite du stage

Comme indiqué précédemment, la suite du stage concernera une étude des autres dispositifs du métro (portes palières, largeurs de portes, gestes métiers) et leur impact sur la ponctualité. Une comparaison avec les meilleures pratiques internationales sera effectuée. Les grandes étapes pour aboutir à diverses échéances de vision de performance à long terme seront également examinées (travaux temporaires, impacts sur les personnels et sur les lignes concernées). La question de la ponctualité des trains sera aussi abordée bien que plus complexe du fait de leur situation en réseau ouvert, imposant des contraintes additionnelles. À ce stade de mon stage, les méthodes pour effectuer ces études n'ont pas été évoquées, bien que l'analyse pour le train se rapprochera fortement de celle effectuée pour le métro.

De manière générale, je n'ai pas eu besoin lors de ce stage d'un matériel très précis, mais uniquement d'un ordinateur et des logiciels basiques de la suite office, mon travail se basant surtout sur de la recherche, prise de connaissance via internet et calcul via le tableur Excel. J'ai également accès à un centre de documentation riche en revues et livres traitant de mon domaine d'étude. Concernant la partie pratique si elle a lieu, elle s'arrêtera à des mesures avec chronomètre des temps d'ouverture des portes de métro / RER / train pour voir si les temps sont globalement respectés et influent ou non sur la ponctualité.

Résultats et discussion

Avant de discuter concrètement des résultats de mon premier mois de stage, il convient de préciser plusieurs choses. Beaucoup de mes résultats sont basés sur des hypothèses ayant plus ou moins de chance de s'avérer vraies. Ces hypothèses ont été formulées pour plusieurs raisons :

- manque d'information sur un sujet (comme l'hypothèse indiquant que le nombre moyen de kilomètres (5,2 km) parcourus par un voyageur en moyenne lorsqu'il prend le métro, est identique pour chaque ligne, faute d'information plus précise, cette hypothèse est nécessaire)
- manque de temps pour vérifier / trouver / affiner une information (comme l'hypothèse indiquant que le coût des poses de portes palières est le même au kilomètre pour chaque ligne, ce qui est faux, mais permet d'avoir un ordre de grandeur avant d'effectuer des recherches qui permettront d'affiner grandement cette information)

Un trop grand nombre des hypothèses sur lesquelles reposent mes calculs sont fausses ou demandent à être étudiées plus en profondeur, ce qui sera l'objet de la suite de mon stage. Les résultats que je vais détailler ici sont donc à prendre avec beaucoup de précautions. De plus, certains éléments n'ont pas encore été pris en compte dans ce tableur (comme un coût d'exploitation moins important qu'implique une ligne automatisée).

La totalité des gains socio-économiques sur la qualité de services que j'ai étudiés, concernant les lignes (3, 3bis, 7, 7bis, 8, 10, 12, 13) qui recevront prochainement (de 2024 à 2040) les nouvelles rames commandées par la RATP atteindrait donc 522 millions d'euros par an. La somme à investir serait quant à elle de 2 327 millions d'euros.

Concernant les lignes 3, 3bis, 7, 7bis, 8, 10, 12, 13	Perte économique heure de pointe	[million l/an]	72,3 €
	Perte économique heure creuse	[million l/an]	68,6 €
	Gain économique vitesse commerciale augmentée	[million l/an]	175,0 €
	Gain économique par rapport aux nb de morts / blessés évités	[million l/an]	207,0 €
	SOMME	[million l/an]	522,9 €

Figure 25 : Tableau récapitulatif des sommes des gains socio-économiques pour les lignes 3, 3bis, 7, 7bis, 8, 10, 12 et 13

Une première approche permet donc de dire que, avec un taux d'actualisation de 5%, ce projet d'automatisation serait collectivement rentabilisé en 6 ans (la valeur actualisée nette étant positive dès 6 ans après l'implémentation du projet), ce projet serait donc totalement viable. Encore une fois, toutes les hypothèses ne sont pas justes, le coût d'automatisation étant probablement plus important. L'augmentation du nombre d'usagers du métro n'est pas non plus prise en compte, ce qui donne d'une part des recettes en plus à la RATP, mais ces usagers seraient d'autant plus de personnes à bénéficier des avantages de l'automatisation des lignes de métro, permettant d'augmenter les gains socio-économiques.

Ces résultats sont donc temporaires, et doivent plutôt mettre en avant la démarche mise en œuvre pour y arriver, plutôt que les résultats trop incertains en eux-mêmes. Les résultats auxquels nous nous attendons sont les suivants : certaines lignes à forte fréquentation et/ou fort taux de problèmes seront très probablement rentables à l'automatisation complète, tandis que pour les lignes plus calmes et déjà plutôt ponctuelle, l'automatisation partielle serait plus pertinente.

Conclusion

N'ayant effectué que le tiers de mon stage, je peux déjà en tirer des enseignements. J'ai tout d'abord développé une culture assez large sur le métro, la ponctualité et la qualité de service en général dans les transports en commun de type lourds, et j'en connais également plus sur les « jeux d'acteurs », les rôles de chacun au sein de la gestion complexe d'un réseau de transports en commun dans une grande ville. J'ai désormais des ordres de grandeur en tête du réseau de transports parisiens. Dès mes premières manipulations, il m'a paru évident que des gains socio-économiques importants peuvent être tirés de l'automatisation des lignes de métro. Bien que peu fiables pour le moment, les premiers résultats permettent de confirmer cela.

Il est encourageant de se dire que le travail que j'effectue pourra éventuellement être présenté aux représentants des transports parisiens dans une optique d'amélioration de la ponctualité des transports, et pourra ainsi faire bouger les choses, ou au moins poser des questions. Ce stage me conforte à nouveau dans l'idée de travailler dans les transports. Les sujets de stage de mes collègues stagiaires (également sur la qualité de service) m'ont également paru intéressants, la thématique des transports en général m'intéresse (plutôt en grande ville), quel que soit le point de vue ou la sous-thématique étudiée. J'aimerais pour la fin de mes études et mon stage de fin d'étude trouver un organisme traitant de la thématique

des transports plutôt dans le secteur privé, car j'ai déjà expérimenté 2 stages dans des organismes publics, très différents dans leur rôle et leur domaine.

Bibliographie

[1] Observatoire de la Mobilité en Île-De-France. [en ligne] (Mise à jour en 2019) Disponible sur : <http://www.omnil.fr/spip.php?article119> (consulté le 28 Juin 2019)

[2] Autorité de la Qualité de Service dans les Transports. [en ligne] (Mise à jour en 2019) Disponible sur : www.qualitetransports.gouv.fr (consulté le 28 Juin 2019)

[3] Île-De-France Mobilités. La qualité de service en chiffres. [en ligne] (Mise à jour en 2019) Disponible sur : <https://www.iledefrance-mobilites.fr/le-reseau/la-qualite-de-service-en-chiffres-bulletin-d-information-trimestriel-bulletin-de-la-ponctualite/> (consulté le 28 Juin 2019)

Annexe 1 :
Tableau Excel

[illegible]



POLYTECH
TOURS

35 ALLÉE FERDINAND DE LESSEPS
37200 TOURS

Vincent Bernard
2018-2019

Ponctualité dans les transports en commun lourds parisiens Prospective long terme 2030-2050

Résumé : Ce rapport de stage décrit le travail que j'ai effectué lors de mon premier mois de stage à l'AQST, quels types de documents j'ai pu lire pour prendre connaissance de mon sujet dans un premier temps, et quelle a été la démarche que j'ai entreprise pour évaluer les bénéfices socio-économiques d'une automatisation des lignes du métro parisien.

Mots Clés : transports, ponctualité, qualité de service, métro, train, automatisation, benchmarking

Autorité de la Qualité de Service dans les Transports
Tour Séquoia, 1 place Carpeaux, 92055 La Défense

Tuteur entreprise :
Alain Sauvart
Directeur AQST

Tuteur académique :
Hervé Baptiste