



HAL
open science

La performance opérationnelle des systèmes de transport collectif en milieu urbain : définition et approche méthodologique : Application des mesures au cas de systèmes TCSP de Nantes, Montpellier et Toulouse

Benoît Oillo

► To cite this version:

Benoît Oillo. La performance opérationnelle des systèmes de transport collectif en milieu urbain : définition et approche méthodologique : Application des mesures au cas de systèmes TCSP de Nantes, Montpellier et Toulouse. Géographie. Université Paris-Est, 2020. Français. NNT : 2020PESC2096 . tel-03561264

HAL Id: tel-03561264

<https://theses.hal.science/tel-03561264>

Submitted on 8 Feb 2022

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.

UNIVERSITÉ — — PARIS-EST

Ecole Doctorale « Ville, Transports et Territoires »
Laboratoire Ville Mobilité Transport
IFSTTAR - ENPC - UPEM

Benoit OILLO
Pour obtenir le grade de : Docteur de l'Université Paris-Est
Discipline : Transport

La performance opérationnelle des systèmes de transport collectif en milieu urbain : définition et approche méthodologique.

Application des mesures au cas de systèmes TCSP de Nantes, Montpellier et Toulouse,

Thèse dirigée par Pierre ZEMBRI
Soutenue publiquement le vendredi 10 janvier 2020

Composition du jury

Pierre Zembri	Professeur des Universités Ecole d'Urbanisme de Paris, directeur
Elodie Castex	Maître de conférences - HDR - université de Lille, rapporteure
Jean-Pierre Wolff	Professeur émérite - HDR - université Toulouse Jean Jaurès, rapporteur
Neila Bhourri	Chargé de recherche – HDR - IFSTTAR, examinatrice
Christine Buisson	Directrice de recherche – HDR - IFSTTAR, examinatrice
Patrice Aknin	Directeur de recherche – HDR - SystemX, examinateur

Remerciements

Mener une thèse jusqu'à son aboutissement est un travail long et souvent solitaire. Néanmoins, ce travail ne peut se faire sans de nombreuses rencontres et échanges. Par conséquent, je tiens à remercier un certain nombre de personnes qui ont su m'accorder leur confiance.

Tout d'abord, je remercie Pierre Zembri, directeur de cette thèse, pour avoir accepté de diriger ce travail et pour m'avoir accompagné tout au long de ces années notamment au cours des derniers mois pour les relectures complètes du manuscrit.

Je tiens à remercier tout particulièrement Alain Richner, dirigeant de sociétés filiales Keolis de 1995 à 2017 et professeur à l'Ecole Supérieure des Transports, pour son soutien, ses conseils et le partage de ses connaissances au cours de toutes ces années.

Je remercie également les dirigeants de la société UVT, pour m'avoir autorisé à utiliser la solution DIALEXIS, et plus particulièrement Andréas Schmidt pour le partage de ses connaissances concernant l'exploitation des réseaux de transport collectif allemands et suisses.

Cette thèse n'aurait pu être réalisée sans terrains d'étude. Pour cette raison, je remercie Xavier Dupuy, directeur de production du réseau de transport de Montpellier, Nicolas Pagès, en charge de la direction du métro de Toulouse lors des mesures et Pascal Leroy directeur de la performance et de l'innovation du réseau de transport de Nantes pour leur accord et leur confiance.

Je souhaite également remercier Philippe Legay, directeur international transport ferroviaire au sein du groupe Keolis pour sa disponibilité lors d'échanges techniques très riches.

J'aimerais également remercier Florent Le Néchet, Maître de conférences Université Paris-Est Marne-la-Vallée pour ses précieux conseils concernant la pertinence des approches statistiques.

Je remercie Sébastien Portier et Flavien Davignon, de la société Beemotion, pour leur aide concernant le traitement des données et l'élaboration de fichiers Excel.

Enfin, je remercie mes amis, ma famille et particulièrement ma conjointe Nawar pour son soutien et sa patience, mon fils Younès pour ses longues siestes qui m'ont permis de travailler et ma fille Ambre qui est arrivée au bon moment.

Résumé

L'exploitation des systèmes de transport collectif de voyageurs en milieu urbain constitue un domaine technique pour lequel très peu de recherches et de littératures académiques sont disponibles.

Notre recherche tente de décrire les aspects techniques fondamentaux de l'exploitation des systèmes de transport collectif notamment en réalisant d'une part une description synthétique de la mise en œuvre des TCSP sur le territoire français au travers de la réservation d'espace et de l'automatisation, d'autre part en décrivant l'aspect fonctionnel du système de transport collectif.

Nous proposons de définir le terme d'exploitation et de contextualiser la performance opérationnelle qui repose sur l'analyse microscopique des conditions d'exploitation. Nous considérons que la mesure détaillée des conditions d'exploitation des systèmes permet d'appréhender le niveau de performance opérationnelle.

Notre démonstration s'appuie sur le recueil et l'analyse de données réelles fines relatives aux conditions d'exploitation de différents TCSP. Les systèmes analysés sont la ligne 4 du BHNS du réseau nantais, la ligne 1 de tramway du réseau de Montpellier et la ligne A de métro automatique type GoA4 du réseau de Toulouse.

L'objectif de cette recherche porte sur une validation technique de l'analyse microscopique de données réelles d'exploitation au travers des résultats de trois types de TCSP différents afin d'enrichir la planification des systèmes actuels et la conception des systèmes futurs.

Mots clés : TCSP, exploitation, performance opérationnelle, analyse microscopique

Abstract

Operating public transportation systems for travelers in urban settings is a technical field for which very little research and academic literature are available.

Our research attempts to describe the fundamental technical aspects of public transportation system operations. mainly by producing a summary description of the implementation plan of Specific Site Public Transportation Projects [SSPT] within France through reserving space and automation on the one hand, and by describing the functional aspect of the public transportation system on the other hand.

We propose to define the term "operation" and to contextualize the operational performance which relies on the microscopic analysis of operating conditions. We consider that the detailed measurement of the systems operating conditions allow an understanding of the operational performance level.

Our demonstration relies on the collection and analysis of actual detailed data related to the conditions of operation of different SSPT. The systems analyzed are line 4 of the BRT of the Nanais Network, Line 1 of the tramway from the Montpellier network, and Lina A of the automatic metro GoA4 in the Toulouse network.

The objective of this research is to validate a technique of microscopic analysis of actual operation data across results from three different types of SSPT in order to enrich the current system planning and the conception of future systems.

Key words : SSPT, operating, operational performance, microscopic analysis

Sommaire

Remerciements	2
Résumé	3
Abstract	4
Introduction générale	10
Chapitre 1 : Les systèmes de transport collectif : évolutions techniques, modalités de réservation d'espace et d'automatisation	14
1 Introduction	15
2. Le concept de TCSP : la classification du CERTU	17
3. Evolution de la technique routière	21
3.1 La technique routière et le site propre : du BRT au BHNS	23
3.1.1 Le développement initial des BRT en Amérique Latine dans les villes de Curitiba et de Bogota.....	23
3.1.2 La transposition du BRT dans d'autres pays.....	25
3.1.3 L'approche européenne.....	25
3.1.4 Le BHNS à la française	27
3.1.5 Les différents modes de guidage.....	29
4. Evolution de la technique ferroviaire	33
4.1 Le tramway	33
4.1.1 Le tramway moderne.....	34
4.1.2 Les premières réalisations.....	36
4.1.3 Le guidage permanent et la réservation d'emprise	38
4.2 Le métro.....	41
4.2.1 Le réseau de Paris	41
4.2.2 Le réseau de Marseille	43
4.2.3 Le réseau de Lyon.....	44
4.3 Le métro VAL (Villeneuve d'Ascq – Lille puis Véhicule Automatique Léger).....	46
4.3.1 Les caractéristiques techniques.....	47
4.3.2 Description du roulement / guidage et voie.....	48
4.3.3 Description du matériel roulant	49
4.3.4 Description de l'automatisme.....	50
4.4 Les niveaux d'automatisation et la perspective de développement	52
4.4.1 Les niveaux d'automatisation (Grades of Automation : GoA).....	52
4.4.2 Perspectives de développement des métros automatiques sur dix ans	54

5. Partage de la voirie : Principes et modalités de mise en œuvre	55
5.1 La typologie de la réservation de voie pour le transport collectif.....	59
5.2 La typologie de l'implantation de la réservation dans le tissu urbain.....	64
5.2.1 Les différents types d'aménagement.....	65
5.2.2 Une réservation permanente ou temporaire.....	68
5.3 La réservation : capacité de transport et consommation d'espace	72
5.3.1 La réservation : un facteur d'augmentation de la capacité de la voirie	72
5.3.2 La consommation d'espace	75
5.3.4 Les limites de la réservation au profit des transports collectifs.....	79
5.3.5 L'analogie possible avec la littérature sur le trafic routier	80
6. Evaluation et choix des systèmes TCSP	83
6.1 Evaluation socio-économique : analyses coûts / avantages.....	84
6.2 Les analyses multicritères.....	85
6.3 Des retours d'expérience aux recommandations.....	86
6.4 Les approches politiques à partir de 1970.....	87
6.4.1 VAL ou tramway à Toulouse : le questionnement du partage de la voirie	87
6.4.2 TVR ou tramway à Nancy et Caen : un choix technique	90
7. Conclusion.....	95
Chapitre 2 : Approche de la performance opérationnelle et description fonctionnelle du système de transport collectif.....	97
1. Introduction	98
2. L'approche systémique du système de transport.....	99
2.1 L'approche systémique : éléments de définition	99
2.2 Modélisation fonctionnelle.....	100
2.3 Schématisation d'un système « Transport » : vision de la régulation.....	102
2.4 Schématisation d'un système « Transport » : vision temporelle	103
2.5 Proposition d'une schématisation d'un système « Transport ».....	105
3. La performance multidimensionnelle du transport collectif	107
3.1 Une approche de la notion de la performance.....	107
3.2 La performance du service de transport collectif	110
3.3 La mesure de la performance économique : une focalisation sur l'efficacité	111
4. La performance opérationnelle et l'analyse microscopique	114
5 La planification théorique et la détermination de l'offre	118
5.1 La terminologie relative au temps.....	118

5.1.1 Définitions de Poupard, X. 1982	118
5.1.2 Définition de l'UTP (1988).....	119
5.1.3 Les lacunes de la terminologie	120
5.2 Détermination de la capacité.....	121
5.2.1 : Détermination de la capacité d'un système bus	122
5.2.2 : Détermination de la capacité d'un système métro.....	124
5.3. Le graphique de marche : l'outil au service de la planification	127
5.3.1 Graphique à pente variable	128
5.3.2 Graphique à pente constante de 45 degrés	129
5.3.3 Le tableau de marche (TM)	130
5.4 Vers le dimensionnement capacitaire maximum	134
5.4.1 Les fréquences de passage.....	134
5.4.2 La capacité des véhicules.....	135
5.5 Les limites de capacité : saturation des systèmes.....	137
5.6 Un regard critique sur cette approche classique du dimensionnement.....	141
6. La mesure du système mis en œuvre	145
6.1 Le temps de parcours	145
6.1.1 L'approche empirique	149
6.1.2 L'approche par l'occurrence	150
6.1.3 Les pratiques actuelles	154
6.2. La fréquentation des systèmes existants.....	156
6.3 La loi d'arrivée des voyageurs.....	160
7. Les notions de ponctualité / régularité, leurs mesures et leurs logiques	167
7.1 Distinction entre ponctualité et régularité.....	167
7.2 Les mesures de l'irrégularité	168
7.3 Les logiques de la régularité	170
7.4 La régulation	171
8. Conclusion.....	174
Chapitre 3 : Mise en œuvre de l'analyse microscopique des conditions d'exploitation	175
1. Introduction	176
2. Caractéristiques des terrains d'étude.....	177
2.1 Ligne 4 BHNS de Nantes « busway »	177
2.2 Ligne 1 du réseau de tramway de Montpellier.....	179

2.3 Ligne A du métro de Toulouse	181
3. Approche méthodologique	183
3.1 Schématisation d'une exploitation optimale : approche théorique	183
3.2 Analyse de la composante organique	185
3.2.1 Analyse de la topographie d'un itinéraire	185
3.2.2 Analyse des caractéristiques du matériel roulant	187
3.3 Analyse de l'aspect fonctionnel	189
3.3.1 La terminologie des composantes du temps de parcours	189
3.3.2 Les données et les systèmes de recueil	190
3.3.3 La base de données EAS	191
3.3.4 Le système DIALEXIS	194
3.3.5 Terminologie commune : vers une équivalence	195
3.3.6 Présentation des valeurs statistiques utilisées pour l'analyse microscopique	197
3.3.7 Présentation de la méthode pour mesurer l'impact de la La variabilité du temps de parcours dans l'hypothèse d'invariance des composantes	197
3.3.8 Présentation de la modélisation des analyses	198
4. Résultats par système	200
4.1 Système BHNS	200
4.1.1 Description de l'aspect organique	200
4.1.2 Analyse de l'aspect fonctionnel.....	204
4.1.1.1 Le temps de parcours comme agrégat.....	205
4.1.1.2 L'échelle de l'interstation	216
4.2 Système Tramway	235
4.2.1 Description de l'aspect organique	235
4.2.2 Analyse de l'aspect fonctionnel.....	239
4.2.1.1 Le temps de parcours comme agrégat.....	240
4.2.1.2 L'échelle de l'interstation	252
4.3 Système VAL	267
4.3.1 Description de l'aspect organique	267
4.3.2 Analyse de l'aspect fonctionnel.....	270
4.3.1.1 Le temps de parcours comme agrégat.....	271
4.3.1.2 L'échelle de l'interstation	280
5. Proposition d'une liste d'inducteurs.....	285
6. Conclusion.....	294
Conclusion générale	295

Bibliographie	300
Liste des figures.....	308
Liste des tableaux	311
Annexes	313

Introduction générale

De l'usage massif de l'automobile à la recherche de transports collectifs durables

L'usage de l'automobile en milieu urbain est remis en cause depuis maintenant plusieurs décennies. Après avoir longtemps été le reflet d'un dynamisme économique et d'une amélioration du niveau de vie des populations, l'usage massif de l'automobile, et plus généralement du transport individuel, devient source de nuisances notamment au travers de la consommation d'énergie fossile, de la consommation d'espace et des nuisances sonores.

A partir de 1972, plusieurs conférences internationales sur l'environnement permettent de poser les jalons d'une prise de conscience de la nécessaire protection de l'environnement (Conférence des Nations Unies sur l'environnement Humain en 1972, Sommet de la Terre à Rio en 1992, Sommet Mondial du développement durable en 2002). Depuis, l'impératif de durabilité est largement repris dans les politiques urbaines concernant notamment les déplacements.

En parallèle de ce constat, nous observons également une augmentation de la population urbaine et donc une augmentation des déplacements en milieu urbain. Comme le précise le rapport d'information du sénateur Jean Pierre Sueur¹, en 1950 on ne comptait que 4 villes de plus de 5 millions d'habitants. Depuis 2010, le monde compte 30 villes de plus de 5 millions d'habitants, et 19 villes de plus de 10 millions d'habitants. Il en comptera 27 en 2025. Selon l'ONU, la part de la population urbaine mondiale est actuellement de 50 % et passera à près de 70 % en 2050. Bien entendu, cette progression ne sera pas identique dans toutes les régions du monde. En effet, la disparité territoriale peut être marquée.

Le 26 mai 1975, M. Valéry Giscard d'Estaing, alors Président de la République, adresse un message au congrès de l'Union Internationale des Transports Publics :

« Réorienter et discipliner l'automobile en dégagant les centres des villes d'une circulation excessive, privilégier les piétons et procurer aux hommes et aux femmes de nos villes des îlots de tranquillité où ils puissent vaquer à leurs occupations et leurs loisirs à l'abri des véhicules, améliorer les transports collectifs et leur donner une réelle priorité, telles devraient être les pièces maîtresses d'une nouvelle politique urbaine.

Au-delà de la nécessaire amélioration des services et du confort, le développement des transports publics doit s'intégrer dans une conception globale d'organisation de l'espace. Les transports collectifs n'ont-ils pas pour mission de permettre toutes les libertés qu'implique l'existence même de la ville : n'est-il pas essentiel de pouvoir choisir son logement, son travail, ses distractions, ses réunions ? ».

Une certaine originalité existe dès lors que cette nouvelle dynamique du secteur est mise en relation avec l'évolution démographique des villes françaises. En effet, comme nous l'avons déjà indiqué, la part de la population urbaine ne cesse d'augmenter. La France verra sa part de population urbaine passer d'environ 80 % aujourd'hui à environ 90 % en 2050

¹ Sueur, JP. *Rapport d'information Villes du futur, futur des villes ; Quel avenir pour les villes du monde ?* Tome 1 : Enjeux. Numéro 594. 2011, 321 p

L'homme est donc de plus en plus citadin. Le besoin en déplacement s'accroît et le transport devient, plus que jamais, un élément majeur des politiques publiques urbaines du fait de la prise en compte de la dimension environnementale.

Le renouveau des transports collectifs

Pour répondre à ce besoin de déplacement urbain, l'homme utilise divers modes de transport. L'utilisation de ces divers modes doit permettre un développement soutenable tant au niveau de l'équité sociale, de la consommation d'espace et d'énergie d'origine fossile. L'environnement actuel de l'utilisation de l'automobile (motorisation majoritairement thermique) permet difficilement d'intégrer une logique de durabilité. Par conséquent, la croissance de la mobilité urbaine, bien que créatrice de valeur, doit évoluer dans le sens d'une durabilité accrue. L'automobile, malgré ses nuisances, a sa place dans le milieu urbain (Merlin. P. 2010)² mais son modèle doit évoluer notamment via de nouvelles motorisations plus respectueuses de l'environnement. Néanmoins, la consommation de l'espace, du fait de son utilisation intensive, doit être maîtrisée.

Les politiques urbaines tentent d'opérer un report modal du transport individuel motorisé vers un transport collectif qui doit permettre d'assurer une mobilité plus respectueuse de l'environnement tout en maintenant le dynamisme du tissu économique urbain. Les nouveaux systèmes de transport collectif doivent être performants afin de rivaliser avec le transport individuel notamment en termes de vitesse commerciale, de régularité, de capacité et de confort.

Au cours des décennies passées, le secteur des transports collectifs a connu une dynamique d'innovation importante au niveau de son intégration dans le tissu urbain, des matériels roulants, des énergies utilisées et des systèmes d'information. Les années 1970 et 1980 amènent, avec une impulsion financière, technologique, juridique et politique, une modernité incontestable des systèmes de transports collectifs.

En 1983, un métro totalement automatique voit le jour dans la ville de Lille. Il en sera de même pour la ville de Toulouse dix années plus tard. Le tramway dit « moderne » quant à lui apparaît en 1985 à Nantes, en 1987 à Grenoble et en 1994 à Strasbourg. On constate dès lors l'apparition, dans cette nouvelle dynamique, d'une dualité entre les Systèmes de Transport en Commun en Site Propre (TCSP) en surface ou en souterrain/viaduc.

La mise en place du Versement Transport (VT) dans les années 1970 participe de manière importante à la diffusion des transports sur le territoire urbain. D'abord instaurée en région parisienne, cette nouvelle taxe s'est étendue à l'ensemble du territoire en évoluant au niveau de son taux et de l'éligibilité du territoire concerné. Ensuite, le cadre législatif évoluera avec les lois LOTI, LAURE, SRU et Grenelle 1 & 2.³

² Merlin, P. *L'urbanisme*. Que sais-je ? Paris : PUF, 2010, 126 p

³ Loi n° 82-1153 du 30 décembre 1982 d'orientation des transports intérieurs, Loi n° 96-1236 du 30 décembre 1996 sur l'air et l'utilisation rationnelle de l'énergie, Loi n° 2000-1208 du 13 décembre 2000 relative à la solidarité et au renouvellement urbains, Loi n° 2009-967 du 3 août 2009 de programmation relative à la mise en œuvre du Grenelle de l'environnement et Loi n° 2010-788 du 12 juillet 2010 portant engagement national pour l'environnement.

Au fil du temps, la recherche de système performant et la capacité financière limitée des autorités organisatrices donnent naissance au nouveau concept portant le nom de Bus à Haut Niveau de Service (BHNS). Ce nouveau concept est largement inspiré du système Bus Rapid Transit (BRT, mis en œuvre pour la première fois dans la ville de Curitiba) venant du continent américain. Rapidement popularisé sur notre territoire, ce nouveau concept s'adapte nécessairement aux particularités de la morphologie très contraignante des villes françaises. Désormais exploité dans de nombreuses agglomérations françaises, il contribue à renouveler l'image des transports collectifs basée sur la technique routière.

Les systèmes métros, tramways et les BHNS font tous partie de la famille des TCSP (nomenclature CERTU). L'arrivée du tramway moderne permet de renouveler la vision d'un système de transport de surface par la réservation d'espace de circulation. Cette réorganisation des espaces de circulation est essentielle pour redonner un avenir au transport collectif urbain.

La performance dans le secteur du transport collectif

La performance est un terme polysémique qui doit être contextualisé. Dans le domaine du transport collectif, le terme de performance est largement utilisé sans que l'on puisse véritablement comprendre le périmètre qui est couvert. Il existe cependant une approche économique de la performance des transports collectifs qui est défini avec certains indicateurs connus des praticiens comme le rapport entre le nombre de voyageurs et le nombre de kilomètres commerciaux offerts (efficience commerciale).

Dans le cadre de cette recherche, nous portons un intérêt à l'exploitation des systèmes de transport collectif et à la mesure de son niveau de performance. Nous cherchons à positionner une performance au travers du prisme "exploitation". Pour ce faire, nous considérons qu'il est nécessaire de comprendre le fonctionnement des systèmes de transport collectif. La performance de l'aspect fonctionnel d'un système de transport peut être considérée comme une « performance opérationnelle ». Nous proposons de mesurer la performance opérationnelle à l'aide d'une analyse microscopique des conditions d'exploitation.

La mesure de la performance opérationnelle

Dans le cadre de notre recherche, nous proposons d'utiliser des données réelles pour réaliser une évaluation précise des conditions d'exploitation. Les données réelles utilisées se focalisent exclusivement sur la variable « temps ». La variable « charge voyageurs » est écartée de notre démonstration car celle-ci n'est que partiellement disponible sur nos terrains d'étude. Néanmoins, la charge devrait être ajoutée comme une donnée réelle dans le cadre de travaux complémentaires. La prise en compte de cette donnée doit permettre, par exemple, d'identifier les sections de lignes les plus chargées, les éventuelles surcharges (capacité) et les liens avec la variable temps (charge et vitesse - charge et régularité).

L'utilisation de données réelles d'exploitation relatives à la variable « temps » doit permettre d'analyser les différents états des mobiles (en roulage, en immobilisation, porte ouverte/fermée) sur leur infrastructure respective et donc d'apporter des éléments de compréhension du fonctionnement de l'interaction/conditionnement avec les mobiles et l'infrastructure utilisés.

Notre objectif est de tenter de décrire plus précisément le fonctionnement du système de transport à l'aide de la désagrégation des temps de parcours. Nous proposons donc une approche qui permet de caractériser ses composantes. L'analyse des composantes du temps de parcours peut être considérée comme une analyse microscopique des conditions d'exploitation.

Nous analyserons les données réelles des systèmes de transport de type TCSP. Nous disposons de trois terrains d'étude qui sont une ligne BHNS (Ligne 4 du réseau nantais), une ligne tramway (ligne 1 du réseau montpellierain) et une ligne métro automatique GoA4 (ligne A du réseau toulousain). La particularité de ces trois systèmes réside dans le fait qu'ils sont tous reconnus comme très fréquentés. Des limites de capacités sont évoquées par les exploitants respectifs. Nous les considérons comme des systèmes de transport « sous tension ».

Si nous nous référons à la typologie des lignes proposée par L. Clément (1995)⁴, nos terrains d'études sont regroupés au sein de la fonction de ligne « massification ». Cette typologie propose de segmenter l'offre autour de trois fonctions : massification, connexion et diffusion. La fonction de massification est assurée par des lignes TCSP situées majoritairement dans la zone la plus dense de l'agglomération, sur lesquelles les rabattements sont effectués et assurant principalement l'écoulement des voyageurs. Ces lignes peuvent être caractérisées par un équilibre relatif des échanges aux différents arrêts.

Au travers de notre analyse microscopique des conditions d'exploitation, nous tentons d'apporter une réponse aux questionnements suivants :

- Peut-on identifier des « états » identiques au mobile indépendamment des systèmes exploités ?
- Peut-on établir une terminologie des différents états des mobiles ?
- Une fois désagrégées, les composantes du temps de parcours ont-elles les mêmes proportions et caractéristiques ?
- Ces composantes ont-elles les mêmes impacts sur le temps de parcours ?
- Peut-on identifier les éléments à l'origine de la contre-performance ?

Nous présenterons les exigences nécessaires au niveau du contenu des données disponibles pour répondre à ces questionnements. Ensuite nous proposerons une analyse statistique des données à l'aide d'indicateurs.

Dans le cadre de notre démarche qui se veut opérationnelle, nous restons soucieux de proposer des méthodes simples afin que ces dernières soient facilement réutilisables et le cas échéant complétées.

⁴ Clément, L. *Offre intermédiaire et organisation hiérarchique des réseaux de transports collectifs urbains*. Doctorat en économie des transports. Université Lyon 2, 1995, 538 p.

Chapitre 1 : Les systèmes de transport collectif : évolutions techniques, modalités de réservation d'espace et d'automatisation

1 Introduction

Nous nous intéressons au développement des techniques des systèmes de transport collectif en milieu urbain sur le territoire français et plus précisément à la convergence vers le Transport en Commun en Site Propre (TCSP) et au développement de l'automatisation.

Ce travail nous obligera à évoquer quelques références étrangères afin de bien comprendre l'apparition de certaines techniques qui ont donné naissance à des systèmes comme notamment le tramway ou encore le Bus à Haut Niveau de Service (BHNS). Notre travail historique permettra également de mettre en avant la nécessaire recherche de performance et de capacité dans le développement des transports collectifs en milieu urbain.

Nous entendons ici le terme « système de transport » comme étant un ensemble d'éléments comprenant, les véhicules, l'infrastructure ainsi que l'organisation de l'exploitation. L'approche systémique du « système de transport » sera abordée en début de chapitre 2.

Nous avons fait le choix de décrire l'évolution des systèmes de transport sous l'angle des techniques mises en œuvre à savoir, pour les principales, la technique routière et la technique ferroviaire. Le métro et tramway sur pneu sont intégrés à la technique ferroviaire car ces derniers sont guidés en permanence et se rapprochent donc davantage d'un environnement ferroviaire. Nous évoquerons succinctement la technique par câble. En revanche, nous écartons la technique des navettes fluviales, maritimes ainsi que la technique de la crémaillère. Nous considérons ces techniques soit comme marginales soit trop peu ou pas intégrées à l'exploitation des réseaux de transport en milieu urbain (à l'exception de la ligne C du métro de Lyon).

Nous n'avons pas pour objectif de lister de manière exhaustive les innovations technologiques mais plutôt de présenter les principales phases d'évolution qui s'orientent vers une réservation des voies de circulation et l'automatisation en particulier pour le système métro. Nous tenterons de dresser un panorama général sans entrer dans une description technologique approfondie. Néanmoins, nous nous attarderons sur le concept BHNS, le tramway dit « moderne » ainsi que le métro type VAL (Villeneuve d'Ascq Lille) du fait de la relation avec nos terrains d'étude. Nous ne traiterons pas de systèmes particuliers comme par exemple le métro suspendu de Wuppertal.

Le travail relatif au développement des techniques utilisées permet d'identifier certaines périodes remarquables.

Tel est le cas de la période des années 1970 où les agglomérations françaises doivent faire face à la question de la réorganisation de leur système de transport collectif. En effet, c'est à cette période que le développement des déplacements axé uniquement sur l'automobile révèle ses limites⁵. A cette époque, la quasi-totalité des réseaux de transport des différentes villes de France, à l'exception de Paris et de quelques autres grandes agglomérations françaises, est exploitée par des autobus. Le tramway a disparu peu à peu des villes françaises après la seconde guerre mondiale remplacé par le trolleybus et l'autobus qui se retrouvent englués

⁵ Laisney, F., Grillet-Aubert, A., *Tramways, espaces publics et mobilité*. Rapport de recherches, Paris, IPRAUS, 2006, 167 p.

dans la circulation générale faute d'espace réservé. Par conséquent, ces véhicules routiers perdent peu à peu de leur attractivité et donc de leur clientèle. Il devient nécessaire de développer des transports collectifs attractifs rivalisant avec l'automobile⁶. Au cours de cette même période, la recherche technologique s'oriente vers l'automatisation de systèmes guidés notamment métro.

Seul un transport collectif attractif permet de rivaliser avec un trafic individuel fondé essentiellement sur l'usage de l'automobile. Cette attractivité se caractérise par une haute fréquence de passage aux arrêts accompagnée d'une vitesse commerciale et d'une régularité élevées.

Nous nous attarderons sur la problématique des systèmes dit de « surface ». En effet, certains systèmes de transports collectifs en milieu urbain sont exploités dans un espace dédié (souterrain et/ou viaduc par exemple), d'autres dans un environnement où s'entremêlent différents types de circulations ce qui pénalise fortement leur bon fonctionnement. L'espace public doit être repensé car la problématique de l'insertion des systèmes de transport dans un contexte urbain doit être considéré comme primordiale.

Dans les années 1980, les autorités organisatrices de transport françaises se focalisent sur la réintroduction du tramway sur leur territoire. Cette réintroduction sera accompagnée d'un certain nombre de difficultés d'ordres techniques et politiques. Contrairement à la décennie passée, le partage de la voirie et un réaménagement du tissu urbain sont considérés comme un véritable enjeu. Les premières réalisations de Nantes, Grenoble et Strasbourg sont abordées dans ce document. Toujours dans les années 1980, la première implantation d'un métro totalement automatique est réalisée à Lille : le VAL (Villeneuve d'Ascq Lille⁷).

Les années 1990 voient apparaître de nouvelles familles de transport en commun de surface : les systèmes guidés sur pneu ou systèmes intermédiaires. Les systèmes intermédiaires situés entre le bus/trolleybus et tramway sont les plus nombreux notamment au travers des systèmes guidés sur pneu. Le premier système guidé sur pneu est le O-Bahn d'Essen en Allemagne. Ce concept est ensuite exporté en Australie et exploité sur le réseau urbain d'Adélaïde.

A partir des années 2000, on cherche à définir le concept de BHNS, inspiré du BRT américain. La définition du concept permet ainsi de regrouper, au sein de la même famille, une partie des systèmes intermédiaires à l'exception du Translohr qui est rattaché à la famille des tramways selon la définition du Service technique des remontées mécaniques et des transports guidés (SRMTG).

Au cours de ces quatre décennies, les systèmes de transport collectif se développent selon cinq grandes tendances :

- Progression du partage de la voirie,
- Recherche de systèmes intermédiaires entre le bus et le tramway,
- Amélioration de systèmes existants,
- Passage d'un mode de traction thermique à un mode de traction électrique,

⁶ Soulas, C., « Transports guidés urbains et innovation technologique : la recherche de solutions nouvelles ». *Transports Urbains*, 1989, numéro 66, p. 5 - 16

⁷ Le contenu de l'acronyme a rapidement évolué vers « véhicule automatique léger » pour sortir du contexte lillois originel.

- Innovation technique qui tend vers une automatisation du fonctionnement.

2. Le concept de TCSP : la classification du CERTU⁸

L'émergence des nouveaux systèmes notamment les systèmes intermédiaires engendre une confusion sur le plan de la sémantique⁹. En 2007, le CERTU propose une nouvelle classification en collaboration avec la Direction Générale des Infrastructures, des Transports et de la Mer (DGITM), le Groupement des Autorités Responsables de Transport (GART), l'Union des Transports Publics (UTP), l'Institut National de Recherche sur les Transports et leur Sécurité (INRETS) et le Service technique des Remontées Mécaniques et des Transports Guidés (SRMTG). Cette classification repose sur deux réglementations :

- Le décret numéro 2003-425 relatif à la sécurité des transports publics,
- Les articles R. 311-1, R. 312-10 et R. 312-11 du code de la route et l'arrêté du 2 juillet 1982 relatif aux transports en commun de personnes, modifié par l'arrêté du 18 mai 2009.

« Certains systèmes guidés sont soumis aux deux réglementations dans la mesure où le guidage est immatériel [CIVIS de Rouen, Philéas de Douai] ou matériel mais débrayable [TVR de Nancy et Caen]. Leurs matériels roulants, considérés comme des véhicules routiers, sont donc limités en gabarit par le code de la route (24,50 mètres de long et 2,55 de large, hors rétroviseur).

En revanche, le Translohr proposé par Lohr Industrie est guidé de manière permanente par un rail central. Il n'est donc soumis qu'à la réglementation sur les transports publics guidés, comme le sont les métros et les tramways.

Cette classification permet de définir trois classes de Transport en Commun en Site Propre [TCSP] : le métro, le tramway et le BHNS » (Extrait de Certu 2009, Tramway et Bus à Haut Niveau de Service (BHNS) en France : domaines de pertinence en zone urbaine).

Selon le ministère du développement durable, le TCSP est un système de transport public de voyageurs, utilisant une voie ou un espace affecté à sa seule exploitation, bénéficiant généralement de priorités aux feux et fonctionnant avec des matériels allant des autobus aux métros, en passant par les tramways).

Il est essentiel de rappeler que la notion de TCSP repose sur une approche système constituée de 3 composantes :

- L'infrastructure,
- Le matériel roulant,
- Les conditions d'exploitation.

Le CERTU classe les trois grandes familles de TCSP comme suit :

⁸ CERTU devenu CEREMA

⁹ CERTU. *Tramway et Bus à Haut Niveau de Service (BHNS) en France : domaines de pertinence en zone urbaine*, Lyon : 2009, 11 p.

« **Le métro** est un TCSP guidé de manière permanente et caractérisé par un site propre intégral (pas de carrefour, plate-forme inaccessible). Il est généralement en sous-terrain ou en viaduc. Il est exploité à voie libre à l'aide d'un système de cantonnement. Il peut être automatique. On fait la différence entre le métro lourd et le métro léger de type Véhicule Automatique Léger (VAL).

Le tramway est un TCSP guidé de manière permanente et caractérisé par un véhicule ferroviaire (roulement fer sur fer) qui circule majoritairement sur la voirie urbaine et est exploité en conduite à vue. On intègre dans cette catégorie le « tramway sur pneus » de Lohr, système guidé sur pneus qui présente la particularité d'avoir un guidage matériel permanent par rail et donc de se soustraire au code de la route, notamment en ce qui concerne la longueur des rames.

Le Bus à Haut Niveau de Service (BHNS) est un TCSP caractérisé par un véhicule routier répondant au code de la route (limité à 24,50m en longueur). Par une approche globale (matériel roulant, infrastructure, exploitation), le BHNS assure un niveau de service continu supérieur aux lignes de bus conventionnelles (fréquence, vitesse, régularité, confort, accessibilité) et s'approche des performances des tramways français. Le bus est ici considéré dans sa conception la plus large. Il peut être guidé (guidage matériel ou immatériel) ou non guidé, à motorisation thermique, électrique ou hybride. »

Dans cette première classification, deux grandes familles se distinguent : les systèmes en souterrain ou sur viaduc type métro et les systèmes en surface type tramway et BHNS. Le CERTU propose également une classification pour les **TCSP de surface** (figure 1).

Classification TCSP	Tramway		BHNS guidés				BHNS non guidé
	Tramway fer	Translohr	TVR de Bombardier à Caen	TVR de Bombardier à Nancy	Phileas d'APTS à Douai*	Bus à guidage optique	Bus classique
Type de guidage	2 rails porteurs	Rail central	Rail central	Rail central	Magnétique	Optique	
Classe de guidage	Matériel	Matériel	Matériel	Matériel	Immatériel	Immatériel	
Utilisation du guidage	Permanent	Permanent	tout le parcours commercial (hors dépôt)	Une partie du parcours commercial	Permanent (sauf mode dégradé)	Permanent (sauf mode dégradé) ou ponctuel	Aucun
Soumis à la réglementation TPG	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui	Non
Soumis au code de la route	Non	Non	Oui	Oui	Oui	Oui	Oui

* en projet

Figure 1 : Classification des TCSP de surface en fonction des caractéristiques de guidage

Source : Certu 2009

Comme suite à l'apparition des téléphériques en milieu urbain, qu'ils soient en exploitation ou en projet, nous estimons que le sujet de leur intégration au concept de TCSP reste ouvert.

Pour cette raison, nous décrivons rapidement la technique de traction par câble en milieu urbain. Les systèmes de transport par câble implanté sur les domaines skiables ou encore à des fins touristiques ne seront pas décrits car non considérés comme système de transport collectif de voyageurs en milieu urbain. Par conséquent, nous limitons notre description aux systèmes téléphérique et funiculaire. L'essentiel des informations ci-dessous proviennent du

site officiel du STRMTG¹⁰ Le site officiel du STRMTG nous permet de clarifier les définitions et de classer les différents termes utilisés.

Le funiculaire (FUN) est un appareil dont les véhicules, tractés par un câble, roulent sur des rails et effectuent un mouvement de va et vient entre les 2 extrémités de la ligne. Soit chaque véhicule circule sur sa propre voie, soit les deux véhicules utilisent la même voie qui dans ce cas comporte une section de croisement au milieu du parcours. Dans ce dernier cas, les véhicules possèdent sur un côté des roues guides qui leur imposent d'être toujours du même côté de la voie dans la zone de croisement.

Le câble tracteur roule sur des galets posés entre les rails. Tout comme pour les téléphériques, il existe deux technologies :

- Le câble enroulé,
- Le câble tracteur.

Le téléphérique désigne une installation où les passagers sont transportés dans des véhicules suspendus à un ou plusieurs câbles. Il s'agit des télésièges, des télécabines, des funitels et des téléphériques (à va et vient ou pulsés), à la différence des téléskis où les usagers restent en permanence avec les pieds au sol, et des funiculaires, très proche des trains. Dans son sens réglementaire, le mot téléphérique correspond donc à la notion de "téléporté".

Il existe deux grandes technologies pour réaliser un téléphérique :

- La technologie monocâble (un câble porteur et tracteur),
- La technologie bicâble (un câble porteur et un câble tracteur).

A ces deux techniques peuvent être associées deux types de mouvements :

- Mouvement unidirectionnel,
- Mouvement à va et vient.

La combinaison des technologies et des mouvements conduit à la mise en œuvre des systèmes suivants :

- Le télésiège - Téléphérique monocâble à mouvement unidirectionnel continu,
- La télécabine - Téléphérique à mouvement unidirectionnel continu,
- Le funitel - Téléphérique monocâble à mouvement unidirectionnel continu,
- Le téléphérique à va et vient,
- Le téléphérique pulsé - Téléphérique à mouvement unidirectionnel discontinu.

Le téléphérique en milieu urbain est adapté au franchissement d'une dénivellation comme à Grenoble ou à la traversée d'un bras de mer comme à Brest. Le projet de câble A d'Île de France Mobilité constitue à l'heure actuelle le projet français le plus abouti en milieu urbain. D'une longueur de 4,5 km, il permettra le franchissement d'une large coupure ferroviaire et autoroutière (vitesse commerciale inférieure à 16 km/h / débit de 1 200 passagers/h/sens).

¹⁰ STRMTG. Service Technique des Remontées Mécaniques et des Transports Guidés. www.strmtg.developpement-durable.gouv.fr (consulté en aout 2018).

Nous listons ci-dessous quelques dates de réalisations sur le territoire français et tentons de lister les projets en cours.

- 1862 : Funiculaire de Lyon (première mondiale),
- 1890 : Funiculaire du Havre,
- 1900 : Funiculaire de Montmartre,
- 1934 : Téléphérique de Grenoble,
- 1989 : Funiculaire de Laon (fermé récemment),
- 2016 : Téléphérique de Brest,
- Projets de téléphérique :
 - o Orléans,
 - o Toulouse,
 - o St-Denis de la Réunion,
 - o Région Ile de France,
 - o Marseille.

Tout comme les systèmes exploités en souterrain ou viaduc tel que le métro, les systèmes de transport par câble ne sont pas impactés par les autres types de circulation.

3. Evolution de la technique routière

Une grande partie des informations historiques ci-dessous proviennent du site internet de l'Association du Musée des Transports Urbains, Interurbains et Ruraux.¹¹ Des éléments sont également issus des ouvrages de Jean Robert, *Histoire des transports dans les villes de France*¹² et *Notre métro*,¹³ ainsi que des thèses de Jeong-hwa An¹⁴ et de Sophie Labbouz¹⁵ soutenues à Paris Est.

Dans un premier temps, nous définissons le véhicule de transport collectif routier. Selon l'arrêté du 2 juillet 1982 relatif aux transports en commun de personnes, un autobus¹⁶ est un véhicule de transport en commun de personnes à moteur conçu et aménagé pour être exploité principalement en agglomération. Les motorisations de ces véhicules sont différentes. Il existe des motorisations thermiques, hybride et électrique. Les capacités diffèrent également selon les modèles. L'autobus dit « standard » a une longueur générale de 12 m et a une capacité de 70 à 80 personnes en fonction de l'aménagement intérieur (selon la norme de 4p./m²). L'autobus dit « articulé » (bi-caisses) a une longueur générale de 18 m et a une capacité de 110 à 120 personnes en fonction de l'aménagement intérieur (selon la norme de 4p./m²). L'autobus dit « double articulé ¹⁷ » a une longueur maximale de 24,50 m et une capacité d'environ 200 personnes en fonction de l'aménagement intérieur.

En France, la première mise en œuvre de lignes de transport collectif en milieu urbain remonte à 1662 sous le règne de Louis XIV. En effet, Blaise Pascal obtient l'autorisation de fonder une entreprise qui permettra d'exploiter cinq lignes dont une circulaire dans Paris sur des itinéraires et horaires fixes. C'est la naissance de lignes régulières de transport collectif de voyageurs. Le premier système de transport collectif de voyageurs fonctionne sur voirie avec une traction hippomobile (carrosse à cheval).

En 1825, Stanislas Baudry organise un service de transport public à l'aide voiture à chevaux (toujours en traction hippomobile sur voirie) reliant le centre de Nantes à la périphérie. La fréquentation de cette première ligne étant un succès, Stanislas Baudry décide de créer un réseau portant le nom de « Omnibus ».

En 1828, la ville de Paris accorde une concession à Stanislas Baudry pour l'exploitation de voitures à cheval sur des itinéraires fixes et la création de l'Entreprise Générale des Omnibus.

¹¹ AMTUIR. Le musée des transports urbains de France. Disponible sur <https://amtuir.org/>. Consulté en 2015,

¹² Robert, J. *Histoire des transports dans les villes de France*. Paris : Fabre, 1974, 529 p.

¹³ Robert, J. *Notre Métro*, éditions OMNES & Cie, Paris 9^{ème}, 1967. 304 p.

¹⁴ An J. *Le choix d'un système de transport durable : analyse comparative des systèmes de transport guidé de surface*. Doctorat : Transport. Université Paris EST, 2011, 364 p.

¹⁵ Labbouz, S. *Le choix du tracé d'une ligne de transport en commun en site propre et de la position de sa plateforme en milieu urbain : l'utilisation des outils mathématiques au service de la concertation*. Doctorat : Génie Urbain. Université Paris Est, 2008, 442 p.

¹⁶ Nous intégrons également à cette définition le trolleybus.

¹⁷ Le réseau de Bordeaux a exploité ce type de véhicule, le réseau de Metz exploite deux lignes de BHNS avec des doubles articulés, le réseau de Nantes en équipera d'ici fin 2019 la ligne 4.

De nombreux réseaux omnibus sont mis en œuvre dans plusieurs villes de province au cours du XIX^e siècle sans trop d'évolution technologique.

Lors du 5^{ème} salon de l'automobile de Paris en 1905, un nouveau véhicule, destiné à assurer un service de transport collectif, apparaît : l'omnibus automobile. L'apparition du véhicule automobile destiné au transport collectif fait suite à une demande la Compagnie Générale des Omnibus (La CGO est créée à la suite d'une réforme législative initiée par le Baron Haussmann). Les premiers véhicules de transport collectif routier mis en circulation sont des Brillié-Schneider. Ces premières exploitations de ligne sont mises en œuvre à Paris en 1906. La diffusion en province des véhicules routiers dédiés au transport collectif en milieu urbain n'aura lieu qu'après la première guerre mondiale.

En 1947, le constructeur Chausson propose un modèle de grande série : le modèle APH. Ce nouveau modèle est beaucoup mieux conçu que les modèles précédents et se répandra sur les lignes interurbaines et urbaines. Renault propose un nouveau modèle concurrent : le R419.

En 1958, la Régie des Transport Parisien (RATP) et l'Union des Transports Publics Urbains et Régionaux (UTPUR) définissent les caractéristiques d'un véhicule standard. Ce véhicule sera produit par SAVIEM avec le modèle SC10 ou encore Berliet avec les modèles PCMU ou PCMR. Ces nouveaux modèles apportant un progrès considérable du fait de la standardisation et d'une meilleure accessibilité, se répandent rapidement ce qui permet de remplacer peu à peu les modèles plus anciens.

A partir des années 1990, le renouvellement du parc d'autobus français devient nécessaire. L'Union des Transports Publics (UTP), le Groupement des Autorités Responsables des Transports (GART) et les principaux groupes s'associent pour définir le cahier des charges d'un nouveau véhicule. En liaison avec la RATP, Renault propose donc le R312. Dans la continuité, Renault proposera le modèle « AGORA » et « AGORA L » pour la version articulée. Ce nouveau véhicule à plancher surbaissé avec le moteur positionné à l'arrière permet d'offrir une capacité plus importante et d'améliorer le confort. Les premiers véhicules AGORA sont mis en exploitation à partir de 1997.

Durant cette période, les ventes des constructeurs étrangers sur le marché français sont devenues importantes [MAN, EVOBUS, Van Hool, Scania]. En effet, ces derniers proposaient déjà ce type de conception nouvelle et moderne avec plancher surbaissé et position du moteur à l'arrière du véhicule. Au cours des années 2000, les constructeurs s'adaptent aux normes européennes, et proposent des véhicules en constante évolution. Ces dernières années sont axées sur le développement des véhicules de transport collectifs routiers électriques (alimentation par batterie et/ou recharge en station).

Les premiers essais de circulation d'un omnibus électrique alimenté par une double ligne de contact au-dessus de la voirie sont effectués à la fin du 19^{ième} siècle par le constructeur Siemens. C'est la naissance du trolleybus¹⁸. En 1901, des essais ont lieu à Charbonnières-

¹⁸ Le trolleybus est très proche de l'autobus à l'exception de l'énergie utilisée et de l'infrastructure nécessaire à son fonctionnement. Tout comme les autobus, il existe des trolleybus standard, articulés et double articulés avec les mêmes capacités d'emport que les autobus équivalents.

les-Bains à proximité de Lyon. Le terme trolleybus est utilisé par la société Vétra vers 1925. Cette société créée par Alsthom (devenu Alstom en 1998) se lance dans le développement de ce système de transport. A cette période, ce système est encore marginal mais quelques villes utilisent ce type de matériel

Pendant la deuxième guerre, c'est le manque d'autobus du fait de la réquisition militaire et de la pénurie de carburant qui permettent au trolleybus de se développer. La société Vétra reçoit de nombreuses commandes de la part des villes de Lyon, Bordeaux, Marseille, Paris, Nice, Limoges....

En 1942, un décret définit une standardisation nationale pour la construction de trolleybus. Cette standardisation est une première en France. Elle n'est réalisée pour les autobus qu'en 1958 à l'origine du modèle SC10 et voit le jour pour les tramways en 1975 avec le modèle Tramway Français Standard (TFS).

A partir de 1960, les réseaux de trolleybus disparaissent progressivement. Aujourd'hui, seules les villes de Limoges, Lyon et St-Etienne exploitent encore des lignes de trolleybus ainsi que Nancy si on considère que le TVR est un trolleybus partiellement guidé.

Au fil des années, la technique des matériels roulants routiers dédiés aux transports collectifs a beaucoup évolué. Au fil du temps, le matériel roulant sera considéré comme une composante d'un système plus large intégrant deux autres composantes qui sont l'infrastructure et l'organisation de l'exploitation.

Cette nouvelle vision donnera naissance au concept de Bus à Haut Niveau de Service. Ce concept permettra, en comparaison avec la technique ferroviaire, de redynamiser une image de l'autobus vieillissante et peu performante. Le système reposant sur l'utilisation de véhicules routiers devient « performant » et capable d'assurer une exploitation de lignes à forte fréquentation.

3.1 La technique routière et le site propre : du BRT au BHNS

A partir des années 1990, les réseaux de transport collectif cherchent à améliorer l'image du bus grâce à une diversification et hiérarchisation de l'offre. En Amérique latine, les lignes d'autobus « hyper capacitatives » dans des villes comme Curitiba ou Bogotá, ouvrent de nouvelles perspectives et donnent naissance au concept « Bus Rapid Transit » [BRT]¹⁹.

3.1.1 Le développement initial des BRT en Amérique Latine dans les villes de Curitiba et de Bogota

Il est essentiel de rappeler que le concept de BHNS (Bus à Haut Niveau de Service) français ou plus largement européen est inspiré du BRT (Bus Rapid Transit) né en Amérique latine.

¹⁹ UTP. *Le BHNS Bus à haut niveau de service*. Département Clientèle, Exploitation et Recherche. Paris, 2006, 2 p.

La première ville à exploiter une ligne d'autobus capacitaire avec une approche système est Curitiba au Brésil. Curitiba est une ville de 1,5 millions d'habitants avec 85 % de la population utilisatrice des transports en commun et une agglomération de 3,5 millions d'habitants avec 70 % de la population utilisatrice des transports en commun²⁰. Cette situation remarquable l'est d'autant plus que le réseau de transport en commun de Curitiba est exploité uniquement par des autobus. Les systèmes métro ou encore tramway n'existent pas. C'est en 1974 que Curitiba inaugure un réseau d'autobus de 1 100 kilomètres dont 81 en site propre pour la partie la plus dense de la ville²¹. Ce réseau est composé à l'heure actuelle de 340 lignes (Viennet, 2014).

Inspirée par Curitiba, la ville de Bogotá est une « figure emblématique » dans le paysage des villes pionnières du concept BRT avec son réseau TransMilenio. Jusqu'à la fin des années 1990, la ville de Bogotá disposait d'un réseau d'autobus composé de 28 000 véhicules détenus par 30 propriétaires. Le réseau souffrait d'une totale désorganisation et la vitesse commerciale moyenne était comprise entre 5 et 8 km/h²². Cette situation a provoqué une baisse sensible de la fréquentation. En 1999, le taux de remplissage moyen des véhicules était de l'ordre de 45 % (Juge, 2006). La congestion urbaine ne cessait d'augmenter et menaçait le développement économique de la ville.

La mise en place d'un réseau de transport public plus performant devient donc indispensable. L'investissement dans la construction d'un réseau ferroviaire est écarté du fait de l'importance de l'investissement à réaliser. Les autorités compétentes optent donc pour la mise en œuvre d'un réseau intégré d'autobus rapide en site propre : TransMilenio. Les objectifs affichés sont de :

- Désengorger l'espace urbain de l'automobile,
- Améliorer la performance et l'image du réseau de transport,
- Augmenter la part du transport collectif.

Le réseau TransMilenio est caractérisé par une réservation de voirie sur un corridor au centre des artères principales. La largeur des réservations de voiries [2 fois 2 voies] permet une double exploitation : ligne express et omnibus. Les véhicules sont articulés, climatisés, à plancher bas et localisés par satellite. Les stations principales sont équipées de portes palières et les quais d'embarquement sont au niveau des véhicules. Par conséquent le réseau TransMilenio possède les caractéristiques d'un réseau ferroviaire de surface avec 84 km de site propre.

L'exploitation du TransMilenio débute courant 2001. La vitesse commerciale passe de 8 km/h à 28 km/h et les taux de remplissage passent de 45 % à 95 % (Juge, 2006).

²⁰ Viennet, R. *Curitiba, la ville qui a inventé le bus à haut niveau de service*. Mobilicity.com. 2014. Disponible sur <http://www.mobilicites.com/011-2577-Curitiba-la-ville-qui-a-invente-le-bus-a-haut-niveau-de-service.html>

²¹ COST TU0603 BHNS – Caractéristiques fondamentales et recommandations pour la prise de décision et la recherche. Paris : CERTU, 2011, 224 p

²² Juge, J. « Bogota, une ville métamorphosée par TransMilenio ». *Transports Urbains*. 2006, numéro 109, p. 3 - 6

3.1.2 La transposition du BRT dans d'autres pays

Le Bus Rapid Transit est un terme utilisé à partir des années 1970 aux Etats-Unis, au Canada, Australie et en Amérique du Sud pour qualifier les services améliorés de transport reposant sur l'autobus²³. Afin de comprendre la notion de BRT, le contexte américain doit être décrit. De manière générale, la morphologie des villes américaines n'est pas favorable à la mise en œuvre de systèmes de transport ferroviaires capacitaires du fait du manque de densité. De plus, les réseaux ferroviaires urbains ne se sont pas développés comme en Europe. Par conséquent le système reposant sur l'utilisation de bus apparaît comme la solution la plus pertinente à court terme (Certu, 2011). Les différentes expériences ont permis de nuancer le concept de BRT avec les BRT-lite, Full-BRT ou encore BRT- Heavy (Certu 2011).

Le BRT-Lite constitue une première amélioration d'une ligne conventionnelle en fixant la limite du concept BRT [distance inter-station importante, quelques priorités aux feux, augmentation de la fréquence ainsi que de l'amplitude]. Le BRT-Lite est la forme de BRT la plus répandue en Amérique du Nord.

Le Full-BRT est un système de surface en site propre avec carrefour dénivelé, paiement avant l'embarquement, véhicules modernes avec une forte identité. Les 3 systèmes Full-BRT les plus cités par les Américains sont : Bogota [Colombie], Brisbane [Australie] et Ottawa [Canada]. Il n'existe pas de Full BRT aux Etats-Unis et ce concept ne se retrouve pas dans le concept BHNS français.

Le BRT-Heavy est une nouvelle approche proposant une augmentation de la vitesse et de la régularité en affectant une image particulière au bus et une réservation de voirie type site partagé.

3.1.3 L'approche européenne

Les pays européens, intéressés par le concept BRT, tentent de faire émerger le concept de Bus with a High Level of Service [BHLS]. Une action de coopération scientifique et technique européenne [COST TU0603] a permis de réaliser un ouvrage reprenant les expériences de 14 pays européens.

Cet ouvrage précise que le concept BHNS repose sur une amélioration structurée des systèmes bus. Le point commun entre tous les sites européens du COST TU0603 repose sur l'approche systémique afin d'améliorer la qualité de service et la fréquentation.

Comme nous l'avons déjà évoqué, le secteur des transports publics bénéficie d'innovations au cours des années 1970. Cette innovation permet de lutter contre la croissance de l'utilisation de la voiture particulière qui devient un modèle en contradiction avec un objectif de durabilité. Par conséquent, les environnements d'exploitation des systèmes de transport reposant sur l'autobus font l'objet d'améliorations : réservations de voirie, gestion du trafic comme mesure d'assistance aux bus, priorité aux feux et contrôle du stationnement (COST Certu, 2011) Durant cette même période, le développement des Systèmes d'Aide à

²³ Certu. *BRT nord-américain / BHNS français*. Paris : Certu, 2011, 9p

l'Exploitation (SAE) contribue également à l'amélioration des conditions d'exploitation des lignes d'autobus.

Dans la majorité des cas, toutes ces améliorations ne sont pas intégrées dans le cadre d'une approche globale ou vue systémique. Le concept BHNS permet désormais cette approche systémique. En Europe, on tente d'améliorer une offre existante alors qu'en Amérique, on propose un moyen de transport capacitaire (COST Certu, 2011).



Figure 2 : La vision systémique du BHNS

Source : CERTU. *Bus à Haut Niveau de Service : du choix du système à sa mise en œuvre*. 2009

A partir de 2005, le Certu²⁴ tente de constituer, via les expériences françaises, le concept de BHNS. Les expériences locales antérieures sont :

- La ville nouvelle d'Evry [1970],
- La ligne francilienne Trans Val de Marne [1993],
- Le système TEOR de Rouen [2001].

Le BHNS européen est conçu comme les BRT (inspiré par la performance du chemin de fer) mais adapté au contexte urbain local.

²⁴ CERTU. *Bus à Haut Niveau de Service : du choix du système à sa mise en œuvre*. Certu. Lyon : Certu, 2009, 160 p.

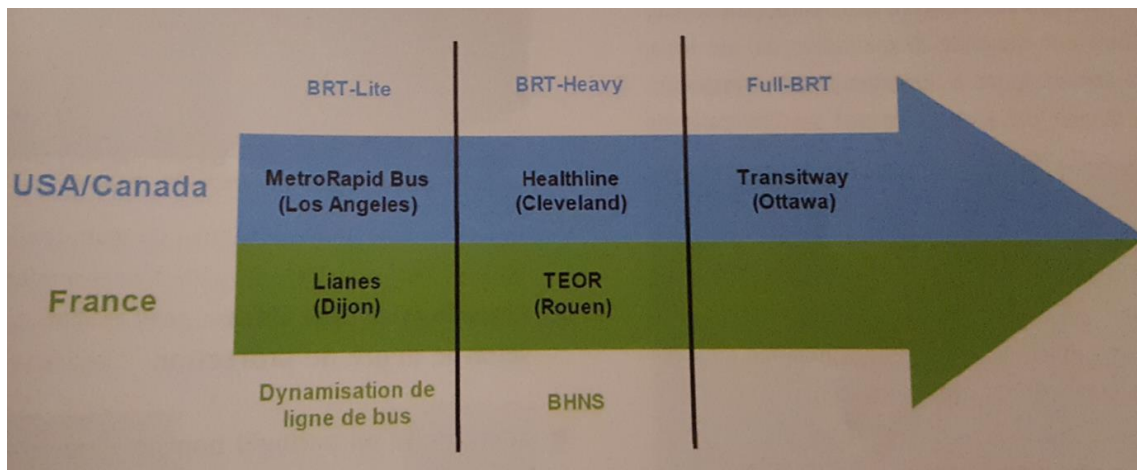


Figure 3 : Comparaison entre BRT et BNHS

Source : COST Certu, 2011

Le BHNS européen peut se résumer ainsi : il s'agit d'un système fondé sur l'utilisation de l'autobus clairement identifiable comme mode principal. Il offre aux voyageurs un niveau élevé de performance et de confort, comparable à celui d'un système ferroviaire. Ce confort s'entend aux arrêts et à l'intérieur du véhicule. L'approche système intégrant l'infrastructure, les véhicules et les outils d'exploitation répond à des objectifs cohérents et permanents en relation avec le réseau de mobilité et le contexte urbain.

Selon le CERTU, trois composantes sont considérées comme stratégiques pour qualifier une ligne d'autobus de BHNS :

- Ponctualité et régularité,
- Fréquence,
- Rapidité.

3.1.4 Le BHNS à la française

En 2005, le CERTU tente de formaliser le concept de BHNS dans son ouvrage *Le BHNS, concept et recommandations*. Toujours en 2005, L'UTP réalise de son côté une enquête auprès des réseaux français afin de dénombrer les lignes de bus dites « structurantes ». Les résultats sont les suivants :

- Agglomération de plus de 100 000 habitants : 19 réseaux sur 31 disposent de lignes structurantes,
- Agglomération de moins de 100 000 habitants : 2 réseaux sur 27 disposent de lignes structurantes.

Ces lignes structurantes ne disposent pas forcément des caractéristiques du BHNS tel que défini par le CERTU. La priorité de passage aux feux ne concerne que 10 % des lignes. L'aménagement des lignes n'est particulier que pour 17 % des cas. Les véhicules utilisés ne sont spécifiques que dans 16 % des cas²⁵. Les variantes sont donc nombreuses et pour certaines très éloignées du concept de BHNS défini par le CERTU. Il existe également une

²⁵ Beaucire, F. « BHNS : une déclinaison française à géométrie variable ». *Transports Urbains*, 2006, numéro 109, p. 14

grande disparité au niveau de l'offre et du niveau de service offert (amplitude, fréquence, vitesse commerciale).

Dans cette collection disparate, figurent néanmoins des lignes de bus structurantes proches du concept du BHNS tels que le réseau TEOR de Rouen (Beaucire, 2006).

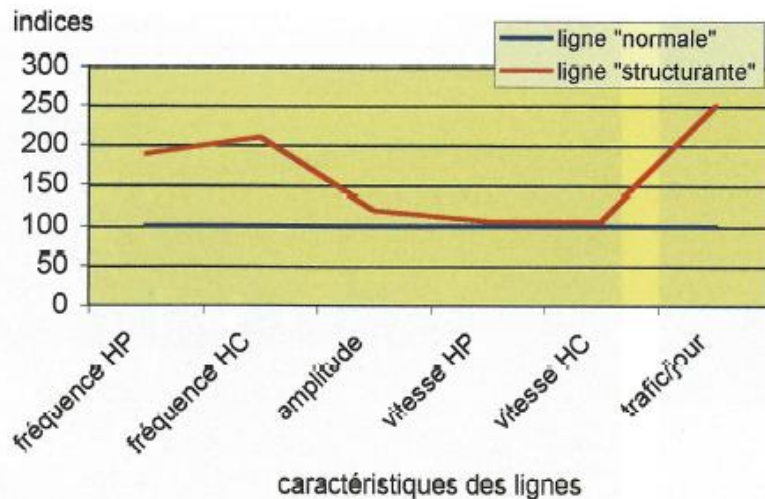


Figure 4 : Comparaison entre lignes conventionnelles et lignes structurantes

Source : Beaucire, 2006

A cela s'ajoute une confusion dans les termes utilisés permettant de nommer des lignes de d'autobus ayant un traitement particulier de l'insertion en milieu urbain. On peut retrouver les termes suivants : Axes VERT, LAHNS, BusWay, Transway, BRT ou encore les Lianes²⁶.

Depuis 2007, le Certu a permis de réaliser une classification claire entre les TCSP de surface notamment en différenciant le tramway du BHNS. Le BHNS est un TCSP caractérisé par un véhicule routier limité à 24,50 m de long et 2,55 m de large par le code de la route. Cette classification permet également de subdiviser les BHNS en BHNS guidés et BHNS non-guidés. Un BHNS peut posséder un système de guidage matériel ou immatériel. Le système de guidage est obligatoirement non permanent. Les véhicules utilisés ont une motorisation thermique, électrique ou encore hybride.

Malgré cette clarification du Certu datant du début des années 2000, le concept de BHNS rassemble encore beaucoup de cas très différents. Il devrait peut-être évoluer en label s'appliquant à partir de mesures précises de vitesse, de ponctualité et de régularité telle une norme de qualité. La longueur de la réservation de voirie en rapport avec la longueur totale de l'itinéraire devrait également être prise en compte.

²⁶ Wartel, A. « Essor et potentialités des BRT – BHNS ». *Transports Urbains*, 2006, numéro 109, p. 7 - 9

3.1.5 Les différents modes de guidage

Comme cela à déjà été évoqué, le BHNS peut être guidé ou non guidé. Lorsque le BHNS possède un système de guidage, celui-ci peut être matériel ou immatériel. Le système de guidage est obligatoirement non permanent. Les véhicules routiers utilisés ont une motorisation thermique, électrique ou encore hybride.

En ce qui concerne le territoire français, nous pouvons lister trois expériences de guidage.

Transport sur Voie réservée : TVR

Rappelons que TVR n'est pas un système développé par Bombardier Transport. Il est le fruit de la recherche et développement de la société belge la Brugeoise et Nivelles (BN). La société BN est ensuite rachetée par Bombardier Transport.

La société BN travaille sur le concept TVR dans le cadre du concours « Cavallé » de 1975. Comme nous le verrons ensuite, le concours « Cavallé », qui avait pour objectif de définir un Tramway Français Standard (TFS), débouche sur le choix du système proposé par la société Alstom. BN et Matra avaient proposé le Valbus ou Val de surface. Le projet de TVR, sous forme d'un prototype « le GLT » (Guided Light Transport), est exposé au congrès de l'UITP de Bruxelles en 1985. Des tests sont réalisés dans les années 1990 sur une ligne de 6 Km à Rochefort dans les Ardennes belges. Le guidage du GLT est donc l'ancêtre de celui du TVR. Ce dernier a été produit par ANF Industries, filiale du groupe Bombardier depuis 1989.

Le fonctionnement du TVR nécessite la mise à disposition d'une voie routière avec la pose d'un rail de guidage central présentant un profil spécifique. Ce nouveau type d'infrastructure est conçu de façon à réaliser des économies en comparaison avec l'infrastructure du tramway sur fer.

Pour les projets des villes de Nancy et de Caen, trois types de voies sont proposées pour le mode guidé :

- Piste en béton en trois files pour les roulements et le guidage,
- Dalle construite en béton armé continu sur une couche de fondation,
- Dalle constituée par une structure de béton bitumineux sur une couche de fondation.

Le véhicule TVR est relativement proche du matériel type « Trolleybus » : un véhicule articulé composé de 3 caisses d'une longueur de 24,5 m et pouvant atteindre la vitesse de 70 km/h. Le TVR offre une capacité de 131 places (selon la norme de 4p./m²). Il est à traction électrique. L'énergie électrique est transmise au véhicule soit par une ligne aérienne de contact (LAC), soit par un groupe diesel embarqué à l'arrière du véhicule.

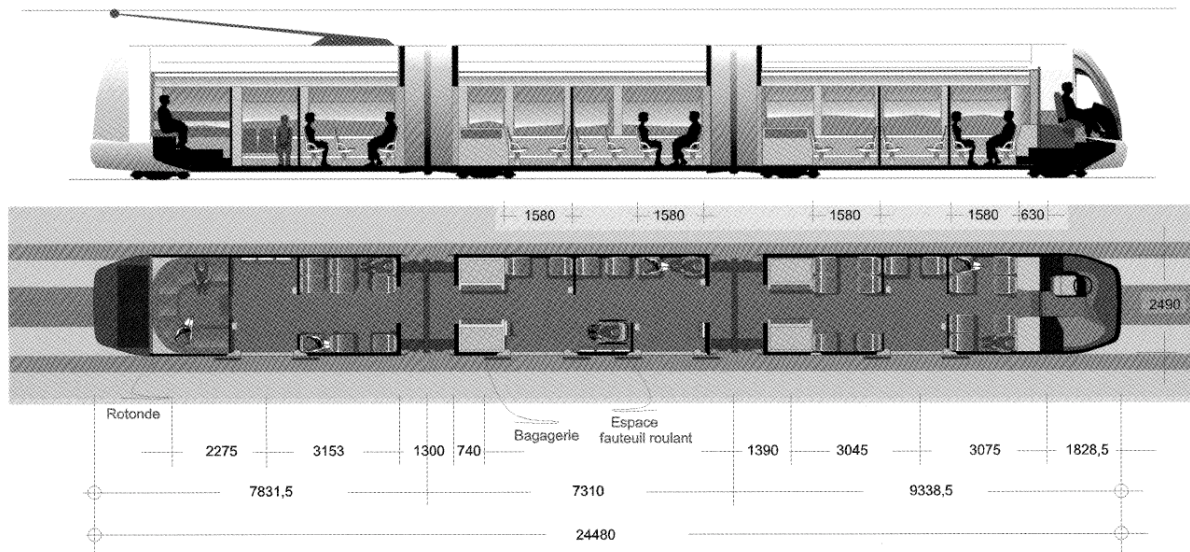


Figure 5 : Diagramme du TVR

Source : Bombardier - AN J, 2011

Aujourd'hui, le TVR est encore exploité à Nancy mais jusqu'en 2022 / 2023. Les élus ont décidé de remplacer ce système par un tramway sur fer. La ville de Caen avait montré le chemin avec la mise en service d'un tramway sur fer au cours de l'été 2019.

PHILEAS

Le système Phileas est composé d'un véhicule articulé ou bi-articulé et d'un système de guidage magnétique basé sur le positionnement d'aimants dans la chaussée. Ce matériel est conçu par la société APTS située à Eindhoven aux Pays-Bas.

Le véhicule Phileas peut être exploité en trois modes :

- Mode manuel : comme un bus,
- Mode semi-automatique : la stabilité de la trajectoire est assurée par le système automatique de direction magnétique et le conducteur est seul responsable de l'accélération et du freinage. En mode semi-automatique, la vitesse est limitée dans les courbes et le véhicule ralentit automatiquement au niveau des arrêts, afin d'assurer un positionnement précis,
- Mode automatique : le réglage de la vitesse est assuré entièrement par un système automatique. Néanmoins, le conducteur a toujours la possibilité de prendre à nouveau le contrôle du véhicule, si nécessaire.

L'infrastructure du système Phileas doit être considérée avec les caractéristiques suivantes :

- Voies réservées aux autobus autant que possible, avec une vitesse au moins de 50 km/h,
- Un minimum de courbes, ou courbes franchissables à une vitesse inférieure à 50 km/h,
- Une distance moyenne entre les arrêts d'au moins 500 mètres,
- Priorité totale aux carrefours autant que possible, contrôlée par feux de signalisation ou des barrières,
- Les quais des stations ont une hauteur de 30 cm selon les spécifications d'APTS,

- Des aimants sont noyés dans le revêtement de la chaussée en vue du guidage et de la précision d'accostage sur toute la longueur de la ligne,
- Les chaussées sont en béton pour éviter la déformation et l'ornièrage de la couche de roulement.

Le Phileas est un autobus monotrace, articulé ou bi-articulé, bimode, hybride et doté d'un guidage.

En France, ce système avait été retenu uniquement par la ville de Douai. La mise en route a été retardée à plusieurs reprises du fait de difficultés d'homologation. De fait, le système de guidage n'a jamais fonctionné. Ces véhicules ont été progressivement retirés de la circulation à partir de 2014 et remplacés par des autobus articulés de marque Mercedes. Du fait de la réalisation d'une voirie réservée lors de l'élaboration du projet Phileas, la ville de Douai dispose aujourd'hui d'un système de transport type BHNS. Cependant, l'infrastructure initiale était conçue pour des véhicules monotraces avec des portes des deux côtés. Par conséquent, les quais centraux ne sont plus utilisables. La nouvelle exploitation oblige à repenser une partie de l'implantation des stations.

CIVIS

Le développement du système Civis a débuté dans les années 1990. Ce projet impliquait deux sociétés :

- Matra pour l'ingénierie générale du système notamment le guidage,
- Renault (devenue Irisbus) pour la conception du véhicule routier.

Civis est un système intégrant un guidage optique. Ce guidage optique fonctionne à l'aide d'une caméra et d'un traitement de l'image. La caméra est fixée sur la face avant du véhicule et lit un marquage au sol matérialisé par un double trait de peinture. Ce guidage est essentiellement utilisé à l'approche des stations pour faciliter l'accostage.

Système CIVIS utilisé sur les lignes TEOR de Rouen

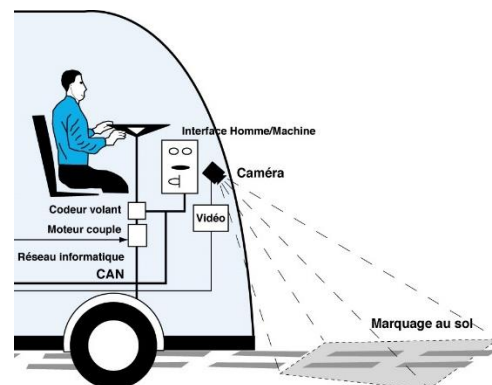


Figure 6 : Système CIVIS

Source : CREA²⁷ – document interne

²⁷ Communauté d'Agglomération de Rouen Elbeuf Austreberthe.

Le système Civis est intégré au code de la route. Les voies de circulation ne sont pas soumises à des exigences particulières. Dès lors que le marquage au sol est intégré à la plateforme, celle-ci peut être de type conventionnel.

Dans le cadre du projet, les véhicules intégrant le système Civis étaient les autobus standard et articulés produits par Iribus : Agora puis Citelis. Aujourd'hui, tous les types d'autobus peuvent être équipés du système Civis. En revanche, Irisbus souhaitait associer ce mode de guidage à des véhicules spécifiques baptisés Civis ou Cristalis, qui ont été boudés par les réseaux car bien trop lourds par rapport à leur capacité d'emport.

Le système Civis est utilisé sur le BHNS TEOR de la ville de Rouen (Transport Est Ouest Rouennais).

4. Evolution de la technique ferroviaire

Tout comme pour la rédaction de la partie relative l'évolution de la technique routière, une grande partie des informations historiques ci-dessous provient du site internet de l'Association du Musée des Transports Urbains, Interurbains et Ruraux²⁸ Des éléments sont également issus des ouvrages de Jean Robert, *Histoire des transports dans les villes françaises*²⁹ et *Notre métro*³⁰, ainsi que des thèses de Jeong-hwa An³¹ et de Sophie Labbouz³² soutenues à Paris Est.

4.1 Le tramway

Les premiers services de transport collectif utilisant des véhicules sur rail sont organisés vers 1830 aux Etats-Unis. En 1832, une ligne régulière est exploitée à New-York. Cependant, la mauvaise intégration du rail monté en saillie sur la chaussée gêne la circulation des véhicules motorisés ce qui provoque sa disparition.

Deux décennies plus tard, le tramway fait de nouveau son apparition aux Etats-Unis grâce à une évolution technologique au niveau de l'infrastructure. Un ingénieur français vivant aux Etats-Unis, Alphonse Loubat, invente le rail à gorge. Celui-ci s'intègre parfaitement à la chaussée ne procurant plus de gêne pour la circulation des véhicules motorisés. En 1853, un tramway utilisant ce nouveau type de rail est mis en exploitation à Broadway³³. Suite à la mise en œuvre du rail à gorge, le tramway se développe dans les principales villes américaines.

De retour en France, Alphonse Loubat demande en 1853 l'autorisation de construire une ligne de tramway traversant Paris [Vincennes – Boulogne et Sèvres] en suivant les quais de la Seine. En septembre 1855, la première ligne de tramway est exploitée en France sur la section Boulogne – Concorde.

Dans les autres pays d'Europe, le tramway se développe rapidement. La traction animale est systématiquement utilisée.

Au cours de la fin du 19^{ème} siècle, la technique de traction évolue avec plus ou moins de succès. Des essais de traction à vapeur ont lieu à Paris en 1875. Une traction par câble est expérimentée à San Francisco en 1873. En 1879, un premier tramway à air comprimé naît à Nantes. La même année à l'Exposition Industrielle de Berlin, la société Siemens fait circuler un tramway à l'aide d'une alimentation électrique via un rail axial sur la voie. Ensuite, Siemens et Halske installeront pour l'Exposition de l'électricité de Paris une ligne entre la Concorde et

²⁸ AMTUIR. Le musée des transports urbains de France. Disponible sur <https://amtuir.org/>. Consulté en 2015

²⁹ Robert, J. *Histoire des transports dans les villes de France*. Paris : Fabre, 1974, 529 p.

³⁰ Robert, J. *Notre Métro*, éditions OMNES & Cie, Paris, 1967. 304 p.

³¹ AN J. *Le choix d'un système de transport durable : analyse comparative des systèmes de transport guidé de surface*. Doctorat : Transport. Université Paris Est, 2011, 364 p.

³² Labbouz, S. *Le choix du tracé d'une ligne de transport en commun en site propre et de la position de sa plateforme en milieu urbain : l'utilisation des outils mathématiques au service de la concertation*. Doctorat : Génie Urbain. Université Paris Est, 2008, 442 p.

³³ Robert. J. « L'évolution du tramway ». *Transport Urbains*, 1975, numéro 31, pages 11 - 16

le Palais de l'Industrie équipée d'une alimentation aérienne. En France, c'est la ville de Clermont-Ferrand qui exploite la première ligne de tramway électrique à prise de courant aérienne en 1890 puis Marseille lui succède deux années plus tard.

La période durant et après les grandes guerres n'est pas une situation avantageuse pour le tramway. En effet, les dynamiques d'innovation sont fortement ralenties, l'économie est affaiblie et une composante importante fait son apparition : la commercialisation de l'automobile. Le tramway perd peu à peu de son efficacité car la circulation automobile augmente. Au fil du temps, les tramways sont retirés.

Le processus de démantèlement des tramway débute sur le territoire français dès 1920. Entre 1920 et 1975, la France passe de 48 à 3 villes dotées d'un tramway. La situation est identique dans différents pays européens tels de le Royaume-Uni, l'Espagne ou encore le Portugal.³⁴

En revanche l'Allemagne conserve un certain nombre de réseaux (passage de 169 à 90 réseaux entre 1945 et 1975) (Emangard P-H, 2012) . Aux Etats-Unis, on cherche à moderniser le tramway afin qu'il rivalise avec l'automobile, de là naît la motrice PCC à partir de 1930 (Robert J, 1975).

A la fin des années 1960, la France ne compte plus que 3 lignes de tramways : Lille, St Etienne et Marseille (Marseille a fait circuler des PCC sur la ligne 68 jusqu'à sa fermeture pour travaux en 2004).

Les autres villes d'Europe maintiennent et développent leur réseau de tramway. Beaucoup de PCC sont importés des Etats-Unis, mais également construits sous licence par des constructeurs européens comme la Brugeoise et Nivelles qui a notamment livré les PCC marseillais de la ligne 68 et de nombreux réseaux belges. La Suisse et l'Allemagne développent leur propre matériel qui circule de plus en plus en site propre.

Après une disparition presque totale du tramway sur le territoire français, il faut attendre les années 1970/1980 pour voir réapparaître le tramway dit « moderne » qui se caractérisera entre autres par une capacité d'emport plus importante et une implantation avec ses propres voies de circulation.

4.1.1 Le tramway moderne

Comme le rappelle Michel Bigey dans l'ouvrage *40 ans de tramways en France*, le renouveau de tramway en France s'inscrit dans un contexte de crise pétrolière qui surgit en 1973. Au début de cette crise pétrolière, le directeur général de la RATP publie un article dans le journal *Le Monde* sur le sujet de la consommation d'énergie des transports collectifs. Le transport collectif permet de diminuer par quatre la consommation d'énergie, par personne, en comparaison avec l'usage de l'automobile. Ensuite, le directeur de la RATP lancera une étude

³⁴ Emangard, P-H. « Les tramways en Europe : une vision diachronique ». *Transports Urbains*, 2012, numéro 120, p. 3 – 8.

auprès de la SOFRETU (filiale de la RATP) qui portera le nom de Neuchateau. Les conclusions de ce rapport seront publiées dans un article du journal Le Monde en 1975³⁵.

Dans ce contexte, Marcel Cavaillé, Secrétaire d'Etat aux Transport, déclare en 1975 que « *le tramway est susceptible de connaître un nouvel essor dans plusieurs villes de France* ». Il demande à huit grandes villes d'étudier un projet de réseau de tramways (une neuvième ville, Nantes, sera ajoutée plus tard). Marcel Cavaillé lance en août 1975 un concours international pour la fabrication d'un « Tramway Français Standard » (TFS).

Il est essentiel de rappeler que lorsque les anciens tramways circulaient sur voirie, celle-ci était généralement loin d'être congestionnée³⁶. Le tramway pouvait être exploité sur site banalisé, mêlé à la circulation générale. Or, la situation a évolué. Dès la moitié du 20^{ème} siècle, l'utilisation massive de l'automobile engendre une congestion de certains axes urbains pour la plupart des villes occidentales. La réintroduction du tramway « moderne » dans le tissu urbain français nécessite une mise en exploitation avec sa propre emprise au sol et potentiellement des ouvrages de génie civil. La réservation des voies doit être accompagnée de mesures limitant les conflits aux carrefours.

Par conséquent, il est nécessaire de définir les grands principes suivants lors de l'intégration du système dans le tissu urbain (Bigey, 1975) :

- Supprimer les « tourne à gauche » dans les carrefours [organiser la circulation générale en fonction du site propre] ;
- Matérialiser l'emprise tramway par une signalisation au sol notamment pour la traversée des carrefours par l'automobile ;
- Mettre en place un système de priorité aux feux.

La réintroduction du tramway « moderne » sur le territoire français a nécessité quelques changements à divers niveaux. Ceux-ci sont listés dans le tableau ci-dessous (tableau 1) :

³⁵ Bigey, M. « Le retour du tramway en France, 1973 – 1990 ». In- Gardon S. (dir.) *Quarante ans de tramways en France*. Lyon : Libel, 2018, 507 p

³⁶ Bigey, M. « Problèmes posés par le tramway dans les villes françaises ». *Transports Urbains*, 1975, numéro 31, p. 17 - 28

	Tramway des années 1950	Tramway moderne
Mode d'implantation	Partage de la voirie avec les autres, Nuisance pour le véhicule routier	Site propre (intégral), Priorité par rapport aux véhicules routiers
Insertion urbaine	Aucune disposition particulière	Outil de réaménagement de l'espace public
Infrastructure au sol	Faible technicité : simple pose des voies sans rails soudés Problème du bruit et de vibration	Haute technicité : dalle flottante, rails soudés, Silence et moins de vibration
Alimentation électrique	Par caténares et LAC (Ligne Aérienne de Contact)	Par caténares et LAC, Alimentation sans fils : APS (Alimentation par le Sol), batterie, supercapacité
Confort et sécurité d'accès	Accès depuis la voirie, Plancher haut	Accès depuis le quai de station, Plancher bas
Condition d'exploitation	Aléas de la circulation, Sans régularité	Indépendant de la circulation, Régularité
Matériel roulant	Véhicules rustiques, Capacité limitée, Aucun design pour le confort	Rames de 30 à 45 m, Capacité quasi-illimitée, Norme pour le confort, Silence de roulement, Absence de mouvements latéraux
Coûts	Quelques millions d'euros au km	15 à 30 millions d'euro au km

Tableau 1 : Analyse comparative entre le tramway des années 1950 et le tramway « moderne »

Source : Bergeron³⁷ 2003 [ATM]

Nous tenons à apporter une certaine nuance concernant le contenu de cette analyse comparative. Tout d'abord, la notion de site propre intégral pour le tramway moderne reste discutable. En effet, bon nombre de lignes disposent d'un niveau de réservation différent tout au long de leur itinéraire. Le niveau de réservation n'est pas systématiquement « site propre intégral ». De plus, concernant l'aspect silencieux du tramway moderne, il arrive régulièrement que des citoyens vivant à proximité d'infrastructures tramway se plaignent du bruit notamment lors de passages de véhicules dans les courbes. Pour atténuer ce type de nuisances sonores, des techniques d'arrosage ou de graissage sont disponibles. Enfin, parler de capacité quasi illimitée semble exagéré. En effet, de nombreuses lignes de tramway contemporaines souffrent de sous-capacité en raison d'un dimensionnement initial inadapté à leur fréquentation.

4.1.2 Les premières réalisations

Nous décrivons succinctement les trois premières réalisations d'implantation du tramway moderne sur le territoire français.

Nantes

Nantes, qui aura été la première ville de France à réintroduire le tramway moderne, n'était pas dans un premier temps, destinataire de de la lettre du Secrétaire d'Etat aux transports. En effet, les huit villes destinataires étaient les villes les plus importantes de France sans projet de métro. La ville de Nantes avait élaboré un projet de « métro Nantais » (Bigey, M. 2018). Nantes demandera à être ajoutée à cette liste ce qui fut accepté.

La première réalisation voit le jour à Nantes en 1985. Dans le cadre du projet, un schéma de financement est élaboré avec une subvention de l'Etat à hauteur de 30 %. Les travaux débutent à la fin de l'année 1981 pour se terminer en 1985.

³⁷ Bergeron, R. *Le nouveau Tramway : Contribution à la réflexion en cours, concernant un possible retour du tramway dans les rues de Montréal*, Agence métropolitaine de transport (AMT) 2003, 64 p

La première ligne est construite entre Bellevue et Haluchère, reprend le tracé d'une ligne d'autobus à fort trafic et correspond partiellement à une ancienne ligne de tramway. Cette nouvelle ligne est bien évidemment construite avec sa propre voie de circulation.

Le matériel roulant correspond au résultat du concours international pour la fabrication d'un « Tramway Français Standard » (TFS). C'est la société Alstom qui livre les tramways TFS. La première série dispose des caractéristiques suivantes :

- Longueur 28,50 m
- Composé de deux caisses, trois bogies et deux moteurs
- Puissance d'un moteur : 276 kW sous 750 V
- Capacité : 150 voyageurs

A partir de 1992, les voitures du parc sont allongées grâce à l'ajout d'une caisse centrale supplémentaire partiellement surbaissée.

Grenoble

Tout comme les autres villes françaises, Grenoble connaît des difficultés de circulation du fait de l'usage massif de l'automobile. En 1974, une étude de mise en place d'un système de transport en site propre conduit à l'élaboration d'un tramway moderne. Après de nombreuses controverses et suite à un référendum, les premiers travaux débutent en 1983. La première ligne relie Fontaine La Poya, à l'Ouest, à Echirolles au Sud, en traversant le centre de Grenoble. Cette ligne est mise en service en 1987.

Le matériel est différent de celui de Nantes. Le modèle TFS d'Alstom est surbaissé sur 75 % de la longueur afin de garantir une meilleure accessibilité. La première série dispose des caractéristiques suivantes :

- Longueur 29,40 m
- Capacité : 198 voyageurs

Strasbourg

A Strasbourg, le réseau de surface reposant uniquement sur des autobus montre également ses limites. La ville de Strasbourg étudie l'implantation d'un système de transport en site propre fondé sur les exemples des villes voisines de Bâle, Fribourg et Karlsruhe. Après l'étude d'un projet de métro, la solution reposant sur le tramway est retenue en 1975. La traversée du centre-ville est prévue en souterrain.

La solution « tramway » est remise en question lors d'un changement de municipalité puis à nouveau validée en 1992. Les travaux débutent la même année. La première ligne est mise en service en 1994 avec une partie souterraine moins longue limitée au passage sous la gare. Cette première ligne relie Hautepierre et Baggersee.

Le matériel roulant utilisé pour cette première ligne strasbourgeoise est totalement différent des deux premières lignes de Nantes et de Grenoble. Les tramways, fournis par ABB³⁸ et baptisés Eurotram, sont totalement surbaissés sur une longueur de 33,10 m [les plus longues au monde à l'époque de leur construction] avec une capacité de 275 personnes.

³⁸ ABB qui deviendra ADTRANZ puis Bombardier en 2001.

Les trois premières villes ayant participé à la réintroduction du tramway en France ont bien entendu fait évoluer leurs réseaux respectifs qui sont aujourd'hui composés de plusieurs lignes. Nantes exploite 3 lignes, Grenoble 5 tout comme Strasbourg³⁹. Notons également que ces réseaux mettent en œuvre des matériels roulants de différents types. Par exemple, Nantes utilise des véhicules TFS, Bombardier et CAF. Nantes a lancé en 2019 un nouvel appel d'offres afin d'entreprendre le renouvellement de son parc.

Par la suite, de nombreuses autres villes françaises font le choix du tramway. Tel est le cas des villes de⁴⁰ : Angers, Aubagne, Avignon, Besançon, Bordeaux, Brest, Clermont Ferrand, Dijon, Le Havre, Le Mans, Lille, Lyon, Marseille, Montpellier, Mulhouse, Nice, Orléans, Paris et sa région, Reims, Rouen, St Etienne, Toulouse et Tours. Il existe de nombreux projets d'extensions pour les réseaux existants.

4.1.3 Le guidage permanent et la réservation d'emprise

En comparaison avec le BHNS, le tramway sur fer ou pneu tel que le définit le CERTU implique un guidage permanent. Ce guidage permanent nécessite un niveau de réservation plus élevé.

La mise en œuvre du tramway moderne nécessite une infrastructure particulière qui est succinctement décrite ci-dessous. Nous décrivons les particularités des voies aussi bien du tramway sur fer que sur pneu.

Pour le matériel roulant sur fer, il existe deux grands types de voie : la voie sur ballast et la voie sur béton. La pose de la voie sur ballast est plus simple que celle sur béton et par conséquent moins coûteuse. En revanche, la pose de voie sur béton subit moins de déformation et nécessite moins d'entretien.⁴¹

La voie du tramway sur pneu la plus aboutie est celle utilisée par le système Translohr. Celle-ci est une voie routière équipée d'un rail central posé au milieu de la chaussée afin d'assurer le guidage du véhicule. Il existe également une voie préfabriquée. Celle-ci est en béton armé et se présente sous forme de bloc.

Sur le territoire Français, les premières lignes de tramway moderne sont exploitées au moyen de véhicules Alstom type TFS. Comme nous l'avons déjà évoqué, le matériel roulant TFS avait déjà évolué entre les projets de Nantes et de Grenoble. Le choix de Strasbourg permet l'entrée dans le paysage d'un autre constructeur : ABB⁴².

Aujourd'hui, le constructeur Alstom est leader sur le marché français avec notamment le modèle Citadis⁴³. Bombardier est également présent avec les modèles Incentro, Eurotram et Flexity. Il existe bien entendu d'autres constructeurs présents ou non sur le territoire. On peut

³⁹ Strasbourg dispose d'une ligne (D) transfrontalière qui est en partie exploitée sur le territoire allemand.

⁴⁰ Par ordre alphabétique.

⁴¹ Godon et Crespolini : *Métrobus : un métro léger pour l'agglomération rouennaise : de l'idée à la mise ne service*. Editions La vie du rail. Paris, 1995, 190 p.

⁴² La société ABB sera absorbée par Bombardier.

⁴³ Dans le cadre du concours Cavallé, la société MTE (Filiale du groupe Schneider) avait proposé un matériel roulant surbaissé baptisé CITADIS. MTE a été absorbée par Alstom.

citer par exemple Siemens, AnsaldoBreda, Stadler, Pesa ou encore CAF qui est de plus en plus visible en France

En raison du nombre important de constructeurs, nous décrivons le matériel roulant (tramway sur fer et tramway sur pneu) le plus répandu dans les villes françaises.

Le matériel Citadis est largement répandu en France grâce à l'étendue de sa gamme. La gamme Citadis propose des rames de tramway allant de 23,9 mètres à 44,6 mètres de longueur avec des largeurs allant de 2,20 à 2,65 mètres. La capacité offerte s'étend de 142 à 319 passagers.

Contrairement au matériel tramway sur fer, le matériel tramway sur pneu se limite à un seul type : le Translohr. Son constructeur propose des véhicules allant de 25 mètres à 46 mètres pour une capacité allant de 178 à 358 passagers.

**

On constate que dans certains ouvrages, les termes de « semi-métro » ou encore « pré-métro » sont utilisés. Le rapport de l'association Lyon – Métro de novembre 1970 intitulé *Nouveaux métros en Allemagne fédérale*⁴⁴ permet de caractériser ces termes. Un semi ou pré-métro correspond à une ligne de tramway ayant une partie de son parcours enterré. L'exemple du semi-métro de Hanovre est décrit comme la mise en œuvre d'un système de transport ferroviaire urbain avec une partie de son itinéraire en souterrain et une partie en surface. La partie de son itinéraire en souterrain (zone urbaine dense) est exploitée à l'identique d'un métro classique (cantonement) et l'autre partie en surface avec une circulation à vue de type tramway. La partie souterraine est réalisée dans le cadre du projet alors qu'une partie des voies ferroviaires de surface, appartenant au réseau de tramway existant, sont utilisées⁴⁵.

Cette terminologie sous-entend une certaine évolutivité du système tramway vers un système métro. Notre territoire compte quelques exemples de tramway ayant une partie de leur parcours en souterrain sans que cela soit intégré à un projet d'évolution à terme vers un système métro. On peut citer par exemple les lignes A et D de Strasbourg, la ligne de tramway de Rouen dénommée « métro » par l'exploitant et les usagers locaux ainsi que la ligne T2 de Nice.

Dans les années 1970, le territoire allemand dispose de nombreuses villes équipées de réseau de tramways. Par conséquent, des projets de type « Semi-métro » d'Hanovre étaient envisageables notamment via la réutilisation d'une infrastructure ferroviaire tramway en surface. Cette évolution d'un système tramway vers un système métro est, pour la même période, beaucoup plus difficile à mettre en œuvre sur notre territoire du fait de la disparition quasi-totale du tramway.

⁴⁴ Scherrer.P : *Nouveaux métros en Allemagne Fédérale*. Traduit par R. Falligan – Devergne. Association Lyon Métro. 1970

⁴⁵ Rives.M : « Le semi-métro de Hanovre ». *Transports urbains*. 1976, numéro 36, p. 23 - 28

**

L'histoire du transport collectif suit, pour la majorité des villes françaises, un phasage plus ou moins identique. Les enchaînements des techniques utilisées sont plus ou moins synchronisés. L'image ci-dessous permet de mettre en avant cet enchaînement pour les villes du Havre, Angers, Reims et Dijon

Dès 1830, des lignes omnibus sont exploitées dans les villes du Havre et d'Angers. Cette existence précoce de lignes de transports publics de voyageurs repose sur les caractéristiques de l'urbanisation. En revanche, Reims et Dijon n'exploitent ce type de transport qu'à la fin du 19^{ième} siècle. Les villes du Havre et de Reims passent par le tramway hippomobile avant d'utiliser la traction électrique alors que les villes d'Angers et de Dijon passent directement au tramway électrique. A la fin du 20^{ième} siècle, les réseaux sont tous exploités avec des autobus. Le tramway dit « moderne » réapparaît pour l'ensemble des villes au début du 21^{ième} siècle.

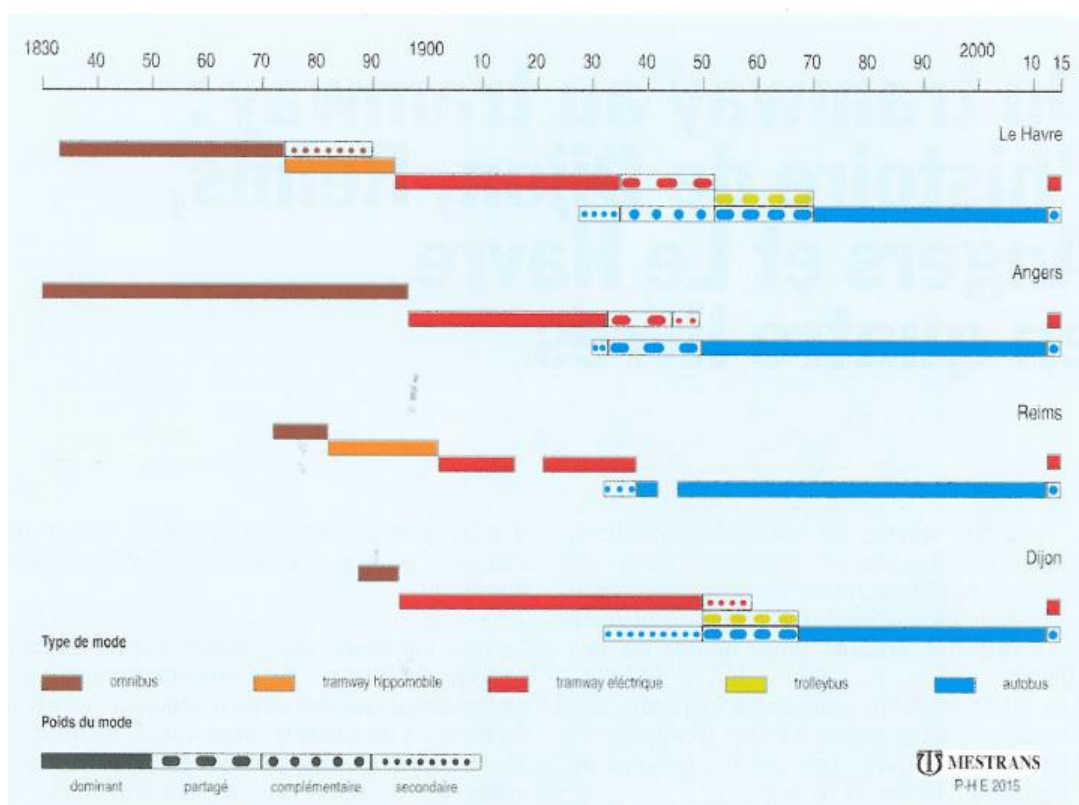


Figure 7 : Enchaînements des techniques de transports utilisées

Source : Pierre-Henri Emangard (2015⁴⁶)

⁴⁶ Emangard, P-H : « Du tramway au tramway : l'histoire de Dijon, Reims, Angers et Le Havre en quatre livres ». *Transports urbains*. 2015, numéro 126, p. 21 – 27

4.2 Le métro

Comme nous avons pu le constater, l'évolution des techniques routières et ferroviaires de surface tend vers la mise en œuvre de la réservation de voirie. La recherche de performance des systèmes de transport collectif de surface oblige à une réorganisation du domaine circulaire.

La situation est bien entendu différente pour le métro qui est par nature un système totalement isolé des autres circulations. Notre approche historique concernant le métro portera un intérêt à l'évolution de l'automatisation de l'exploitation.

Nous décrivons les trois réseaux de métro français les plus anciens à savoir Paris, Lyon et Marseille. Ces plus anciens réseaux de métro ont connu, pour certains, le développement de l'automatisation de l'exploitation. Cette automatisation est, soit mise en œuvre dans le cadre de l'évolution d'une ligne existante, soit directement intégrée à un projet de construction de nouvelles lignes.

Les réseaux plus récents tels que Lille, Toulouse ou encore Rennes et bénéficiant que de lignes/réseaux totalement automatiques seront cités dans la sous-partie consacrée à la description du métro automatique de type VAL.

Le premier métro au monde est mis en service en 1863 à Londres. Cinq années plus tard, en 1868, New-York inaugure son réseau métropolitain (Chicago (1892), Paris (1900), Vienne (1900) et Berlin (1902)) (Scherrer. P , 1970). Le métro londonien est composé de trains à vapeur circulant dans des tranchées partiellement couvertes en milieu urbain. Le métro New-Yorkais est également exploité par des trains à vapeur mais avec une infrastructure en viaduc⁴⁷.

Les trains à vapeur sont utilisés dans les deux premiers métros du monde. La technologie ne permet pas de circuler dans un souterrain totalement fermé (tube). Pour cette raison, Londres avait opté pour une tranchée et New-York pour un viaduc. Le point commun réside dans la recherche d'herméticité des voies de circulation des trains. Cette notion de réservation de voie de circulation pour le matériel roulant des transports collectifs caractérise, déjà à l'époque, la desserte « lourde » (recherche de système capacitaire). Pour les transports dits de surface, cette réservation deviendra indispensable à mesure que le trafic automobile croîtra.

A partir de 1890, l'électrification fait son apparition. Les nouvelles lignes de métros peuvent être exploitées en souterrain fermé. A partir de 1950, de nouveaux métros sont mis en chantier : Stockholm (1950), Toronto (1954), Rome (1955), Leningrad (1955) (Scherrer.P , 1970).

4.2.1 Le réseau de Paris

En France, les premiers projets de métro datent du Second Empire avec pour objectif de relier les gares parisiennes entre-elles à l'instar du métro londonien. Le premier métro apparaît à Paris au début du 20^{ème} siècle. L'exposition universelle de Paris en 1900 est l'élément

⁴⁷ <http://www.amtuir.org>

déclencheur pour concrétiser le projet de construction d'un réseau de transport dit « lourd ». La première ligne relie Porte de Vincennes à Porte Maillot. Les travaux débutent en novembre 1899. Le premier chemin de fer métropolitain de Paris est inauguré le 19 juillet 1900.

En 1928, le réseau de métro parisien s'étend sur 112 km. Le trafic est en constante augmentation et la capacité du métro doit augmenter. Dès les années 1920, l'augmentation de capacité concerne en parallèle la capacité d'emport du matériel roulant (capacité physique) et la diminution des intervalles (capacité dynamique). A partir de 1929, la longueur des nouvelles stations passe de 75 mètres à 105 mètres afin que le système soit compatible avec des trains de 7 voitures.

Nous ne listerons pas de manière exhaustive l'évolution du matériel roulant de la RATP mais porterons un intérêt à l'arrivée de la technique du pneumatique que nous considérons comme une évolution majeure.

Le nouveau matériel roulant recherché par la RATP doit permettre d'augmenter le confort pour les usagers et la performance pour l'exploitant. En 1951, la RATP met au point le prototype MP 51. Ce nouveau matériel, qui repose sur la technologie du roulement sur pneumatiques, est testé pendant 4 années. Le MP 51 permet également d'expérimenter la conduite programmée par un tapis électromagnétique : le pilotage automatique. Le PA (pilotage automatique) introduit la notion d'automatisation de l'exploitation (GoA2⁴⁸).

Le Pilotage Automatique (PA) répond à deux objectifs : le premier concerne l'allègement de la tâche des conducteurs et la seconde repose sur une recherche d'augmentation de la régularité du trafic.

« Le principe était simple : le train pouvait rouler s'il en recevait l'autorisation en permanence, à condition que la signalisation le permette et, les vitesses étant inscrites sur la voie, le train recevait soit l'ordre d'accélérer s'il allait trop doucement par rapport au programme, soit l'ordre de freiner s'il allait trop vite »⁴⁹.

A l'écart du réseau sur une section de 750 mètres entre Porte des Lilas et Pré Saint-Gervais, les premières expérimentations du PA sont réalisées par la RATP (Régie Autonome des Transports Parisiens) et la CSEE (Compagnie de Signaux et d'Entreprises Electriques). Les expérimentations auront duré 4 années.⁵⁰ Il est important de rappeler que le PA ne connaîtra pas d'évolution jusqu'en 1965. La première ligne de métro parisien à être exploitée entièrement à l'aide du pilotage automatique date de 1969. Ce dernier sera mis en œuvre sur la ligne 11 qui sera également la première ligne à être exploitée par du matériel sur pneumatique.

Au fil des années, le réseau de métro parisien s'étend. En parallèle de cette extension, l'exploitation est modernisée notamment via le déploiement du PA qui permet d'homogénéiser les marches et de réduire les intervalles entre métros. Le PA sera ensuite modernisé au sein

⁴⁸ Le niveau de graduation de l'automatisation sera abordé dans la suite du document.

⁴⁹ Tricoire, J. *De Bienvenue à Météor. Un siècle de métro en 14 lignes*. Paris : La Vie du Rail, 1999. 351 p.

⁵⁰ Foot, R. « Automatisation du métro et qualité de service ». *Cahiers du GDR Réseaux*, 1988, 11, p. 36 – 59.

de la RATP à partir des années 2000. Le métro sur pneu se développe également. Aujourd'hui, les lignes 1, 4, 6, 11 et 14 sont exploitées à l'aide de matériel roulant sur pneumatiques.

La ligne 14 (projet METEOR) est totalement automatique dès sa conception (GoA4). Elle est inaugurée le 14 octobre 1998. La ligne 1 est également automatisée (GoA4) en 2013. Cette automatisation de ligne préexistante sans interruption de service (rétrofit) constitue une première mondiale.

Le projet du métro express du grand Paris se substitue à différents projets tels que les projets ORBITAL, Arc Express... Toutes ces nouvelles lignes de métro seront totalement automatisées (GoA4) dès leur conception.

Dans le cadre du développement de l'automatisation de lignes existantes, la ligne 4 est en cours de transformation. Son fonctionnement totalement automatisé devrait être mis en œuvre au cours de l'année 2022. La prochaine ligne à être automatisée devrait être la ligne 13 (décision d'IdFM intervenue en 2019).

4.2.2 Le réseau de Marseille

L'idée d'un métro à Marseille apparaît dès 1913 avec un projet de pénétration des tramways de grande banlieue vers le centre-ville : il est porté par la Compagnie Générale Française de Transports (CGFT) qui exploite alors le réseau de tramways. Une compagnie concurrente, la Société pour l'étude du chemin de fer métropolitain de Marseille, filiale de la Compagnie générale d'électricité (CGE) propose un projet de métro entièrement souterrain en 1918.

Les deux projets sont présentés en 1920 au conseil municipal de la ville qui n'y donne pas suite pour des raisons financières. Cette concurrence se retrouve durant les années 1930 avec une nouvelle proposition de la CGFT visant à prolonger les lignes de tramway en souterrain dans le centre avec une importante station de correspondance dans ce dernier.

La Ville de Marseille souhaitant réaliser un véritable métro, fait étudier un projet de trois lignes en 1937. Ce projet est inscrit au premier plan quinquennal d'équipement national de 1947 (« Plan Monnet ») mais la priorité est alors donnée à la relance d'autres industries.

Il faut attendre 1964 pour que de nouvelles études soient engagées : elles sont confiées en 1968 à la Société du métro de Marseille, filiale de la Caisse des dépôts et de consignations et de la Société centrale pour l'équipement du territoire constituée pour l'occasion, qui réalise un avant-projet adopté le 30 juin 1969 par le Conseil municipal.

A cette époque, la question de l'intégration des tramways dans le réseau souterrain ne se pose plus que pour la ligne 68 (Noailles – Saint-Pierre), les autres lignes de tramways ayant été remplacées soit par des trolleybus soit par des autobus entre les années 1950 et 1960 : 156 km de lignes disparaissent en effet entre 1953 et 1958. Dès le début des années 1960, les solutions pré-métro, comme à Bruxelles ou semi-métros, comme dans certaines villes allemandes, ne peuvent plus être envisagées à Marseille.

Le choix du métro est finalement déclaré d'utilité publique le 14 avril 1972.

Les travaux débutent en 1973 et aboutissent à la réalisation en novembre 1977 du premier tronçon de la ligne 1 de La Rose à la gare Saint-Charles en novembre 1977 puis d'un second tronçon de la gare Saint-Charles à Castellane en mars 1978. Les travaux de la ligne 2 débutent simultanément, notamment pour la réalisation de la station de correspondance de la gare Saint-Charles qui est le nœud du réseau et le point d'échange avec les lignes SNCF. Celle-ci est inaugurée en mars 1984.

Le métro de Marseille est un métro sur pneus, comme celui de Lyon. « *Ce choix a été fortement conseillé par les pouvoirs publics, la RATP et les constructeurs qui y voyaient la confirmation d'une technique spécifiquement française et un renfort pour l'exportation de matériel métro* »⁵¹

Le parc est composé d'un seul type de matériel : le MPM 76 (Métro Pneumatique Marseille 1976) qui est proche du MP 73 de la RATP. Ces matériels roulants sont produits par Alstom. La largeur des caisses est de 2,60 mètres. Ces matériels roulants disposent du PA.

Concernant l'automatisation du métro, la Régie des Transports Marseillais (RTM) compte lancer un appel d'offres en septembre 2019 et faire aboutir ce projet d'ici à 2023.

4.2.3 Le réseau de Lyon

L'organisation des transports collectifs à Lyon se distingue par la mise en place dès 1941 d'un syndicat mixte des Transports en Commun de la Région Lyonnaise (TCRL) réunissant le département du Rhône et la ville de Lyon. Au-delà de la période où elle se met en place, cette organisation est une innovation pour l'époque, car la formule du syndicat mixte, réunissant des collectivités de niveau différent, n'est pas encore codifiée en droit administratif⁵².

Cette date est aussi la date de renouvellement de la concession du réseau, qui confie, jusqu'en 1967, son exploitation, à la Compagnie des Omnibus et Tramways de Lyon (OTL).

Par suite de l'usage intensif du réseau pendant la guerre et des records de fréquentation atteints durant cette époque, les tramways doivent être impérativement renouvelés en 1945. Le syndicat des TCRL et le service des Ponts et Chaussées demandent un rapport à M. Marc Langevin, directeur adjoint de la Compagnie du chemin de fer métropolitain de Paris, qui le remet le 10 juillet 1945. Ce rapport prémonitoire à plus d'un titre, distingue les mesures à prendre immédiatement ainsi que les solutions de proche avenir et de grand avenir.

Deux solutions sont distinguées pour le proche avenir :

- Solution A : *construction d'un métropolitain du type de celui de Paris, uniquement en souterrain et disposant d'un matériel spécial ne pouvant rouler sur les voies publiques,*
- Solution B : *constitution d'un réseau de tramways à grande puissance circulant en souterrain dans un parcours strictement indispensable et sur les voies publiques, autant que possible sur plates-formes indépendantes dans le reste de leur parcours.* (Waldmann R. 1991)

⁵¹ Michel Y. « Le métro de Marseille ». *Transports Urbains* 1980, n°45, pages 23-32

⁵² Waldmann R. : *La grande traboule*, Lyon : Editions lyonnaises d'art et d'histoire, 1991, 243 p.

En raison du développement rapide de l'agglomération lyonnaise au cours des années 1950 et de la saturation des voies urbaines qui en résulte, le projet de métro rejaillit en 1963, porté tout d'abord par l'association Lyon Métro, créée par la Jeune chambre économique et l'Union des comités d'intérêt local, et très rapidement ensuite par la municipalité.

Selon le schéma qui est également retenu à Marseille, une société d'économie mixte est créée entre les collectivités locales, la Caisse des dépôts et consignations, la Société centrale pour l'équipement du territoire, pour réaliser les études : Cette société prend le nom de Société d'études du métropolitain de l'agglomération lyonnaise (SEMALY). Les décisions continuent de relever du Syndicat des TCRL.

La RATP use de son influence pour faire retenir un métro sur pneus tandis que les élus locaux se mobilisent durablement pour un métro de gabarit assez large (2,90m) afin d'offrir aux voyageurs une solution de transport confortable.

Les lignes A et B, inaugurées le 28 avril 1978, sont exploitées par du matériel roulant MPL 75 (Métro Pneu Lyon 1975). Ces matériels roulants sont produits par Alstom et disposent du PA.

La ligne C, réalisée simultanément, présente la particularité d'être un métro à crémaillère. Le matériel roulant est également de 2,90 mètres. Il est produit par un groupement composé d'Alstom et une société Suisse SLM (La Société suisse de construction de locomotives et de machines connaît la technique de la crémaillère). La ligne C est exploitée par du matériel roulant MCL 80 (Métro Crémaillère Lyon année 1980).

Le 13 décembre 1985, le SYTRAL (Syndicat Mixte des Transports pour le Rhône et l'Agglomération Lyonnaise) prend la décision d'automatiser intégralement la conduite ainsi que la surveillance la ligne de métro D (Foot, R. 1988). Cette décision permet au réseau lyonnais d'être le premier à mettre en œuvre une ligne de métro « grand gabarit » totalement automatisé (GoA4). Cette automatisation correspond également à une première automatisation d'un système existant car le projet de construction de la ligne D a débuté depuis 1983. Le projet porte le nom de MAGGALY (Métro Automatique à Grand Gabarit de l'Agglomération Lyonnaise).

La ligne D est exploitée par du matériel roulant MPL 85 (Métro Pneu Lyon 1985). Ces matériels roulants sont produits par un groupement Alstom et Matra (MATRA maîtrisant la technique liée à l'automatisation). La largeur des caisses est de 2,90 mètres. Ces matériels roulants disposent d'une automatisation de type GoA4. Notons également que la configuration intérieure des rames a été revue à plusieurs reprises pour passer d'une capacité maximale de 264 passagers à la livraison à 325 en 2009.

4.3 Le métro VAL (Villeneuve d'Ascq – Lille puis Véhicule Automatique Léger)

Nous faisons le choix de traiter du sujet du VAL de manière séparée des autres métros. En effet, nous considérons le VAL comme singulier car ce système est le premier métro totalement automatique au monde dès sa conception, ayant une véritable implantation en milieu urbain avec des caractéristiques de ligne urbaine. De plus, le système VAL fait partie intégrante de nos différents terrains d'étude.

Les prémisses de l'automatisation des nouveaux systèmes automatiques guidés urbains apparaissent avec le système PRT (Personal Rapid Transit) aux Etats-Unis dans les années 1970 (Soulas, C. 1989). L'objectif est bien entendu de concurrencer l'automobile. Pour ce faire, le système doit réunir les trois caractéristiques suivantes :

- La programmation par le passager de la destination
- Un service direct sans arrêts intermédiaires
- Une taille personnalisée des véhicules de 1 à 6 places assises.

Au cours des années 1970 et 1980, d'autres systèmes tentent de se rapprocher de ce concept. On peut citer, le KNT et le NTS au Japon, le Cabintaxi en Allemagne et le projet Aramis de Matra en France. Les systèmes guidés japonais mis en service en 1981 sur les villes de Kobe (KNT) et Osaka (TTS) permettent de franchir une étape en comparaison avec les systèmes américains notamment au niveau de l'implantation, qui se rapproche davantage de véritables dessertes urbaines.

Les Etats-Unis continuent à développer de nouveaux systèmes automatiques avec des phases de tests dans des environnements type parc d'exposition ou encore aéroport. Nous pouvons citer ici le système Airtrans de l'aéroport de Dallas et le système Boeing de l'université de Morgantown. Un autre concept voit le jour quelques années plus tard : le DPM (Downtown People Mover). Celui-ci est déployé dans trois villes américaines : Miami, Détroit et Jacksonville.

Le système ICTS (Intermediate Capacity Transit System), mis en service en 1985 à Vancouver, se distingue par un roulement sur fer à l'inverse de tous les autres concepts et réalisations dont le roulement est sur pneu.

Cette période d'innovation technique se caractérise par de multiples concepts mais peu de réalisations concrètes.

En France, seul le métro VAL (Villeneuve d'Ascq – Lille puis Véhicule Automatique Léger) connaîtra un succès commercial durable. Le VAL est le premier système métro totalement automatique implanté sur une ligne spécifiquement urbaine (Soulas., C. 1989).

L'automatisme du VAL est conçu par le professeur Gabillard de l'université Lille 1 et sous la maîtrise d'œuvre de Matra qui sera ensuite racheté par Siemens⁵³. En 1983, Le VAL traverse le centre-ville et relie les extrémités de l'agglomération lilloise en desservant un complexe universitaire et un centre hospitalier. Le VAL possède différentes déclinaisons possibles :

⁵³ Démoulin, B. & Salmer, G. « Le parcours scientifique du professeur Robert Gabillard : de la résonance magnétique nucléaire au métro VAL ». *Les nouvelles d'Archimède*. 2010, Numéro 53, p. 49 – 52.

- Métro automatisé,
- Desserte de centre-ville,
- Desserte d'un aéroport,
- Liaison entre un axe ferroviaire lourd et un aéroport.

Les réalisations françaises sont les suivantes :

- Lille en 1983,
- Liaison Antony – aéroport d'Orly en 1992,
- Toulouse en 1993,
- Rennes en 2002,
- Desserte interne de l'aéroport de Roissy Charles de Gaulle en 2007.

Les réalisations étrangères sont les suivantes :

- Jacksonville (USA) en 1989,
- Taipei (Taiwan) en 1993,
- Chicago aéroport O'Hare (USA) en 1993,
- Turin (Italie) en 2006,
- Uijeongbu (Corée) en 2012.

4.3.1 Les caractéristiques techniques

Aujourd'hui, le VAL est le système de transport automatique et guidé ayant le plus de succès au monde. Avant cela, il était indispensable que cette technologie fasse ses preuves à partir de la réalisation de Lille. Dans sa version de base, le gabarit du véhicule est de 2,06 mètres [existe également en 2,08]. Ce gabarit permet de limiter l'emprise du système et donc d'alléger le coût du génie civil notamment pour le tunnel. En revanche, il existe également un VAL avec un gabarit plus important de 2,56 mètres. Ce gabarit est utilisé à l'étranger dans la ville de Taipei à Taiwan et aux Etats-Unis.

Le principe technique essentiel du VAL est l'automatisme intégral. Par conséquent, aucun personnel de conduite ou accompagnateur n'est présent dans le véhicule. Ce niveau d'automatisation permet d'atteindre des fréquences très élevées, de l'ordre de 70 secondes.

Le VAL reprend des technologies connues telles que :

- Moteur à courant continu classique,
- Pilotage automatique proche de celui utilisé sur le réseau parisien.

Les caractéristiques qui distinguent le système VAL, sont les suivantes :

- Le roulement sur pneumatique à l'aide d'essieux à deux roues porteuses et roulettes d'aiguillage centrales [au lieu de bogies à quatre roues porteuses dérivées des bogies fer pour les métros sur pneus classiques],
- L'originalité dans le système anti-collision,
- La réalisation de nouvelles fonctions comme l'accostage et le poussage à faible vitesse d'une rame en panne,
- L'existence de portes palières fermant le quai, portes dont l'ouverture et la fermeture sont synchronisées avec celles des portes du véhicule. Il s'agit là d'une première en France mais cela existait déjà aux Etats-Unis.

4.3.2 Description du roulement / guidage et voie

La solution de roulement du VAL repose sur un système pneumatique. Le guidage de chaque voiture est constitué de deux essieux orientables. Chaque essieu est guidé par quatre roues horizontales également pneumatiques prenant appui sur deux rails de guidage. Dans le cas d'un passage d'aiguillage, il n'y a plus de rails de guidage. L'essieu est alors guidé par un galet d'aiguillage qui suit une ornière.



Figure 8 : Vue d'un essieu de voiture VAL 208

1 : Roue, 2 : Frotteurs, 3 : Roues de guidage, 4 : Barre chasse-corps, 5 : Attelage automatique, 6 : Galets de guidage
Source : <http://www.translille.com> ⁵⁴



Figure 9 : Description des voies VAL

Source : Document interne Kéolis Conseil et Projets 2015⁵⁵

L'image ci-dessus permet de visualiser la voie et ses différents composants qui sont la barre de guidage, l'isolateur, la piste de roulement ainsi que l'ornière de guidage. Cette image ne permet pas de visualiser le tapis de transmission.

⁵⁴ Trans'Lille. <http://www.translille.com/>. (Consulté en août 2018)

⁵⁵ Keolis Conseil et Projets. *Fonctionnement général du VAL*. 2015. 66 p.

4.3.3 Description du matériel roulant

Dans le domaine du transport collectif, une rame est composée de voitures. Le métro VAL propose trois largeurs de voitures : 206, 208 et 256 cm (le nom de la voiture correspond à la largeur en centimètres). Le VAL 256 compose des rames exploitées à l'étranger notamment aux Etats-Unis et à Taiwan.

Les rames du VAL exploitées en France sont généralement composées de deux voitures de type 206 ou 208. Le type 208, plus récent, est une optimisation du gabarit VAL originel qui ne nécessite pas de modifications d'infrastructure.

La voiture 206 possède les dimensions suivantes : longueur : 26,14 m, largeur : 2,06 m et hauteur : 3,25 m. Sa masse est de 31 tonnes à vide et de 42 tonnes en charge nominale. La capacité d'emport nominale (4p./m²) est de 154 passagers. Le constructeur annonce une capacité maximum de 208 passagers.

La voiture 208 possède les dimensions suivantes : longueur : 26,14 m, largeur : 2,08 m et hauteur : 3,27 m. Sa masse est de 28 tonnes à vide et de 39 tonnes en charge nominale. La capacité d'emport nominale (4p./m²) est de 156 passagers. Le constructeur annonce une capacité maximum de 210 passagers.

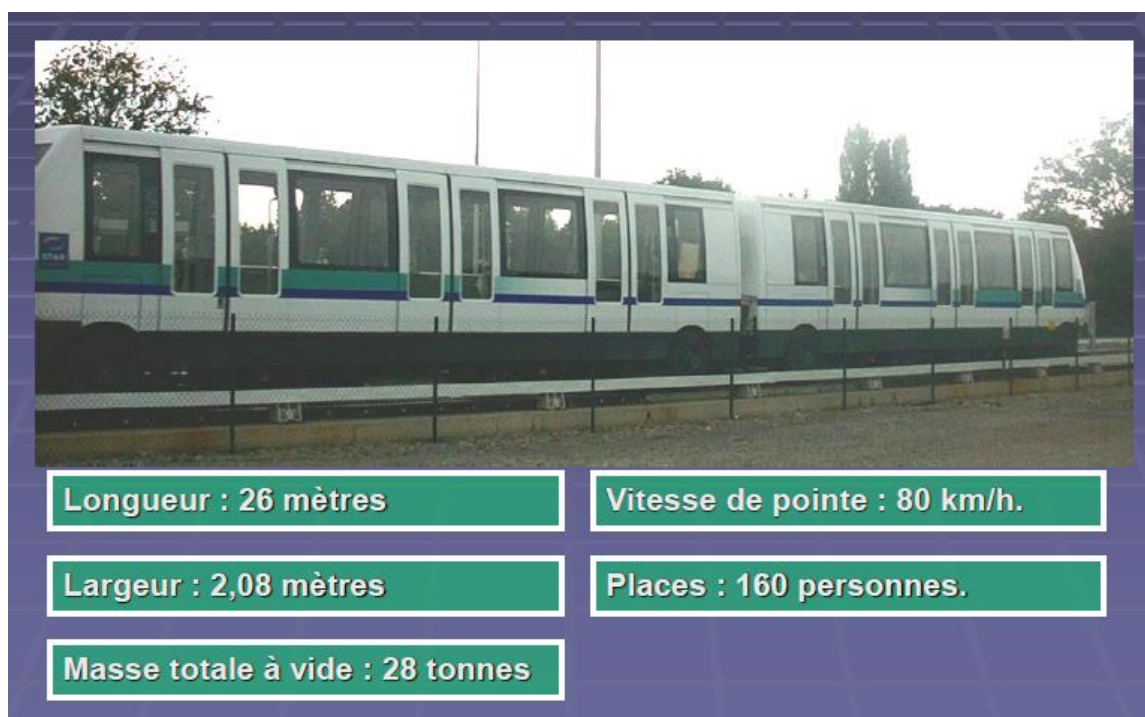


Figure 10 : Caractéristiques principales du véhicule de type 208

Source : Source : Document interne Keolis Conseil et Projets 2015

L'image ci-dessous (figure 11) permet de visualiser l'emplacement des différents organes des véhicules.

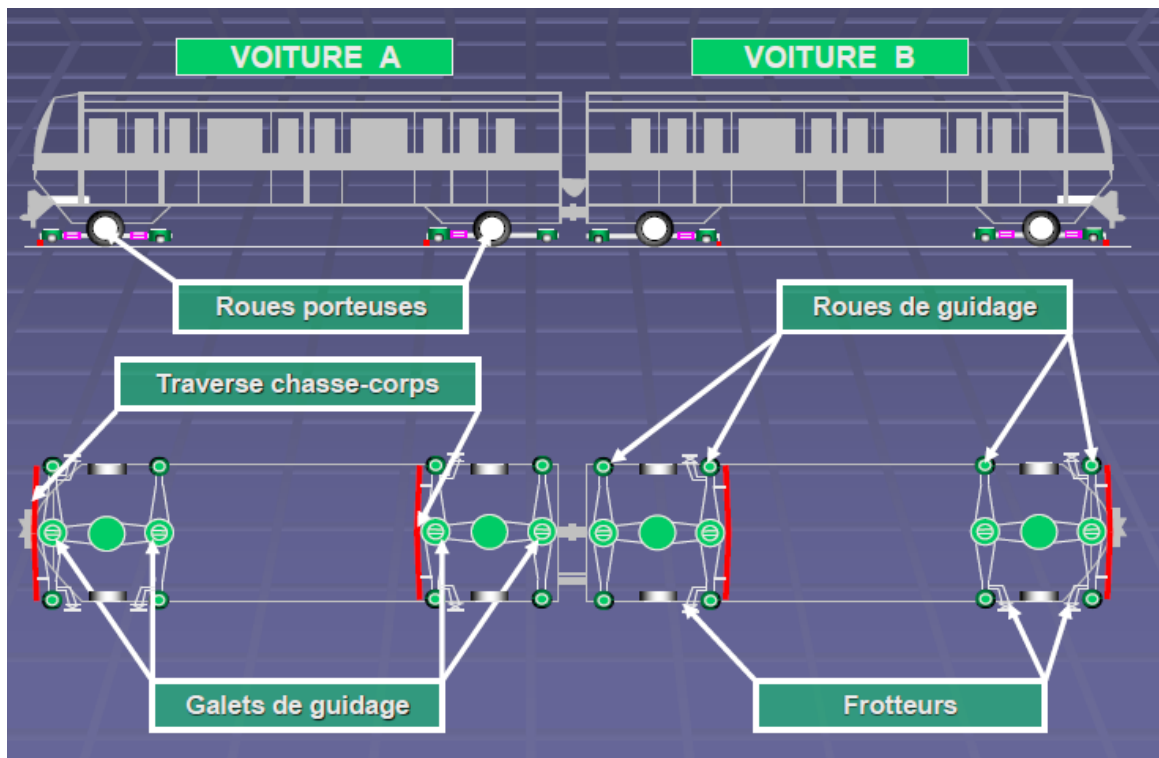


Figure 11 : Description des organes de roulement des véhicules de type 208

Source : Source : Document interne Kéolis Conseil et Projets 2015

4.3.4 Description de l'automatisme

L'automatisation du VAL intègre les fonctions de conduite, de surveillance, d'anticollision et de sécurité.

Pour ce faire, le métro VAL intègre un pilote automatique qui gère la circulation des rames. Le pilotage automatique oblige à une communication constante entre infrastructure et véhicule. Le métro VAL intègre également des automatismes au niveau des stations. Ces automatismes vérifient la présence et le bon fonctionnement des rames en station et autorisent l'ouverture et la fermeture des portes. Enfin, l'automatisme du VAL intègre un PCC (Poste de Commande Centralisé) qui permet aux régulateurs de surveiller l'ensemble du dispositif.

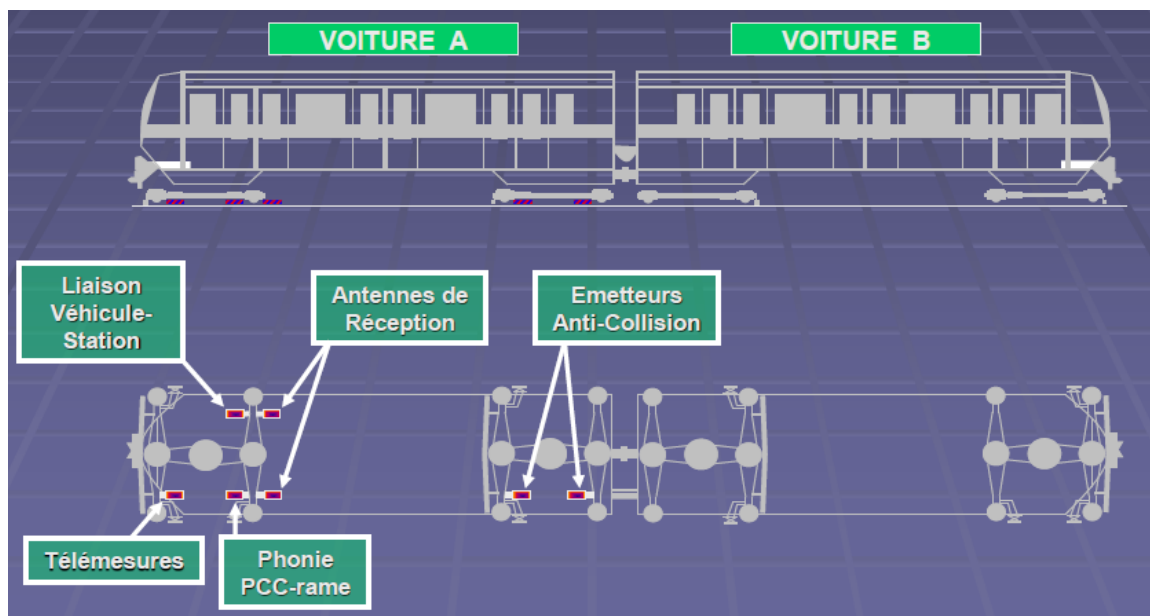


Figure 12 : Description de l'automatisme VAL

Source : Source : Document interne Kéolis Conseil et Projets 2015

La société Siemens propose aujourd'hui, dans le cadre d'un partenariat industriel avec notamment la société Lohr Industrie, une offre améliorée du VAL : le NEOVAL⁵⁶. Ce dernier se caractérise par des véhicules plus larges (jusqu'à 2,80 mètres), plus de modularité (caisse châssis), une technologie plus développée (guidage central inspiré de celui du Translohr, automatisme...) et une prise en compte des nouvelles normes internationales.

NEOVAL se décline en CITYVAL pour les intégrations en milieu urbain et en AIRVAL pour les intégrations sur les plates-formes aéroportuaires. La première réalisation sera la ligne B du réseau de Rennes. Cette ligne devrait être exploitée à partir de 2020.

⁵⁶ SIEMENS. *Le projet NeoVal : Une innovation dans les systèmes de transport urbains de voyageurs*. 2006. 17p

4.4 Les niveaux d'automatisation et la perspective de développement

Nous considérons que le métro associé au développement de son niveau d'automatisme doit faire l'objet d'une attention particulière. Tout comme nous l'avons indiqué en introduction, le paysage urbain mondial évolue dans une dynamique forte et le nombre de projets de système de métro automatique s'inscrit dans une logique de croissance exponentielle⁵⁷.

En 2017, 178 villes exploitent un système métro. Les deux tiers des villes ayant un métro se localisent soit en Asie soit en Europe (70 villes en Asie et 46 villes en Europe). Le dernier tiers concerne les villes d'Amérique du nord, l'Amérique Latine, l'Eurasie et le Moyen Orient/Afrique du nord. Presque un quart de ces villes exploitent un métro automatique type UTO GoA⁵⁸.

4.4.1 Les niveaux d'automatisation (Grades of Automation : GoA)

L'UITP a défini quatre niveaux d'automatisation pour les transports guidés (Grades of Automation, GoA) qui sont les suivants :

- GoA1 : Conduite manuelle avec un système ATP (Automatic Train Protection)
Un ATP complet contrôle le franchissement des signaux et le dépassement de la vitesse. Beaucoup d'ATP ne contrôlent que le franchissement des signaux, d'où de possibles déraillements par survitesse.
Le niveau GoA1 est le niveau le plus répandu pour l'exploitation métro et train de banlieue. Le conducteur effectue les arrêts, autorise l'ouverture des portes, déclenche la fermeture et assure les départs. Au niveau des interstations le système ATP peut déclencher un freinage de manière ponctuelle ou continue soit en cas de danger ou de survitesse.
- GoA2 : Conduite semi-automatique avec un système STO (Semi-automated train Operation, anciennement ATO : Automatic Train Operation)
Le Pilotage Automatique (PA) des métros français est un STO. En 1968, la Victoria Line du réseau londonien est équipée d'un système de fonctionnement automatique du train (ATO). Le conducteur gère l'ouverture et la fermeture des portes. Une fois les portes fermées, le conducteur enclenche deux boutons « démarrage ». Si la voie est libre, l'ATO mène le train à une vitesse maîtrisée à la station suivante et l'arrête. Toutefois, le conducteur peut reprendre la main sur la conduite à tout moment. Ce système a été mis en place à l'ouverture de la ligne en 1968, faisant de la Victoria line la première ligne de métro à pilotage automatique au monde.
D'après nos informations, la mise en exploitation commerciale de la ligne Victoria correspond à la première mise en œuvre d'un métro GoA2.

La qualification de métro automatique débute au niveau du GoA2. Cela correspond au niveau défini par la norme CEI (commission électrotechnique internationale) IEC 62290-1.

- GoA3 : Conduite automatique sans conducteur avec système DTO (DTO : Driverless Train Operation).
Ce type d'exploitation s'effectue sans conducteur mais implique la présence d'un personnel d'accompagnement à l'intérieur du véhicule qui peut reprendre la conduite

⁵⁷ Wawestone. *World's best driverless métro lignes 2017 : Etude du marché du métro automatique et benchmark de la performance des réseaux*. 2017 ; 103 p

⁵⁸ IUTP. *World metro figures : Statistics brief_2018*. 2018. 8p

en main en cas d'urgence (sur un pupitre escamotable) et, pour certaines lignes, gérer la fermeture des portes. Dans tous les cas, c'est le personnel d'accompagnement qui autorise le départ du véhicule.

Pour le réseau DLR de Londres (Docklands Light Railway), le personnel d'accompagnement est itinérant dans les trains pour contrôler les tickets. Le réseau DLR semble être le premier réseau de métro au monde exploité en GoA3.





- GoA4 : Conduite intégralement automatique sans personnel à bord avec système UTO

Ce type d'exploitation n'implique aucune présence de personnel à bord des véhicules même en situation dégradée.

Le premier système métro UTO est le métro VAL de Lille en 1983. La technique du VAL repose sur une signalisation analogique (PA avec cantons fixes). Le premier métro UTO en CBTC est la ligne D de Lyon (MAGGALY). La ligne 14 de la RATP est également un métro UTO en CBTC mais avec une technologie CBTC différente de MAGGALY (CBTC = signalisation numérique/digitale avec cantons fixes, ou cantons mobiles ou les deux).

Il existe différentes technologies permettant de mettre en œuvre des exploitations de type UTO. Néanmoins, la technologie CBTC, commercialisée par différents industriels, reste la plus répandue.

La figure 13 ci-dessous permet de différencier les différents niveaux d'automatisation avec leurs caractéristiques propres.

Grade of Automation	Type of train operation	Setting train in motion	Stopping train	Door closure	Operation in event of Disruption
GoA 1 	ATP with driver	Driver	Driver	Driver	Driver
GoA 2 	ATP and ATO with driver	Automatic	Automatic	Driver	Driver
GoA 3 	Driverless	Automatic	Automatic	Train attendant	Train attendant
GoA 4 	UTO	Automatic	Automatic	Automatic	Automatic

ATP - Automatic Train Protection ATO - Automatic Train Operation

Figure 13 : Niveaux d'automatisation des transports guidés

Source : IUTP 2015⁵⁹

Cette classification concerne les systèmes de transport guidé. Comme nous l'avons évoqué, d'autres systèmes peuvent être guidés de manière permanente ou non. Nous pouvons

⁵⁹ IUTP. *World metro figures : Statistics brief 2014 ; Outlook and focus on automated lines*. 2015. 6 p.

reprendre l'exemple du tramway qu'il soit sur roulement fer ou pneu ou encore l'exemple de certains BHNS tels que le TVR.

Nous pourrions imaginer que ces systèmes, notamment ceux guidés en permanence, intègrent cette matrice avec un niveau GoA0. Pour le type GoA0, le conducteur assure toutes les tâches et détermine la vitesse en fonction des limitations indiquées tout au long du parcours et de son environnement général car la circulation se fait à vue.

Cette intégration d'un niveau GoA0 pour d'autres systèmes guidés hors métro amène une réflexion sur l'éventuelle hausse du niveau d'automatisation des systèmes de surface.

4.4.2 Perspectives de développement des métros automatiques sur dix ans

D'ici 2025, l'UITP projette environ 2 300 km de lignes de métro automatique (GoA4) opérationnels contre 800 Km aujourd'hui.

A ce jour, c'est la France qui a le plus grand nombre de métros automatiques au monde devant la Corée et Singapour avec les villes de Lille, Lyon, Paris, Rennes et Toulouse.

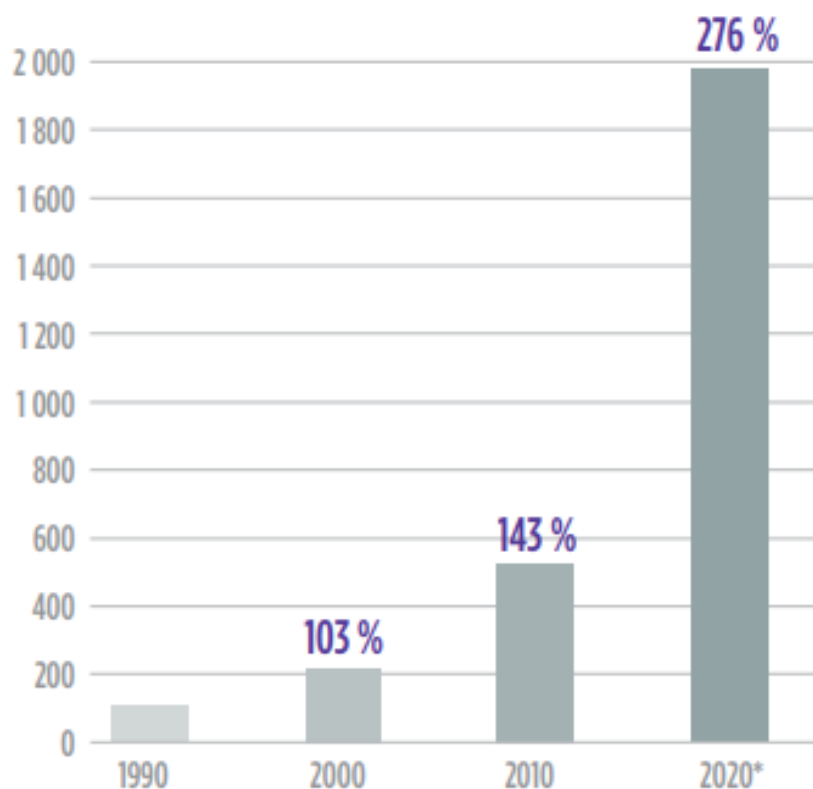


Figure 14 : Nombre de km de lignes de métros automatiques réalisés et projetés

Source : IUTP 2016⁶⁰

En 2025, l'Asie représentera 33 % des Kilomètres de lignes automatiques contre 30 % pour l'Europe. Le Moyen Orient représentera quant à lui 25 % notamment grâce à l'important projet de Riyad.

⁶⁰ IUTP. *Statistics brief : World report on métro automation*. 2016. 6 p.

5. Partage de la voirie : Principes et modalités de mise en œuvre

Cette partie est consacrée à la problématique du partage de l'espace dédié aux circulations dans un contexte urbain. Aujourd'hui encore, cet espace de circulation est limité et majoritairement utilisé par la circulation routière individuelle. Le concept de TCSP (Certu 2007) permet de s'éloigner plus ou moins de cette problématique. Comme nous le verrons dans la suite du document, les réservations d'espace pour les TCSP présentent des caractéristiques différentes. Un métro exploité en souterrain et viaduc ne devrait pas subir d'aléas lié aux autres circulations. La situation peut être identique pour les transports utilisant la technique du câble notamment pour les funiculaires et les téléphériques exploités en milieu urbain.

En revanche, les systèmes exploités en surface, y compris les catégories de TCSP comme les BHNS et tramway, peuvent entrer en conflit avec les autres circulations qui peuvent être piétonne et routière en particulier au niveau des carrefours. Le système de transport collectif le plus concerné par les aléas liés aux autres circulations reste l'autobus circulant sans réservation de voirie.

Le début du 20^{ième} siècle est marqué par le développement de la production de l'automobile. La production en grande série, apparue aux Etats-Unis, se répand en Europe. Les constructeurs européens adoptent la production dite « à la chaîne ». Cette nouvelle méthode de production permet de démocratiser l'automobile. Dans un premier temps réservé aux classes aisées, l'automobile se popularise et concerne une population beaucoup plus large. On observe, un développement très rapide du trafic automobile dans les villes européennes. En France, dès les années après-guerre ; les grands principes des réseaux routiers permettent de desservir les grandes villes sont arrêtés. Ces axes autoroutiers sont accompagnés de rocade permettant le contournement des centres-villes. Mais les réseaux autoroutiers urbains ne peuvent constituer à eux seuls une réponse à l'afflux d'automobiles. Malgré ce dimensionnement du réseau routier, les encombrements réapparaissent (Héran, F. 2018⁶¹). Cette situation entraîne, pour les transports collectifs de surface, une chute de la vitesse commerciale.

Le graphique ci-dessous permet de constater l'évolution du parc automobile français entre 1900 et 2011. L'utilisation de l'automobile sur le territoire débute peu après 1910. Jusqu'en 1950, nous observons une augmentation progressive du nombre de véhicules. A partir de 1950, la courbe représentant l'évolution du nombre d'automobiles prend un tout autre aspect. En effet, l'augmentation est très importante et se caractérise par un passage de moins de 5 millions d'automobiles à plus de 35 millions en 2010. Notons également l'apparition en 1950 d'un fichier central de l'automobile géré par l'INSEE.

⁶¹ Héran, F. « Le retour mouvementé du tramway à Strasbourg (1971 – 1994) : vingt ans de débats ». In- Gardon S., *Quarante années de tramways en France*. Lyon : LIBEL, 2018, 507 p.

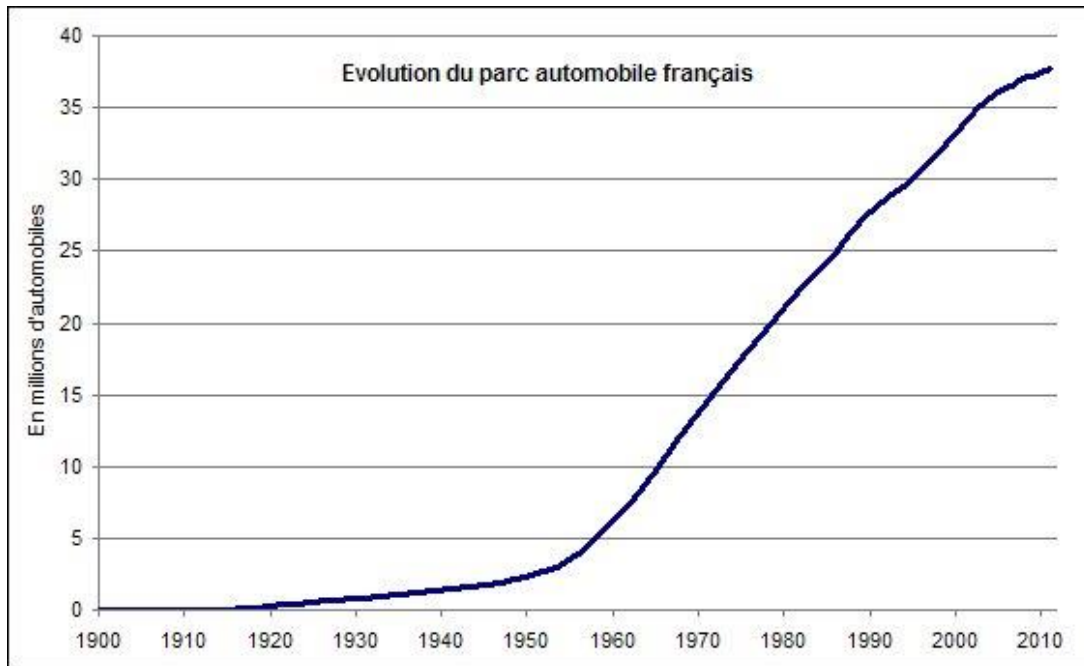


Figure 15 : Evolution du parc automobile français de 1900 à 2011

Source : Comité des constructeurs français d'automobiles⁶²

Comme nous l'avons constaté lors de notre rapide description historique, les systèmes de transport exploités en surface rencontrent les difficultés d'exploitation liées à l'encombrement de la voirie du fait de l'usage massif de l'automobile⁶³. Nous entendons principalement par « difficultés d'exploitation » une diminution de la vitesse commerciale et une augmentation de l'irrégularité.

Au cours de cette période de démocratisation de l'usage de l'automobile, le lien étroit entre l'augmentation de la circulation automobile et la disparition de certains systèmes de transport tels que le tramway ou encore le trolleybus est réel. En effet, ces systèmes de transports publics sont considérés comme une gêne à cette nouvelle circulation « moderne ». Même si l'existence de l'autobus est mieux acceptée du fait de son appartenance à la famille « routière/thermique » celui-ci subit à son tour les conséquences de l'usage massif de l'automobile au travers d'une diminution sensible de sa vitesse commerciale.

Malgré tout, l'usage massif de l'automobile est considéré comme une évolution positive de la société. De ce fait, les éléments contraignant son utilisation, et donc son développement doivent progressivement disparaître. La cohabitation entre les anciens systèmes de transport et l'expansion de l'automobile devient impossible.

⁶²Comité des constructeurs français d'automobiles. <https://ccfa.fr/> (consulté juillet 2017)

⁶³ Silvardière, J. « L'automobile au service des citoyens ». *Transports Urbains*. 1980, numéro 43. p. 5-17 et Macheras, J. « La capitale des autos ». *Transports Urbains*. 1988, numéro 65. p. 3



Figure 16 : Place de l'Etoile à Paris vers 1930

Source : Robert J. 1975⁶⁴

Les premiers signes de démocratisation de l'usage de l'automobile et par conséquent de désaffection des transports publics apparaissent, en France et plus généralement en Europe occidentale, aux alentours de 1960⁶⁵. Ce recul des transports publics est bien connu des spécialistes et repose, à cette époque, sur deux processus :

- Croissance économique,
- Croissance urbaine.

La croissance économique entraîne une augmentation du taux de motorisation et l'étalement urbain favorise l'usage de la voiture.

Il est essentiel de rappeler que dans les années 1970, il n'existe plus que trois lignes de tramways en France et quelques réseaux de trolleybus. Le service de transport public repose en quasi-totalité sur l'exploitation de l'autobus sur site banalisé qui se caractérise par une voie de circulation mutualisée pour différents types de circulation.

Dès 1955, l'Union des Transports Publics urbains et régionaux (UTPUR) affirme la nécessité de séparer le transport public et le transport privé en réservant des voies de circulation⁶⁶. Le partage de la voirie fait son apparition.

⁶⁴ Robert J. « Evolution du tramway ». *Transports Urbains*. Numéro 31.1975, p. 11 - 16

⁶⁵ Bonnafous, A. « Le choix entre voiture et transport collectif ». In Institut des villes. *Villes et économie*. La documentation française. 2004. p.185 - 206

⁶⁶ AMTUIR. Le musée des transports urbains de France. Disponible sur <https://amtuir.org/>. Consulté en 2015

Dans un contexte d'utilisation massive de l'automobile, deux phénomènes sont observables au niveau des systèmes de transports publics en milieu urbain :

- Une diminution de la vitesse commerciale,
- Une diminution de la fréquentation.

Précisons que les deux phénomènes précités peuvent évoluer de manière indépendante. Néanmoins, l'expérience montre également qu'une diminution de la vitesse commerciale engendre une diminution de la fréquentation. Par conséquent, en plus d'être indétérédendants, ces phénomènes peuvent se nourrir mutuellement.

Les pouvoirs publics décident d'investir massivement au niveau de la voirie urbaine afin de faire face à l'augmentation du trafic automobile. Ces investissements montrent rapidement leur inefficacité. Dans ces conditions, les transports publics se voient attribuer une nouvelle mission : la fluidité (Bonnafous, 2004).

Il existe une approche théorique permettant de visualiser la relation dynamique entre les deux aspects suivants :

- La compétition entre modes de transports pour l'usage de la voirie,
- La compétition entre modes de transport concernant le marché des déplacements.

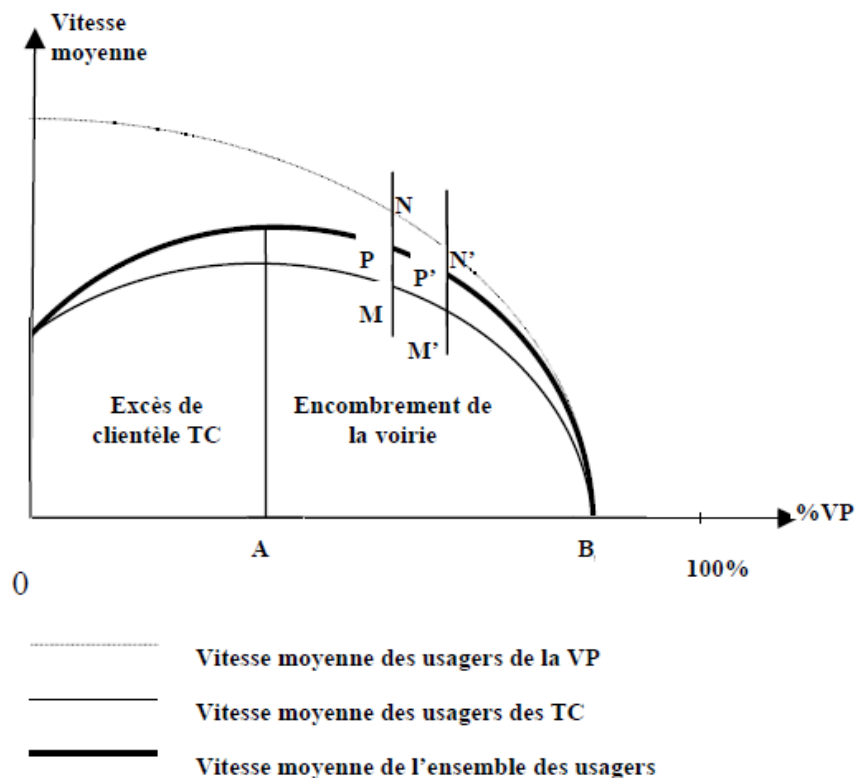


Figure 17 : Variation de la vitesse moyenne des usagers en fonction de la répartition modale

Source : Bonnafous et Piel 1983

Cette approche théorique est simplifiée car elle repose, pour un système urbain, sur l'utilisation de deux modes concurrents seulement : l'automobile et l'autobus utilisant les mêmes voies de circulation. Néanmoins, elle permet de représenter la vitesse moyenne en fonction de la

répartition modale. L'axe des abscisses correspond au pourcentage des déplacements réalisés par l'automobile et l'axe des ordonnées correspond à la vitesse moyenne des usagers. Les deux courbes correspondent aux vitesses des usagers TC et VP. Le point A correspond à une situation optimale pour les transports collectifs et le point B au pourcentage d'usagers de l'automobile à partir duquel l'encombrement est total et la vitesse nulle.

Dans le cadre de notre recherche, les principaux axes de réflexion issus de cette approche théorique sont :

- La vitesse de la voiture particulière est toujours supérieure à la vitesse du transport collectif ;
- Une très faible part d'utilisation de la voiture particulière n'altère pas la vitesse du transport collectif ;
- Une légère augmentation de l'utilisation de la voiture particulière augmente la vitesse du transport collectif (diminution de l'affluence voyageur) ;
- Il existe une situation optimale où les vitesses moyennes maximales sont atteintes ;
- Au-delà de la situation optimale, la voirie passe d'un régime fluide à un régime saturé.

5.1 La typologie de la réservation de voie pour le transport collectif

La littérature abordant le sujet de la réservation et de l'aménagement des voies de circulation est limitée ou peu diffusée. De plus, il existe une grande variété de termes utilisés en fonction des cas. Nous ne cherchons pas à lister de manière exhaustive les différentes techniques liés à la notion de réservation mais exposer les typologies qui méritent encore aujourd'hui d'être clarifiées.

La rédaction de cette partie repose en grande partie sur l'article de Peter Midgley et Michel Bigey, « L'autobus en site propre », dans le numéro 34 de la revue *Transports urbains* paru en 1976⁶⁷. Malgré le fait que cet article s'oriente principalement vers l'autobus, ces grands principes de mise en œuvre restent transposables aux autres systèmes de surface.

Dans les années 1970, moins de 10 villes dans le monde disposent d'un site propre pour autobus. Le premier site propre pour autobus est apparu à Paris, sur le quai de la Mégisserie, en septembre 1964⁶⁸.

Comme nous l'avons constaté au point précédent, l'usage massif de l'automobile engendre des encombrements de circulation. Dès lors que les systèmes de transport collectif de surface utilisent les mêmes infrastructures, les performances de ces derniers chutent. L'utilisation d'une voirie urbaine en régime saturé a une conséquence directe sur leur exploitation. Pour Peter Midgley et Michel Bigey, trois politiques sont alors possibles :

⁶⁷ Midgley, P & Bigey, M. « L'autobus en site propre ». *Transports Urbains*. 1976, numéro 34, p. 35 – 44.

⁶⁸ Zalkind, S. « Préface ». In- Gardon S. (dir.), *Quarante ans de tramways en France*. Lyon : Libel, 2018, 507 p.

- Abandonner à son sort le transport en commun en limitant les conséquences financières qui en résultent, c'est à dire en réduisant le service⁶⁹,
- Agir globalement sur la circulation des voitures particulières pour rendre le trafic à peu près fluide, notamment en limitant les possibilités de stationnement dans le centre de la ville,
- Essayer de soustraire l'autobus aux aléas de circulation en lui attribuant l'utilisation privilégiée d'une partie du domaine de circulation, en lui réservant des voies de circulation.

La troisième politique implique une palette de solutions. En effet, un domaine de circulation dédié peut se caractériser comme suit :

- 1- Réserve exclusive,
- 2- Réserve au transport en commun ainsi qu'aux véhicules d'urgence, police et taxi,
- 3- Réserve identifiée par des séparateurs ou des isolateurs,⁷⁰
- 4- Réserve partielle ou totale de l'itinéraire,
- 5- Réserve permanente ou limitée dans le temps,
- 6- Réserve pour une ou deux directions voire voies réversibles.

Cette palette de solution proposée par les deux auteurs met en avant 3 angles d'approches qui sont :

- L'aspect physique,
- L'aspect spatial,
- L'aspect temporel.

Peter Midgley et Michel Bigey rappellent que dans les années 1970, il existait trois types de réalisation :

- *Les autobus en site propre sur autoroute*
A l'époque, la totalité des autobus en site propre sur autoroute se trouve aux Etats-Unis. L'exemple le plus connu est celui de la Shirley Highway qui relie le centre des affaires de Washington aux zones résidentielles de Virginie. En 1969, le site propre s'étendait sur 6,5 km. Dans sa version définitive, le site propre s'étend sur 18 km. Il est isolé, composé de deux voies et ne comporte pas de stations. Le site propre est situé au centre de l'autoroute constituée de 2 fois 3 voies. Il est unidirectionnel et fonctionne le matin dans une direction et le soir dans la direction inverse. Les autobus allant dans la direction opposée circulent sur la chaussée de l'autoroute elle-même qui n'est pas saturée.
La réserve intervient lorsqu'il y a saturation sans possibilité d'accroître la capacité de l'infrastructure en termes de déplacement de véhicules. Les justifications présentées jouent sur la capacité en termes de déplacement et sur les gains de temps.
(Midgley, P & Bigey, M. 1970)]

⁶⁹ Nous reviendrons au cours du chapitre 2 sur la relation entre la vitesse commerciale et le coût d'exploitation.

⁷⁰ Séparateur : Sépare deux largeurs roulables affectées à des circulations.

Isolateur : Isole une largeur roulable affecté à la circulation d'un espace non affecté à la circulation. Les séparateurs et isolateurs peuvent être franchissables ou infranchissables.

- *Les autobus en site propre dans les villes nouvelles*

Dans cette configuration, la réservation du site propre pour les autobus est planifiée dans la conception de la ville. Deux exemples illustrent à l'époque cette configuration : celui de Runcorn [Grande Bretagne] et Evry [France]. Le site propre est alors planifié dans le cadre d'une limitation de l'usage de la voiture particulière. Le transport collectif obtient donc une position centrale de la mobilité urbaine.

Dans le cas de Runcorn, le site propre est isolé et les traversées piétonnes sont dénivelées.

La ville nouvelle d'Evry est conçue en 1969. Le site propre est directement intégré à la conception et permet de desservir l'ensemble des futurs quartiers d'habitation⁷¹. Les rayons de courbure et la résistance des ouvrages ont été déterminés d'emblée en vue d'une transformation ultérieure en tramway, ce qui confère à ce cas une grande originalité.

- *Les autobus en site propre dans la voirie urbaine ordinaire*

La dernière configuration repose sur l'aménagement des voies urbaines dans un tissu existant. Pour ce cas précis, les auteurs s'intéressent au cas de Liège [Belgique]. A l'époque, la ville compte deux sites propres d'une longueur totale de 4,2 Km. Les caractéristiques de ces deux sites propres sont différentes. L'un est à double sens sur 1,9 km en position axiale dans le centre-ville. L'autre est à la fois à double sens et en sens unique à l'extérieur du centre-ville. Les deux sites propres intègrent les stations, comportent des carrefours au niveau de la voirie, les véhicules ne disposent pas de système de priorité aux feux.

Chez les praticiens, la typologie n'est pas utilisée correctement. Trop souvent, le terme « site propre » englobe généralement bon nombre de cas bien différents. Néanmoins, la documentation technique disponible permettrait la classification suivante :

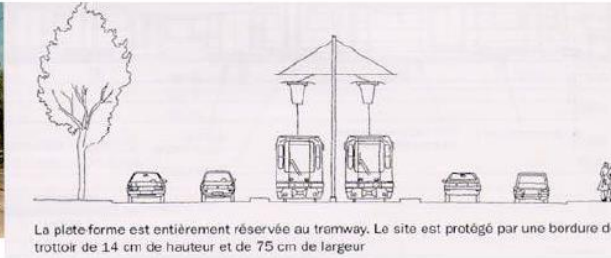
- Site propre : réservation caractérisée par un isolement total (le terme isolement peut prêter à confusion avec ce qui a été précédemment annoncé),
- Site protégé : les véhicules de transport collectif sont seuls sur le site mais ce site est fréquemment coupé par la voirie,
- Site partagé : les véhicules de transport collectif partagent le site avec des modes doux ou privilégiés type taxi,
- Site banalisé : le site est utilisé par tout le monde.

Il existe également des variantes comme on peut le voir ci-dessous. Cette classification est issue d'un document de l'Agence Métropolitaine des Transports⁷² (Bergeron, R. 2003) réalisé dans le cadre d'une mission en France et aux Pays-Bas. Cette mission avait pour objectif de réaliser une étude d'opportunité pour l'intégration du tramway dit « moderne » dans la ville de Montréal.

⁷¹ Belle, D. « Le cas pionnier d'Evry : un site propre pour autobus dans une ville nouvelle ». *Transports Urbains*. 2006, numéro 109 ; p. 10 - 13.

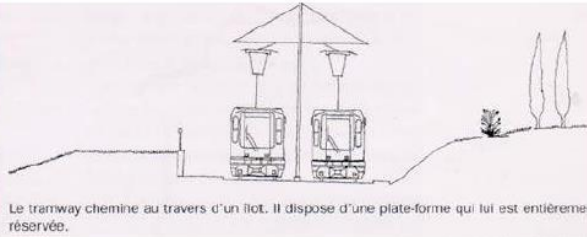
⁷² L'Agence métropolitaine de transport, communément appelée AMT, est une agence gouvernementale, rattachée au ministère des Transports du Québec.
Bergeron, R. *Le nouveau Tramway : Contribution à la réflexion en cours, concernant un possible retour du tramway dans les rues de Montréal*, Agence métropolitaine de transport (AMT) 2003, 64 p

Site propre sur voirie



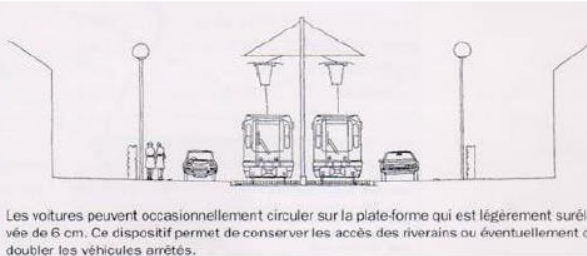
La plateforme est entièrement réservée au tramway. Le site est protégé par une bordure de trottoir de 14 cm de hauteur et de 75 cm de largeur

Site propre hors voirie



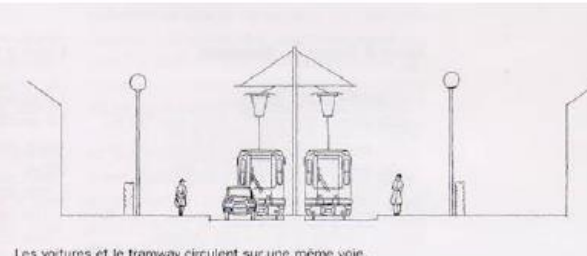
Le tramway chemine au travers d'un flot. Il dispose d'une plateforme qui lui est entièrement réservée.

Site semi banalisé



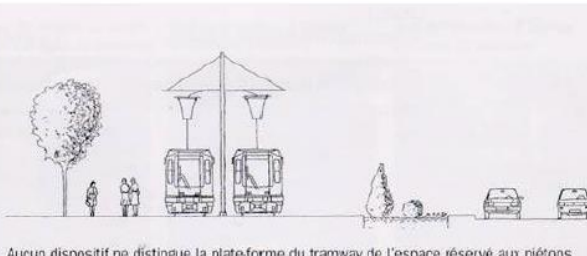
Les voitures peuvent occasionnellement circuler sur la plateforme qui est légèrement surélevée de 6 cm. Ce dispositif permet de conserver les accès des riverains ou éventuellement de doubler les véhicules arrêtés.

Site banalisé



Les voitures et le tramway circulent sur une même voie.

Site sur espace piéton



Aucun dispositif ne distingue la plateforme du tramway de l'espace réservé aux piétons.

Figure 18 : Classification AMT

Source : Bergeron, R. 2003

Cette classification comporte 5 classes. Le terme site propre est décliné avec celui de voirie : Site propre sur voirie ou hors voirie. Les termes « banalisés » et « semi banalisé » font leur apparition. Une classe est dédiée aux zones mixtes associant transport collectif et piétons.

D'autres classifications existent également comme celle du professeur Vukan R, Vuchic. (2007) qui regroupe trois catégories de voies réservées. Nous considérons cette classification plus simple d'utilisation. Celle-ci sera réutilisée dans notre démonstration au chapitre trois.

Catégories de voies réservées	Type de système
<p>Catégorie A : Voie réservée entièrement contrôlée dépourvue d'intersection à niveau et dont l'accès est interdit à tout autre véhicule ou personne. Elle peut également être qualifiée de voie réservée « dénivelée » ou « exclusive », avec une implantation souterraine, aérienne ou à niveau.</p> <p>Dans des cas exceptionnels, une voie réservée équipée d'intersections à niveau avec priorité totale aux feux et barrières de protection peut être considérée comme appartenant à la catégorie A, car de telles intersections n'ont pratiquement aucun effet négatif sur les performances de la ligne.</p>	<p>Systèmes de transport rapides</p>
<p>Catégorie B : Elle comprend les voies réservées séparées physiquement (dans le sens longitudinal) du reste de la circulation à l'aide de bordures, barrières, dénivellations ou autres dispositifs similaires, mais pourvues d'intersections à niveau pour les autres véhicules et les piétons, empruntant notamment des carrefours classiques.</p> <p>Cette catégorie est la plus fréquente pour les systèmes de transport ferré léger (tramway).</p> <p>Les voies ou les routes réservées au covoiturage correspondent au niveau de qualité le plus faible de la catégorie B ; elles offrent une circulation plus fluide que les voies générales mais ne présentent pas de séparation entre les véhicules privés et les véhicules de TC, un critère qui représente l'élément essentiel pour doter les TC d'un statut prioritaire par rapport aux moyens de transport privés, statut qui se justifie par leur nature de service public et par leur efficacité supérieure.</p>	<p>Systèmes de transport semi-rapides</p>
<p>Catégorie C : Elle regroupe les rues accueillant une circulation mixte. Les transport peuvent y bénéficier d'un statut privilégié matérialisé sous la forme de voies réservées séparées par des lignes (principalement en implantation latérale), une signalisation spécifique ou une circulation mixte.</p>	<p>Systèmes de transport sur rue</p>

Figure 19 : Classification de Vukan R Vuchic (2007)

Source : Vukan R Vuchic 2007⁷³

Toutes ces différentes réservations sont applicables soit sur l'ensemble d'une ligne soit sur certaines sections. Ces différentes réservations peuvent être également intégrées de manière alternative sur un itinéraire.

Nous constatons que la typologie varie en nombre de classes et de termes utilisés. Nous considérons que la typologie de Vukan R Vuchic est intéressante car elle présente une certaine simplicité d'utilisation tout en étant « universelle » et apporte une notion de performance grâce à l'intégration d'un type de transport en relation avec la classe.

Nous considérons qu'une typologie officielle, simple et universelle demeure nécessaire.

Vukan R, Vuchic. *Urban Transit systems and technology*. Wiley, New York : 2007, 624 p

5.2 La typologie de l'implantation de la réservation dans le tissu urbain

Après avoir analysé la typologie de la réservation, attardons-nous désormais sur son implantation dans le tissu urbain.

La voirie urbaine est très diverse dans sa nature et son fonctionnement. Celle-ci peut être différente au niveau de l'activité riveraine, de la circulation, de son dimensionnement et de son aménagement. Par conséquent chaque réservation de voie de circulation doit être considérée comme spécifique. Pour Peter Midgley et Michel Bigey, le seul point commun aux voies urbaines intégrant une réservation est l'insuffisance de la largeur d'emprise et les conflits qui en résultent entre les différents usagers. Une réservation de voie de circulation dans un tissu urbain existant se fera forcément au détriment d'une ou plusieurs activités existantes à savoir :

- Le nombre de voies de circulation,
- Les emplacements de stationnement ou de livraison,
- Les plantations d'alignement,
- Les trottoirs,
- Les riverains.

De gauche à droite :
Le tramway, l'espace vert, le piéton,
la circulation automobile et le
stationnement

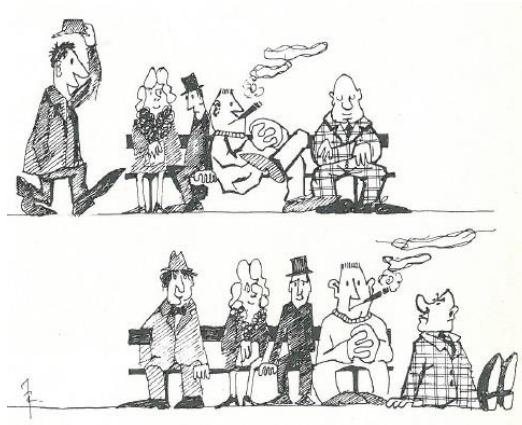


Figure 20 : Inévitablement quelqu'un doit céder sa place...

Source : J. Roulet 1975⁷⁴

L'image ci-dessus (figure 20) schématise de manière humoristique l'arrivée du tramway dans l'espace urbain dédié aux différentes circulations. L'espace des circulations n'est pas extensible. Par conséquent, une fonction doit être limitée voire supprimée.

Cette représentation nous permet de faire un rappel sur la problématique du dimensionnement des voiries urbaines. Pour cela, nous reprenons la démonstration de Yann Le Gal, auteur du rapport du PREDIT intitulé *Voirie urbaine : un patrimoine à réhabiliter ?* et paru en novembre 2002⁷⁵.

Tout d'abord, rappelons que le cadre législatif français constitué de la LOTI de 1982, de la loi sur l'air et l'utilisation rationnelle de l'énergie de 1996 et de la loi Solidarité et Renouvellement

⁷⁴ Bigey, M. « Problèmes posés par le tramway dans les villes françaises ». *Transports Urbains*, 1975, numéro 31, p. 17-28

⁷⁵ Le Gal, Y. *Voirie urbaine : un patrimoine à réhabiliter ? : Enseignements de Nantes*. PREDIT. Paris. 2002. 86 p.

urbain de 2000 souligne l'importance de l'amélioration de l'usage de la voirie urbaine en l'affectant notamment aux différents modes de circulations. Le Plan de Déplacements Urbains (PDU) étant l'un des outils permettant d'appréhender la problématique de la voirie. Un rapport d'étude issu d'un groupe de travail GART, CERTU, DTT, DRCR et ADEME d'octobre 2000, intitulé *Suivi national des plans de déplacements urbains – Le point des plans de déplacements urbains au 30 juin 2000*, a pour objet de faire un point sur les PDU.

Les conclusions du rapport concernant la voirie urbaine sont claires : il existe beaucoup de voirie nouvelle et pas assez de voirie requalifiée.

Pour Yann Le Gal, la problématique principale repose sur la vision du dimensionnement de la voirie. Les modèles actuels ne portent pas assez d'attention aux circulations piétonnes, cyclistes et à celle des véhicules de transport en commun. Ces modèles privilégient la prise en compte de la circulation motorisée privée. De plus, le dimensionnement de la voirie se fait sur le flux de circulation motorisé en heures de pointe et non sur le besoin pour l'ensemble de la journée. Le surdimensionnement des voiries pour la circulation routière attire de nouveaux flux qui seront pris en compte dans les nouveaux dimensionnements et feront apparaître une utilisation encore plus importante etc. Généralement, les prévisions sont telles qu'il est inenvisageable de diminuer le gabarit des voies dédiées aux circulations routières. La ville « routière » continue à se développer. Dans les années 1990, le maire de Nantes Jean Marc Ayrault affirmait que « *concevoir les voiries pour les heures de pointe conduit à une impasse* » (Le Gal, Y. 2002).

Limiter les capacités routières aura certes un impact sur les heures de pointe mais cette période ne représente qu'une petite part de l'ensemble de la journée. Il est essentiel de maîtriser l'usage de l'automobile. Telle sera la vision nantaise lors du développement du réseau de tramway.

En 1990, avec l'arrivée de la ligne 2 de tramway de Nantes, une nouvelle stratégie du plan de circulation apparaît. Cette stratégie repose sur une démarche qualitative intégrant, dans cet ordre, les piétons, les cyclistes, le tramway, les autobus et la circulation automobile. Pour la circulation automobile, l'objectif est de la rendre plus fluide et plus sûre en clarifiant et en modifiant le plan de circulation.

5.2.1 Les différents types d'aménagement

Après avoir rappelé la problématique du dimensionnement et de l'usage de la voirie urbaine, nous décrivons rapidement quelques aménagements majeurs dédiés aux circulations des véhicules de transport collectif de surface. Un tableau de la Direction Régionale de l'Équipement d'Île de France (tableau 2, *infra*) résume les avantages et inconvénients de ces trois principaux types d'aménagement (Direction Régionale de l'Équipement d'Île de France – 2000).

- Aménagement bilatéral

Cet aménagement consiste à positionner la réservation de part et d'autre des voies de circulation générale (figure 21). Cet aménagement est applicable à toutes les voies urbaines larges. Les entrées et sorties de la réservation sont simplifiées et les stations peuvent être insérées le long de la réservation ce qui facilite leur accès par les voyageurs.

Cependant, cet aménagement est source de difficultés. Lorsque les véhicules roulant sur la réservation doivent effectuer des mouvements tournants notamment le « tourne à gauche », des conflits apparaissent. Ces derniers doivent être pris en considération notamment via les cycles de feux. Les sources de perturbation de l'exploitation doivent être identifiées. Les activités des riverains et des livraisons doivent être prises en considération. Cet aménagement est plutôt rare en France. Cependant, nous disposons d'un cas emblématique : celui de l'aménagement de la Canebière à Marseille.



Figure 21 : Exemple d'aménagement bilatéral

Source : SYSTRA. Labbouz, S. 2008

- Aménagement unilatéral

Cet aménagement consiste à positionner les deux sens de réservation du même côté d'une voie de circulation générale (figure 22). Cet aménagement est envisageable pour toutes les catégories de voie urbaine. Les voyageurs ont un accès direct aux deux directions sans être amenés à traverser les voies de circulation générale. Les mouvements tournants posent les mêmes difficultés que pour l'aménagement bilatéral. Les activités des riverains et du transport de marchandises en ville doivent être prises en considération.



Figure 22 : Exemple d'aménagement unilatéral

Source : SYSTRA. Labbouz, S. 2008

- Aménagement axial

Cet aménagement consiste à positionner la réservation au centre des voies de circulation générale (figure 23). Cet aménagement est applicable à toutes les voies urbaines larges. Les

interactions avec les flux tournant à droite ainsi qu'avec les activités des riverains et du transport de marchandises en ville sont diminuées voir éliminées. Les mouvements tournant à gauche doivent être pris en considération notamment via les cycles de feux. Cette réservation semble être la plus favorable aux systèmes de transport collectif.

Exemple d'aménagement axial



Figure 23 : Exemple d'aménagement axial

Source : SYSTRA. Labbouz, S. 2008

Sur une même ligne, l'aménagement de la réservation peut évoluer tout au long du parcours en étant par exemple bilatéral sur un tronçon et unilatéral sur un autre. Bien entendu, ces aménagements de voirie permettent d'améliorer l'efficacité des transports publics. Néanmoins, cette efficacité est accrue par la mise en place de systèmes de priorité des feux, de dénivelés pour piétons, de trémies pour les carrefours, d'aménagements pour les stations etc.

		Unilatéral	Bilatéral	Axial	
Circulation sur le site propre	Section courante		2	3	1
	Carrefours	Tourne à droite	3 ou 1(*)	1	2
		Tourne à gauche	3 ou 1(*)	3	2
Accès piétons aux stations		2	1	2	
Impact sur la circulation des voitures particulières	Section courante		2	1	3
	Carrefours	Tourne à droite	3 ou 1(*)	2	1
		Tourne à gauche	3 ou 1(*)	1	2
Impact sur la desserte des riverains		3 ou 1(*)	2	1	
Circulation piétons	Le long de l'axe		2	2	1
	Traversée		3	2	1
Accès (sortie) au site propre	Dégagement latéral		3 ou 1(*)	1 (à droite) 3 (à gauche)	2
	Réinsertion dans l'axe		exclu	1	2
Simplicité de l'aménagement		3	2	1	
PROBLEMES MAJEURS		<ul style="list-style-type: none"> - réinsertion et dégagement latéral du côté opposé - traversée des voitures particulières et piétons - véhicule à contre sens sur une file - un quai de station en contact avec les voitures particulières - dans une voie à sens unique 	<ul style="list-style-type: none"> - Véhicule en panne (autobus) - tourne à gauche - précarité du niveau de service - desserte des riverains - capacité relativement basse 	<ul style="list-style-type: none"> - deux quais de station au contact des voitures particulières - nécessité de maintenir 2 x 2 voies pour les voitures particulières - tourne à gauche pour les voitures particulières (stockage) - desserte des riverains boucle de retournement 	
CAS TYPES D'APPLICATION		<ul style="list-style-type: none"> - le long d'une voie à grande circulation du côté où il n'est pas nécessaire de maintenir les accès privatifs 	<ul style="list-style-type: none"> - le long d'une voie où on peut supprimer tous les accès privatifs (vitesse élevée) - le long d'une voie où les accès privatifs et où les arrêts et entrées/sorties sont nombreux (vitesse basse) 	<ul style="list-style-type: none"> - dans un axe rapide à condition de limiter les stations et entrées/sorties - s'il faut absolument maintenir les accès latéraux - site propre partiel pour passer un point dur (carrefour) 	

Nota : les types d'aménagements sont classés de 1 à 3 par ordre décroissant d'intérêt vis-à-vis des différents critères envisagés (*) Dépend de la file de circulation sur site propre

Source : Direction Régionale de l'Équipement d'Ile-de-France, 2000.

Tableau 2 : Avantages / inconvénients des trois implantations majeures

Source : Direction Régionale de l'Équipement d'Ile de France - 2000

5.2.2 Une réservation permanente ou temporaire

Nous considérons que les différents types d'aménagements cités ci-dessus se rapportent généralement à une réservation permanente. La largeur de roulage, séparée des autres circulations, est exclusivement dédiée au transport collectif. À l'inverse, une largeur de roulage peut être dédiée au transport collectif et séparée des autres circulations de manière

temporaire. Généralement cette réservation temporaire se met en œuvre sur une voirie dédiée à la circulation générale.

Si l'on considère la voirie sous l'angle d'une capacité globale journalière, celle-ci peut être considérée comme un vaste potentiel mal utilisé dont l'usage doit être repensé. Cette vision conduit à la réflexion de l'usage dynamique de la voirie. Le temps est au service de l'espace.

Cette réflexion amène un questionnement sur le terme de réservation temporaire ou dynamique. Nous constatons que le terme dynamique est utilisé dans la littérature spécialisée. Cependant, nous considérons qu'une implantation de réservation est généralement permanente et qu'en opposition le terme temporaire est plus adapté. Néanmoins, la temporalité d'une réservation exige une dynamique au niveau de la gestion de l'information. Dans la suite du texte, nous utiliserons le terme dynamique afin de respecter la littérature existante.

Les voies de bus dynamiques sont uniquement dédiées aux bus quand et où les transports collectifs en ont besoin. Dans le cas contraire, les voies sont ouvertes pour tous les autres types de circulation.

De manière plus large, c'est la notion de Gestion Dynamique de la Voirie (GDV) qui introduit la création dynamique de couloir bus temporaire. La GDV permet une affectation variable de la chaussée dans le temps. Le CGV doit être en mesure de diffuser des informations dynamiques aux usagers. La GDV a pour but de limiter la congestion des infrastructures routières et/ou d'améliorer les conditions de fonctionnement de certaines modes tels que le transport collectif.

En France, la GDV existe depuis les années 1960. A l'époque, on utilise des panneaux de signalisation pliants sur lesquels l'indication portée est modifiable manuellement. Aujourd'hui, la signalisation a évolué. Il existe des exemples de signalisation lumineuse statique tel un panneau ou encore une signalisation lumineuse dynamique au niveau du sol. Il existe également des séparations physiques telles que des barrières. La signalisation doit être accompagnée de recueil de données pour détecter les véhicules et plus généralement pour mesurer l'état du trafic.

La première réflexion de GDV pour l'autobus date de 1996. Viegas and Lu ont étudié le concept Couloir bus intermittent (IBL : Intermittent bus lanes)⁷⁶. Lorsque le bus est détecté, l'organisation de la chaussée se modifie grâce à des éclairages.

Ce concept a été déployé pour la ville de Lisbonne en 2005.

⁷⁶ Xie. X. *Étude et modélisation des couloirs de bus dynamiques*. Thèse de doctorat. Génie Civil. École Nationale des Travaux Publics de l'État. 2013. 197 p.

Kathrin, A. *Evaluation of Dynamic Bus Lanes in Zurich*. Master Thesis Civil Engineering. ETH Zurich. 2014. 89 p

Viegas, J. and B. Lu. "Widening the scope for bus priority with intermittent bus lanes". *Transportation Planning and Technology*, 2001. 24(2), p 87-110

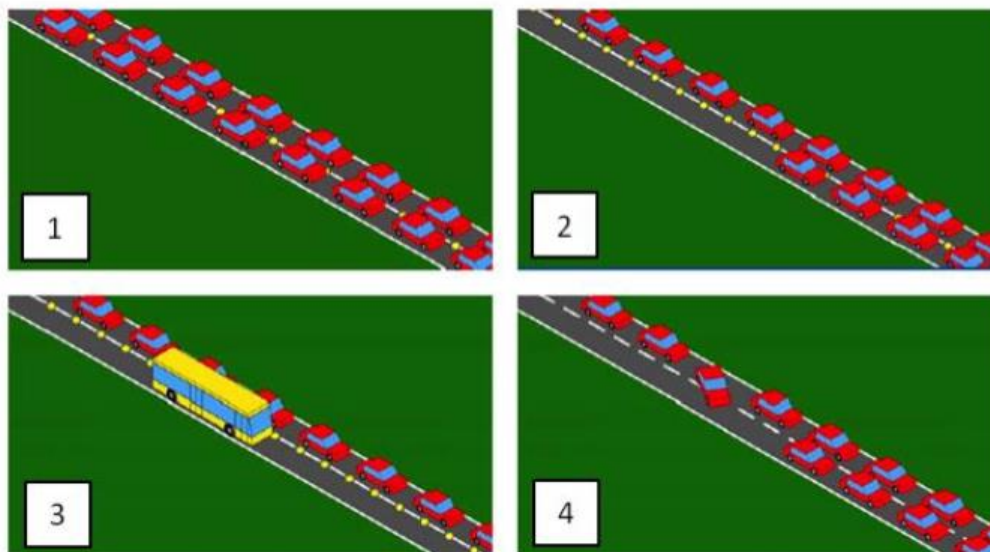


Figure 24 : Processus de fonctionnement de l'IBL

Source : Xie. X. 2013

Nous décrivons brièvement le processus de fonctionnement de l'IBL. Durant la phase 1, les diodes lumineuses s'allument. La phase 2 correspond au retrait de la circulation automobile sur une partie de la voirie. La phase 3 correspond à la circulation du bus sur une voirie dégagée. Enfin la phase 4 correspond au retour de la circulation automobile sur toute la voirie. Le système IBL nécessite de modifier le paramétrage des feux.

Les conclusions montrent que la vitesse des véhicules de transport collectif augmente et que les perturbations relatives à la mise en place de ce concept est quasi neutre pour les autres circulations. Néanmoins, ce type de dispositif semble fonctionner pour les systèmes de transport avec des intervalles élevés entre véhicules.

En 2006, Eichler et Daganzo proposent une variante d'IBL avec le concept du couloir de bus avec priorité intermittente (BLIP : Bus Lane Intermittent Priority)⁷⁷. Par rapport à l'IBL, le BLIP ne nécessite pas de modification des paramétrages des feux. Il existe deux types de BLIP :

- BLIP classique
Le BLIP classique propose une réservation de voirie pendant la durée du cycle de feux. La succession des étapes est présentée avec l'image ci-dessous (figure 25).
- BLIP libérale
Contrairement au BLIP classique, le BLIP libérale permet aux circulations automobiles situées derrière le bus d'utiliser de nouveau d'ensemble de la voirie (figure 26).

Les deux types de BLIP fonctionnent plus ou moins de la même manière. Cependant, le BLIP libéral est plus optimal et plus efficace d'un point de vue du débit total de la voirie.

Bien entendu ces systèmes ne sont efficaces que si l'ensemble des usagers de la voirie respecte la réglementation.

⁷⁷ Eichler et Daganzo, "Bus lanes with intermittent priority : strategy formula and an evaluation". *Transportation Research Part B: Methodological*, 2006, 40(9): p 731–744

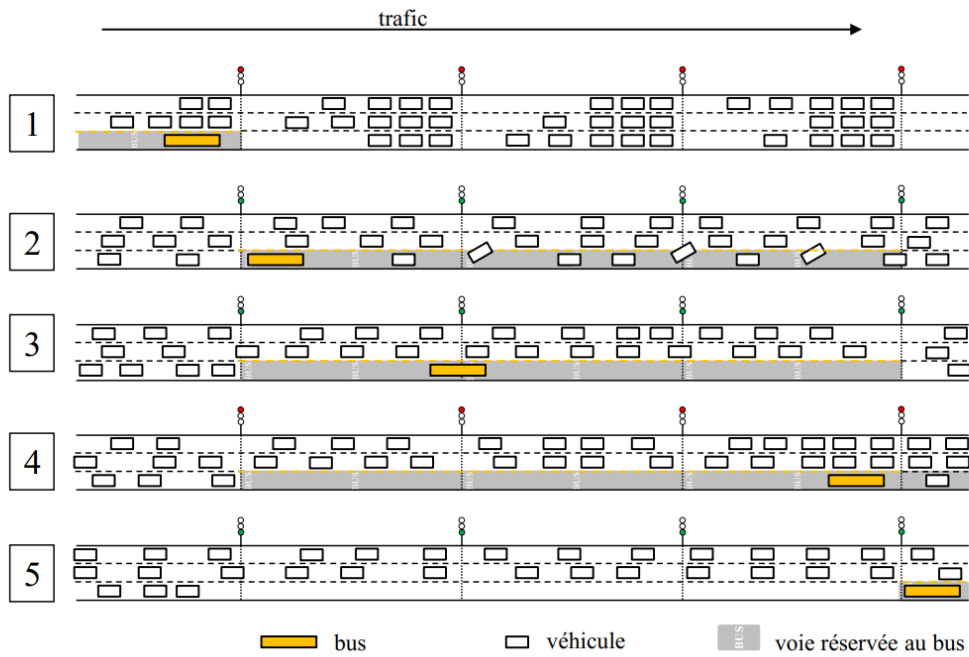


Figure 25 : Processus de fonctionnement du BLIP classique

Source : Xie.X. 2013

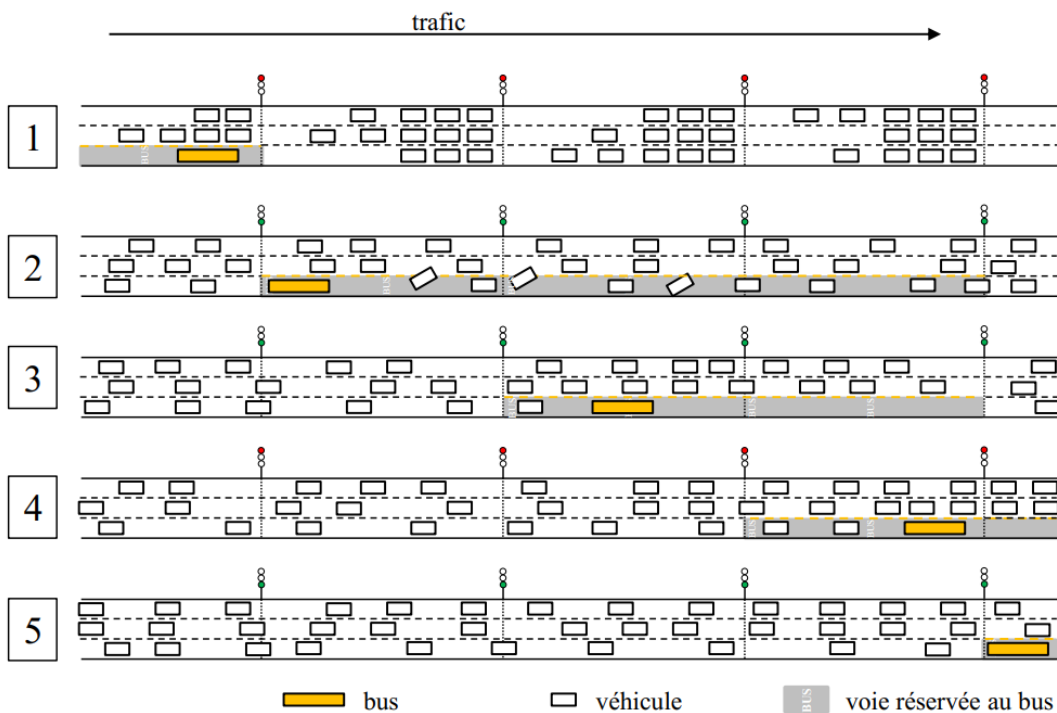


Figure 26 : Processus de fonctionnement du BLIP libéral

Source : Xie.X. 2013

En France, au début 2017, la ville de Lyon a mis en place un couloir bus dynamique. La même année, la ville de Nantes a lancé un couloir bus temporel sur stationnement. Il existe d'autres cas d'utilisation très contextuels à Zurich. Nous considérons que ce type de réservation

nécessite un niveau de discipline élevé de la part de l'ensemble des usagers de la voirie, et que son efficacité est incertaine.

5.3 La réservation : capacité de transport et consommation d'espace

Les centres des agglomérations regroupent différentes fonctions urbaines que sont l'habitat, le commerce, l'enseignement, la santé, la culture, les loisirs, l'administration, etc... La problématique liée à l'espace, pour le développement de ces différentes activités, est donc majeure. Les évolutions techniques dans le domaine de la construction permettent d'obtenir des bâtiments de plus en plus élevés. Par conséquent, la densité d'occupation des sols est augmentée. Cette densification entraîne un accroissement du volume des déplacements qui sont très concentrés dans le temps. Cette concentration dans le temps est généralement appelée « heures de pointe ». Ces déplacements sont donc réalisés sur un espace résiduel (espace total moins les espaces utilisés par les activités autres que les déplacements tel que l'habitat)⁷⁸.

La problématique de l'heure de pointe fait l'objet de réflexions visant à désynchroniser les déplacements domicile-travail afin de réduire les effets de pointe. Cependant, cette désynchronisation reste difficile à mettre en œuvre car elle se heurte aux rythmes sociaux et économiques. Néanmoins, certaines expériences très contextualisées montrent des effets positifs notamment à Rennes avec un décalage du début des cours des universités qui permet de diminuer le taux de charge du métro rennais⁷⁹.

La création d'espace supplémentaire pour la circulation nécessite la création d'infrastructures aériennes ou souterraines. Cependant, cette stratégie connaît deux limites : le coût et les conséquences de la mise en œuvre de telles infrastructures dans le paysage urbain (Marchand. L, 1984).

Nous constaterons que la réservation de la voirie aux transports collectifs permet d'une part d'augmenter la capacité de ceux-ci (en nombre de personnes transportées.) et d'autre part s'avère économe en espace (élimination de consommation d'espace dû au stationnement).

Cette partie permet de rapporter quelques éléments théoriques fondamentaux pour éclairer les notions de capacité de voirie et de consommation d'espace. Nous considérons que ces deux domaines sont trop souvent écartés des réflexions concernant la place des transports collectifs dans le milieu urbain.

5.3.1 La réservation : un facteur d'augmentation de la capacité de la voirie

Publié en 1950 aux Etats-Unis Le *Highway capacity manual*⁸⁰ est le premier ouvrage d'ingénierie abordant la problématique de la capacité des infrastructures routières. Ce manuel sera traduit et largement utilisé à travers le monde notamment en France. Le Service des Etudes et Recherches de la circulation routière (SERC) publiera un ouvrage sous le titre « Capacité des routes » en 1965. Ci-après, dans ce document, nous aborderons les

⁷⁸ Marchand. L. « Un concept fécond : la consommation d'espace-temps ». *Les cahiers scientifiques de la revue Transport*. 1984, numéro 10 p 55 - 63

⁷⁹ Munch, E. « L'harmonisation des horaires de travail : en finir avec l'heure de pointe ? » *Métropolitiques*, 2014, URL : <http://www.metropolitiques.eu/L-harmonisation-des-horaires-de.html>.

⁸⁰ Transportation Research Board ; *HCM 2000 : Highway Capacity Manual*. Washington, D.C, 2000, 1207 p. Première édition en 1950. Nouvelles publications en 1965, 1985, 2000, 2010 et 2016.

fondamentaux de l'ingénierie du trafic routier notamment pour faire un lien avec les limites de la réservation du transport collectif.

Il semble important de rappeler que l'ouvrage intitulé *Highway capacity manual* est le premier apport théorique permettant d'appréhender la capacité des voiries. L'évolution du concept de capacité de voirie permettra, au fur et à mesure de l'évolution de la réflexion, d'aboutir à la mesure de la consommation d'espace⁸¹.

L'ingénierie concernant la capacité des routes permet de mettre en relation la vitesse et le débit. Les capacités de routes sont généralement exprimées en nombre de véhicules/heure. Cette notion est importante car nous constaterons que cette approche pour la mesure de la capacité peut être différente.

En 1973, l'ouvrage *Les transports collectifs et la ville*⁸² apporte une nouvelle réflexion concernant la notion de capacité. « *On a coutume de traiter les problèmes de voiries en ne prenant en compte que les véhicules en circulation* » (Bigey, M 1975⁸³). Cet ouvrage met en avant, non pas la notion de capacité sous l'angle du nombre maximum de véhicules mais sous l'angle du nombre maximum de personnes. Par conséquent, l'utilisation de véhicules plus capacitaires permet d'obtenir une capacité d'infrastructure plus importante. Cette constatation permet, bien évidemment, de reconsidérer la place des véhicules de transport collectif. Le transport collectif permet, pour une même infrastructure, d'obtenir un débit de personnes plus important en comparaison de l'utilisation de la voiture particulière.

Comme le souligne M. Bigey, « *il est difficilement concevable, dans les visions traditionnelles des ingénieurs de circulation, de mettre en œuvre une réservation de voirie sur un axe saturé par le trafic automobile. L'idée première est d'élargir cette voirie et non de la diminuer. Dans cette logique, il est plus facilement concevable de réaliser une réservation de voirie sur un axe sous-utilisé par le trafic automobile. Or, si l'on raisonne non pas en nombre de véhicules mais en nombre de personnes, un site propre pour le transport collectif permet d'augmenter de manière importante la capacité de la voirie. La réservation de voirie pour l'exploitation de systèmes de transport collectif permet donc de transporter plus de voyageurs.* »

De plus, l'ouvrage *Transport collectif en ville* de 1973 met en relation le coût d'une infrastructure de transport et le débit horaire maximum en voyageurs.

⁸¹ ENERTRANS. *Consommation d'espace des différents modes de transport urbain. Phase 1 ; Recherche méthodologique*. Paris, 1982, 29 p.

⁸² CPT / UTPUR. *Les transports collectifs et la ville*. Paris. CELSE. 1973

⁸³ Bigey. M. « Problèmes posés par le tramway dans les villes françaises ». *Transports Urbains*, 1975, numéro 31, p. 17 - 28

type d'infrastructure	coût au km (MF 1970)	débit horaire maximal (en voyageurs par sens)
tramway en site propre au sol	1,5	16 000
autobus articulé	1,5	8 000
métro en viaduc	15	30 000 à 40 000
autoroute urbaine (1)	20 à 100	6 000
RER	100	30 000 à 80 000

(1) 3 ou 4 files - Source : op. cit. pages 181 - 183

Tableau 3 : Rapport entre le coût et le débit en voyageur pour différents types d'infrastructure

Source : Les transports collectifs et la ville, CPT - UTPUR - CELSE, 1973

Ce tableau (tableau 3) montre qu'un système RER peut transporter plus de 13 fois plus de personnes sur son infrastructure qu'une autoroute urbaine pour un coût d'investissement équivalent. Concernant les transports collectifs, cette notion de « débit voyageurs » sera largement reprise. Aujourd'hui, il existe de nombreuses représentations graphiques qui permettent de classer les différents systèmes de transport en fonction de débits théoriques. Les capacités d'emport des véhicules utilisés ainsi que les fréquences de passage ne sont pas toujours renseignées. Or, nous considérons que ces informations sont importantes dès lors que nous souhaitons comparer les systèmes entre eux.

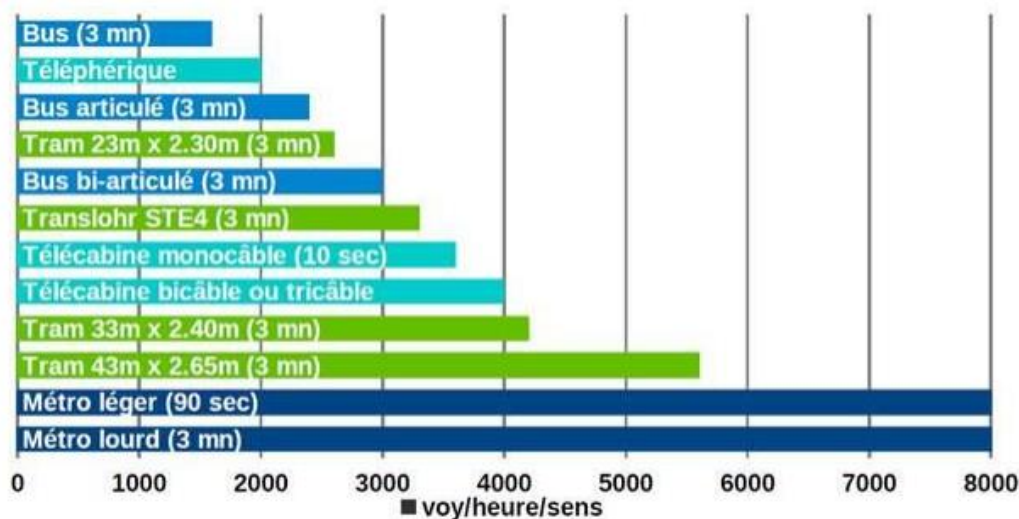


Figure 27 : Classification des systèmes de transport public en fonction de leur débit

Source : CEREMA⁸⁴

⁸⁴ CEREMA. *Référentiel pour le choix des systèmes de transports collectifs à haut niveau de service*. 2018, 39 p.

5.3.2 La consommation d'espace

La consommation d'espace par les différents modes de transport ne semble pas être une préoccupation majeure des économistes, des ingénieurs ou des urbanistes, alors que l'espace est (par définition) un bien rare en zone urbaine et qu'il représente un enjeu de premier ordre dans les rapports de forces entre les différentes catégories d'utilisateurs de la ville (ENERTRANS 1982).

Très peu de littérature scientifique aborde le sujet de la quantité d'espace consommé par les circulations des personnes et des biens. Or cette problématique reste un enjeu fondamental pour les politiques de transports en milieu urbain.

Même si le thème de l'utilisation du sol reste un sujet approfondi, celui de la consommation d'espace par les différents modes de transport notamment en milieu urbain l'est beaucoup moins.

Aujourd'hui encore, la problématique de la consommation d'espace reste en marge des réflexions de la mobilité urbaine notamment par rapport aux intentions de développer les motorisations électriques et les véhicules autonomes.

En 1977, Louis Marchand présente dans un article de la revue *Métropolis*⁸⁵ le concept du m²/h. Ce concept permet d'ajouter l'espace consommé pour circuler et l'espace consommé pour stationner. Cela permet de mettre en évidence l'importance de la part du stationnement dans la consommation totale d'espace. Comme le rappelle l'étude d'ENERTRANS en 1982, le trajet dure souvent moins d'une heure alors que le stationnement d'une voiture près du lieu de travail occupe l'espace pendant huit heures.

Ce concept de consommation de surface*temps est essentiel pour bien saisir que, dans un contexte de pénurie de surface de circulation, le débit de la voirie est très inférieur à celui qui résulte de l'observation directe des flux (Bigey, M. 1975⁸⁶).

Pour Louis Marchand, le concept de consommation d'espace /temps, mesurée en mètre carré par heure, peut sans difficulté exprimer quantitativement la productivité intrinsèque des différents modes de transport individuel et collectif au regard de l'espace consommé.

Approche mathématique du concept m²/h (Marchand. L, 1984)

Dans un milieu urbain, les déplacements des personnes s'effectuent grâce à des espaces de circulation qui peuvent être énumérés de la manière suivante :

- Pour les piétons : Les trottoirs
- Pour les deux roues : Les chaussées et piste cyclables
- Pour les automobiles : Les chaussées (voirie normale et voirie rapide Urbaine)
- Pour les transports collectifs : Les chaussées et voies spécifiques au niveau du sol ou dénivelées (en viaduc ou tunnel)

⁸⁵ Marchand, L. « Qu'est-ce que la mobilité ? », *Métropolis*, 1977, 24-25, p 51 - 54

⁸⁶ Le concept de consommation d'espace fait l'objet d'une publication en 1977. A la lecture de différents articles, nous constatons que certains praticiens y faisaient déjà référence dès 1975.

Chaque déplacement engendre deux types de consommation d'espace : consommation d'espace de circulation et consommation d'espace de stationnement. Ci-dessous, nous présentons les formules mathématiques proposées par M. Marchand (figures 28, 29 et 30).

$$C_{si} = \frac{S_i \times h_i}{n_i}$$

où : S_i : surface nécessaire au stationnement du véhicule (en m²)

h_i = durée du stationnement (en heures)

n_i = taux d'occupation du véhicule utilisé pour effectuer le déplacement (en nombre de personnes).

Figure 28 : Formule pour le calcul de la consommation d'espace en stationnement

$$C_{di} = \frac{1000 \times l_i \times k}{Q_i(V) \times n_i}$$

où : l_i = largeur de la voie de circulation (en mètres)

k = longueur du déplacement (en kilomètres)

$Q_i(V)$: débit optimal de la voie de circulation pour la vitesse moyenne V (en véhicules par heure).

n_i = taux d'occupation du véhicule (en nombre de personne).

Figure 29 : Formule pour le calcul de la consommation d'espace en circulation

Source : Marchand. L, 1984

La consommation totale de l'espace par personne s'exprime donc comme suit :

$$C_i = C_{si} + C_{di} = \frac{1}{n_i} \left[S_i \times h_i + \frac{1000 \times l_i \times k}{Q_i(V)} \right]$$

Figure 30 : Formule de la consommation d'espace totale

Source : Marchand. L, 1984

Pour l'auteur, la formule est simple, facile à utiliser et particulièrement intéressante à mettre en œuvre pour les périodes de pointe dans les secteurs géographiques congestionnés. L'idée est de pouvoir comparer la productivité des différents modes de transport vis-à-vis de l'espace consommé lorsque ceux-ci fonctionnent à leur capacité optimale.

Le tableau suivant (tableau 4) donne un aperçu des résultats obtenus en utilisant la formule précédente. A propos des résultats, l'auteur rappelle deux points :

- La consommation d'espace en stationnement pour les transports collectifs est quasi nulle car, en heure de pointe, ces derniers sont rarement immobilisés à l'exception des périodes de régulation en terminus qui sont généralement situés hors du centre.
- Le motif de déplacement qui conditionne la durée du stationnement pour les automobiles et les deux roues influence très fortement la consommation d'espace totale.

	Stationnement	Circulation	Consommation totale
Piéton	0,0	2,0	2,0
2 roues			
. Travail (durée 9h)	13,5	7,5	21,0
. Loisirs (durée 3h)	4,5	7,5	12,0
. Achats (durée 1,5h)	2,3	7,5	10,0
Automobile (1,25 personne/véhicule)			
. Travail (durée 9h)	72,0	18,0	90,0
. Loisirs (durée 3h)	24,0	18,0	42,0
. Achats (durée 1,5h)	12,0	18,0	30,0
Autobus (50 personnes/bus)			
. voirie banale	0	3	3
. voie réservée (60 bus/sens/heure)	0	6	6
(30 bus/sens/heure)	0	12	12
Métro (30 000 pers./sens/heure)	0	1	1

Tableau 4 : Consommation d'espace par personne pour un déplacement

Source : Marchand. L, 1984

On peut facilement constater la dispersion des résultats obtenus. La valeur la plus faible est de 1 m²/h pour le métro et la plus importante est de 90 m²/h pour l'automobile. Rappelons l'importante consommation d'espace pour le stationnement.

Ces chiffres permettent d'alimenter la réflexion sur le dimensionnement de l'espace attribué aux différents modes de transport urbain ainsi que leur rôle dans le système de la mobilité urbaine.

En 1984, l'économiste Jean-Marie Beauvais⁸⁷, a illustré et vérifié les démonstrations de Louis Marchand dans le cadre de deux études appliquées aux cas de Bourges et de Toulouse. Ces études mettent en évidence l'intérêt de l'indicateur de la consommation d'espace m^2/h qui permet d'agrèger la consommation pour circuler et pour stationner. Les applications pour les agglomérations de Bourges et de Toulouse portent sur l'heure de pointe (17 à 18 heures) dans l'hypercentre, là où les contraintes spatiales sont les plus importantes.

La représentation suivante (figure 31) concerne le cas de Bourges. Il en ressort clairement que dans un environnement congestionné, l'automobile est le mode de transport le plus inefficace. A l'inverse de l'autobus qui est le moyen le plus efficace. Bourges ne possédant pas de tramway, la comparaison avec ce mode est inexistante.

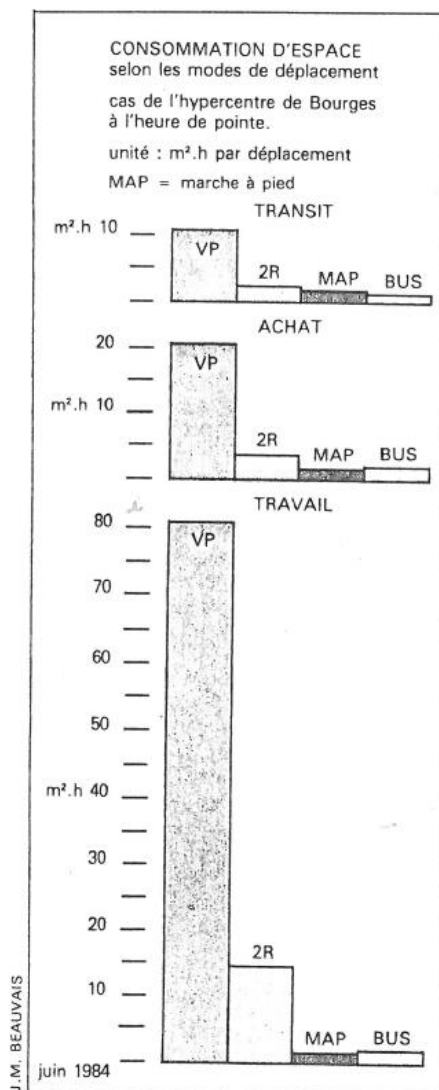


Figure 31 : Consommation d'espace selon les modes de déplacement en heure de pointe : le cas de Bourges

Beauvais. JM, 1984

⁸⁷ Beauvais. JM. « Les transports publics urbains sont économes en espace et en énergie ». in- UTP. *Entreprise et politique des transports Publics Urbains*. Nice. 1984. p. 14 - 16

L'auteur précise que si l'on veut éviter l'asphyxie et maintenir une capacité d'accueil pour les activités commerciales et autres situées dans ce périmètre, il faut, pour des raisons d'efficacité, s'orienter vers des rues réservées aux piétons et aux autobus. Dans les plus grandes agglomérations la conclusion est analogue si ce n'est que les autobus seraient remplacés par des tramways.

Ce critère de consommation d'espace devrait être calculé dans la cadre du développement de la voiture autonome et de son modèle d'utilisation. En effet, comme nous avons pu le constater pour l'usage traditionnel des automobiles, la consommation d'espace liée au stationnement est toujours supérieure à celle liée à la circulation.

5.3.4 Les limites de la réservation au profit des transports collectifs

Une réservation de voie dédiée à l'usage exclusif ou partiel du transport collectif possède, tout comme une voie de circulation classique, différentes limites. En effet, une réservation est en mesure d'accepter un certain débit, en fonction des dimensions et des caractéristiques des véhicules qui y circulent. Au-delà de ce débit, la réservation voit sa performance décroître.

Nous pouvons présenter trois limites à la pratique de la réservation (Bigey. M, 1975) :

- Limite de priorité

La mise en place d'une réservation pour le transport collectif de surface est généralement accompagnée d'un système de priorité aux feux. Il est difficilement envisageable de mettre en place une quasi onde verte sur une réservation pour le transport collectif lorsque celle-ci est traversée par une voirie de circulation générale. Les axes sécants verraient leur capacité diminuer de manière significative. De plus, la phase verte n'a de sens que lorsque qu'un véhicule de transport collectif doit franchir un carrefour. En l'absence de passage de véhicule de transport collectif, l'onde verte est inutile.

Cette priorité montre une limite à partir du moment où l'intervalle moyen entre deux passages de véhicule est inférieur à la durée d'un cycle de feux. Si tel est le cas, la priorité est dégradée. D'après l'auteur une dégradation de la priorité intervient à partir de 25 à 30 passages de véhicules par sens et par heure soit, dans le cas d'une régularité parfaite, un passage toutes les 2 minutes environ.

Cette limite de priorité est d'autant plus importante lorsque la réservation pour le transport collectif est utilisée par des véhicules de différentes lignes.

- Limite de fluidité

A partir d'une certaine fréquence de passage, les véhicules de transport collectif circulant sur la même réservation et desservant les mêmes arrêts voient leur vitesse diminuer. En effet, les véhicules peuvent être gênés par ceux qui les précèdent. D'après l'auteur, cette limite de fluidité apparaît à partir de 50 passages de véhicules par sens et par heure soit dans le cas d'une régularité parfaite, un passage toutes les 70 secondes environ.

- Limite d'efficacité

Au-delà d'une certaine fréquence de passage, la réservation perd de son efficacité et donc de son utilité. D'après l'auteur, la limite d'efficacité intervient pour une fréquence de passage égale et supérieure à 100 véhicules par sens et par heure soit dans le cas d'une régularité parfaite, un passage toutes les 36 secondes environ.

L'auteur précise que ces valeurs peuvent être différentes en fonction des cas mais permettent de fixer des ordres de grandeur. Les valeurs sont issues de mesures réelles.

5.3.5 L'analogie possible avec la littérature sur le trafic routier

Au point précédent, nous avons souligné que la réservation pour le transport collectif était un moyen d'augmenter la capacité de la voirie. Nous avons également montré l'importance de la mesure de la consommation d'espace avec la notion de m²/h.

En ce qui concerne la consommation d'espace en milieu urbain, les TCSP possèdent un double avantage

- d'une part une réservation de voirie pour la circulation permet d'augmenter sa capacité (débit – capacité : faire passer le maximum de personnes)
- d'autre part, les transports en commun restent peu consommateurs d'espace.

Après l'analyse de la capacité des réservations pour le transport collectif et de ses limites, il nous paraît important de faire une analogie avec l'ingénierie du trafic routier.

Comme nous l'avons évoqué plus haut, le *Highway capacity manual* a été publié aux Etats-Unis en 1950. Cet ouvrage deviendra « la bible » des ingénieurs routiers du monde entier. Depuis cette date, les théoriciens du trafic routier cherchent à comprendre et à quantifier des phénomènes tels que la congestion.

*La congestion survient lorsque la demande (le nombre de véhicules qui cherchent à utiliser une infrastructure donnée) est supérieure à la capacité de cette infrastructure. Si la demande excède la capacité, alors les véhicules seront ralentis à l'entrée de l'infrastructure.*⁸⁸

Nous tenons à donner ici un rapide aperçu de l'analyse du diagramme fondamental illustrant les trois variables du trafic routier :

- Le débit Q (nombre de véhicules passant pendant une période de temps donnée en un point,
- La concentration K (nombre de véhicules présents à un instant sur une longueur de route donnée),
- La vitesse du flot U (vitesse moyenne des véhicules présents à un instant sur la longueur de la route donnée).

Ces trois variables sont reliées par la relation suivante :

$$Q = K \cdot U$$

Lorsque l'on met en relation les notions de débit et de concentration, on constate qu'il existe deux régimes différents (Certu : 2010) :

- « lorsque la concentration est faible, on peut supposer que le débit qui passe en un point va croître de manière presque linéaire. Si les véhicules ne sont pas contraints,

⁸⁸ Certu. *Comprendre le trafic routier : Méthodes et calculs*. CERTU. Lyon : 2010, 114 p

alors plus ils sont nombreux dans une zone de longueur constante située en amont d'un point donné (concentration), plus ils seront nombreux à passer dans les minutes suivantes en ce point (débit). Ceci est vrai jusqu'à ce que le débit atteigne la capacité de la voie. À ce moment-là, en effet, il y a une contrainte qui s'oppose à l'écoulement libre des véhicules ;

- au-delà d'un certain point (que l'on appelle le point critique) la congestion apparaît ; les contraintes subies par le trafic et qui se reflètent par une limitation du débit (parce qu'il y a une limitation de la capacité de la voie en aval, par exemple) induisent une augmentation de la concentration. Donc, au-delà du point critique, plus le débit passant en un point diminue, plus la concentration augmente. »

Le graphique ci-après (figure 32) illustre les deux régimes : le régime fluide et le régime congestionné.

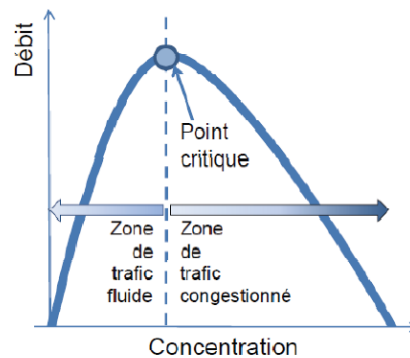


Figure 32 : Représentation du diagramme fondamental du trafic routier en liant concentration et débit

Source : Certu 2010

La première représentation repose sur le lien entre la concentration et le débit. Cependant, la vitesse est également en relation avec ces deux variables [Q et K].

Les deux représentations suivantes intègrent la vitesse (figure 33). La courbe de gauche représente la vitesse en fonction du débit et celle de droite la vitesse en fonction de la concentration.

Ces trois représentations sont différentes mais permet d'exprimer la même relation qui est tout à fait transposable aux limites de débit d'une réservation TC.

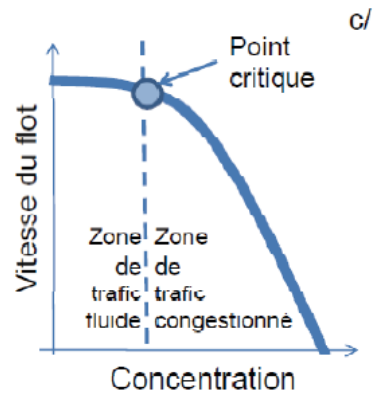
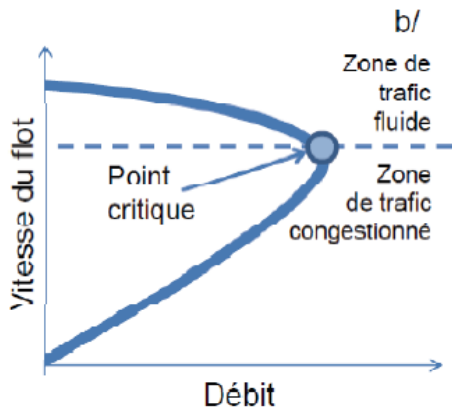


Figure 33 : Représentation du diagramme fondamental du trafic routier

Source : Certu 2010

6. Evaluation et choix des systèmes TCSP

Le choix d'un système TCSP repose sur la recherche d'une cohérence entre les besoins en mobilité de l'agglomération et les contraintes du tissu urbain. De plus, ce choix doit s'inscrire dans une offre industrielle existante. Il est indispensable de rappeler également que le milieu d'accueil (tissu urbain) doit être restructuré afin de garantir une véritable efficacité notamment pour les systèmes de surface⁸⁹.

Par conséquent, le choix d'un système TCSP s'inscrit au cœur d'un véritable débat. Les autorités organisatrices qui souhaitent mettre en place un TCSP doivent répondre à de nombreuses questions se rapportant à différents domaines, le tout dans une temporalité allant du court au long terme car le système de transport retenu sera exploité durablement dans son état originel ou modifié. Il est important de considérer un système de transport comme évolutif dès sa conception.

Selon le Certu, les déterminants du choix d'un système TCSP peuvent être analysés comme suit⁹⁰:

- Etape 1 – Vision à long terme de l'agglomération et objectifs du TCSP
 - o Définition du projet urbain à long terme
 - o Analyse des besoins de déplacements actuels et futurs sur l'agglomération
 - o Schéma du réseau à long terme
 - o Identification des enjeux d'aménagement et de qualification urbaine
 - o Définition des objectifs de niveau de service
- Etape 2 – Capacité et coût du TCSP
 - o Analyse de la demande sur le TCSP et de la capacité nécessaire pour écouler les flux
 - o Estimation des coûts et des ressources financières
- Etape 3 – Précautions technologiques et impacts locaux du TCSP
 - o Evaluation des impacts locaux
 - o Analyse des précautions technologiques et industrielles des systèmes
 - o Evaluation des potentiels d'interconnexion et de compatibilité des matériels
- Etape 4 – insertion et réalisation du TCSP
 - o Conditions d'insertion urbaine
 - o Organisation des travaux

Nous verrons dans cette partie que le choix peut se faire à l'aide d'études techniques mais que le choix final des autorités politiques en place conditionne le lancement et la réussite de l'opération. Nous illustrerons l'approche politique par deux exemples significatifs. Le premier concerne le choix entre le tramway et le VAL pour l'agglomération de Toulouse. Le second

⁸⁹ Maupu, J.L., « Comment choisir un système de transport collectif en site propre (TCSP) de surface ». *Transports Urbains*, 2003, numéro 105, p. 11-19

⁹⁰ CERTU. *Bus à Haut Niveau de Service : du choix du système à sa mise en œuvre*. Lyon : Certu, 2009, 160 p.

exemple se focalise sur le choix politique des agglomérations de Tours, Nancy et Caen où le choix entre Tramway et TVR se pose.

Concernant les études techniques, nous verrons, qu'il existe véritablement deux approches : l'évaluation monocritère et multicritère. Le résultat de ces études techniques reste un outil d'aide à la décision mais le choix final est éminemment une décision politique.

Lorsque le renouveau des transports collectifs en France se manifeste au début des années 1970, « *l'Etat souhaite engager des études de suivi dans le double souci d'apprécier l'usage fait de l'argent public et d'estimer si les solutions élaborées localement, tant sur le plan technique qu'organisationnel, pouvaient être généralisées. Étant également maître d'ouvrage pour des projets d'infrastructures nationales qui relèvent de sa compétence, l'État entend aussi être en mesure d'évaluer ses propres actions* »⁹¹.

Rappelons également que « *la Loi n°82-1153 d'Orientation des Transports Intérieurs du 30 décembre 1982, dite LOTI, a institué plusieurs notions originales (droit au transport, efficacité économique et sociale, plan de déplacements urbains...) et a imposé dans son article 14 la réalisation **d'évaluations socio-économiques et de bilans** des grands projets d'infrastructure. Le décret d'application de l'article 14 de la LOTI précise le contenu de l'évaluation et du bilan, et impose que l'évaluation a priori comme le bilan a posteriori soient soumis à des obligations de publicité* » (CERTU 2002).

La loi sur l'air et l'utilisation rationnelle de l'énergie (LAURE) de 1996 précise le contenu des évaluations. Il est également nécessaire de mentionner la décision du tribunal administratif de Rennes du 15 février 1993 d'annuler la déclaration d'utilité publique du projet de métro de Rennes pour insuffisance d'évaluation socio-économique.

Nous constatons ici que le législateur oriente, dans le cadre des investissements de TCSP, l'évaluation socio – économique qui est une des méthode(s) d'évaluation. Cette orientation repose sur la volonté de standardiser la méthodologie afin de pouvoir les comparer entre elles.

Nous décrivons succinctement ci-après les deux méthodes permettant d'appréhender un choix d'investissement.

6.1 Evaluation socio-économique : analyses coûts / avantages

La méthode la plus généralement utilisée, du moins pour la France, est l'analyse coûts/avantages.

Le Certu définit l'évaluation socio-économique comme « *une analyse des avantages et inconvénients d'un investissement pour la collectivité pendant la durée de vie de cet investissement. Elle permet de comprendre les enjeux liés au projet ainsi que son intérêt social et économique. L'évaluation socio-économique d'un projet de TCSP est une évaluation a priori qui s'inscrit dans un processus de décision. Elle permet de porter plusieurs éclairages sur les effets d'un projet dans le temps, d'en appréhender la complexité de manière organisée et la plus rigoureuse possible ; ainsi elle prend en compte des aspects monétaires, environnementaux, sociaux. L'évaluation socio - économique de projet n'est pas le seul élément qui concourt au choix des décideurs, mais est un outil au service du choix le plus judicieux possible* » (CERTU 2002).

⁹¹ CERTU. *Evaluation socio-économique pour les projets TCSP*. Certu. Lyon, 2002, 147 p.

L'ouvrage du Certu intitulé *Evaluation socio-économique pour les projets de TCSP* stipule que cette méthode permet six utilisations :

- Aide à la décision,
- Optimisation des projets (choix entre différentes variantes),
- Transparence/description du projet,
- Aide au contrôle de l'utilité publique,
- Concertation préalable à la décision, outil de dialogue,
- Préparation de l'évaluation a posteriori.

L'analyse coûts/avantages se fonde sur la théorie du surplus de l'utilisateur. Elle repose sur le principe selon lequel il est possible d'associer à un projet une valeur socio-économique qui peut être définie comme mesure de la résultante pour la collectivité des éléments favorables (avantages) et éléments défavorables (inconvenients) à la réalisation du projet ⁹².

Les principaux indicateurs de l'analyse coûts/avantages sont d'une part la valeur actuelle nette (VAN) d'autre part, le taux de rentabilité interne (TRI).

La VAN mesure la création de richesse engendrée par l'investissement. Le TRI est quant à lui un taux d'actualisation de la VAN.

Bien que la méthode de l'analyse coûts / avantages soit historiquement utilisée et éprouvée pour les investissements d'infrastructure routière sur le territoire national, l'ouvrage du Certu de 2002 met en garde sur la spécificité des projets en milieu urbain :

« L'évaluation socio-économique sur les projets routiers interurbains est une pratique ancienne au niveau national. La méthodologie est aujourd'hui solide en milieu interurbain et appliquée depuis de nombreuses années.... En milieu urbain, où les interactions entre des projets de transport et le développement urbain sont très complexes, les évaluations socio-économiques des projets de TCSP n'ont pas de méthodologie éprouvée. »

6.2 Les analyses multicritères

Il existe également une autre approche permettant d'analyser un choix d'investissement d'un TCSP : l'analyse multicritère.

« Les deux approches sont parfois mises en opposition, l'une étant jugée trop subjective, l'autre trop agrégative ; nous considérons qu'elles se complètent et n'ont pas les mêmes finalités. L'analyse multicritère est pertinente puisqu'elle correspond à une analyse par objectif et n'agrège pas. L'évaluation socio-économique et le bilan coûts/avantages inversement ont l'avantage d'être une approche que l'on peut plus facilement normaliser, et permettent de comparer des éléments a priori difficilement comparables.

Les méthodes de l'évaluation socio-économique surtout dans leur partie calcul économique sont presque imposées par la théorie économique.... L'analyse multicritère dont les méthodes ont également été étudiées, consiste plus à faire dialoguer des acteurs pour qu'ils constituent eux-mêmes leur outil d'aide à la décision » (CERTU 2002).

Il existe trois principales méthodes d'analyses multicritères :

Méthode d'agrégation complète

Dans le cadre de cette méthode, on recherche une agrégation de n critères afin de les réduire en un critère unique. Ces méthodes issues de la théorie de l'utilité multi-attribut, issues de

⁹² Debrincat, L., Meyère A. (1998). « L'aide multicritère à la décision : des potentialités pour l'évaluation des projets de transport collectif en Ile-de-France », *Métropolis*. 1998. Numéro 106-107, p 57-67.

l'approche américaine, se fondent sur le principe que le décideur est capable de comparer toutes les solutions sans exprimer d'indifférence entre elles ; elles reposent ensuite sur le fait que le décideur essaie de maximiser une fonction qui agrège tous les points de vue.

Méthode d'agrégation partielle

Dans le cadre de cette méthode, on cherche à comparer des actions potentielles ou des classements les uns aux autres et à établir entre ces éléments des relations de surclassement. Les méthodes de surclassement, issues de l'approche européenne, se basent sur la construction d'une relation de surclassement entre deux solutions à comparer, représentant le point de vue du décideur. Elles se servent ensuite de l'exploitation de ces relations afin d'aider le décideur à construire une solution acceptable

Méthode d'agrégation locale

Dans le cadre de cette méthode, on cherche en premier lieu une solution de départ. Par la suite, on procède à une recherche itérative pour trouver une meilleure solution. Les méthodes interactives, utilisées principalement dans le contexte de la programmation mathématique à objectifs multiples, reposent sur l'alternance de phases de calcul et de phases de dialogue ; elles imposent une grande disponibilité de la part du décideur qui doit, à plusieurs reprises, intervenir dans le déroulement de la méthode.

6.3 Des retours d'expérience aux recommandations

En 2016, les cabinets Transmission et TTK se voient confier, de la part de l'Association Qualité Mobilité, une étude concernant les retours d'expériences des choix tramways et BHNS dans certaines agglomérations françaises⁹³.

Pour cette étude, la méthode repose sur une reconstitution des situations Ex Ante et Ex Post de chaque projet de TCSP. Après avoir recueilli diverses données, les auteurs procèdent à une comparaison entre les différents projets. Les principaux indicateurs retenus sont :

- Coûts estimés puis observés,
- Fréquentation estimée puis observée,
- Coût global.

Pour un même mode de transport, l'analyse comparative donne des résultats de fréquentation et de coût très différents. Pour les auteurs, les éléments théoriques doivent être directement corrélés avec le contexte local.

La méthodologie proposée reprend les axes suivants :

- Comparaison des caractéristiques techniques (matériel roulant et infrastructure),
- Détermination de la zone de pertinence : limite capacitaire,
- Calcul des coûts globaux (un modèle est défini afin de réaliser une comparaison pertinente) :
 - o Matériel roulant
 - o Infrastructure
 - o Exploitation

Concernant la zone de pertinence, l'étude démontre clairement qu'en dessous de 30 000 voyageurs par jour, le BHNS reste le choix le plus rationnel au regard des coûts par voyageur.

⁹³ Beauvais, JM. Cureau, M. Gradelle. J. Perez, M. Trubert, E. *Les retours d'expériences des choix tramways - BHNS dans les agglomérations françaises*. 2016, 107 p.

Au-delà de 45 000 voyageurs par jour, le tramway s'impose car le BHNS devient sous capacitaire.

Le modèle de calcul des coûts globaux, indépendamment des différentes hypothèses retenues, montre que les coûts globaux annuels sont toujours plus importants pour le système tramway que pour le système BHNS. En revanche, lorsque le coût global est ramené au voyage, le tramway devient plus économique que le BHNS à savoir 2,44 Euros par voyage pour le tram et 2,65 Euros par voyage pour le BHNS.

Pour les auteurs, le choix d'un mode doit en premier lieu reposer sur le potentiel de clientèle, les considérations techniques et politiques et enfin l'aspect financier. La contrainte financière ne doit pas être le critère unique du choix.

6.4 Les approches politiques à partir de 1970

Au cours des années 1970 – 1985, les villes désireuses de mettre en place un TCSP s'intéressent fortement au VAL ou aux Transports Rapides Personnalisés (PRT). De 1985 à 1990 plusieurs villes françaises hésitent entre le tramway moderne et le VAL. Dans les années plus récentes, le débat se porte plus sur le choix entre BHNS et tramway.

Les processus politiques quant au choix des TCSP sont importants car les choix d'hier concernant les systèmes de transport sont au service des populations d'aujourd'hui et sont confrontés aux nécessaires évolutions à venir. Le choix du système, plus précisément son aspect capacitaire, doit s'orienter vers une estimation de la fréquentation à deux horizons, celle de la mise en service et celle du long terme.

Le choix d'un TCSP n'est pas systématiquement rationnel. En effet, la mise en œuvre d'un TCSP de surface induit une réorganisation de la circulation et oblige à limiter l'accès des centres villes à l'automobile. A l'inverse, un TCSP exploité en souterrain évite bien des difficultés. Cela étant, en contrepartie, le coût du TCSP est plus élevé. Mais pour certains responsables politiques locaux, s'engager dans un investissement conséquent permet d'éviter bien des conflits avec la population locale. Dès lors, la question de la véritable priorité au transport en commun est posée. Souhaitons-nous une ville routière ou une ville du transport en commun ?

Nous décrivons deux situations : celle de Toulouse avec le choix du VAL et celle de Caen et Nancy avec le choix du TVR. Le cas de Toulouse met en lumière le difficile choix du partage de la voirie alors que Caen et Nancy illustrent davantage les problématiques liées au choix des systèmes dit « intermédiaires ».

6.4.1 VAL ou tramway à Toulouse : le questionnement du partage de la voirie

Au début des années 1980, la ville de Toulouse connaît les difficultés des grandes agglomérations en relation avec la circulation motorisée privée, le bruit et la pollution atmosphérique. En 1981, la commune de Toulouse détient trois records :

- Le taux de motorisation le plus élevé de l'hexagone,
- La marche à pied est très peu utilisée,

- Le temps de parcours moyen par habitant est de 50 minutes⁹⁴.

A cette époque, le maire Pierre Baudis affirme qu'adapter la ville au rail est impensable. Les Toulousains vivent alors dans le vacarme et les gaz d'échappement. On note tout de même que pour le bruit, la ville signe un protocole avec le ministère de l'écologie. Un budget de 5 millions d'euros va permettre d'isoler des bâtiments en bordure de rocade. Pour la pollution atmosphérique, on mesure et on applique une déviation des circulations en cas d'alerte (Ambroise-Rendu, M. 1981).

Dès 1960, la ville de Toulouse était menacée d'asphyxie par la circulation automobile⁹⁵. A l'époque et jusqu'au début des années 1980, le réseau de transport toulousain reposait uniquement sur l'autobus, lui-même englué dans la congestion urbaine à l'exception de quelque couloirs bus. En 1978, sur les sections les plus chargées de la rue d'Alsace-Lorraine, on pouvait compter jusqu'à 120 bus par heure et par sens soit un passage toutes les 30 secondes (Marconis, R. 1987).

Les responsables politiques de Toulouse ont toujours recherché une organisation permettant de favoriser aussi bien la bonne marche des transports collectifs que la circulation automobile. Limiter la circulation automobile dans le centre de la ville était considéré, à l'époque, comme contraire à la prospérité du commerce de centre-ville qui devait faire face à l'établissement de centres commerciaux périphériques dotés de parkings (Marconis, R. 1987).

Depuis la fin des années 1970, la question de la mise en œuvre d'un TCSP de surface ou en souterrain/viaduc se pose. La limitation de l'usage de la voiture ainsi qu'une réservation de voirie au transport collectif oblige à une réorganisation spatiale de l'espace urbain. La réorganisation de l'espace de circulation remet en cause toute l'organisation de l'espace urbain. Les représentants du conseil général et des communes avoisinantes sont plutôt favorables au retour du tramway avec un projet de réseau à l'échelle de l'agglomération qui voit ces mouvements pendulaires croître. En revanche, la mairie de Toulouse est plutôt favorable à la mise en œuvre d'un métro.

Au début de l'année 1972, L'Agence d'Urbanisme de l'Agglomération Toulousaine (AUAT) est créée. Elle lance une étude pour un projet de TCSP⁹⁶ comprenant des variantes en viaduc, au sol et en souterrain. Toutes les variantes sont rassemblées sous l'expression de « métro léger » (Frébault J., 2018). La rue Alsace-Lorraine, qui est l'une des rues principales du centre de la ville fera l'objet de nombreux échanges concernant son réaménagement : la rue Alsace-Lorraine sans voiture.

En juin 1974, Marcel Cavaillé, sénateur et adjoint au maire de Toulouse, est nommé secrétaire d'Etat aux transports au sein du gouvernement de Jacques Chirac (Frébault J., 2018).

⁹⁴ Ambroise-Rendu, M. « Toulouse, avec les rêves et les cauchemars d'une capitale ». *Le Monde*. 4 mars 1981.

⁹⁵ Marconis, R. « Evolution des transports urbains de Toulouse, acteurs et enjeux ». *Transports Urbains*. Numéro 60, 1987, p. 9-14.

⁹⁶ Frébault J. « Tramway ou métro ? Débats techniques et hésitations politiques autour du projet de métro léger à Toulouse dans les années 1970 », In- Gardon S. *Quarante ans de tramways en France*. Lyon : Libel, 2018, 507 p.

En 1975, l'AUAT publie deux rapports. L'un concerne une hypothèse de métro léger en site nouveau (majeure partie de l'itinéraire en souterrain et viaduc), l'autre une hypothèse de métro léger au sol y compris au niveau de l'axe de la rue Alsace-Lorraine. Cependant, il est difficile de mettre en place une trémie⁹⁷ place Esquirol. Afin de résoudre cette difficulté, il est proposé d'allonger le souterrain et de faire un tronç commun pour 2 lignes sous la rue Alsace-Lorraine. Un puits d'essai est même réalisé.

En 1982, le sujet est au cœur du débat politique car la campagne politique se dessine. Dominique Baudis, maire de Toulouse, défend l'idée du souterrain. Son concurrent propose un tracé en surface sur les boulevards périphériques. Ce tracé de surface permet le maintien sans problématique du partage de la voirie. Cependant, le partage de voirie au détriment de l'automobile en hypercentre est écarté par les deux protagonistes.

Une étude de comparaison socio-économique entre les deux tracés montre que le tracé périphérique est moins pertinent en termes de populations et d'emplois desservis.

Dominique Baudis lance l'idée du VAL, considérant que ce choix repose sur l'automatisation et le prestige. Toulouse est une capitale de région, berceau d'Airbus, des automates et de la haute technologie. En conséquence, le débat du partage de l'espace urbain est relayé au second plan.

Du fait du coût élevé du métro type VAL, les responsables politiques de la ville de Toulouse cherchent alors à réduire le coût du projet. Par exemple, on imagine utiliser un tunnel, devant être réalisé pour une conduite d'eau, par le VAL. Cependant, un problème se pose au niveau du gabarit. On imagine également un PantoVal (véhicule Hybride mi-Val mi-Tramway). Une nouvelle étude indique que le VAL coûte 1,9 Milliards de Francs et le Tramway 1,3. Les deux systèmes passeront en souterrain en centre-ville. Le 9 juillet 1985 le SMTC opte pour le VAL. Le projet est finalement estimé à 2,7 Milliards de Francs.

Notons que l'approche économique des promoteurs du VAL s'organise de la manière suivante : Le VAL est automatique donc son coût d'exploitation est plus faible. Le coût d'investissement est également plus faible car le gabarit des véhicules est réduit. Il est donc possible de faire circuler un grand nombre de véhicules de petite taille (plus de réserve de capacité dynamique). Cependant le vrai coût du VAL restera flou.

Pour P. Alexis et O. Delerve, le choix des autorités organisatrices qui souhaitent le VAL repose sur les options suivantes :

- Le choix de la mythologie du standing,
- Le choix de la mythologie du progrès (l'automatisme),
- Le refus d'une priorité réelle aux transports collectifs.

Dominique Baudis s'exprime ainsi sur le choix du VAL : « *Il aurait été absurde de choisir à la fin du 20^{ème} siècle un système (tramway) qu'elle juge (la municipalité de Toulouse) révolu alors que l'avenir appartient aux systèmes automatiques. Un métro ultra moderne construit par une entreprise spécialisée également dans le domaine aéronautique et spatial est un atout*

⁹⁷ Alexis P. et Delerve O. 1987 : « Val ou Tramway ? A Toulouse et ailleurs, beaucoup plus qu'un choix de technologie ». *Transports Urbains*. Numéro 60, 1987, p. 3-8.

pour une ville qui donne d'elle-même une image de modernité et de haut niveau technologique » (Lettre du GART, numéro 5, octobre 1985).

6.4.2 TVR ou tramway à Nancy et Caen : un choix technique

Au milieu des années 1980, les systèmes dits « intermédiaires » sont développés d'une part pour répondre au besoin de créneaux manquants entre le bus et le tramway sur fer et d'autre part, favoriser la concurrence sur ce secteur d'activité. Les villes de taille moyenne doivent avoir la possibilité de réaliser un TCSP sans devoir investir dans un tramway sur fer souvent trop cher par rapport au budget disponible.

L'Etat est fortement impliqué dans cette démarche à travers des crédits de recherche et de développement. Une commande est passée au Syndicat des Transports Parisiens (STP devenu STIF puis IDFM) pour définir un cahier des charges d'un matériel roulant de type tramway sur pneus avec l'aide de la RATP. La RATP avait pour objectif d'organiser des expérimentations des nouveaux produits tels que CIVIS, Translohr ou encore TVR sur une section du TransVal de Marne⁹⁸.

Ce travail n'a pas permis d'atteindre le résultat attendu. A l'exception des villes de Clermont-Ferrand, et de la région Île de France avec le Translohr, Nancy et Caen avec le TVR et Rouen le CIVIS, les agglomérations françaises s'engagent majoritairement soit vers un projet BHNS soit vers un projet tramway sur fer.

Le TVR est commercialisé en France dans les années 1990. Ce système innovant peut se définir comme suit : « *C'est un véhicule électrique, articulé, à trois caisses, à plancher bas, mais sur pneu et guidé par un rail unique encastré dans la chaussée. Un hybride, en somme, du tramway, du trolleybus et du mégabus* »⁹⁹

Les arguments annoncés pour le choix du TVR reposent pour l'essentiel sur la flexibilité technique offerte par ce nouveau type de matériel, son coût d'investissement plus faible en comparaison avec le tramway sur fer ainsi que sa durabilité du fait de l'utilisation de l'énergie électrique : le tout avec des performances proches de celui du tramway sur fer.

L'argument principal reste le coût d'investissement :

- L'infrastructure pour le tramway sur pneu est moins chère que l'infrastructure pour le tramway sur fer tant que l'on ne dévie pas les réseaux,
- Le TVR ne nécessite pas de construction de nouveaux dépôts.

Un autre argument, plus technique mais important notamment pour la ville de Nancy, est celui concernant la possibilité du TVR de gravir des pentes importantes contrairement au tramway sur fer.

⁹⁸ CGEDD. *Mission de diagnostic et de prospective sur les réseaux de transports urbains de Caen et Nancy*. 2010. 68 p

⁹⁹ Beaucire, F. « La souplesse : joker ou talon d'achille du TVR ? » *Transports Urbains*. numéro 85, 1994. p. 3 – 6.

Les informations ci-dessous sont pour l'essentiel tirées de deux articles de Pierre Debanon publiés dans la revue *Stadtverkehr*¹⁰⁰.

Le cas de Nancy

Pierre Debanon résume l'histoire des choix politiques relatifs aux évolutions des transports en commun de l'agglomération nancéenne.

Depuis les années 1970, la ville de Nancy s'est intéressée à de nombreux projets de transport. La principale motivation, pour les responsables en charge des transports, repose sur la problématique de la congestion automobile.

Dès 1974, les élus et techniciens portent un grand intérêt au projet de mise en œuvre d'un Transport Rapide Personnalisé TTI Otis (Personal Rapid Transit). Ce projet ferait de la ville de Nancy, la première ville au monde à se doter d'un tel système. La ligne envisagée est d'une longueur de 23 Km (A/R) et composée de 20 stations. La ligne dispose d'une réservation de voie totale (la ligne est souterraine dans le centre et en aérien en périphérie) et est exploitée par des véhicules de 30 places qui circulent sur coussin d'air. Une année après, ce projet utopique est abandonné.

La fin du projet du système de Transport Rapide Personnalisé donne naissance au projet URATEC (du nom du bureau d'étude qui le conçoit). Ce projet consiste à faire circuler les bus sur leur propre voie de circulation tel que cela était envisagé pour le TRP (la ligne est souterraine dans le centre et aérienne en périphérie). En effet, pour certains élus, ce projet doit pouvoir évoluer vers la mise en œuvre d'un TRP futur. Ce projet sera également abandonné aux alentours de 1977.

De 1977 à 1980, une nouvelle équipe municipale de Nancy prévoit une réservation de la voirie au transport collectif ainsi que de la traction électrique : tramway ou trolleybus. Cependant, cette nouvelle vision ne fait pas l'unanimité notamment au sein du District Urbain (structure intercommunale précédant la communauté urbaine). Par conséquent, seule la commune de Nancy réalisera des couloirs de bus. Les autres communes de l'intercommunalité refuseront de remettre en cause la place de l'automobile sur leurs territoires respectifs.

Les élus réfractaires à la nouvelle vision des transports publics engagent cinq scénarii d'évolution des transports au sein d'un groupe de travail. Ces scénarii iront d'une étude de la situation « au fil de l'eau » à l'étude de mise en œuvre de deux lignes de tramways. Mais la véritable réflexion se déroule entre techniciens et certains élus sur la base d'un projet trolleybus bimode.

Le 20 mars 1980, le projet trolleybus bimode est présenté en séance publique sans débat préalable avec le groupe de travail précédemment créé. Le projet trolleybus bimode est avant tout un projet de recherche de consensus politique mais pas un véritable projet technique. Ce

¹⁰⁰ Debanon, P. « Les transports de l'agglomération nancéenne : évolution et perspectives ». *Stadtverkehr*. Numéro 44, 1999, p. 9-16.

Debanon, P. « TVR : Moderniser ou remplacer ? » *Stadtverkehr*. Numéro 57, 2012, p. 34-36.

projet de trolleybus bimode permet aux partisans du développement des transports publics et aux inconditionnels de l'automobile d'être satisfaits.

Cependant, ce projet ne repose pas sur une véritable étude technique approfondie permettant de mettre en lumière par exemple la création d'un réseau de trolleybus avec une refonte du réseau existant ainsi qu'une hiérarchisation du réseau avec une organisation de lignes de rabattement.

Il est important de souligner que le choix technologique du trolleybus bimode repose sur un certain nombre d'innovations notamment au niveau de la traction électrique ainsi que la gestion de l'énergie électrique.

Le premier trolleybus circule le 27 septembre 1983 et l'ensemble du réseau fonctionne en septembre 1983. Attesté par la hausse de la fréquentation, le succès est incontestable. Le réseau de transport dispose d'un système performant notamment grâce à la réservation de voirie.

De 1982 à 1998, l'automobile reprend une place prédominante. Par conséquent, la vitesse des transports en commun diminue. De plus, le réseau est remanié et la tarification modifiée avec une succession d'augmentations. Ces différentes évolutions ont pour conséquence directe une diminution de la clientèle. Notons qu'en 1989, la fréquentation du réseau est inférieure à celle précédant la mise en place du réseau de trolleybus bimode. Après quelques années d'exploitation, beaucoup de trolleybus vieillissent mal. Certains circulent comme des autobus classiques en mode thermique.

En 1996, le Grand Nancy présente les grandes orientations transport. Celles-ci se caractérisent par une volonté de prioriser les transports en commun notamment via une nouvelle politique de réservation sur les axes principaux du réseau, une hiérarchisation du réseau avec des lignes de bus de rabattement sur des axes lourds qui seront exploitées par des tramways sur pneu car l'infrastructure électrique existante est toujours en bon état. Le tramway sur fer est écarté du fait de pentes jugées trop fortes, notamment celle accédant au plateau de Brabois. Avant même l'enquête publique, le Grand Nancy décide l'achat des tramways sur pneu auprès de l'entreprise Bombardier. Le projet final de tramway sur pneu est présenté à l'enquête publique en 1998.

Pour l'auteur, Nancy a fait le choix du tramway sur pneu sans vraiment examiner les solutions alternatives et sans prendre en compte l'état de dépendance engendré par le monopole du constructeur. Un point important est également relevé, celui du choix d'une solution très innovante sans retour d'expérience. Cependant, l'auteur précise aussi certains aspects positifs tels que la mise en place de réservations ainsi que la traction électrique.

Le système TVR est inauguré en décembre 2000. Le guidage est limité à 6 km de voies réservées. Le reste de l'itinéraire (4 km) est en mode non guidé sans réservation de voirie. Les entrées et sorties de lignes se font en mode diesel non guidé.

La mise en œuvre du tramway sur pneu de Nancy révèle un grand nombre de difficultés. Dès la mise en service, les véhicules rencontrent de graves problèmes de déraillements qui

conduisent à suspendre l'exploitation durant plusieurs mois. Le service reprend en mars 2002. Cependant, l'exploitation du système reste difficile. Les difficultés suivantes sont constatées :

- L'usure du rail est très rapide,
- La circulation des véhicules est très bruyante,
- La piste ne résiste pas au passage des véhicules,
- Le matériel roulant est peu fiable,
- Les coûts d'entretien sont très élevés.

Alors que la ville de Caen décide de remplacer le TVR par un tramway sur fer, Nancy décide de moderniser son TVR afin d'allonger la durée de la vie du système. Le remplacement du TVR par un tramway sur fer semble plus difficile car le TVR actuel de Nancy ne dispose pas de réservation sur l'ensemble de son itinéraire.

Cependant à Nancy, une contre-étude pour une solution trolleybus est réalisée. Elle propose trois scénarii. Cette contre-étude, viable, aurait permis d'économiser, en comparaison avec la modernisation du tramway sur pneu environ 8 millions d'euros sur 10 ans (Debano 2012).

Finalement, Nancy décide de remplacer le TVR par un tramway sur fer. L'enquête publique est en cours et devrait s'achever à la fin du mois de septembre 2019. Ce remplacement intègre un prolongement ainsi qu'une modification de l'actuel itinéraire du TVR notamment pour contourner la pente menant au CHU de Nancy Brabois.

Le cas de Caen

L'agglomération de Caen fait le choix du TVR en 1991 et inaugure le système en 2002. Contrairement à Nancy, le guidage ainsi que la ligne aérienne sont utilisés sur toute la ligne en voie réservée. Seules les entrées et sorties de ligne se font en mode diesel non guidé.

Le réseau de Caen connaît les mêmes difficultés techniques que celui de Nancy lors de l'exploitation du TVR (déraillements, pannes véhicule 32 fois supérieures aux engagements pris par Bombardier et coûts d'entretien très élevés).

Le choix du TVR est fait sous le mandat de Jean-Marie Girault alors maire de Caen. Le maire de Caen souhaite faire un référendum concernant le choix du système TCSP. Les différents maires des autres communes de l'intercommunalité ne sont pas favorables au référendum. Celui-ci sera alors transformé en consultation informative.

La Déclaration d'Utilité Publique est cassée par le tribunal administratif et revalidée par le Conseil d'Etat. Le premier choix du constructeur était orienté vers Lohr. Ce constructeur sera écarté et indemnisé pour laisser place au constructeur Bombardier et son système TVR. Selon certains élus, Bombardier permet d'assurer une pérennité du système plus importante en comparaison de Lohr.

Pour M. Duron (Maire de Caen du 23 mars 2008 au 5 avril 2014) c'est un succès commercial au niveau de la fréquentation mais un échec industriel notamment au travers de la fiabilité du système et de son usure. En effet, toutes les trois semaines, il est nécessaire de remplacer les galets qui permettent le guidage. Le rail doit être rechargé régulièrement. De plus, lors de

la mise en œuvre du système TVR, on constate son incompatibilité avec les fortes pluies et la neige.

Lorsque M. Duron devient maire de Caen, il demande à Dominique Bussereau alors secrétaire d'Etat aux transports, un audit du système. Le but étant de trouver une solution alternative. Des travaux de retrofit avaient déjà eu lieu pour le TVR de Caen sans résultat probant. Par conséquent, le choix d'une solution alternative s'impose. Cette décision est délicate car un système type « TVR / tramway » doit s'amortir sur environ 30 ans et la ville de Caen s'interroge sur un remplacement du système au bout de 12 ans. Cette situation engendre de nombreux débats au sein de la municipalité.

Le rapport du CGEDD (2010) examine trois possibilités : La première repose sur la modernisation du matériel roulant, la seconde sur le remplacement par un tramway sur pneu (Translohr) et la dernière sur le remplacement par un tramway sur fer.

Caen décide en 2011 de remplacer le TVR par un tramway sur fer. Cette finalité est possible à Caen car la ligne TVR dispose d'une réservation ainsi que d'une électrification monofilaire sur l'ensemble de son itinéraire. L'évolutivité vers un tramway sur fer est donc simplifiée.

La ville de Caen s'oriente donc vers un remplacement du système TVR par un tramway sur fer mais pour trois lignes (passage de deux lignes TVR à trois lignes de tramways sur fer).

Lors de la conférence 11 février 2015¹⁰¹ organisée par l'Association pour l'Histoire des Chemins de fer, M Duron précise que les élus de Caen avaient confiance en Bombardier car cette entreprise construisait des trains et des avions. Il indique également que « *quand on est amoureux, on est aveugle* ».

Bien que deux villes françaises connaissent les mêmes difficultés techniques avec le TVR, les échanges entre Caen et Nancy sont inexistants. L'autorité politique de Caen interdit à ses techniciens de discuter avec Nancy.

Pour l'anecdote : Caen a eu un problème de capacité et a donc souhaité racheter de nouvelles rames mais Bombardier demandait 60 Millions d'Euros pour relancer la chaîne de production. A cela Caen devait ajouter le prix du matériel roulant.

¹⁰¹ Extrait conférence Association pour l'histoire des chemins de fer et de l'UMR AUSser n° 3329 / CNRS. *Le tramway, entre incertitudes et tergiversations : le projet victime du jeu des acteurs*. Février 2015.

7. Conclusion

Au travers de l'histoire, le transport collectif a connu des périodes de fort développement mais également de régression voir même de quasi-extinction pour certains systèmes tels que le tramway. L'apparition de l'automobile (transport individuel), incarnera aussi bien la régression du transport collectif sur le territoire que son renouveau. Après la seconde guerre mondiale, l'automobile reflète le bon développement économique de la société. Le taux de motorisation ne cesse de croître jusqu'à l'apparition des problèmes liés à son utilisation massive. Les orientations politiques de l'époque en matière de mobilité sont orientées vers un modèle tout automobile avec des cités qui doivent s'adapter à cette nouvelle mobilité à l'aide notamment la construction d'autoroute urbaine.

Dès 1960, le modèle du tout automobile s'essouffle et les prises de conscience que le dimensionnement de la voirie pour toujours plus de voiture, ne fonctionne pas. Dès lors le transport collectif, notamment celui caractérisé par le site propre, semble être une alternative crédible. Par conséquent, les années 1970 seront riches en initiatives qu'elles soient politiques, ou industrielles.

Au cours de cette période, certaines villes feront le choix du métro comme Marseille, Lyon ou encore Lille dans les années 1980. Paris est doté d'un réseau métropolitain depuis le début du 20ème siècle. L'expérience parisienne influencera les autres villes françaises ayant pour projet de mettre en œuvre un métro notamment au travers du matériel roulant sur pneumatiques.

Pour les autres villes, où la mise en œuvre d'un métro n'est pas adaptée, le choix du TCSP de surface s'impose. Le « renouveau » du transport collectif s'inscrit obligatoirement dans un partage de la voirie jusqu'ici très majoritairement utilisé par l'automobile. Désormais, le tissu urbain doit s'adapter à l'intégration des nouveaux systèmes de transport TCSP.

Les premiers projets d'intégration de transport collectif dans le tissu urbain sont portés par l'arrivée du tramway « moderne » à partir de 1985 à Nantes. La réintroduction de tramway devient, en plus d'un nouveau modèle de mobilité urbaine, un outil de réaménagement et de reconquête de l'espace dédié aux circulations.

Cette nouvelle approche ne se limitera pas au seulement au système tramway car très vite la question de l'intégration de l'autobus se pose. Inspiré du modèle BRT du continent américain, le modèle BHNS sera construit pour les villes européennes. Là encore, la réservation de l'espace dédié aux circulations s'impose.

La lecture de l'histoire du transport collectif sous l'angle de l'évolution des techniques montre que les systèmes de transport possédant leurs propres espaces de circulation tendent vers l'automatisation de la conduite et de la surveillance du fonctionnement global. L'évolution technique du métro le démontre. Concernant les systèmes de surface, la dynamique actuelle de recherche s'oriente également vers l'automatisation même si cette dernière est essentiellement visible au travers de navettes autonomes exploité dans des conditions très particulière. Aujourd'hui, les industriels et les opérateurs mènent des réflexions sur l'automatisation des déplacements des véhicules en dehors des trajets commerciaux. Les

véhicules pourraient par exemple réaliser eux-mêmes les trajets à l'intérieur du dépôt pour le nettoyage et le stationnement sur le parc.

Nous considérons que lorsque le système de transport est isolé des autres circulations, la technique peut se substituer aux actions humaines de conduite.

Pour les systèmes de transport circulant sur voie banalisée, les opérateurs cherchent à hiérarchiser les axes lourds en accordant des évolutions notamment à l'aide de la réservation de voirie, priorité de passage aux carrefours et identification visuelle forte. Cette évolution tend vers le concept BHNS. Ces nouveaux axes forts sont constitués de lignes permettant la mise en œuvre d'un réseau différencié. On peut citer en exemple les lignes d'autobus « chronobus » des villes de Nantes et de Grenoble mais aussi les lignes d'autobus structurantes de Strasbourg préfixées L.

Pour rivaliser d'une part avec le transport individuel et d'autre part, faire face à la demande accrue de mobilité des citoyens, les différents systèmes de transport collectif se doivent d'être performants et capacitaires.

Dans la suite de notre réflexion, nous porterons un intérêt à la contextualisation du concept de performance ainsi qu'à l'analyse du fonctionnement des systèmes de transport collectif.

Chapitre 2 : Approche de la performance opérationnelle et description fonctionnelle du système de transport collectif

1. Introduction

Au cours de ce deuxième chapitre, nous souhaitons proposer une vue d'ensemble du système de transport collectif à l'aide de quelques modélisations existantes. Ensuite, nous discuterons de la performance dans le secteur du transport collectif et nous nous attacherons à positionner la notion de performance opérationnelle que nous tenterons de définir. Enfin, nous décrirons l'aspect fonctionnel d'un système de transport reposant sur une exploitation omnibus qui correspond au mode d'exploitation le plus répandu. Au cours de cette description fonctionnelle, nous aborderons le dimensionnement du système et sa planification ainsi que différentes mesures pratiquées une fois mis en œuvre. Nous constaterons que les approches pour le dimensionnement et la planification sont identiques pour tous les systèmes, de l'autobus conventionnel au métro totalement automatisé.

Nous constaterons que la littérature abordant les sujets techniques en relation avec l'exploitation des systèmes de transport collectif demeure très limitée. Les pratiques et connaissances relatives d'une part au domaine de la construction d'une offre de transport (tableau de marche) et d'autre part au domaine de la régulation d'un système de transport sont très peu diffusées et demeurent, de manière générale, un domaine réservé aux praticiens.

« L'établissement des tableaux de marches et la gestion des conducteurs sont des domaines réservés à quelques rares spécialistes, dans chaque réseau, dont le savoir-faire se transmet le plus souvent de manière empirique, par des formations « sur le tas ».¹⁰²

La démarche choisie repose sur l'existence à la RATP d'un savoir empirique très important, forgé par des années d'expériences de la régulation, mais qui demeure pour l'essentiel confiné dans les PC, et que l'on va chercher à formaliser¹⁰³ ».

Les quelques rares ouvrages techniques décrivant ces pratiques datent essentiellement des années 1970 et 1980. Par conséquent, nous considérons qu'un recueil des connaissances fondamentales est nécessaire, même si celles-ci reposent essentiellement sur l'exploitation des autobus, car les fondements empiriques et théoriques sont transposables aux différents systèmes, reflet du caractère universel de l'aspect fonctionnel.

Au cours des différents entretiens menés au cours de cette recherche, nous avons remarqué que les fondamentaux théoriques sont aujourd'hui méconnus des praticiens. Cela peut s'expliquer par le développement d'outils informatiques qui jouent un rôle de « boîte noire » et de l'industrialisation de la construction de l'offre de transport.

Nous rassemblerons ici un certain nombre de connaissances fondamentales relatives au fonctionnement d'un système de transport collectif en milieu urbain. Nous constaterons qu'il existe une terminologie permettant de définir un certain nombre de termes en lien avec l'exploitation. Cependant, nous considérons que cette terminologie nécessiterait d'être complétée et standardisée pour la bonne compréhension du domaine de « l'exploitation ».

¹⁰² Poupard, X. *Méthodes d'exploitation : Etablissement des tableaux de marches, gestion des conducteurs*. SCET, 1982, 164 p.

¹⁰³ Froloff, E, Rizzi, M, Saporito, A. *Bases et pratiques de la régulation*. RATP, 1989, 174 p.

2. L'approche systémique du système de transport

2.1 L'approche systémique : éléments de définition

Nous estimons que la compréhension du fonctionnement d'un système de transport nécessite une approche systémique notamment du fait de l'existence de multiples interactions entre les différents éléments constituant ce système. La systémique étudie la totalité des éléments du système ainsi que leurs interrelations et interdépendances.

L'approche systémique est une approche différente de l'approche classique rationaliste. Elle peut également porter le nom de « Théorie générale des systèmes ».

Le concept moderne de système s'est progressivement dégagé, lors des grandes opérations militaires de la seconde guerre mondiale, au cours de la seconde moitié du 20^{ème} siècle dans des branches variées des sciences et des techniques et à travers des recherches scientifiques, et l'établissement des comptabilités économiques nationales (Durand, D. 2013¹⁰⁴).

Nous donnons ici quelques définitions du terme « système » (Durand, D. 2013) :

- Une totalité organisée, faite d'éléments solidaires ne pouvant être définis que les uns par rapport aux autres en fonction de leur place dans la totalité,
- Ensemble d'unités en interrelations mutuelles,
- Ensemble d'éléments liés par un ensemble de relations.

Comme le rappelle D. Durand, ces définitions très proches mettent en avant la notion d'interrelations et de totalité.

Nous pouvons compléter ces premières définitions par celles qui suivent :

- Ensemble d'éléments en interaction dynamique, organisés en fonction d'un but (*de Rosnay*) ;
- Objet complexe, formé de composants distincts reliés entre eux par un certain nombre de relations (*J. Ladière*) ;
- Unité globale organisée d'interrelations entre éléments, actions et individus (*E. Morin*).

Afin de bien comprendre la notion de système, rappelons ici les quatre concepts fondamentaux :

- L'interaction : double relation causale de A vers B et de B vers A,
- La globalité : le système est un tout non réductible à ses parties,
- L'organisation : aspect structurel et fonctionnel,
- La complexité : tient compte de l'aléatoire ou de l'incertain.

L'aspect structurel d'un système intègre des frontières, des éléments, un réseau de relations et des réservoirs. L'aspect fonctionnel intègre quant à lui les flux, des centres de décision, des boucles de rétroaction et des délais de réponse.

¹⁰⁴ Durand, D. *La systémique*. PUF, collection Que sais-je ?, Paris, 2013, 128 p.

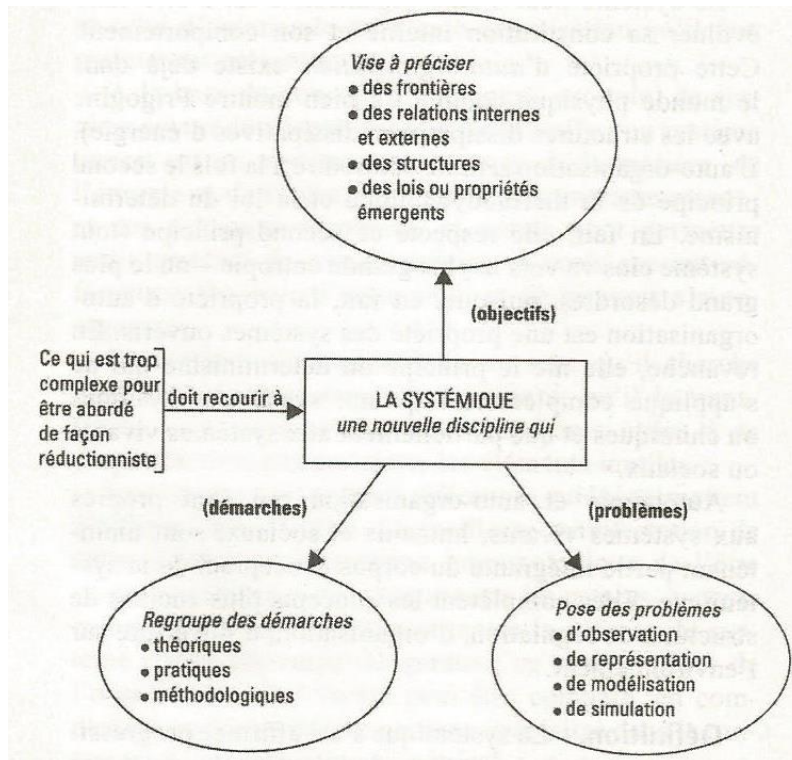


Figure 34 : Représentation graphique de la définition de la systémique

Source : Durand, D. 2013

Le fonctionnement d'un système de transport reste, aujourd'hui encore, très peu décrit. Cependant, nous disposons de quelques études, issues notamment de la RATP, proposant quelques descriptions du système. A partir de ces bases, nous tenterons de construire une représentation schématique plus étendue dans la suite du document.

2.2 Modélisation fonctionnelle

A partir de 1974, La RATP met en œuvre une recherche opérationnelle afin d'obtenir une modélisation du fonctionnement d'une ligne d'autobus. Nous reprenons ci-dessous les principaux éléments tirés d'un article d'Edith Heurgon paru en 1981¹⁰⁵.

Afin de structurer le champ d'étude, l'auteur souligne l'importance de la modélisation du système. Tout d'abord, il est essentiel de distinguer ses principaux composants au niveau organique, fonctionnel et génétique. Cette organisation en trois niveaux (organique, fonctionnel et génétique) est issue de l'ouvrage *La théorie du système général*¹⁰⁶ de J-L. Le Moigne paru en 1977.

« Le cadre dans lequel viendra s'inscrire la description de l'objet à modéliser (l'observé) : ces trois visions, la fonctionnelle, l'organique et l'historique, devront se joindre et s'imbriquer, révélant par leur compatibilité mutuelle la légitimité de l'hypothèse initiale : ce que l'on modélise

¹⁰⁵ Heurgon, E. « Modéliser une ligne d'autobus pour mieux comprendre les phénomènes d'irrégularité ». *Revue française d'automatique, d'informatique et de recherche opérationnelle*. Recherche opérationnelle, 1981, tome 15, n° 4, p. 305-316.

¹⁰⁶ Le Moigne, J-L. *La théorie du système général*. PUF. Paris, 1977, 258 p.

est bien modélisable ; pour cet observateur, il dispose d'une identité spécifique et spécifiable. »
(Le Moigne, J-L, 1977)

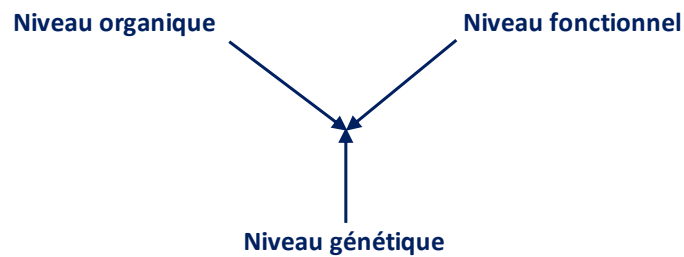


Figure 35 : Les composantes de la modélisation d'un système de transport collectif

Source : Auteur

Pour Edith Heurgon, le **niveau organique** d'une ligne d'autobus comprend les composants suivants :

- Les infrastructures (points d'arrêt, terminus, bandes de roulement...),
- Les véhicules,
- Le personnel d'exploitation,
- Les voyageurs.

Le **niveau fonctionnel** résulte de l'imbrication de deux processus principaux :

- Processus d'immobilisation des véhicules aux arrêts pour les mouvements voyageurs,
- Processus de parcours inter-arrêts.

Ces deux processus sont régis par différents mécanismes suivant les horaires, la régulation ainsi que le comportement de différents protagonistes (voyageurs, conducteurs, contrôleurs etc.).

Enfin, pour l'auteur, une ligne d'autobus se caractérise également par sa genèse (**niveau génétique**). Depuis sa création et tout au long des années, elle accumule des expériences, discerne des spécificités, instaure des habitudes. Son exploitation et notamment l'établissement de ses horaires ne se définit non pas à chaque fois sur une élaboration nouvelle mais par de légères déformations successives qui intègrent les écarts détectés dans son fonctionnement.

Cette recherche portant sur la modélisation du système de transport, a permis également, grâce à des enquêtes sur le terrain, de modéliser plus finement les principaux processus aléatoires notamment au niveau fonctionnel.

Le processus du parcours inter-arrêts a été décomposé en deux sous – modèles :

- Le temps de parcours en régime fluide tient compte des caractéristiques de la voirie : couloir de circulation, feux, rues étroites. Il est modélisé sous forme implicite par des lois Gamma ¹⁰⁷;

¹⁰⁷ Loi Gamma est un type de loi de probabilité de variables aléatoires réelles positives utilisées pour modéliser une grande variété de phénomènes, et tout particulièrement les phénomènes se déroulant au cours du temps.

- Le temps de parcours en régime de congestion tient compte des stationnements hors points d'arrêt, qu'ils résultent de la circulation ou des perturbations comme les livraisons etc. Il est modélisé par des lois binomiales pour l'apparition de la congestion, par des lois exponentielles pour sa valeur.

Le processus d'immobilisation aux arrêts tient compte du nombre de voyageurs montants, descendants, de la charge de l'autobus et de la proportion d'habitueés de la ligne. Les arrivées de voyageurs, supposées se faire au hasard, sont modélisées par des lois de Poisson, tandis que leur destination est caractérisée par des lois multinomiales¹⁰⁸.

Ne serait-il pas nécessaire de faire une réserve sur l'approche qui consiste à intégrer les voyageurs au niveau organique ? Certes le nombre de voyageurs (appelé « charge » à la RATP) est un élément constitutif de la ligne mais n'est-il pas aussi une résultante du fonctionnement du système ?

2.3 Schématisation d'un système « Transport » : vision de la régulation

L'ouvrage de la RATP de 1989 intitulé *Bases et pratique de la régulation* propose un schéma permettant de visualiser le fonctionnement d'un système de transport au travers la vision de la régulation.

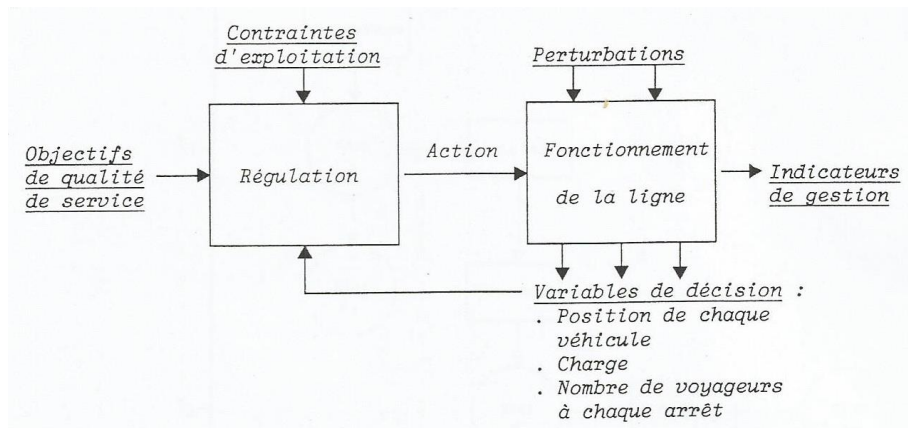


Figure 36 : Schéma d'un système de transport : Vue de la régulation

Source : Froloff, E et al. 1989

Cette représentation se compose de deux éléments principaux :

- Le sous-système de fonctionnement,
- Le sous-système de régulation.

« Le sous-système de fonctionnement de la ligne proprement dit, dont l'état à un instant donné est décrit par un ensemble de variables (position et charge des bus, voyageurs en attente aux arrêts).

Le sous-système de régulation analyse les écarts existants entre les objectifs de qualité de service et la réalité, et met en œuvre des actions susceptibles de les combler, compte tenu

¹⁰⁸ La loi binomiale concerne le nombre de succès dans n épreuves de Bernouilli indépendantes donnant chacune un résultat binaire, comme dans le jeu de pile ou face.

des contraintes liées à l'exploitation (niveau des moyens disponibles et règles d'utilisation de ces moyens » (Froloff, E et al. 1989).

Les écarts entre les objectifs et la réalité sont de différents types. On peut citer les suivants :

- Perturbations liées aux conditions de circulation et se répercutant sur les temps de parcours,
- Variations dans la configuration de la fréquentation,
- Perturbations liées au matériel roulant,
- Problème afférant au personnel machiniste.

Cela nous permet de mettre en avant le caractère aléatoire du sous-système dit « fonctionnement ». En 1981, Edith Heurgon décrivait les processus aléatoires du niveau fonctionnel.

2.4 Schématisation d'un système « Transport » : vision temporelle

Le système de transport est « ouvert » car en relation avec son environnement urbain (itinéraire, voirie, circulations...). En effet, son fonctionnement pourra être modifié en fonction d'éléments extérieurs propres à son environnement dans lequel il évolue. On peut toutefois spécifier que les niveaux d'influence de l'environnement sont liés au degré d'ouverture du système. Certains systèmes sont fortement influencés par leur environnement et d'autres moins (système en surface versus système en souterrain/viaduc).

Le système de transport possède donc une dimension spatiale et temporelle. En effet, les véhicules dédiés à une ligne circulent sur un itinéraire défini avec des heures de début et de fin de service.

Au cours d'une journée, le fonctionnement d'un système de transport est susceptible d'évoluer selon différentes configurations. Par conséquent, il dispose d'une capacité à se réinventer.

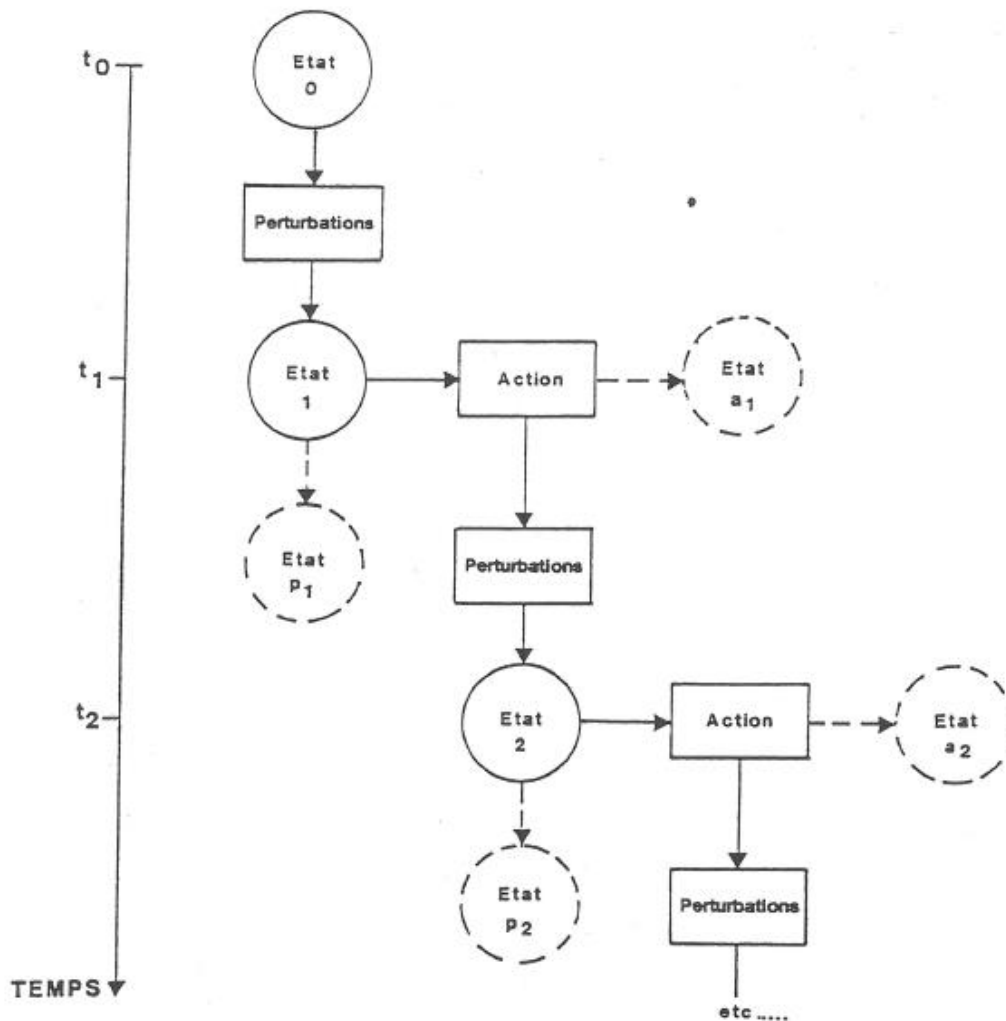


Figure 37 : Evolution du fonctionnement d'un système de transport au cours d'une période donnée

Source : Froloff, E et al. 1989

La représentation ci-dessus (figure 37) schématise l'évolution du fonctionnement d'un système de transport. Nous avons un état 0 (isomorphe aux objectifs d'exploitation) qui subit une ou plusieurs perturbations. Cet état 0 se transforme en état 1 (éloignement de du système optimum). Si aucune intervention n'est engagée par l'exploitant, l'état 1 continuera à se dégrader en un état P1. Cependant, en t1, l'exploitant interroge le système et met en œuvre un ensemble d'actions permettent de passer de l'état 1 à un état a1 (isomorphe aux objectifs d'exploitation). Ce processus peut se répéter plusieurs fois au cours d'une journée d'exploitation.

Pour la suite de notre démonstration, nous réutiliserons l'approche d'Edith Heurgon, inspirée par Jean-Louis Le Moigne, qui intègre, pour le système transport, les composantes organique, fonctionnelle et génétique.

2.5 Proposition d'une schématisation d'un système « Transport »

En s'inspirant des trois approches précédentes, nous tentons de proposer une schématisation plus complète (figure 38).

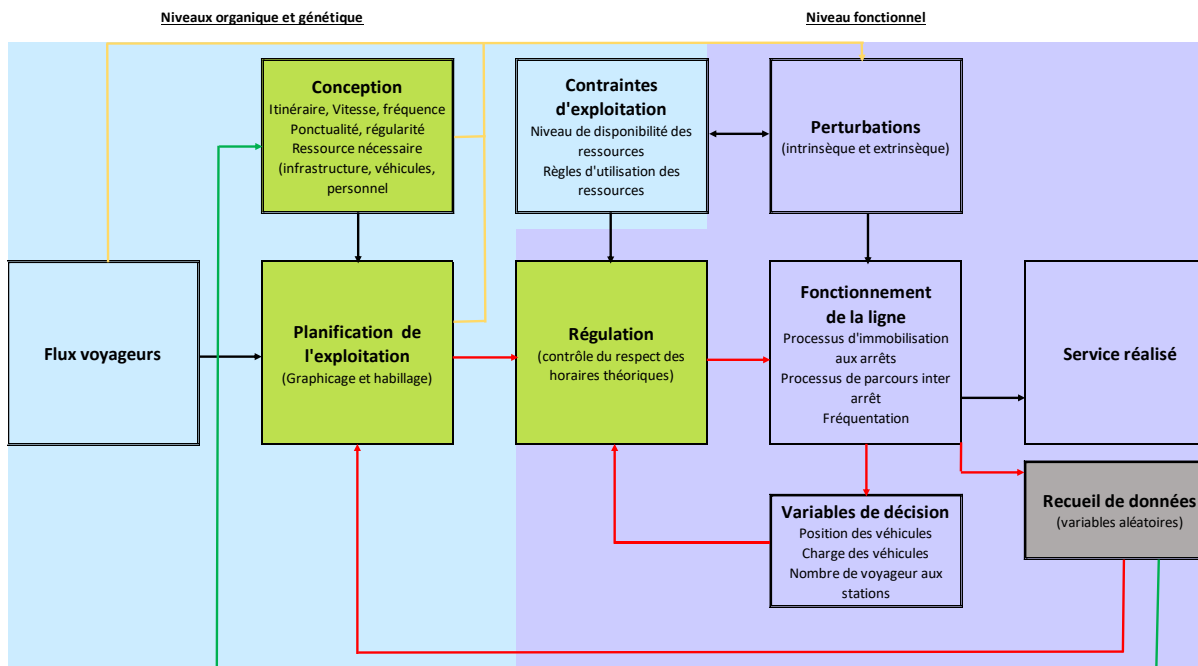


Figure 38 : Proposition d'une schématisation d'un système de transport collectif

Source : Auteur

Les niveaux organique et génétique intègrent quatre éléments :

- Flux voyageurs
Le flux voyageurs correspond à la demande de transport. Celle-ci doit être quantifiée dans un repère espace-temps car il existe une variation de la demande en fonction des heures de la journée et des arrêts de la ligne. Ces données sont essentielles à la planification de l'offre. Il est également important de s'intéresser à la manière dont les voyageurs arrivent sur le système de transport à savoir si leur arrivée est hasardeuse ou bien anticipée. Nous verrons dans la suite du document que cela dépend des fréquences de passage des véhicules aux arrêts.
- Conception
Cet élément décrit l'ensemble des ressources nécessaires à la mise en œuvre d'un service ainsi que les niveaux de qualité attendue. L'itinéraire de la ligne, le nombre de stations, les niveaux de réservation, le type de véhicule, les fréquences de passage y sont formalisés.
- Planification de l'exploitation
Cet élément correspond à la mise en forme de l'élément précédent. Généralement cette mise en forme se fait à l'aide d'un Tableau de Marche contenant le type de véhicules à utiliser ainsi que leurs horaires. Le Tableau de Marche est défini et expliqué au point 5.3.3.

- Contraintes d'exploitation
Cet élément correspond au niveau de disponibilité des ressources. En effet, les véhicules ainsi que, le cas échéant les conducteurs, peuvent être indisponibles pour une certaine durée. De plus, la réglementation aussi bien pour le personnel de conduite que le matériel roulant oblige à respecter certaines règles. Ces indisponibilités de ressources, prévisibles et imprévisibles, sont à prendre en considération dans le cadre de la mise en œuvre du système de transport.

Le niveau fonctionnel intègre quant à lui les six éléments suivants :

- Perturbation
Cet élément regroupe tous les facteurs propres au système ainsi qu'à son environnement qui vont influencer son fonctionnement. En ce qui concerne les perturbations « intrinsèques », on peut citer par exemple une panne matérielle ou encore un dysfonctionnement d'une infrastructure du système. Pour les perturbations « extrinsèques », on peut citer par exemple la congestion des voies de circulation ou encore une affluence de voyageurs.
- Régulation
L'élément « régulation » correspond à toutes les actions humaines qui permettent à l'instant T de maintenir le fonctionnement de la ligne au plus près de sa planification théorique en respectant les critères de qualité. L'élément « régulation » sera décrit au point 7.
- Fonctionnement de la ligne
Cet élément représente la réalité des conditions de fonctionnement du système à l'instant T (position des véhicules, intervalles...)
- Variable de décisions
Cet élément correspond au contenu des informations disponibles sur le fonctionnement de la ligne et à la vitesse de retour de ces informations vers le centre de décision « Régulation ».
- Service réalisé
Cet élément correspond, une fois la mise en œuvre du système achevée, au niveau d'offre réelle ainsi qu'à sa qualité.
- Recueil de données
Cet élément correspond à la mesure du fonctionnement de la ligne. Cette mesure est essentielle pour comprendre les conditions de fonctionnement des systèmes. Les éléments mesurés, en fonction de leur fiabilité et précisions, permettront d'améliorer la planification et la conception des systèmes.

3. La performance multidimensionnelle du transport collectif

3.1 Une approche de la notion de la performance

Aborder le sujet de la performance des systèmes de transports est une chose relativement complexe. Pour P. Zembri (2012)¹⁰⁹, la performance des tramways et plus largement des systèmes de transport est un angle mort de la recherche.

Cependant, le terme performance est largement utilisé dans la presse spécialisée notamment lorsque la question du BHNS est abordée. Bon nombre d'articles abordent la performance sans véritablement la définir. Si le terme de performance est fréquemment utilisé dans le secteur des transports, ce concept fait souvent référence à des dimensions très diverses. Cela est le reflet de la polysémie¹¹⁰ du mot.

B. Faivre d'Arcier (2012) précise que « *la performance est généralement assimilable à un rendement, elle renvoie le plus souvent à la notion de rapport qualité/prix, intégrant aussi bien l'idée d'efficacité (sur le plan socio-économique) que d'efficience* »¹¹¹.

Pour Jean-Cyril Spinetta (2018), la « *performance* » du transport ferroviaire s'apprécie sur plusieurs critères : *l'intensité de l'offre et les trafics voyageurs, la sécurité et la qualité de service.*¹¹²

Dans les dictionnaires de langue française, la performance est définie comme un constat officiel enregistrant un résultat accompli à un instant t, toujours en référence à un contexte, à un objectif et un résultat attendu, et ce quel que soit le domaine (Notat, 2007¹¹³).

Dans la pratique on constate que la performance est un concept flou et multidimensionnel qui en définitive ne prend de sens que dans le contexte dans lequel il est employé (M. Salgado 2013). Soulignons l'importance de la contextualisation du terme « performance ».

La recherche universitaire dédiée à l'étude des organisations en sciences de gestion notamment pour l'évaluation des entreprises, porte un intérêt particulier au concept de « performance ».

¹⁰⁹ Zembri, P. « La conception des transports collectifs en site propre (TCSP) en France : des tracés problématiques ? » *Revue Géographique de l'Est*, vol. 52 / 1-2 | 2012, mis en ligne le 04 février 2013, URL : <http://rge.revues.org/3603>

¹¹⁰ La polysémie est la caractéristique d'un mot ou d'une expression qui a plusieurs sens ou significations différentes. On le qualifie de polysémique.

¹¹¹ Faivre d'Arcier, B. *Mesure de la performance des lignes de transport public urbain. Projet APEROL. Amélioration de la Performance Economique des Réseaux par l'Optimisation des Lignes*. 2012, 103 p.

¹¹² Spinetta, J-C. *L'avenir du Transport ferroviaire : Rapport au premier ministre*. 2018, 127 p.

¹¹³ Notat NN., « une question centrale », *Acteurs de l'Économie*, dossier spécial Performance, octobre 2007, p. 72.

Marion et al. (2012)¹¹⁴ signalent que dans l'univers de l'entreprise, la performance peut être définie comme : le résultat d'une action (Bouquin, 2004¹¹⁵), le succès de l'action (Bourguignon, 1995)¹¹⁶, ou bien à partir des modes d'obtention du résultat (Baird, 1986¹¹⁷).

Le sens de la performance repose soit sur le résultat, soit sur le bilan d'une action, soit sur l'action elle-même. Le sens de la performance a influencé naturellement l'approche retenue pour l'évaluer. Par conséquent, en fonction de la finalité recherchée, l'évaluation/définition de la performance se fait selon un processus défini. En définitive, la notion de performance repose sur la grille de lecture que l'on souhaite réaliser.

Pour R.H Hall ¹¹⁸(1980) le domaine de l'étude de la performance des entreprises distingue trois voies majeures :

- L'approche par le but (goal achievement),
- L'approche par les ressources (resource acquisition model),
- L'approche de la satisfaction des parties prenantes.

Une fois définie, la performance doit être mesurée. Il paraît souhaitable de se rattacher à une définition particulière de la performance (contextualisée selon une grille de lecture) pour ensuite choisir sa mesure ¹¹⁹(C. Gauzente 2000). Cependant, certaines définitions nécessitent la mise en œuvre de solutions de mesures plus ou moins praticables. La réalité des données et informations disponibles vient contraindre la démarche de mesures. Cette dimension est essentielle et doit être prise en compte pour la mesure de la performance des systèmes de transport. Le tableau ci-dessous (tableau 5) met en relation les conceptions de la performance de RH Hall (1980) et ses mesures correspondantes.

Définition de la performance	Cadre théorique sous-jacent	Dimensions à mesurer
Degré d'atteinte d'objectifs	<ul style="list-style-type: none"> • rationnel économique • relations humaines 	<ul style="list-style-type: none"> • économiques et financières • humaines
Capacité d'acquisition de ressources	<ul style="list-style-type: none"> • systémique • contingence 	<ul style="list-style-type: none"> • adaptation à l'environnement • efficacité • complémentarité des sous-systèmes
Satisfaction de groupes variés	<ul style="list-style-type: none"> • politique 	<ul style="list-style-type: none"> • autant de dimensions que d'acteurs concernés

Tableau 5 : Les conceptions de la performance et les dimensions à mesurer

Source : C. Gauzente 2000

¹¹⁴ Marion A., Asquin A., Everaere C., Vinot D., Wissler M., *Diagnostic de la performance d'entreprise, Concepts et Méthodes*, Dunod, 2012, 304 p.

¹¹⁵ Bouquin H., *Le contrôle de gestion*, PUF, Collection Gestion, 6^{ème} édition, Paris, 2004, 508 p.

¹¹⁶ Bourguignon, A. « Peut-on définir la performance ? », *Revue Française de Comptabilité*, juillet- août 1995, p. 61-66.

¹¹⁷ Baird L., *Managing Performance*, John Willey, 1986.

¹¹⁸ Hall R.H, « Effectiveness Theory and Organizational Effectiveness », *The Journal of Applied Behavioral Science*, 1980, vol. 16, p. 536-545.

¹¹⁹ Gauzente, C. « Mesurer la performance des entreprises en l'absence d'indicateurs objectifs : quelle validité ? Analyse de la pertinence de certains indicateurs ». *Finance Contrôle Stratégie – Volume 3*, N° 2, juin 2000, p. 145 – 165.

De manière plus générale, les logiques d'évaluation de la performance peuvent être organisées comme suit (Marion et al., 2012) :

- **L'efficacité** qui traduit l'aptitude de l'entreprise à atteindre ses objectifs, en rapportant les résultats aux objectifs ;
- **L'efficience** qui met en relation les résultats et les moyens, en rapportant un indicateur de résultat à un indicateur de mesure des capitaux employés ;
- **La cohérence** qui traduit l'harmonie des composants de base de l'organisation pour mesurer la performance organisationnelle en rapportant les objectifs aux moyens
- **La pertinence** qui met en relation les objectifs ou les moyens avec les contraintes de l'environnement. La pertinence permet d'évaluer la performance dans le domaine stratégique, c'est-à-dire l'avantage concurrentiel à partir d'une appréciation entre l'adéquation des éléments de l'offre (créateurs de valeur) et les attentes du marché.

Pour Gibert (1980)¹²⁰ la performance se positionne au centre d'un triangle regroupant les notions d'efficience, d'efficacité et de pertinence (figure 39).

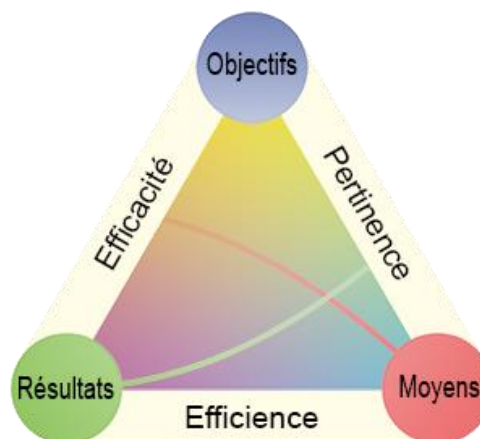


Figure 39 : Triangle de la performance

Source : Gibert, P 1980

- l'axe objectifs-résultats définit l'efficacité comme relative à l'utilisation des moyens pour obtenir des résultats donnés dans le cadre d'objectifs fixés ; c'est-à-dire l'atteinte des objectifs.
- l'axe résultats-moyens définit l'efficience comme le rapport entre l'effort produit et les moyens totaux déployés dans une activité ; c'est-à-dire l'atteinte des objectifs avec le moindre coût.
- l'axe moyens-objectifs définit la pertinence comme le rapport entre les moyens déployés et les objectifs à atteindre ; c'est-à-dire la bonne allocation des ressources.

¹²⁰ Gibert, P. *Le contrôle de gestion dans les organisations publiques*. Paris : Editions d'Organisation, 1980, 239 p.

3.2 La performance du service de transport collectif

La partie précédente nous a permis de mettre en avant le caractère multidimensionnel de la performance. Tout comme nous l'avons indiqué, une fois définie, la performance doit être mesurée. La mesure de la performance doit être associée à des indicateurs de performance. « *Un indicateur de performance est une information devant aider un acteur, individuel ou plus généralement collectif à conduire le cours d'une action vers l'atteinte d'un objectif ou devant lui permettre d'en évaluer le résultat* »¹²¹.

De plus, la mise en œuvre d'un indicateur de performance doit être associée aux éléments ayant un impact sur celui-ci : les inducteurs de performance. L'inducteur de performance est le facteur qui influe sur la performance d'une activité ou de tout un processus¹²².

Pour le domaine du transport public de voyageurs, l'Institut de la Gestion Déléguée (IGD) et l'Association des Maires de France (AMF) ont publié en mars 2008 un document regroupant une liste d'indicateurs de performance¹²³. Ce document a pour objectif de mettre à disposition des collectivités un outil permettant de comparer l'évolution du service de transport public dans le temps et avec d'autres réseaux. Les auteurs de ce document rappellent que l'analyse de la performance des réseaux de transport se distingue des autres services publics en deux points :

- « *d'une part, la performance des services de transport public ne réside pas uniquement dans la qualité du service offert en cours de déplacement, mais également dans l'accès qu'elle permet aux différentes aménités urbaines (lieux de travail, d'études, de services, de commerces).*
- *d'autre part, les transports collectifs ne constituent qu'un moyen parmi d'autres (marche, vélo, voiture particulière) pour répondre aux besoins de mobilité des personnes (tout le monde a un robinet d'eau dans son logement, mais tout le monde n'est pas usager des transports collectifs) ; ils s'insèrent dans l'organisation globale d'un système de déplacements, défini par l'ensemble des infrastructures de transport, les modes et les services disponibles, ainsi que l'offre de stationnement.* » (p. 5)

Pour ces raisons, les auteurs indiquent également que l'analyse de la performance des transports publics s'intègre dans trois domaines complémentaires et interdépendants qui sont :

- La sphère des transports collectifs (caractéristiques des infrastructures, du matériel, des services offerts),
- La sphère des déplacements (l'organisation globale du système de déplacements)
- La sphère urbaine (fonctionnement du système urbain dans son ensemble).

Ce document regroupe donc 14 indicateurs principaux et 15 indicateurs complémentaires ce qui permet d'établir un tableau de bord de mesure de la performance.

Les indicateurs de performance s'articulent autour de six grands items qui sont :

¹²¹ Bonnefous, C. and A. Courtois. *Indicateurs de performance*. Paris, Hermès Science. 2011. 282 p.

¹²² Addouche, S. Dafaoui EM, El Mhamedi, A. *Identification des relations entre inducteurs et indicateurs de performance des processus d'entreprise. Conception et Production Intégrées*. Casablanca (Maroc), 2005, 17 p.

¹²³ IGD et AMF. *Charte des services publics locaux. Indicateurs de performance des services de transport public*. 2008, 66 p.

- 1. Faciliter l'accès des territoires aux citoyens par une offre de service adaptée : travail, commerce, loisirs, santé, école, etc.
- 2. Favoriser l'accessibilité de tous aux transports publics,
- 3. Réduire les impacts du transport individuel par l'attractivité des transports publics,
- 4. Développer la relation citoyenne,
- 5. Participer à la qualité environnementale par un fonctionnement propre,
- 6. Garantir un fonctionnement économique acceptable pour l'utilisateur et pour la collectivité.

Ensuite, chaque item se décompose en un certain nombre d'indicateurs. Le tableau 6 ci-dessous détaille les indicateurs du premier item.

	INDICATEUR URBAIN		INDICATEUR INTERURBAIN	
	Indicateur « majeur »	Indicateur « complémentaire »	Indicateur « majeur »	Indicateur « complémentaire »
1. Faciliter l'accès des territoires aux citoyens : travail, commerce, loisirs, santé, école, etc. (par une offre de service adaptée)				
1.1 Accès physique	(1) - Kilomètres commerciaux par habitant du PTU (2) - Déplacements par habitant du PTU	- Kilomètres commerciaux par longueur des lignes - Densité de population	(1) - Kilomètres commerciaux par habitant, y compris scolaires, y compris dans les PTU	- Taux de communes desservies en dehors des PTU - Part de la population desservie en dehors des PTU
1.2 Accès temporel	(3) - Amplitude	- Taux de services fonctionnant le samedi - Taux de services fonctionnant le dimanche	(2) - Part des services aller/retour fonctionnant pendant les petites vacances scolaires	- Taux de services fonctionnant le samedi - Taux de services fonctionnant le dimanche
1.3 Continuité entre réseaux (intermodalité)	(4) - Part des déplacements intermodaux		(3) - Part des déplacements intermodaux	- Existence d'un titre intermodal ?

Tableau 6 : Exemples d'indicateurs de performance pour le transport public

Source : IGD et AMF. 2008

Cette série d'indicateurs est utilisable par les collectivités locales et permet d'obtenir une vue assez complète du niveau de performance du service offert dès lors qu'il est possible de le comparer dans le temps ou bien avec d'autres services de transport public comparables. En revanche, Bruno Faivre d'Arcier indique que « *si cette démarche répond bien à des objectifs de pilotage de l'action publique, elle reste cependant peu explicative des résultats obtenus et ne permet pas d'identifier les sources d'(in)efficacité du réseau. Elle répond ainsi plus à une nécessité managériale qu'à une compréhension des facteurs explicatifs de la performance* ».

124

3.3 La mesure de la performance économique : une focalisation sur l'efficacité

Comme l'indique Bruno Faivre d'Arcier dans le cadre du projet APEROL (2012), de nombreux économistes privilégient, dans le cadre de la mesure de la performance des transports collectifs, l'efficacité de type productive, définie comme le rapport entre les inputs (capital, travail, énergie...) et les outputs (véhicules-kilomètres produits).

La notion d'efficacité est différente de la notion d'efficacités. L'efficacité se définit comme un rapport optimal entre les moyens mobilisés et le résultat obtenu. En revanche, l'efficacités se définit comme un niveau d'atteinte d'un objectif fixé. Comme le rappelle Baumstark et al. (2005), « *L'objectif n'étant pas défini, l'efficacités n'est pas évaluable. Ce cas est symptomatique d'un grand nombre d'évaluations. Les objectifs des politiques sont très rarement précisés. L'efficacité peut apparaître comme une dimension plus facile à évaluer, et toute aussi importante que l'efficacités. En particulier, lorsque les objectifs opérationnels ne*

¹²⁴ Faivre d'Arcier, B. *Mesure de la performance des lignes de transport public urbain. Projet APEROL. Amélioration de la Performance Economique des Réseaux par l'Optimisation des Lignes*. 2012, 103 p.

sont pas spécifiés, il est toujours possible, ex post, de mesurer l'efficacité à partir des résultats et des moyens observables (les objectifs ne sont pas observables ex post) ». ¹²⁵

Baumstark et al. (2005), distingue deux types d'efficacité qui dépendent de la nature des données de sortie considérées (outputs) :

- L'efficacité productive : l'output considéré est l'offre réalisée (niveau de service, le plus souvent exprimé en véhicules-kilomètres produits).
- L'efficacité commerciale, qui met l'accent sur l'usage de cette offre (mesurée le plus souvent par le taux d'utilisation, défini comme le nombre de voyages par véhicule-km).

Le schéma qui suit (figure 40) permet de visualiser les deux types d'efficacité.

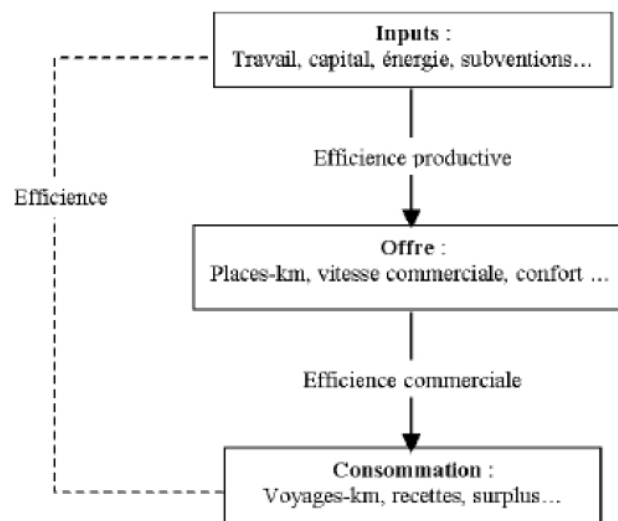


Figure 40 : Relation entre efficacité productive et efficacité commerciale

Source Baumstark et al. 2005

La notion d'efficacité productive est généralement abordée au travers du mode de gestion des réseaux de transports. Le type de mode de gestion permet de gérer avec plus ou moins d'efficacité l'outil de production composé de capitaux financiers, de ressources humaines, de matériels roulants, etc.

L'efficacité commerciale est une notion largement utilisée par les exploitants de réseaux de transport public de voyageurs. Elle est définie comme le nombre de voyages dans les deux sens, divisé par le total des véhicules.km commerciaux (haut-le-pied non compris) : $Voy/km.V$

Généralement, cet indicateur intègre la globalité des différentes courses qui constitue l'offre complète de la ligne (Aller et retour). Celui-ci peut être également agrégé à l'échelle d'un réseau. Une vision de cet indicateur par course pourrait mettre en lumière un certain nombre de pistes d'optimisation.

Le V/K permet de suivre l'évolution de l'efficacité pour un système donné et de réaliser des comparaisons inter-systèmes. En revanche, la comparaison intra-système reste discutable car

¹²⁵ Baumstark, L. Ménard, C. Roy, W. Yvrande-Billon, A. *Modes de gestion et efficacité des opérateurs dans le secteur des transports urbains personnes*. Prédit 3, groupe 1, Mobilités, territoire et développement durable. 2005, 154 p.

le V/K ne permet pas une prise en compte de la capacité d'emport des véhicules. Or cette donnée impacte de manière significative le résultat obtenu.

De plus, le V/K ne permet pas de prendre en compte la distance moyenne parcourue par les voyageurs. Que la distance moyenne parcourue soit de 100 mètres ou 2 kilomètres, cela n'a aucune incidence sur la valeur du V/K. En réalité, cette distance moyenne parcourue peut impacter la notion de taux d'occupation et donc de confort. Le V/K ne permet donc pas de visualiser un phénomène de surcharge.

Il est intéressant de déterminer, une fois contextualisée, la bonne valeur d'un ratio tel que le V/K. Il n'existe que peu d'études sur le sujet. Pour le cas français et pour une exploitation par autobus ou trolleybus de ligne urbaine avec une exploitation omnibus, on peut considérer que le ratio est satisfaisant au-delà d'une moyenne de 4 voyageurs/km-voitures (à dire d'experts).

Le diagramme en bâtons ci-dessous (figure 41) permet d'obtenir quelques ordres de grandeur. Pour une agglomération de plus de 400 000 habitants disposant d'un TCSP, le V/K moyen agrégé réseau est de 5,1.

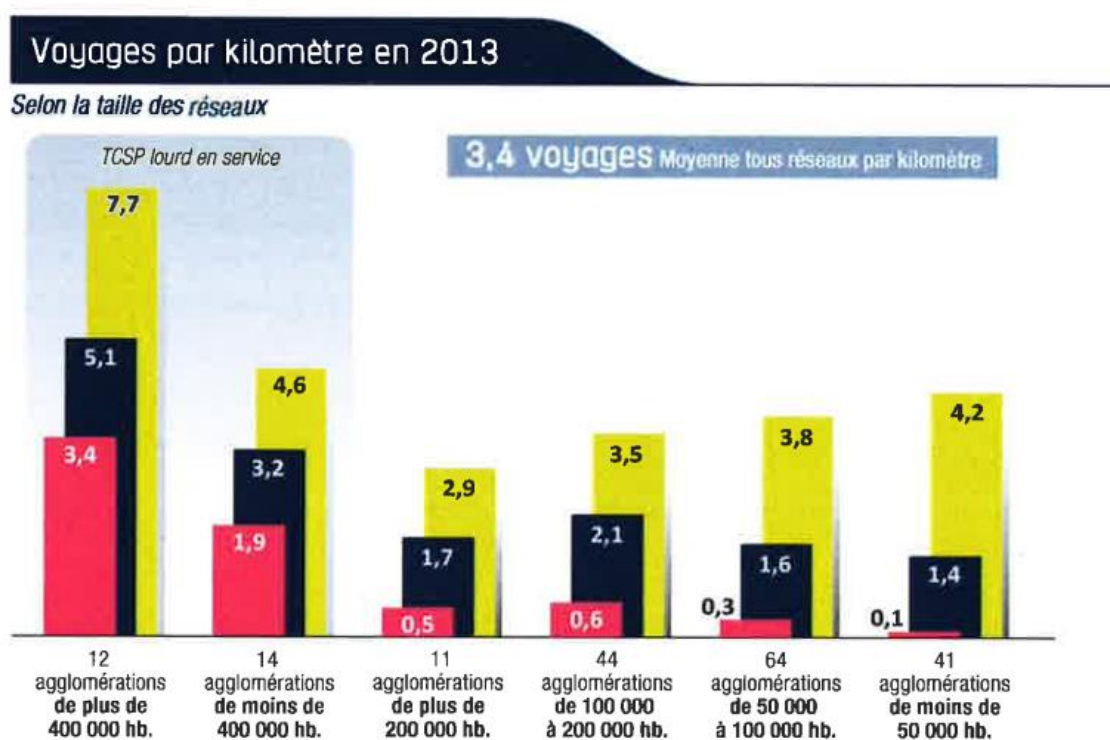


Figure 41 : Répartition des V/K (moyenne en noir, minimum en rouge et maximum en jaune) en fonction de la taille de l'agglomération

Emangard, P-H : Séminaire Marc Wiel – 9 novembre 2017

Le ratio voyageurs.km/kilomètres-véh. serait un très bon indicateur mais quasiment impossible à calculer actuellement sans faire d'enquêtes importantes sur la distance moyenne parcourue par chaque usager.

4. La performance opérationnelle et l'analyse microscopique

Nous entendons par performance opérationnelle tout ce qui se rattache **aux conditions d'exploitation des systèmes de transport réguliers** (hors services à la demande).

Nous définissons l'exploitation d'un système de transport comme étant la mise en œuvre d'un service à l'aide d'unités d'œuvre constituées de mobiles¹²⁶ et le cas échéant de conducteurs avec un itinéraire et des horaires définis. Cette mise en œuvre doit correspondre à un service efficace pour l'exploitant et de qualité pour les usagers. L'efficacité du service se traduit par une bonne répartition des unités d'œuvre en fonction de la demande. La qualité du service se traduit par un haut niveau de ponctualité, régularité, vitesse commerciale et confort/sécurité.

L'exploitation d'un système de transport exige donc de mettre en mouvement des mobiles avec des caractéristiques propres (avec ou sans conducteurs) sur un itinéraire possédant lui aussi des caractéristiques particulières. Les caractéristiques relatives aux mobiles peuvent être par exemple ses dimensions, sa capacité ou encore sa puissance d'accélération. Les caractéristiques relatives à l'itinéraire peuvent être la longueur des interstations, le coefficient de sinuosité ou encore la présence ou non de points spécifiques entre les stations.

Lorsque les mobiles circulent sur leur itinéraire, ces derniers présentent différents « états » : Les mobiles se déplacent, s'immobilisent entre les stations, s'immobilisent en station, et ouvrent leurs portes pour permettre le flux des voyageurs. On peut facilement imaginer qu'en fonction du type de mobile et de l'itinéraire, les différents états varient dans leur nature et leur proportion. On peut également imaginer que pour un même itinéraire, les différents états de mobiles possédant les mêmes caractéristiques varient en fonction des heures de la journée. En effet, l'activité urbaine, notamment la circulation des biens et des personnes, peut agir directement sur les conditions d'exploitation des systèmes et donc sur les différents états des mobiles. Par exemple, les mobiles d'un système de transport de surface circulant sur un itinéraire non protégé rencontreront des temps d'immobilisation et ralentissement plus important lors des périodes de pointe. Toujours pendant ces heures de pointe, les mobiles ouvriront leurs portes plus longtemps pour permettre l'écoulement d'un flux de voyageurs également plus important.

Dans la partie précédente, nous avons tenté de caractériser/contextualiser le concept de performance des transports collectifs. Nous retenons que pour le contexte étudié, la notion de performance s'apprécie généralement au travers de l'efficacité. Nous rappelons que l'efficacité correspond au rapport « optimal » entre les moyens mis en œuvre et le résultat obtenu. Pour le secteur du transport collectif, il existe deux types d'efficacité : l'efficacité productive et l'efficacité commerciale.

Dans le cadre de notre recherche, nous considérons que **l'optimisation des conditions d'exploitation** et donc la recherche de performance opérationnelle impacte les efficacités productive et commerciale. Par conséquent, nous partons du postulat que la performance opérationnelle influence la performance économique.

¹²⁶ Mobile = Matériel roulant = Véhicule

Or, nous constatons que l'étude des conditions d'exploitation et donc de la performance opérationnelle telle que nous l'entendons, n'est pas un domaine très exploré.

De nombreux auteurs soulignent que des recherches sur les conditions d'exploitation seraient d'une utilité certaine. Nous citerons ici N G Harris et R J Anderson : « *Although there is considerable engineering and demand planning analysis in the development of urban railways around the world, less attention is paid to the understanding of key operating conditions such as station stop times* »¹²⁷.

Dès lors, il serait intéressant d'analyser les différents « temps » relatifs aux différents « états » des mobiles sur leur itinéraire respectif. Cette analyse devrait permettre de mieux comprendre le fonctionnement du système de transport et ses conditions d'exploitation. Nous souhaitons, au travers de notre recherche, réaliser une **analyse microscopique des conditions d'exploitation**.

Cette première analyse de la performance opérationnelle se focalise entièrement sur la variable « **temps** ». La variable « **charge** » n'est pas intégrée. Néanmoins, celle-ci doit être considérée comme un élément à apporter dans le cadre de travaux complémentaires.

Comme nous le verrons dans la suite de notre démonstration, la vitesse et la régularité sont des indicateurs de performance opérationnelle relativement proches. *Les facteurs permettant d'avoir une bonne régularité sont assez proches de ceux permettant d'avoir une bonne vitesse.*¹²⁸

A ce stade, l'analyse microscopique des conditions d'exploitation dont le but est d'appréhender la performance opérationnelle doit être considérée comme exploratoire. Nous souhaitons analyser les différents états des mobiles en contextualisant l'environnement dans lequel ils se déplacent : l'itinéraire. Nous devrions pouvoir apporter des éléments d'explication à la vitesse et la ponctualité/régularité¹²⁹.

Néanmoins, il est nécessaire de nuancer l'importance de la performance opérationnelle en rappelant que l'insertion territoriale de la ligne, la nature et le nombre de pôles générateurs de trafic desservis ont également une influence majeure. Cela correspond à la notion de « design¹³⁰ » ou encore de « structuration » des lignes et du réseau.

Dans l'étude APEROL, Bruno Faivre d'Arcier rappelle ce qui suit : « *L'hypothèse principale qui motive cette recherche consiste à affirmer que c'est au niveau du **design** des réseaux que les gains potentiels seront les plus importants, comparativement à la maîtrise des coûts unitaires de production ou à l'accroissement des tarifs. C'est la raison qui explique pourquoi l'analyse de la performance doit être menée au niveau de chaque ligne, en recherchant les facteurs explicatifs d'une bonne efficacité commerciale. Il reste cependant nécessaire de garder à*

¹²⁷ Anderson, R.J. Harris, NG. "An international comparison of urban rail boarding and alighting rates". *Proc. Inst. Mech. Eng. Part F J. Rail and Rapid Transit*. 2007, numéro 221, p. 521 – 526.

¹²⁸ Nau, O. « L'insertion des tramways en milieu urbain, entre desserte, vitesse et régularité ». In-Gardon S., *Quarante années de tramways en France*. Lyon : LIBEL, 2018, 507 p.

¹²⁹ La différence entre ponctualité et régularité sera expliquée dans la suite du document.

¹³⁰ Le design intègre le tracé, le degré de correspondance, le relief, la longueur et la sinuosité des lignes, la population, le niveau de service (fréquence, amplitude horaire, vitesse, régularité).

l'esprit les « missions » confiées au transport public (rôle social, décongestion, amélioration de l'environnement, cohérence transport/urbanisme), afin de ne pas tomber dans une simple rationalisation économique qui serait contraire aux objectifs de politique publique visés par les AOT. En effet, il suffirait de limiter les services aux heures de pointe pour améliorer automatiquement l'efficacité commerciale des réseaux. Il est donc indispensable de coupler l'optimisation économique des lignes avec la notion d'efficacité, c'est-à-dire de degré d'atteinte des objectifs des politiques publiques. La finalité de cette recherche est de proposer une méthodologie d'analyse de la performance des lignes, afin d'aider à une certaine rationalisation de l'offre sous contraintes ».

En février 2015, la Cour des comptes a publié son rapport public annuel incluant un volet consacré au financement des transports et intitulé « Les transports publics urbains de voyageurs : un nouvel équilibre à rechercher »¹³¹. Ce rapport fait référence à l'étude APEROL précitée et rappelle que la **structuration** (design) des réseaux offre les gains potentiels les plus importants, comparativement à la maîtrise des coûts unitaires de production ou à la hausse des tarifs.

La réorganisation du réseau semblerait donc être le levier permettant d'améliorer les efficacités commerciales. Cependant, il est essentiel, comme nous l'avons indiqué, de tenir également compte des conditions d'exploitation qui permettent d'obtenir un bon niveau de performance opérationnelle. Une restructuration de réseau avec un mauvais niveau de performance opérationnelle aurait, dans notre vision, moins d'effets bénéfiques.

Toujours selon notre approche, le taux de fraude doit être considéré comme un élément clé. En effet, même si l'efficacité commerciale donc l'usage d'un système de transport est satisfaisant, il reste indispensable que les usagers disposent d'un titre de transport valide. Dans le cas contraire, les recettes relatives à l'usage sont directement impactées.

Nous proposons ci-dessous de schématiser notre approche de la performance économique d'un système de transport en incluant les notions de performance opérationnelle et de maîtrise de la fraude (figure 42).

¹³¹ Cour des comptes. *Les transports publics urbains de voyageurs : un nouvel équilibre à rechercher*. Rapport annuel 2015. p 261 - 320

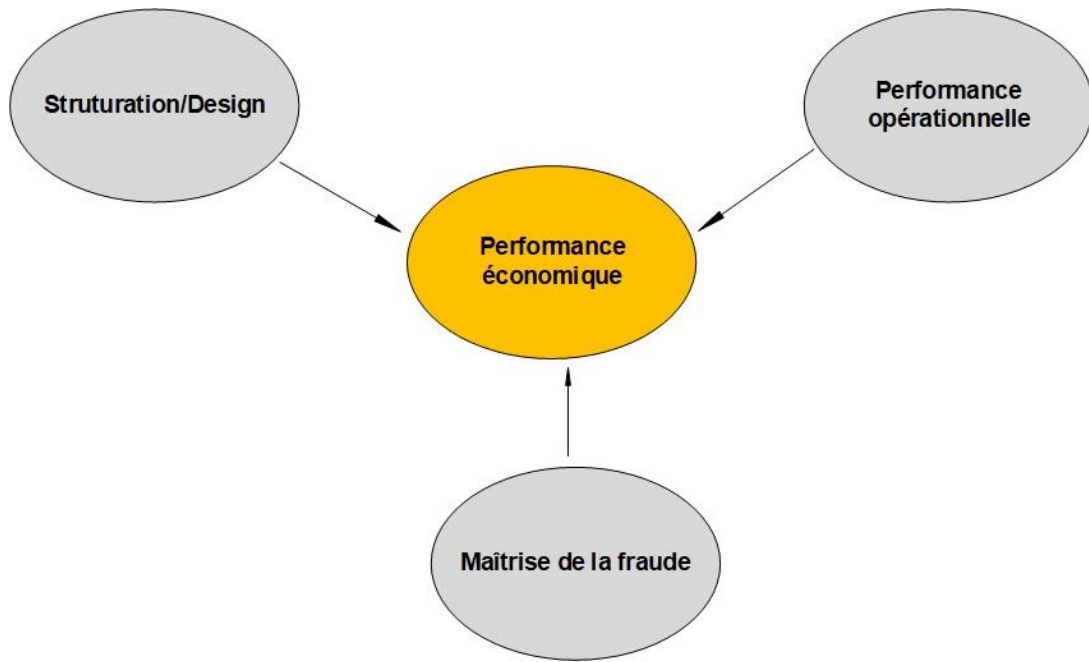


Figure 42 : Schématisation de la performance économique d'un système de transport

Source : Auteur

Nous considérons la notion de performance opérationnelle comme élément source à la performance économique au même titre que le design et la maîtrise de la fraude.

5 La planification théorique et la détermination de l'offre

La planification théorique de l'offre de transport est réalisée de manière anticipée grâce à des informations concernant d'une part la fréquentation attendue, et d'autre part, les temps de parcours nécessaires pour relier les stations entre elles donc les terminus de la ligne. La planification théorique est réalisée pour l'exploitation de tous les systèmes de transport quel que soit le niveau de priorisation, d'automatisation ou encore la période de validité de l'offre (d'une année à une journée). En effet, une ligne d'autobus conventionnelle ou une ligne de métro de type GoA4 disposent d'une planification théorique avec des heures de départs des terminus et des heures de passage aux différentes stations.

Cette partie consacrée à la planification théorique n'aborde pas la problématique de la modélisation. La modélisation reste un sujet très spécifique. Néanmoins, les modèles de prévisions de trafic ne sont pas à écarter de notre raisonnement. En effet, pour leur bon fonctionnement, ces derniers sont alimentés de données relatives aux réseaux existants notamment ceux du transport collectif. Par conséquent, la mise à disposition de données relatives aux conditions d'exploitation permet d'enrichir et de consolider les prévisions d'affectation. De manière générale, les outils de modélisation sont utilisés dès lors qu'un réseau existant doit être restructuré de manière plus ou moins importante.

5.1 La terminologie relative au temps

Comme nous l'avons déjà indiqué, la documentation technique relative à l'exploitation des systèmes de transport reste confinée à des cercles restreints de praticiens. Il n'existe pas d'ouvrages regroupant l'ensemble de la terminologie technique d'exploitation. Cependant, il existe tout de même quelques définitions notamment dans les publications UTP ou encore dans l'ouvrage de Poupard, X. de 1982 intitulé *Méthodes d'exploitation*. Nous listons ci-dessous les principaux termes utilisés. Il est important de souligner que les terminologies existantes restent succinctes et n'abordent pas les termes relatifs à la décomposition des temps de parcours, à la fréquentation des lignes ou encore aux méthodes de graphycage. Les systèmes d'ingénierie utilisés par les exploitants proposent leur propre terminologie. Les définitions d'un même terme sont parfois très différentes. Il n'existe pas, comme en Allemagne, une gouvernance permettant de standardiser la terminologie propre à l'exploitation des systèmes de transport.¹³²

5.1.1 Définitions de Poupard, X. 1982

Temps de révolution :

Temps alloué théoriquement à chaque voiture entre deux départs consécutifs du même terminus.

Temps de parcours

Temps alloué théoriquement entre le départ d'un terminus et l'arrivée à l'autre terminus.

Temps de battement

Temps qui s'écoule théoriquement entre l'arrivée et le départ d'un même terminus.

¹³² VDV : standardisation et interopérabilité des systèmes d'informations.

Le temps de battement est destiné à résorber une partie des écarts positifs des temps de parcours réels par rapport au temps de parcours théorique. Il s'agit d'un supplément de temps de parcours. Il existera toujours des courses dont le temps réel sera tel que, malgré l'utilisation du battement, le départ suivant ne pourra pas être effectué à l'heure prévue.

Deux conceptions du temps de battement doivent être prises en compte. Pour l'exploitant c'est un temps qui permet d'absorber une variation du temps de parcours vers le haut. Pour le personnel roulant, ce temps est considéré comme un temps de pause.

Temps de course

Somme des temps de parcours et du temps de battement qui le suit. C'est le temps de la course qui détermine la fiabilité du TM.

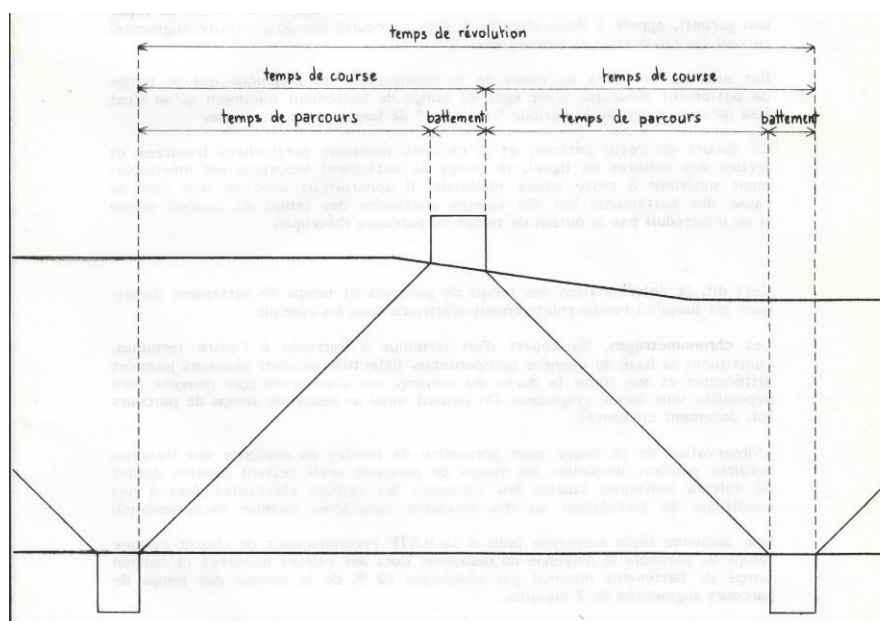


Figure 43 : Schéma des définitions de Poupard, X. 1982

Source : Poupard, X. 1982

5.1.2 Définition de l'UTP (1988)

Temps de révolution

Temps nécessaire à l'exécution d'une rotation¹³³, c'est-à-dire le temps qui sépare deux départs successifs d'une même voiture d'un même terminus.

Temps de parcours

Temps nécessaire à l'exécution d'une mission, applicable aux différents moments de la journée, de la semaine et de l'année. Le temps de parcours d'une course est le temps nécessaire à l'exécution de cette course

Temps de battement voiture

Temps s'écoulant, pour une voiture, entre l'arrivée au terminus (point d'arrivée) et le départ de ce même terminus (point de départ). Le temps de battement comprend le temps de

¹³³ Rotation : Déplacement d'une voiture entre deux départs successifs d'un même terminus. La durée d'une rotation est appelée révolution.

retournement, le temps de régulation destiné à absorber l'irrégularité, le temps de stationnement obligatoire en terminus (achat de billets, modification de la girouette, montée des voyageurs...). Il peut aussi comprendre un temps mort induit par les contraintes techniques de la construction de l'horaire, voire même un temps de pause pour le personnel de conduite.

Temps alloué

Temps inscrit sur le TM qui sépare les départs d'une voiture de deux terminus successifs. C'est la somme d'un temps de parcours et d'un temps de battement.

Temps de régulation

Temps destiné à absorber les écarts entre les temps de parcours théorique et ceux effectivement réalisés.

Schéma de définitions (figure 44)

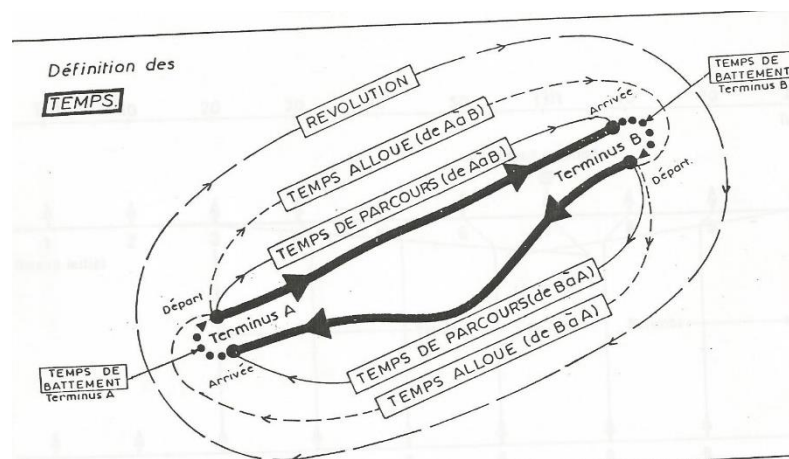


Figure 44 : Schéma des définitions UTP 1988

Source : UTP 1988

Concernant la terminologie ci-dessus, les termes utilisés sont identiques à l'exception de la notion de « temps alloué » qui pour l'UTP correspond au « temps de course » de la SCET. Nous ne nous attardons pas sur la terminologie relative à l'habillage des courses (affectation des conducteurs et gestion de leur temps de travail).

5.1.3 Les lacunes de la terminologie

Nous constatons que la terminologie officielle en relation avec l'exploitation des systèmes de transport est orientée « macro ». En effet, la terminologie permet de faire la distinction entre une course, un battement et une révolution. En revanche, il n'existe pas de terminologie officielle permettant de caractériser des phénomènes intégrés à l'intérieur d'une course relatifs aux différents états des mobiles. Comme nous l'avons évoqué plus haut, un mobile réalisant une course présentera différents états, concernant par exemple l'ouverture des portes. **Nous rappelons que l'objet de notre recherche est de réaliser une analyse microscopique des conditions d'exploitation. Par conséquent, nous tenterons de définir ces différents états.**

5.2 Détermination de la capacité

Comme nous l'avons décrit plus haut, la capacité doit s'apprécier à deux niveaux qui sont la capacité de la voirie (Vehicule capacity) et la capacité du système de transport (person capacity). Le « Transit Capacity and Quality of service ¹³⁴ » du Transit Cooperative Research Program », présente également des deux catégories de capacité :

- Person capacity : Correspond au nombre maximum de personnes qui peuvent être transportées à un endroit donné pendant une période de temps donnée dans des conditions d'exploitation précises (par exemple confort et sécurité),
- Vehicule capacity : Correspond au nombre maximum de véhicules de transport en commun (autobus, trains, bateaux, etc.) qui peuvent passer à un endroit donné pendant une période donnée.

Ces deux types de capacité peuvent être appréhendés soit de manière individuelle soit de manière groupée ou les deux.

La problématique de la capacité d'un système de transport en commun repose, à première vue, sur la notion de Person capacity. En effet, l'objectif économique recherché est de transporter un maximum de personnes avec une limitation du nombre de véhicules à utiliser. Néanmoins, la notion de Vehicule Capacity doit également être prise en compte. Comme nous l'avons expliqué au cours du chapitre 1, il existe pour les réservations de voirie dédiées au transport collectif des limites, notamment celle relative à la fluidité. En effet, les réservations de voirie et les infrastructures ferroviaires ne peuvent accueillir qu'un nombre limité de véhicules.

La capacité d'un système de transport est le résultat du produit entre le nombre de véhicules en ligne et la capacité d'emport d'un véhicule soit :

$$N = \frac{Li}{Ve} * \frac{60}{I}$$

$$C = N * Cv$$

Avec

N : Nombre de véhicules

Li : Longueur de la ligne

Ve : Vitesse exploitation

I : Intervalle entre deux véhicules

C : Capacité du système

Cv : Capacité d'emport d'un véhicule selon la norme 4p./m2

La détermination de la capacité repose sur une approche identique pour tous les systèmes. Seuls certains termes peuvent être différents en fonction des systèmes qu'ils soient autobus ou métro. Par exemple, les exploitants métro utilisent l'acronyme PPHPD pour Personnes Par Heure et Par Direction. Ce terme n'est pas utilisé chez les exploitants d'autobus, de BHNS ou encore de tramways.

¹³⁴ TCRP. *Transit Capacity and Quality of Service Manual*. Washington. D.C., TRB, 2003

5.2.1 : Détermination de la capacité d'un système bus

Afin de décrire l'approche théorique du dimensionnement, nous réutilisons un exemple disponible dans l'ouvrage de Poupard, X. 1982. Cet exemple décrit le dimensionnement d'une ligne d'autobus.

Nous partons du principe que le choix du corridor est établi et que l'itinéraire au sein du corridor est également réalisé. De même, nous ne nous attarderons pas sur le processus réglementaire de la mise en œuvre d'un système de transport. Seul l'aspect capacitaire sera traité.

Prenons une ligne radiale qui relie une zone d'habitat située en périphérie au centre de la ville. Les dynamiques de mobilité urbaine font que la demande en transport en heure de pointe du matin est essentiellement basée sur la direction de la périphérie vers le centre

Les postulats de départ :

- Point critique de charge : arrêt ZUP (terminus départ),
- Pas de palier dans le diagramme de charge permettant d'envisager un terminus partiel,
- Pas d'intervalles supérieurs à 10 minutes,
- Taux de charge : ne doit pas excéder 80 % de la charge maximum (capacité d'emport par véhicule de 100 places).

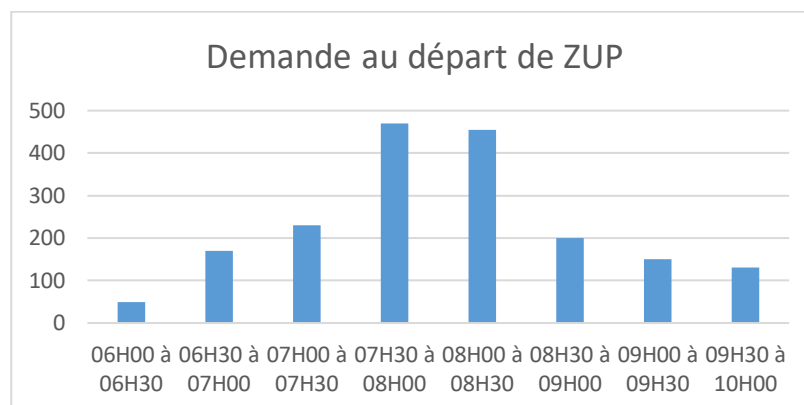


Figure 45 : Prévion à l'aide d'un modèle de simulation ou recueil de données de comptage donne les informations suivantes

Source : Poupard, X. 1982

La détermination de temps de parcours théorique donne les informations suivantes.

	Tranche horaire	Temps en minutes
Sens ZUP vers Centre ville	Jusqu'à 07h00	20
	de 07h30 à 08H30	25
	Après 09H00	20
	Tranche horaire	Temps en minute
Sens Centre ville vers ZUP	Jusqu'à 07h00	20
	de 07h30 à 08H30	22
	Après 09H00	20

Figure 46 : La détermination de temps de parcours théorique

Source : Poupard, X. 1982

Calcul préalable à la construction du graphique de marche

- Calcul du nombre maximal de véhicules en service

Pour ce faire, nous déterminons le nombre de passages nécessaires afin d'offrir un service à l'ensemble des voyageurs en respectant la norme de confort. Le nombre de départs correspond à l'intervalle. On constate que pour les tranches horaires les plus importantes au niveau de la demande (de 7h30 à 8h30), il est nécessaire de mettre en œuvre **6** départs pour chaque tranche. Ce nombre est calculé de la manière suivante :

$$470 / 80 = 5,8 \text{ soit } 6$$

Il est important de souligner que ce dimensionnement se fait toujours sur la période la plus chargée soit 7h30 à 8h00 (heure de pointe du matin).

Cette tranche horaire dure 30 min et nous obtenons donc un intervalle de 5 minutes. Ce nombre est calculé de la manière suivante :

$$30 / 6 = 5$$

Ensuite, la tranche horaire qui reste la plus chargée est celle de 7h00 à 7h30. Il est nécessaire de mettre en œuvre **3** départs pour chaque tranche. Ce nombre est calculé de la manière suivante :

$$230 / 80 = 2,8 \text{ soit } 3$$

Cette tranche horaire dure 30 min et nous obtenons donc un intervalle de 10 minutes. Ce nombre est calculé de la manière suivante :

$$30 / 3 = 10$$

- Calcul du temps de révolution

Ensuite, nous déterminons les temps de révolution nécessaire pour l'heure de pointe et l'heure creuse (selon la règle empirique citée plus haut ou de marches à blanc dans le cadre d'un projet métro) :

Temps de révolution à l'heure de pointe

La révolution « **R** » est égale à : 25 min + 22 min + $\frac{10\% (25 \text{ min} + 22 \text{ min})}{100} + 2 \text{ min}$ ¹³⁵ = 54 min

Pour assurer un intervalle « **I** » de 5 min il faut **11 véhicules** car $54/5 = 10,8$ soit 11.

Temps de révolution à l'heure creuse

La révolution « **R** » est égale à : 20 min + 20 min + $\frac{10\% (20 \text{ min} + 20 \text{ min})}{100} + 2 \text{ min}$ = 46 min

Pour assurer un intervalle « **I** » de 10 min il faut **5 véhicules** car $46/10 = 4,6$, arrondi à 5.

- Relation fondamentale entre N, I et R

Il devient essentiel de rappeler la relation fondamentale qui lie les 3 paramètres suivants

***N** : Nombre de véhicules sur la ligne*

***R** : Durée de la révolution*

***I** : Intervalle au tableau de marche*

Cette relation est la suivante :

$$\mathbf{R = N * I}$$

Donc

$$\mathbf{N = R / I}$$

Par conséquent, à intervalle constant, plus le temps de révolution est élevé, plus le nombre de véhicules en circulation est important. En d'autres termes, à intervalle constant, plus la vitesse des véhicules¹³⁶ est élevée, plus le nombre de ressources nécessaires diminuera. **On comprend ainsi la relation fondamentale entre la vitesse et le coût d'exploitation (performance économique).**

5.2.2 : Détermination de la capacité d'un système métro

Afin de compléter notre démonstration, nous présentons ci-dessous un exemple de dimensionnement pour un système métro. Comme indiqué précédemment, les logiques restent identiques. Seuls quelques termes ainsi que le niveau de finesse de dimensionnement changent. Le dimensionnement de la capacité se fera sur la charge inter station la plus importante. Notons également que, pour un système métro, la recherche de l'intervalle minimum est importante. La minimisation de l'intervalle oblige à prendre en compte des éléments supplémentaires. Par exemple, certaines variables comme celle des temps d'arrêt en station sont intégrées au dimensionnement du système ce qui n'est pas le cas pour une ligne d'autobus.

¹³⁵ L'ajout des deux minutes correspondant à une ancienne pratique RATP décrite dans le manuel du Poupard X. (1982).

¹³⁶ Vitesse commerciale : Vitesse mesurée pour l'exécution du temps de parcours ; Vitesse d'exploitation : Vitesse mesurée pour l'exécution du temps alloué

Dans la suite de notre démonstration, nous tenterons de lister tous les paramètres ayant une incidence sur la minimisation de l'intervalle.

Les postulats de départ :

- Les temps de parcours sont connus dans le cadre de la mise en œuvre du projet (marche à blanc). Leur détermination est moins difficile que pour les autres systèmes de transport car l'exploitation est en site totalement protégé (soit en souterrain ou en viaduc).
- On connaît la charge maximale. Cette valeur sera déterminante pour le dimensionnement du système.
- Les capacités unitaires des matériels sont connues.

Calcul du nombre de véhicules

Pour déterminer le nombre de véhicules, les valeurs suivantes sont à prendre en compte :

- Longueur de la ligne de terminus à terminus
- Vitesse d'exploitation (en fonction du niveau d'automatisation du métro, les temps de retournement et de battement varient. Cela repose pour l'essentiel sur la présence ou non de conducteur à bord des véhicules)
- Intervalle (en équivalent heure)

$$N = \frac{Li * 2}{Ve * I}$$

Avec

N : Nombre de véhicules

Li : Longueur de la ligne (de terminus à terminus)

Ve : Vitesse d'exploitation

I : Intervalle entre deux véhicules (en équivalent heure)

Le rapport entre la longueur de la ligne multipliée par deux et la vitesse d'exploitation multipliée par l'intervalle équivalent heure revient à calculer la formule utilisée précédemment :

$$N = R / I$$

Capacité du système

La capacité maximale du système peut être calculée de la manière suivante. Pour ce faire, les valeurs ci-dessous sont à prendre en compte :

- Capacité d'un véhicule,
- Intervalle minimum atteignable (ce point sera abordé dans la suite du document)

$$D = \frac{Cn * 3600}{I}$$

Avec

D : Capacité du système

Cn: Capacité nominale d'un véhicule

I : Intervalle entre deux véhicules

Ci-dessous un exemple de mise en œuvre du calcul avec les valeurs suivantes :

- Capacité nominale : 300
- Intervalle minimum : 2 minutes et 30 secondes soit 150 secondes

$$D = \frac{Cn*3600}{I} = \frac{300*3600}{150}$$

Dans cet exemple, le système dispose d'une capacité maximale de 7 200 Personnes Par Heure et Par Direction (PPHPD).

Temps de stationnement des véhicules à la station la plus fréquentée

Comme nous l'avons évoqué précédemment, le dimensionnement capacitaire d'un métro exige une plus grande précision car la recherche de mise en œuvre d'un intervalle minimum est essentielle. Un des éléments déterminant la fréquence maximale est le temps de stationnement des véhicules aux arrêts pour assurer le flux voyageurs. Les autres paramètres essentiels à la recherche d'intervalle minimum sont la performance du système de cantonnement et de signalisation et la marge d'exploitation intégrée au tableau de marche pour adsorber les aléas.

Le paramètre « temps de stationnement » étant un paramètre essentiel, celui-ci doit être calculé.

Le temps de stationnement peut se formuler ainsi :

$$D = \frac{G + A}{V} + \frac{M + D}{\frac{P * r}{L * e}} + O + F$$

Avec

- G : Gabarit transversal du matériel roulant (m)
- A : Distance depuis la position assise la plus éloignée de l'entraxe des portes (m)
- V : Vitesse de déplacement des passagers (m/s)
- O : Temps technique d'ouverture des portes (s)
- F : Temps technique de fermeture des portes (s)
- M : Flux de voyageurs montant en station (voy)
- D : Flux de voyageurs descendant en station (voy)
- P : Nombre de portes par face du véhicule
- R : Facteur de répartition des voyageurs sur le quai ou dans le véhicule (%)
- L : Largeur d'une porte (m)
- E : Débit d'échange admissible (voy/s/m)

Concernant le débit d'échange admissible, il existe chez les praticiens différentes valeurs :

- 1,53 voy/s/m ¹³⁷
- 1,10 voy/s/m.

Ces valeurs sont issues des expériences des opérateurs.

Il existe également d'autres formulations mathématiques notamment celle de Gerry Weston ¹³⁸. Cette formule a été utilisée dans le cadre d'une étude de N G Harris et R J Anderson (2007).

¹³⁷ Nombre de voyageurs montants ou descendants par mètre de porte et par seconde.

¹³⁸ Weston, J. G. *Train service model – technical guide*. London Underground operational research note 89/18, 1989

Les auteurs estiment que cette formule est la plus complète car de nombreux paramètres sont pris en compte.

Pour Weston, le temps de stationnement se formule ainsi :

$$SS = 15 + \left[1.4 * \left(1 + \left(\frac{F}{35} \right) * \left(\frac{(T - S)}{D} \right) \right) \right] \\ * \left[\left(F * \frac{B}{D} \right)^{0.7} + \left(F * \frac{A}{D} \right)^{0.7} \right] \\ + \left(0.027 * \left(F * \frac{B}{D} \right) * \left(F * \frac{A}{D} \right) \right) \quad (1)$$

Avec

SS = temps d'arrêt en station,

A = nombre de descentes de passagers

B = nombre de montées de passagers

D = nombre de portes

F = pic / porte moyenne facteur,

S = nombre de sièges,

T = nombre de travers passagers,

(Le tout exprimé pour l'ensemble du train)

En conclusion de cette étude, les auteurs rappellent l'importance du temps de stationnement (Dwell Time) pour le bon fonctionnement du système ferroviaire à haute fréquence. Il est également indiqué que la formule de Weston semble être valide pour l'ensemble des systèmes ferroviaires à haute fréquence. Les auteurs recommandent d'utiliser cette méthode pour les systèmes existants en vue d'une optimisation, mais également pour les projets lors de la conception de lignes.

Certaines variables prises en compte pour le calcul du temps de stationnement sont directement intégrées au niveau organique du système. En effet, le nombre de portes, leur largeur, les temps d'ouverture et fermeture ou encore la position des sièges à l'intérieur du véhicule dimensionnent en partie ce temps de stationnement.

5.3. Le graphique de marche : l'outil au service de la planification

Une fois les calculs de dimensionnement réalisés, il est nécessaire d'établir un tableau de marche (encore appelé grille horaire) qui contiendra toutes les heures de départ des terminus, les heures de passage aux stations et les heures d'arrivée aux terminus. Pour ce faire, les exploitants de réseau de transport collectif construisent un graphique de marche plus communément appelé « graphique ».

Dans certains cas, notamment pour les exploitants métro, le graphique n'est pas forcément utilisé comme étape intermédiaire entre le dimensionnement de la capacité et le tableau de marche.

L'UTP (1988) définit le graphique comme le tracé représentant la marche théorique des véhicules et obtenu en portant le temps en abscisse et la distance ou le temps de parcours en ordonnée.

Du fait du changement d'unités pour l'axe des ordonnées, il existe deux grands types de graphique : le graphique à pente variable et le graphique à pente constante 45 degrés. Ces deux types de graphique correspondent à deux visions de la représentation de la variabilité du temps de parcours et de la vitesse au travers de l'unité consacrée à l'axe des ordonnées.

5.3.1 Graphique à pente variable

Sur le graphique à pente variable les deux terminus sont figurés par deux traits parallèles. La pente du graphique est variable en fonction du temps de parcours pour rejoindre le terminus opposé. L'inclinaison de la pente donne une indication relative à la vitesse du véhicule.

- Axe des X : Evolution du temps au cours de la journée
- Axe des Y : Distance

Pour Poupard, X. (1982) ce type de graphique permet d'intégrer les performances techniques du matériel et les impératifs de sécurité en relation avec les normes ferroviaires et par conséquent est moins adapté au transport urbain avec variation des temps de parcours.

Néanmoins, le graphique à pente variable reste le type le plus utilisé par les services méthodes des réseaux de transport collectif.

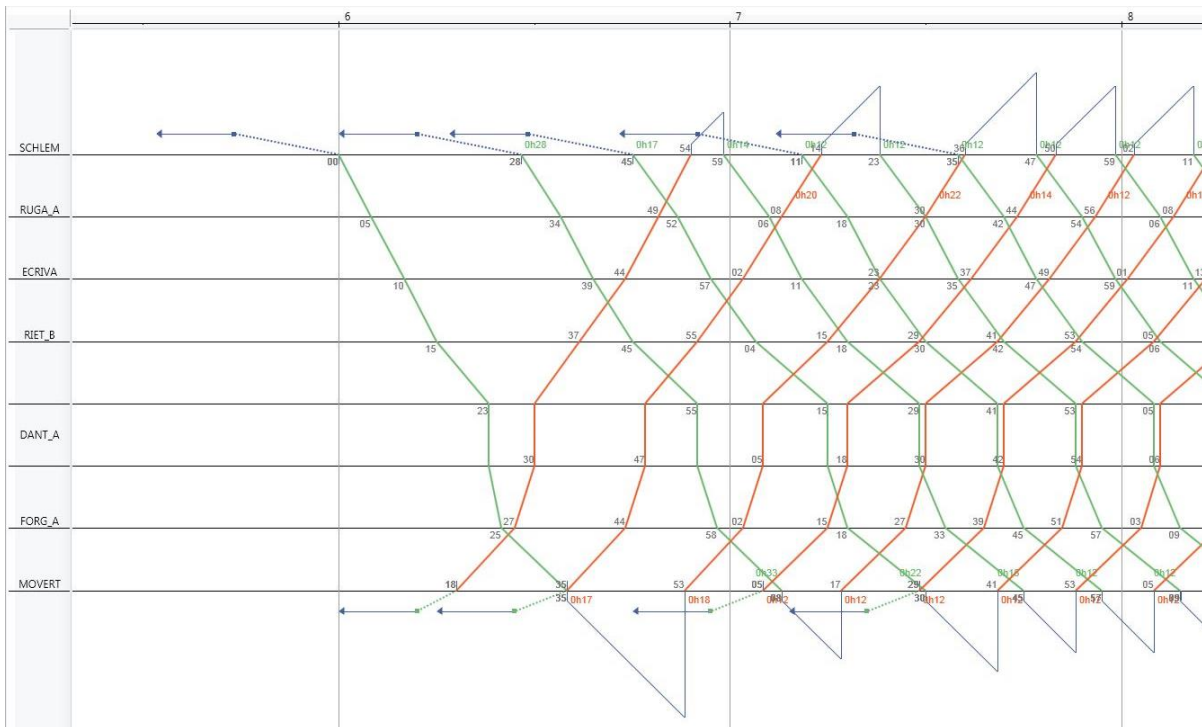


Figure 47 : Exemple de graphique à pente variable

Source : Auteur

5.3.2 Graphique à pente constante de 45 degrés

Le terminus de départ est donc représenté par un trait rectiligne alors que le terminus d'arrivée est représenté par une ligne brisée dont l'écart avec l'axe des abscisses varie en fonction du temps de parcours théorique tout au long de la journée.

- Axe des X : Evolution du temps au cours de la journée
- Axe des Y : Temps de parcours

Pour Poupard, X. (1982), ce type de graphique est le plus adapté à la représentation d'une offre de transport en milieu urbain avec une variation des temps de parcours. En représentant le parcours d'un véhicule par un segment de droite faisant un angle de 45 degrés avec l'abscisse (qu'il coupe à l'heure de départ), ce segment coupe la ligne brisée d'arrivée en un point dont l'abscisse est bien égale à l'heure d'arrivée (propriété du triangle rectangle isocèle).

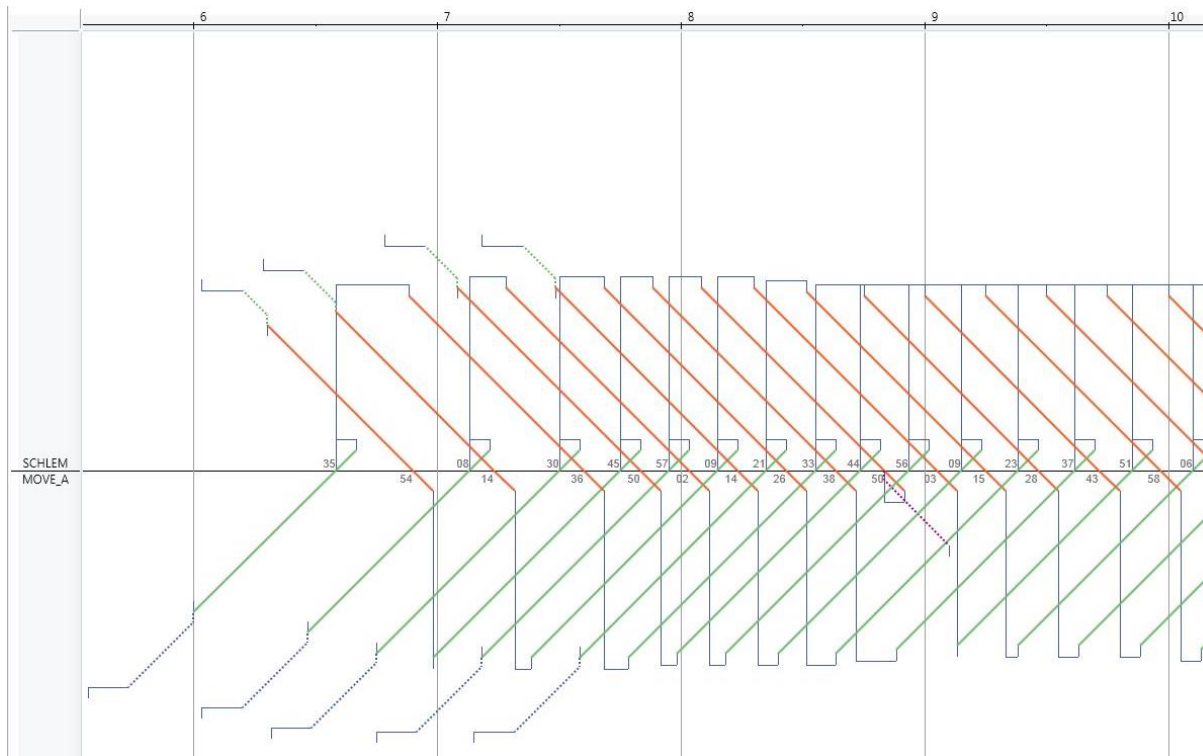


Figure 48 : Exemple de graphique à pente constante

Source : Auteur

A l'issue du travail de construction de l'offre grâce à l'outil « graphique », il est possible de synthétiser toutes les informations essentielles dans le tableau de marche TM.

5.3.3 Le tableau de marche (TM)

L'UTP définit le tableau de marche comme suit : « Document généralement établi à partir du graphique de ligne et comportant, pour chaque véhicule, les heures de rentrée ou de sortie du dépôt, les interruptions de marche, et de manière générale, les heures de départ des terminus ou des points de relèves (synonyme : graphique à plat) » (UTP 1988).

Poupard, X. définit le tableau de marche comme suit : « Document qui indique, pour chaque véhicule de la ligne repéré par un numéro d'ordre, les différents lieux et heures (en dépôt, terminus ou point de garage) caractérisant le service théorique offert chaque jour » (Poupard, X. 1982).

Le TM reste bien entendu une approche théorique qui doit cependant se rapprocher au plus près de la réalité du terrain. Le recueil régulier de données terrain permet de quantifier cette réalité et d'alimenter les services en charge de la construction du graphique. L'objectif recherché dans cette planification de l'offre est la minimisation des ressources matériel et des kilomètres non productifs alloués à la mise en œuvre.



Figure 49 : Tableau de marche d'une ligne d'autobus du réseau de Toulouse en 1982

Source : Poupard, X. 1982

Le tableau de marche permet de visualiser un programme de production pour une ligne donnée. Les services voiture y sont représentés et numérotés avec leurs heures respectives d'entrée et de sortie de ligne (heure de début et heure de fin de service). L'amplitude de chaque service est renseignée.

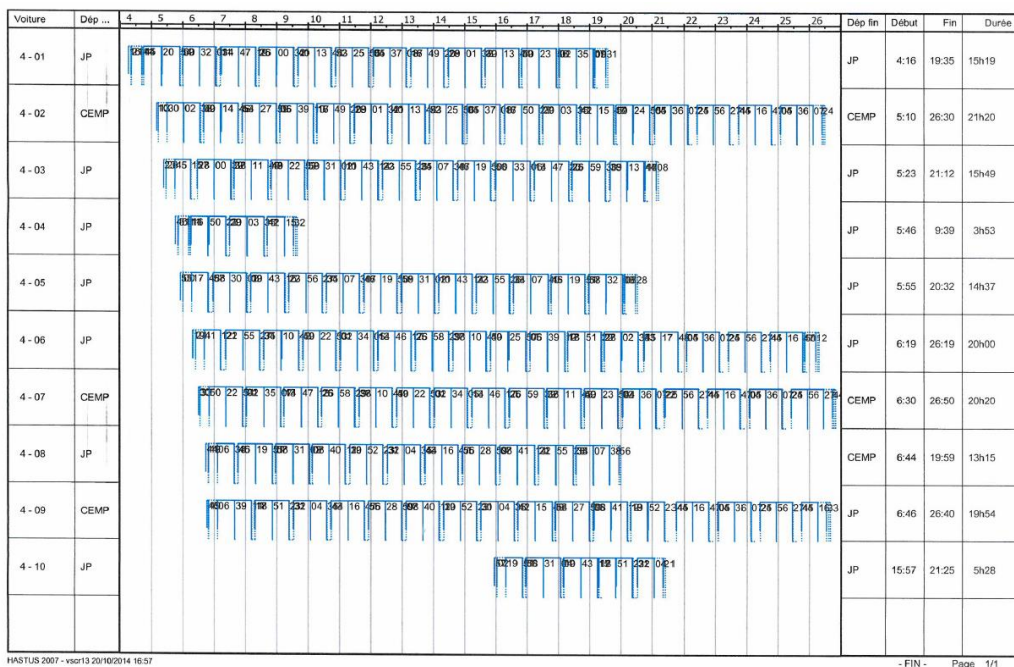


Figure 50 : Tableau de marche d'une ligne de tramway en 2015

Source : Auteur

Que ce soit pour une ligne de bus conventionnelle ou encore un TCSP, le principe de construction de la production de l'offre est identique. Notons que l'unité de temps utilisée est

différente selon les systèmes. En effet, le degré de précision dans le tableau de marche passe de la minute à la seconde pour les systèmes type métro.

La représentation ci-dessous (figure 51) permet de visualiser la décomposition des temps de parcours pour un ensemble de courses sur un système métro durant une tranche horaire. Cette représentation prend en compte les temps de parcours interstations ainsi que les temps d'immobilisation en station. Les temps de parcours sont déterminés dans le cadre du projet et les temps d'immobilisation en station en fonction des mouvements voyageurs.

TEMPS SENS 1						
TEMPS	INTERSTATION	T supp, REB	Stationnement	EAS	Arr. quai	REB
MBC			00:15	00:15	05:15:00	
	01:01	61				
BEL			00:15	00:15	05:16:16	
	00:57	57				
REY			00:15	00:15	05:17:28	
	00:45	45				
MUN			00:18	00:18	05:18:28	
	01:21	81				
BAG			00:15	00:15	05:20:07	
	00:45	45				
MER			00:15	00:15	05:21:07	
	00:48	48				
FLE			00:15	00:15	05:22:10	

Figure 51 : Exemple de description d'une course théorique pour un métro automatique type VAL

Source : Auteur

Lorsque les temps de parcours et les temps d'immobilisation sont connus pour chaque course ou tranche horaire, le tout est regroupé dans un tableau de marche. L'exemple ci-dessous (figure 52) est un extrait un tableau de marche pour un métro type GoA4.

Batt	Départ	Batt	Départ	Batt	Départ	Batt	Départ	Batt	Départ	Batt	Départ
Inj.	05:17:00	30	08:45:00	Inj.	12:03:23	67	14:51:07	35	17:30:51	34	20:32:32
Inj.	05:21:30	30	08:47:00	96	12:05:39	67	14:53:23	35	17:32:51	139	20:36:53
Inj.	05:26:00	15	08:48:45	63	12:07:55	67	14:55:39	35	17:34:51	-14	20:40:50
Inj.	05:30:30	20	08:50:50	31	12:10:11	67	14:57:55	35	17:36:51	23	20:44:48
56	05:35:00	30	08:53:00	-6	12:12:27	67	15:00:11	35	17:38:51	52	20:48:48
56	05:39:30	54	08:55:24	-29	12:14:43	67	15:02:27	35	17:40:51	107	20:52:48
56	05:44:00	104	08:58:14	Inj.	12:16:59	67	15:04:43	35	17:42:51	149	20:56:48
56	05:48:30	-9	09:00:21	65	12:19:15	67	15:06:59	35	17:44:51	181	21:00:48
26	05:53:00	16	09:02:46	62	12:21:31	67	15:09:15	35	17:46:51	43	21:04:48
26	05:57:30	46	09:05:16	62	12:23:47	67	15:11:31	35	17:48:51	42	21:08:48
26	06:02:00	87	09:07:57	64	12:26:03	67	15:13:47	35	17:50:51	21	21:12:48

Figure 52 : Exemple de tableau de marche pour un métro automatique type VAL

Source : Auteur

La colonne « départ » correspond à l'ensemble des départs théoriques d'un terminus. Le premier départ a lieu à 05 :17 :00, le second à 05 :21 :30...

La mise en production d'une offre de transport mobilise des moyens humains et matériels. Au travers du personnel de conduite, la dimension humaine doit correspondre à la réglementation du code du travail ainsi qu'à tous les accords de branche et d'entreprise. Par conséquent, la

construction et la validation d'une offre peut être relativement chronophage. Dans ce contexte, il est difficilement envisageable de modifier cette offre fréquemment. En revanche, pour des systèmes sans conducteur type métro GoA4, la construction ainsi que la mise en œuvre sont beaucoup plus rapides.

5.4 Vers le dimensionnement capacitaire maximum

Comme nous l'avons déjà expliqué, la capacité d'un système de transport repose sur l'imbrication de la capacité d'emport des véhicules utilisés et la fréquence de passage aux arrêts. La fréquence de passage est également conditionnée par la capacité de la voie de circulation.

La capacité d'emport des véhicules affectés à une ligne peut être considérée comme intangible (sauf en cas de remplacement des véhicules existants par des véhicules plus capacitaires). Cependant cette notion de capacité d'emport des véhicules doit être analysée. La vision française de la capacité d'un véhicule correspond à 80 % de la capacité indiquée par le constructeur (4p./m²). La vision allemande est différente car la capacité d'un véhicule correspond à 65 % de la capacité théorique (Beauvais, J-M et al. 2016). La problématique de la capacité réelle des véhicules doit être considérée comme essentielle.

En ce qui concerne la fréquence de passage aux arrêts, celle-ci peut être considérée comme tangible. Par conséquent, une variation de la fréquence reste possible. Cependant la fréquence maximale de passage aux arrêts ou encore l'intervalle minimal entre deux véhicules sont régis par un certain nombre de paramètres. Nous tentons ci-dessous de lister ces paramètres en fonctions des systèmes de transport.

5.4.1 Les fréquences de passage

Pour un système autobus, la recherche de l'intervalle minimum sera régie par les paramètres suivants :

- Fluidité de la voie de circulation (niveau de réservation, niveau de priorisation aux feux, capacité des carrefours),
La fluidité des voies de circulation englobe l'aspect capacitaire de l'infrastructure mais également l'aspect régularité,
- Les temps d'arrêt en station pour la station la plus chargée,
- La configuration du terminus (temps de retournement et temps de battement),
- Le graphicage et l'habillage (temps de battement et relève conducteur),
- Les paramètres dynamiques des véhicules (vitesse, accélération/freinage).

Pour un système BHNS la recherche de l'intervalle minimum sera régie par les paramètres suivants :

- Fluidité de la voie de circulation (niveau de réservation, niveau de priorisation aux feux, capacité des carrefours),
La fluidité des voies de circulation englobe l'aspect capacitaire de l'infrastructure mais également l'aspect régularité,
- Les temps d'arrêt en station pour la station la plus chargée,
- La configuration du terminus (temps de retournement et temps de battement),
- Le graphicage et l'habillage (temps de battement et relève conducteur),
- Les paramètres dynamiques des véhicules (vitesse, accélération/freinage).

Pour un système tramway, la recherche de l'intervalle minimum sera régie par les paramètres suivants :

- La fluidité de la voie de circulation (niveau de réservation, niveau de priorisation aux feux, capacité des carrefours),
La fluidité des voies de circulation englobe l'aspect capacitaire de l'infrastructure mais également l'aspect régularité,
- Les temps d'arrêt en station pour la station la plus chargée,
- Le type et la position des appareils de voie pour la performance du retournement,
- Le graphicage et l'habillage (temps de battement et relève conducteur),
- Les paramètres dynamiques des véhicules (vitesse, accélération/freinage).

Pour un système type métro, la recherche de l'intervalle minimum sera régie par les paramètres suivants :

- La performance du système de signalisation (canton fixe, CBTC...),
Le niveau de performance du système de signalisation fixe l'aspect capacitaire de l'infrastructure,
- Les temps d'arrêt en station pour la station la plus chargée (fonction du flux voyageurs, du design des portes du véhicules et du quai),
- Le type et la position des appareils de voie pour la performance du retournement,
- Le graphicage et l'habillage (temps de battement et relève conducteur),
- Les paramètres dynamiques du train (vitesse, accélération/freinage),
- La longueur des trains (plus le train est long, plus l'intervalle entre deux convois doit être élevé).

5.4.2 La capacité des véhicules

La capacité théorique des véhicules annoncée par les constructeurs peut être remise en question. En effet, la détermination du nombre de passagers repose sur la norme usuelle de 4p./m². Une fois que le nombre de places assises est connu, le reste de la superficie au sol est transposé en nombre de passagers debout. Or cela sous-entend que chaque unité de surface au sol est utilisée. Dans la réalité, certaines parties de la surface ne seront jamais utilisées par les voyageurs. De plus, au cours de leur voyage, les voyageurs peuvent avoir en leur possession des sacs, des poussettes ou tout autre objet encombrant.

Pour cette raison simple, le calcul du dimensionnement d'un système doit admettre une réserve quant à la capacité d'emport des véhicules. *Pour la France, la capacité réelle considérée du matériel roulant correspond environ à 80 % de sa capacité théorique. En Allemagne cependant, le ratio utilisé, notamment pour le dimensionnement des projets de tramway, est généralement pris à 65 % (soit environ 2,5 personnes/m²) (Beauvais, JM et al. 2016).*

Le tableau ci-dessous (tableau 7) reprend les valeurs de capacités théoriques et les valeurs de capacité avec un ratio à 65 % par type de véhicule.

véhicule	BHNS 18m	BHNS 24m	TRAM 24m	TRAM 32m	TRAM 43m
capacité théorique	110	138	132	200	300
capacité réelle	71,5	89,7	85,8	130	195

Tableau 7 : Capacités théoriques et réelles des différents types de véhicules

Source : Beauvais, J-M et al. 2016

La matrice ci-dessous (tableau 8 issu de Beauvais, J-M et al. 2016) permet de simuler des fréquences de passage en fonction d'une part de la charge maximale en heure de pointe d'autre part en fonction de la capacité réelle des véhicules (65 % de la capacité théorique).

Prenons le premier calcul proposant une fréquence à 5 min 43 secondes. Une fois que la charge maximale est déterminée (750 voyageurs sur une période d'1 heure), elle est divisée par la capacité réelle des véhicules soit 71,5. On obtient donc 10,48. Cette valeur correspond au nombre de passages à effectuer afin d'emporter la charge. Ce nombre de passages doit être réparti sur les 60 min de l'heure de pointe. Pour ce faire, il est nécessaire de diviser 60 minutes par le nombre de passages nécessaire. On obtient, après conversion du résultat en minutes, un intervalle qui est de 5 minutes et 43 secondes. Le nombre de véhicules nécessaire pour assurer cette fréquence de passage n'est pas déterminé car le temps de révolution n'est pas indiqué.

fréquentation par jour	15000-22500	20000-30000	25000-37500	30000-45000	35000-52500	40000-60000	45000-67500	50000-75000	55000-82500	60000-90000	65000-97500	70000-115000
Charge maximale HP sens le plus chargé	750	1000	1250	1500	1750	2000	2250	2500	2750	3000	3250	3500
BHNS 18 m	5:43	4:17	3:25	2:51	2:27	2:08	1:54	1:42	1:33	1:25	1:19	1:13
BHNS 24 m	7:16	5:27	4:21	3:38	3:07	2:43	2:25	2:06	1:57	1:47	1:39	1:31
Tramway 24 m	6:54	5:12	4:12	3:25	2:54	2:36	2:12	2:03	1:52	1:45	1:34	1:28
Tramway 32 m	10:24	7:48	6:14	5:12	4:27	3:54	3:27	3:07	2:49	2:36	2:24	2:13
Tramway 44 m	15:36	11:42	9:21	7:48	6:40	5:51	5:12	4:40	4:15	3:54	3:36	3:20

	bon dimensionnement
	dimensionnement limite
	mauvais dimensionnement

Tableau 8 : Détermination des fréquences sur la ligne (en minutes)

Source : Beauvais, J-M et al. 2016

Les auteurs de cette étude jugent la qualité du dimensionnement par rapport à la fréquence de passage nécessaire. L'expérience révèle des difficultés d'exploitation pour un intervalle de temps inférieur à 3 minutes (pour des systèmes de surface ayant un certain niveau de réservation et de priorisation dans l'espace de circulation : type BHNS ou tramway). Au contraire, on considère qu'au-delà de 10 minutes, la ligne perd en attractivité.

« Dans les réseaux français, l'utilisation de la totalité de la capacité des véhicules (4 personnes/m²) permet une exploitation plus souple (fréquence plus faible). Le Busway à Nantes, équipé de véhicules de 18 m, est ainsi fréquenté par près de 38.000 voyageurs quotidiens à mesure d'un bus toutes les 3,5 minutes en heure de pointe. Néanmoins, la saturation du véhicule ne correspond pas aux attentes d'un véhicule à haut niveau de service » (Beauvais, J-M et al. 2016).

5.5 Les limites de capacité : saturation des systèmes

Le phénomène de congestion, propre à l'utilisation de l'automobile s'étend, à partir des années 1960 / 1970 aux transports collectifs de personnes sous la dénomination de « saturation ». En France, le phénomène fait son apparition sur le RER A du fait de la montée en puissance du quartier de la Défense dans les années 1980. Cette situation est également visible sur la ligne 13 du métro parisien pendant les heures de pointe. Bien entendu, bon nombre de systèmes dans les villes de province sont également « déclarés » saturés. Avec l'émergence des exigences de confort, la perception du phénomène de saturation s'amplifie. Le terme saturation peut être utilisé dans des contextes très différents. Par exemple, certains usagers peuvent déclarer qu'un système est saturé dès que les places assises d'un véhicule ne sont plus disponibles. D'autres déclareront qu'un système est saturé à partir du moment où la perception de confort est fortement dégradée notamment lorsque les personnes, à l'intérieur des véhicules, sont comprimées. On constate que le terme de saturation n'est pas défini. Il relève davantage de perceptions locales que d'une mesure normée. Par conséquent, le terme saturation repose, selon les exploitants ou usagers à une perception subjective.

Sous un angle plus technique, une limite de capacité ou « saturation », doit correspondre à une situation ayant des caractéristiques bien particulières. En effet, la littérature technique d'exploitation des systèmes de transport propose différentes vues plus ou moins liées entre elles.

Tout d'abord, nous présentons ci-dessous la traduction d'une notice d'un exploitant métro du réseau de la ville de Tokyo. Chaque taux de charge mesuré correspond à une situation voyageur. Dans cet exemple, le taux correspondant à 100 % correspond à la capacité du véhicule (places assises et debout). Au-delà de cette capacité, les situations sont caractérisées.

Densité voyageurs (taux de charge *)

Taux de charge voiture	Situation des voyageurs
0% (0 voyageurs/voiture)	• Pas de voyageurs.
50% (70 voyageurs)	• Tous les sièges sont occupés par les voyageurs.
100% (140 voyageurs)	• Les voyageurs sont supposés avoir chacun leur place : Soit un siège, soit une poignée, soit tenir une barre confortablement.
150% (210 voyageurs)	• Les épaules des voyageurs se touchent. Ils peuvent cependant lire un journal sans gêner les autres.
180% (250 voyageurs)	• Les corps des voyageurs se touchent mais ils peuvent encore lire un journal.
200% (280 voyageurs)	• Les corps des voyageurs se touchent et même se pressent les uns contre les autres, mais ils peuvent toujours lire un magazine (plus petit format qu'un journal).
250% (350 voyageurs)	• Les voyageurs ne peuvent plus bouger, ni contrôler leur inertie lors des secousses du véhicule. Les corps sont décollés du sol par la pression de la foule. Les portes ne s'ouvrent pas à cause de la pression.
300% (420 voyageurs)	• Proche de la limite physique de capacité. Danger pour les corps.
320% (450 voyageurs)	• Limite physique absolue.

* Voiture de « métro » à Paris (MP89) : 15m x 2,3m (95 voyageurs), à Tokyo : 20m x 2,6m (140 voyageurs)

Tableau 9: Description des densités voyageurs (métro de Tokyo)

Source : Abe, N. 2012 ¹³⁹

Pour Beauvais, J-M et al. (2016) on considère qu'il y a saturation dès que la charge HP estimée atteint 65 % de la charge théorique à 4 personnes / m². Cette approche relève du dimensionnement selon la méthode allemande. Pour la RATP, le phénomène de saturation est atteint dès lors que le ratio 4p./m² est dépassé. Ces deux premières approches relèvent de la notion de « confort » pour le voyageur.

Selon Beauvais, J-M et al. (2016), une limite de capacité peut se manifester selon différentes manières :

- Une surcharge du matériel roulant en heure de pointe, ce qui dégrade d'autant le niveau de service proposé à l'utilisateur,
- Une fréquence trop forte qui nuit à l'exploitation du service et qui peut entraîner la formation de trains de véhicules.

Dans cette approche, nous retrouvons la notion de « confort » mais également une notion plus technique au travers d'une instabilité de l'exploitation.

Pour Bousquet, D et al. (2009)¹⁴⁰, la saturation est une situation qui se caractérise par le fait qu'une partie significative des passagers à quai n'arrive pas à monter à bord d'un tramway faute de places disponibles. Dans cette étude, les auteurs soulignent que ce phénomène de

¹³⁹ Abe, N. *Vécus dans les foules tokyoïte et parisienne*. Présentation lors d'une conférence CERTU dans le cadre de la préparation d'un doctorat. 2011, 25 p.

¹⁴⁰ Bousquet, D. Lhomet, E. Rouffet, J-M. « La structuration des réseaux de province, quelles réponses à leur saturation ? Le cas de l'agglomération bordelaise ». *TEC*, 2009, numéro 203, p 44 – 50.

saturation bordelais est plus lié à une irrégularité des intervalles entre les rames qu'à une insuffisance globale des infrastructures. Ce constat, qui repose sur le lien entre la régularité du système et sa capacité sera abordé dans la suite du document.

Pour conclure, le terme saturation peut se caractériser par une notion de service dégradé du point de vue de l'utilisateur (inconfort), par une impossibilité du système à se maintenir en état nominal ou encore à une impossibilité d'ajouter une capacité complémentaire via une injection de véhicules supplémentaires.

Les limites de capacité obligent à porter un intérêt à la notion de réserve de capacité : Une étude du STIF, portant sur la problématique de désaturation de la ligne 13, propose la définition suivante : « *Propriété d'une ligne de transport à pouvoir accueillir un nombre croissant d'utilisateurs, sans que les conditions de transport pour les usagers n'en soient dégradées* »¹⁴¹.

Nous pouvons compléter cette définition en faisant une distinction entre une réserve de capacité physique et dynamique. En effet, nous considérons qu'une réserve de capacité peut être en rapport avec la composante organique (véhicule, infrastructure) aussi bien qu'avec la composante fonctionnelle (intervalle).

Afin d'illustrer cette distinction capacitaire, nous décrivons l'exemple de la mise en œuvre du tramway de Tours. Mise en service le 31 août 2013, la ligne de tramway de Tours est exploitée à l'aide de véhicules Alstom de type CITADIS 402. Ces véhicules de 43 mètres proposent une capacité d'emport de 280 passagers. Dans le cadre du dimensionnement du projet, la fréquentation attendue était de 54 000 montées/jour. Cette estimation de voyageurs n'obligeait par la maîtrise d'ouvrage à opter pour des véhicules aussi capacitaires. Néanmoins, le choix a été fondé sur une volonté de surdimensionner la capacité d'emport unitaire des véhicules et de diminuer les fréquences de passages. Dans ce cas concret, il existe une réserve de capacité dynamique importante. En effet, lorsque le système de transport sera plus sollicité, celui-ci pourra répondre, en termes d'offre, en augmentant la fréquence de passage aux arrêts. Le tramway de Tours dispose donc d'une réserve de capacité dynamique importante.

Comme le rappelle Beauvais, J-M et al. (2016), il a été considéré acceptable de mettre à la disposition des usagers une fréquence de 6 minutes en heures de pointe avec des véhicules de 44 mètres et non de 5 minutes avec des véhicules de 32 mètres.

Cependant, cette approche conduit à deux remarques. La première repose sur l'attractivité de l'offre de transport. En effet, lorsque la capacité d'emport des véhicules est surdimensionnée par rapport à la fréquentation attendue, les fréquences sont diminuées afin de correspondre au mieux à la demande. Cependant, une fréquence de passage trop basse peut diminuer l'attractivité du système. La seconde concerne le dimensionnement du parc. Une augmentation des fréquences de passage nécessitera, pour un temps de rotation égal, un nombre de rames plus important. Cela peut donc correspondre à un investissement conséquent.

¹⁴¹ STIF. *Désaturation de la ligne 13 du métro par le prolongement de la ligne 14 – Bilan de la concertation et orientation pour le dossier d'enquête publique*. 2010.118 p.

Le rapport intitulé *Etude de désaturation de la ligne 13*¹⁴² propose différents projets pour désaturer la ligne 13 du métro parisien. Afin d'enrichir notre propos concernant les différentes capacités, nous portons un intérêt au projet D : Ligne 13 +. En effet, ce projet consistait à augmenter la capacité du système en améliorant l'existant. Les variables étaient les suivantes :

- La réduction de l'intervalle entre les trains par l'automatisation,
- L'augmentation de la capacité des matériels roulants à longueur de quai constante,
- L'allongement des trains de 5 à 6 voitures et ses conséquences sur toutes les composantes du système de production du transport,
- La gestion des espaces et en particulier l'amélioration des flux passagers sur les quais.

Ces différentes propositions portaient aussi bien sur les capacités dites « physiques » que « dynamiques ».

¹⁴² STIF – RATP – DAT. *Etude de désaturation de la ligne 13 - Rapport principal*. 2007. 170 p

5.6 Un regard critique sur cette approche classique du dimensionnement

Tout comme nous avons pu l'observer en analysant la documentation relative au dimensionnement de la voirie, la capacité d'un système de transport se dimensionne également sur l'heure de pointe.

La grande majorité des systèmes de transport urbain tend vers une exploitation en **omnibus à service unique de terminus à terminus**¹⁴³ En d'autres termes, toutes les stations sont desservies par tous les véhicules. Par conséquent, l'offre mise en œuvre pour absorber une forte charge sur une interstation donnée sera également disponible pour toutes les autres. De ce fait, cette approche produit une offre surcapacitaire structurelle qui, bien entendu, ne permet pas de réaliser une optimisation du coût de l'exploitation et de maintenance.

Nous présentons ci-dessous une visualisation de la charge et de l'offre d'un système de transport dans un repère espace-temps. Cela nous permet de mettre en vis-à-vis l'offre et la fréquentation.

Visualisation 3D de la charge

De manière générale, l'offre maximale est dimensionnée sur le « pic » de charge qui se situe généralement aux heures de pointe. Ce « pic » ne concerne que quelques interstations voire qu'une interstation. Le graphique ci-dessous (figure 53) représente les charges interstation cumulées par direction pour des tranches horaires d'une heure et d'une amplitude de 5 h à 21 h. Ces valeurs sont issues de mesures réelles d'un système de transport exploité avec des autobus.

¹⁴³ Il existe différents types d'exploitation. On peut citer l'exploitation omnibus, en quinconce, dissymétrique ou encore en carrousel. Une exploitation omnibus peut également être complétée par des renforts ou des partiels.

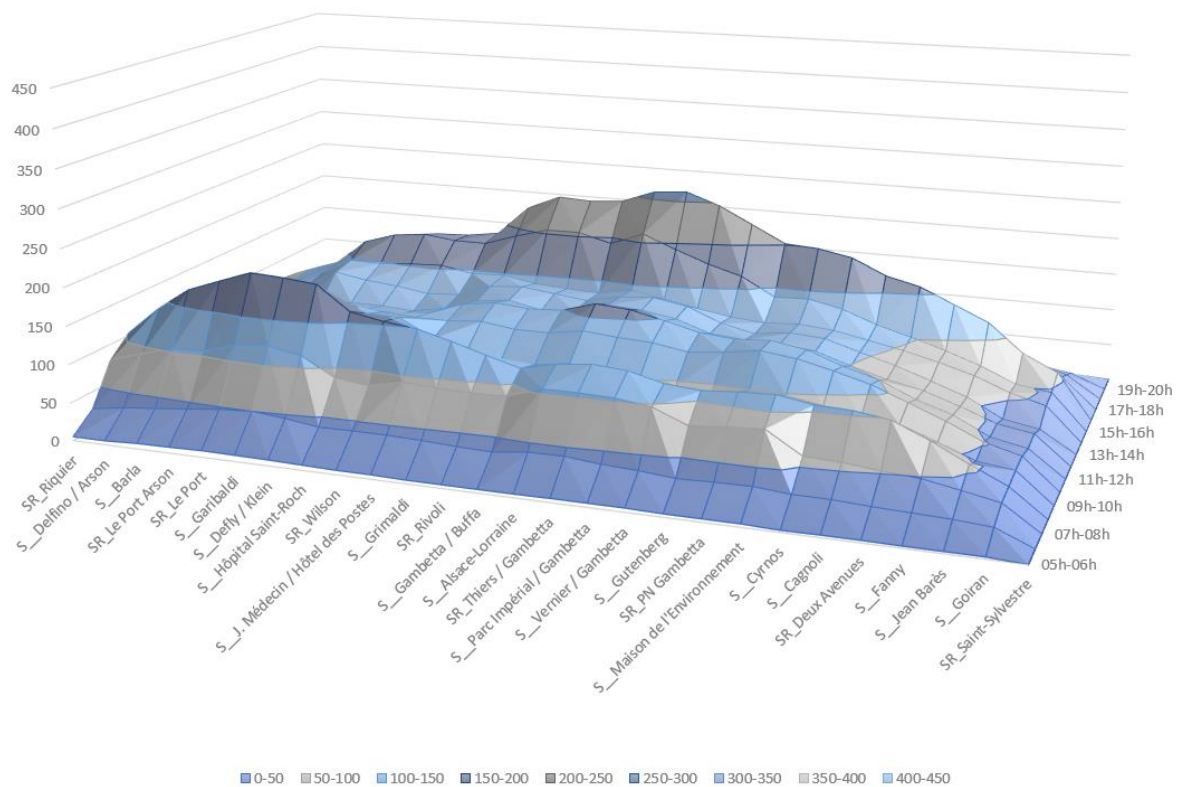


Figure 53 : Représentation 3D de la charge cumulée par tranche horaire et par interstation

Source : Auteur

Cette représentation 3D permet de visualiser le développement de la charge cumulée, pour une direction, tout au long de la journée. Les sommets de la surface correspondent aux charges interstation les plus élevées. Nous remarquons que ces charges sont variables aussi bien sur l'axe de l'espace (interstation) que sur l'axe du temps (tranche horaire).

Nous constatons deux « pics » de charge notables qui correspondent aux heures de pointe matin et soir. Soulignons également l'apparition d'un pic de charge entre 11 h et 12 h. La valeur la plus haute correspond à environ 262 et se situe sur une interstation entre 16 h et 17 h.

De manière générale, le nombre de départs théoriques par tranche horaire, sera dimensionné en fonction du cumul de charge de l'interstation le plus élevé.

Visualisation 3D de l'offre

Dans les exemples de dimensionnement des systèmes expliqués précédemment, nous avons souligné que les valeurs de charge les plus élevées sont dimensionnantes. La représentation ci-dessous (figure 54) illustre l'offre de transport en relation avec les valeurs de cumul de charge précédentes. Ce système repose sur une exploitation en omnibus à service unique de terminus à terminus.

Pour cet exemple, les véhicules utilisés sont des bus standard d'une capacité total de 70 places (assises et debout). L'offre totale correspond au produit entre le nombre de départs inscrit au tableau de marche et la capacité unitaire des véhicules.

Capacité cumulée par tranche horaire et par interstation

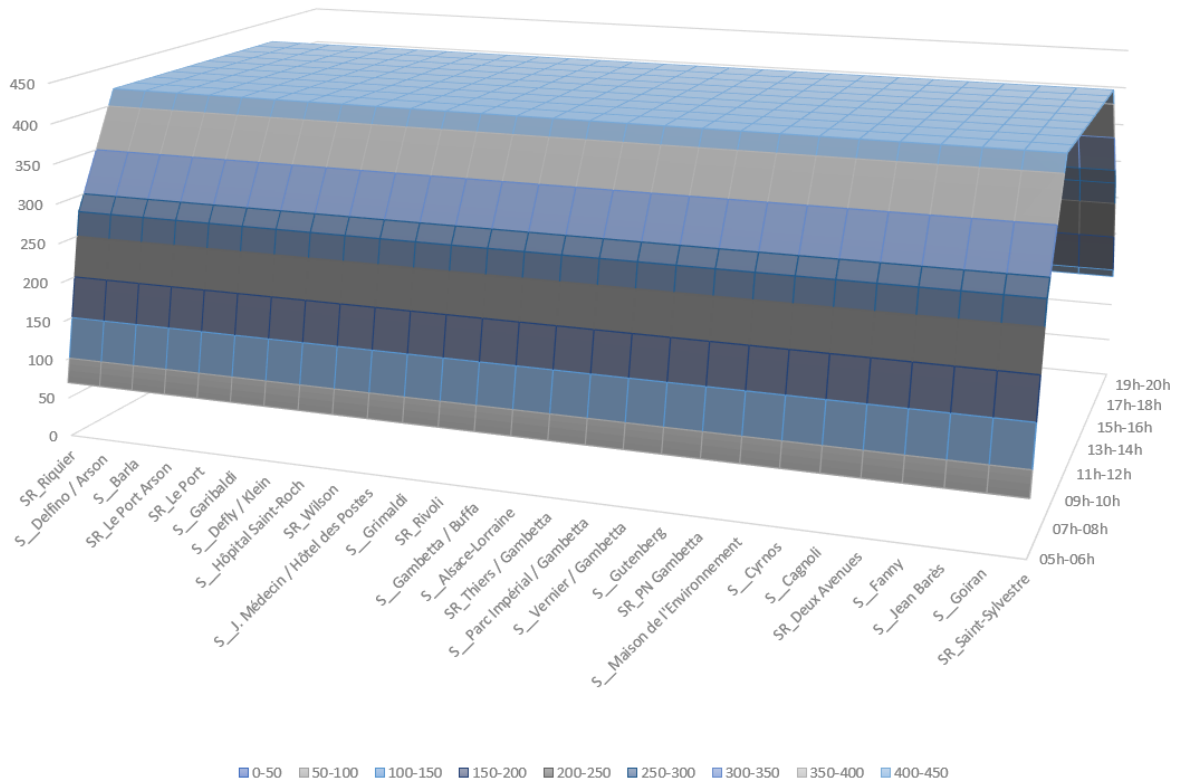


Figure 54 : Capacité cumulée par tranche horaire et par interstation

Source : Auteur

Les deux « pics » de charge se situent d'une part au niveau de l'heure de pointe du matin avec une valeur maximale de 200 ; d'autre part au niveau de l'heure de pointe du soir avec une valeur maximale d'environ 260. Pour chacune de ces tranches horaires, la capacité offerte est de 420. Par conséquent, l'offre est fortement dimensionnée par rapport au cumul de charge.

De plus, cet exemple se caractérise par un nombre de départs par heure identique de 8h00 à 18h00. Pour cette raison, la voûte de la représentation graphique conserve sa limite haute une grande partie de la journée. Cette offre présente deux caractéristiques de

surdimensionnement. La première correspond au calcul de l'offre pour les « pics » de charge en heure de pointe. L'offre correspond à une capacité de 420 alors que la charge la plus élevée est de 260. La seconde correspond à l'uniformité de l'offre tout au long de la journée alors que les charges maximales en dehors des heures de pointe atteignent un maximum d'environ 160. L'exploitation omnibus engendre une surcapacité structurelle car le nombre de départs par tranche horaire doit permettre d'absorber le « pic » de charge qui n'est atteint que pour une ou quelques interstations. De plus, cet exemple issu de données réelles montre également que le nombre de départs peut être trop important pour les heures de pointe en relation avec la charge et maintenue tout au long de la journée.

Il est essentiel de préciser que dans ce type d'approche, la comparaison entre fréquentation et offre est agrégée sur une tranche d'une heure. A l'intérieur d'une tranche horaire, il existe donc plusieurs départs théoriques ainsi qu'un flux voyageurs qui se répartit d'une manière continue ou non continue (en relation avec la fréquence de passage). Une partie conséquente du flux voyageurs peut se concentrer sur un ou quelques départs de cette tranche horaire. Cette situation peut engendrer des phénomènes de surcharge. Par conséquent, analyser le flux voyageurs nécessite une certaine finesse notamment pour adapter le type de véhicules selon les courses.

Cette situation de surcharge peut également être le résultat d'une irrégularité trop forte. Ce point sera abordé dans la suite du document.

Afin de minimiser une offre structurellement surcapacitaire, certains exploitants mettent en œuvre des courses spéciales qui permettent d'ajuster l'offre en cas de forte charge. Ces courses peuvent porter le nom de « renfort » ou « service partiel ».

Il existe également d'autres types d'exploitation alternatifs au principe de l'omnibus à service unique de terminus à terminus. On peut citer par exemple les exploitations en quinconce (toutes les stations ne sont pas desservies). Ce type d'exploitation est observable par exemple sur les lignes du RER parisien. Il existe d'autres types d'exploitation ayant une capacité plus forte pour s'adapter à la demande notamment sur les systèmes ferroviaires.

Ce constat amène naturellement un questionnement sur la faisabilité technique de réaliser une offre de transport dynamique adaptée à la fréquentation. Cette gestion dynamique de l'offre (exploitation Agile) est envisageable notamment pour les systèmes considérés de Mass Transit. Nous retenons une définition du Mass Transit parue dans le numéro 5 de la revue *Réseau le mag* de SNCF Réseau en 2018.¹⁴⁴

« Le Mass Transit est le nom donné à l'ensemble des problématiques qui caractérisent le transport des voyageurs en zone dense. Parmi elles figurent notamment les flux voyageurs à volumétrie élevée, la saturation des nœuds ferroviaires et l'insertion des circulations dans un écosystème complexe avec, notamment, la nécessité de préserver les plages horaires pour maintenir l'infrastructure ».

Cette définition est orientée transport ferroviaire mais peut se transposer par analogie aux systèmes de transport routier.

¹⁴⁴ Réseau le mag « Au cœur des grandes métropoles, le Mass Transit » Réseau le mag ; le magazine de SNCF Réseau. numéro 5, 2018. p. 3.

6. La mesure du système mis en œuvre

Une fois le système mis en œuvre, des mesures de temps de parcours et le comptage des passagers devraient être réalisés notamment pour ajuster le tableau de marche. Ces mesures régulières servent à contrôler l'évolution du système et permettent également de disposer d'informations pour alimenter des modèles de simulation concernant notamment la vitesse et la fréquentation en cas de restructuration partielle ou complète du réseau.

6.1 Le temps de parcours

Selon l'UTP (1988), une course est définie comme « *le déplacement d'une voiture entre deux points caractéristiques (par exemple entre deux terminus successifs) effectué dans le cadre d'une mission. Une course est caractérisée par son heure de départ et son temps de parcours* ».

Le temps de parcours est défini comme « *le temps nécessaire à l'exécution d'une mission, applicable aux différents moments de la journée, de la semaine et de l'année. Le temps de parcours d'une course est le temps nécessaire à l'exécution de cette course* ».

En amont de l'édition du tableau de marche, la construction du graphique nécessite une bonne connaissance des temps nécessaires à l'exécution des courses. En fonction de l'itinéraire, du niveau de réservation ainsi que du niveau d'automatisation, la variabilité du temps de parcours est plus ou moins importante.

Pour certains systèmes, la variabilité du temps de parcours est importante aussi bien pour une course donnée que pour l'ensemble des courses tout au long de la journée. Dès lors, l'objectif est de déterminer le temps de parcours qui conviendra à un maximum de courses garantissant ainsi le plus fort taux de ponctualité.

Pour d'autres, totalement protégés sur leur itinéraire avec un niveau d'automatisation important, la question de la détermination des temps de parcours peut se révéler moins cruciale. En effet, une marche à blanc permet de déterminer les temps¹⁴⁵. Il sera néanmoins important de déterminer les temps nécessaires aux mouvements voyageurs en station qui sont en relation avec le volume du flux.

La problématique de détermination des temps de parcours concerne en premier lieu les systèmes de surface avec conducteur ayant des interactions avec des éléments extérieurs.

Sur une même ligne, le temps de parcours évolue selon une certaine temporalité tout comme la fréquentation (heures de la journée, période...). En effet, les véhicules affectés à l'exploitation d'un système de transport, avec ou sans réservation de voirie, subissent des variations de vitesse du fait de l'accroissement des circulations et/ou de l'affluence voyageurs.

Pour Poupard, X. (1982), les logiques suivantes s'appliquent :

¹⁴⁵ Les polygones de vitesses théoriques sont également utilisés.

- Un **temps de parcours uniforme trop faible** engendre une désorganisation du service qui conduit soit à une dégradation quantitative et qualitative de la production, soit à des surcoûts provenant de la mise en œuvre de moyens supplémentaires de régulation dont l'utilisation ne peut jamais être optimisée.
- Un **temps de parcours uniforme trop long** engendre une majoration improductive des temps de stationnement en terminus aux heures creuses.

Rappelons ici que le temps de parcours varie tout au long de la journée. Les praticiens savent que le temps de parcours doit être adapté aux variations et ne doit être ni trop élevé ni trop court. La non-adéquation du temps de parcours théorique au temps de parcours réel engendre un grand nombre de désagréments au niveau de la maintenabilité de l'exploitation.

Nous représentons ici la variabilité du temps de parcours tout au long d'une journée à l'aide de deux figures.

La première représentation est un nuage de points (figure 55). Le nuage de points est très utilisé dans le domaine de l'exploitation des transports publics de voyageurs en milieu urbain pour déterminer le temps de parcours. Ce nuage de points alimenté par un recueil de données réelles (mesures terrain ou mesure à l'aide d'un système embarqué) permet de constater que le temps moyen nécessaire à l'exécution d'une course n'est pas le même tout au long de la journée. Soulignons que cette variation du temps de parcours peut être beaucoup plus prononcée notamment sur un système type autobus sans réservation de voirie car celui-ci subit, entre autres, les aléas de circulation.

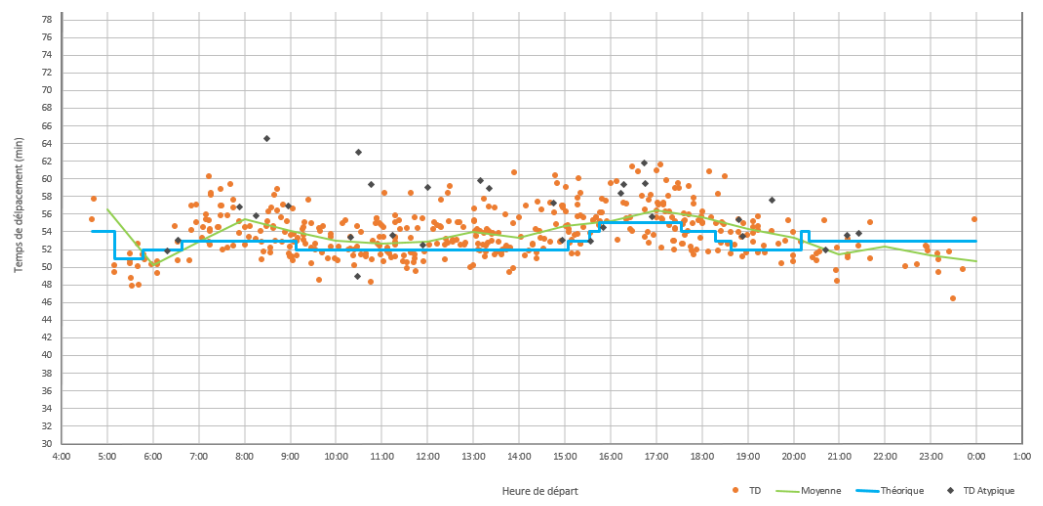


Figure 55 : Nuage de points de temps de parcours : relevé des temps de parcours sur un système tramway (2014)

Source : Auteur

Dans cette représentation graphique, l'axe des abscisses correspond aux différentes heures de la journée et l'axe des ordonnées au temps de parcours des courses mesurées. Chaque point orange correspond à un temps de parcours d'une course pour une direction. Afin d'obtenir une vision complète d'une situation, il est nécessaire d'obtenir suffisamment de

points afin de visualiser l'évolution du temps sur l'ensemble d'une journée. Dans la pratique, on y ajoute généralement deux courbes :

- Valeur moyenne des temps de parcours des courses mesurées (courbe verte)
- Valeur du temps de parcours théorique (courbe bleue)

Cela nous permet de constater l'évolution des temps de parcours sur l'ensemble de la journée ainsi que pour une même heure de départ théorique.

En effet, si l'on se concentre sur la valeur moyenne des temps de parcours des courses mesurées, nous observons que l'on passe d'une moyenne de 50 minutes à 6 h à 56 minutes à 17 h soit une différence de 6 minutes. De plus, les temps de parcours des courses mesurées aux alentours de 17 h peuvent passer de 52 minutes à 62 minutes soit une différence de 10 minutes. Ces deux cas concrets permettent de visualiser cette notion de variabilité. Nous reviendrons sur cette notion plus longuement dans le chapitre 3.

La deuxième représentation est issue d'une étude de l'université de Bruxelles de 2008¹⁴⁶ et permet de représenter dans un repère espace/temps les variations de vitesse commerciale moyenne et d'irrégularité tout au long de la journée sur le réseau de transport bruxellois.

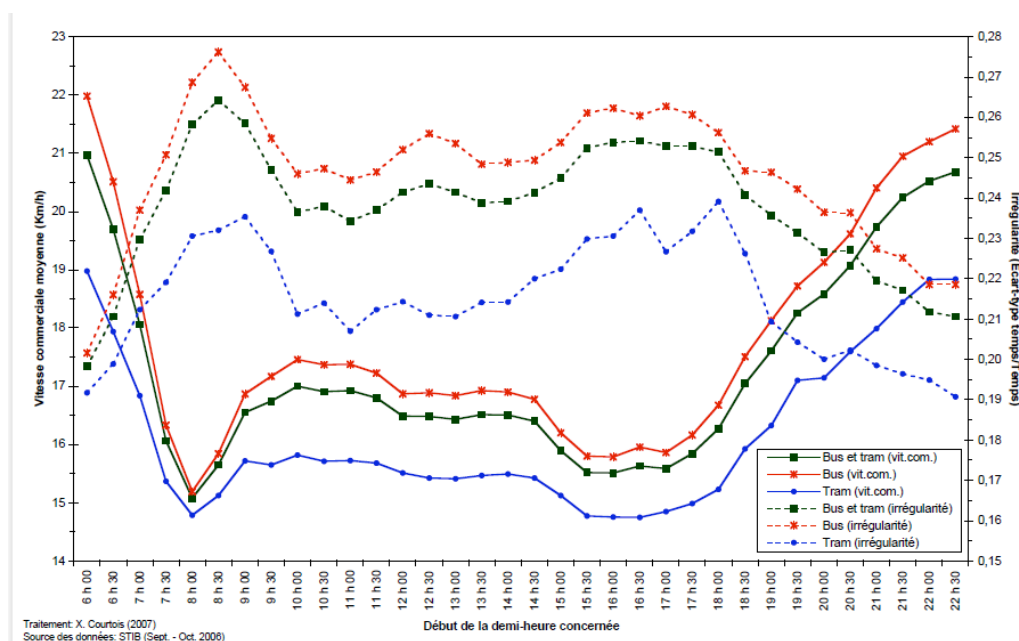


Figure 56 : Temporalité de la vitesse commerciale et de l'irrégularité sur le réseau STIB en 2006 (semaine entre 6h00 et 23h00 par tranche de 30 minutes)

Source : Courtois, X. Dobruszkes, F. 2008

Pour ce graphique, nous retrouvons en abscisse les heures de la journée. Les axes des ordonnées, ont dans le cas présent deux unités : l'une concerne la vitesse en km/h et l'autre l'irrégularité du temps de parcours au travers de l'utilisation de l'écart-type du temps de parcours. Cette représentation permet de constater que la vitesse moyenne des véhicules

¹⁴⁶ Courtois, X. Dobruszkes, F. « L'(in)efficacité des trams et bus à Bruxelles : une analyse désagrégée ». *Brussels Studies*, numéro 20, 2008, 24 p.

varie tout au long de la journée. Par conséquent, il en est de même pour les temps de parcours. Le phénomène d'irrégularité est également représenté et varie lui aussi toute la journée.

Il est frappant de constater que les heures de pointe matin et soir partagent des caractéristiques identiques à savoir une diminution des vitesses et une augmentation de l'irrégularité. Ces notions seront également approfondies au chapitre 3.

Toute la difficulté des praticiens en charge de l'élaboration des temps de parcours repose sur le juste positionnement d'une part du temps de parcours afin d'assurer un bon niveau de ponctualité et de régularité, d'autre part du temps de battement permettant ainsi d'absorber, au mieux, cette variabilité et donc d'assurer un certain niveau de ponctualité pour les courses qui vont suivre.

Nous présentons ci-après les différentes approches de détermination d'un temps de parcours pour une ligne qui sont bien entendu plus complexes dès lors que celles-ci s'appliquent à l'ensemble d'un réseau en tenant compte des correspondances, des relèves conducteurs, de la dimension sociale du temps de travail, etc. La logique réseau intègre ce qui suit mais contient un spectre plus large.

Avant d'aborder les différentes approches permettant de dimensionner le temps de parcours, il est essentiel de rappeler l'importance des stations considérées comme des points de référence ou encore points de régulation. Pour une direction donnée, il est nécessaire de découper l'itinéraire en sections de ligne à l'aide de points de référence. Une section de ligne correspond à la succession de stations entre deux points de référence. Dans certains cas particuliers, deux points de référence peuvent se suivre. La direction d'un itinéraire est découpée en différents tronçons.

Les points de référence d'une ligne peuvent être déterminés selon les critères suivants :

- Terminus partiels,
- Point de déparation des antennes (fourche),
- Point de relève conducteur,
- Environnement urbain permettant la manœuvre de régulation,
- Environnement urbain permettant un temps d'immobilisation sans entraver les autres circulations,
- Paliers de la vitesse commerciale,
- Pôles de correspondance avec pratique ou non de « rendez-vous »¹⁴⁷.

De manière générale, les temps de parcours sont analysés, pour une ligne donnée, entre les points de référence. Néanmoins, quelques réseaux déterminent leurs temps de parcours pour l'ensemble de leur ligne et non entre points de référence. Les différences approches citées ci-après s'appliquent pour ces deux types de structuration.

¹⁴⁷ L'expression « rendez-vous » correspond aux regroupements de véhicules à une station donnée avec un départ sur ordre PCC (Poste de Commande Centralisé).

6.1.1 L'approche empirique

Il existe différentes méthodes empiriques pour déterminer les temps de parcours. Chaque réseau de transport vit ses propres expériences et capitalise ses propres connaissances. Il est important de souligner que de nombreuses méthodes empiriques ont fait leur preuve. Ces méthodes empiriques reposent sur des approches plus ou moins scientifiques. En effet, certains praticiens appliquent des méthodes à caractère historique et d'autres avec un regard porté sur la statistique. Nous décrivons ci-après les méthodes pour déterminer les temps de parcours et les temps de battement.

La première méthode est issue de l'ouvrage de Méthodes d'exploitation de Poupard, X. (1982). Dans cet ouvrage, la méthode de détermination du temps de parcours adapté est issue d'une ancienne règle de la RATP.

Dans un premier temps, il est indispensable de disposer d'un échantillon de mesures. Ces échantillons étaient constitués par des mesures effectuées par des agents sur le terrain : les chronométrages. Une fois les données recueillies, elles étaient représentées sous forme de nuage de points. Le premier travail consistait à éliminer les valeurs aberrantes. L'élimination des valeurs aberrantes reste aujourd'hui pratiquée. La prise en compte de valeurs « hors normes » agirait sur la dérive du temps de parcours par rapport à la réalité. Une dérive vers le haut amène à une augmentation du coût d'exploitation.

L'ancienne règle RATP proposait, une fois les valeurs aberrantes exclues, de classer les valeurs en trois tiers. La moyenne du deuxième tiers était retenue comme le temps de parcours adapté.

Il existe également, à la même époque, une nouvelle approche qui consiste à utiliser la valeur moyenne de l'ensemble de l'échantillon (G. Amar et J. Girard 1982¹⁴⁸).

La différence entre ces deux approches est intéressante car elle conduit indirectement à considérer la « tension » du temps de parcours. Nous entendons ici par « tension », le fait de retirer quelques minutes au temps de parcours total afin de limiter les passages de véhicules en avance. De plus, la mise en œuvre d'une tension permettra de tonifier la conduite et limitera une éventuelle dérive du temps de parcours vers le haut au fil du temps.

D'autres réseaux intégraient dans leur approche l'instauration d'une tension. La pratique traditionnelle reposait sur le retrait de 1 à 2 minute(s) sans tenir compte ni du temps de parcours total ni de la longueur de la ligne.

Cette approche ne repose pas sur une méthode scientifique rationnelle et soulève des interrogations telles que la répartition du temps entre les points de référence. En effet, le ou les inter point(s) de référence subissant la tension ne sont pas clairement identifié(s). Cela peut engendrer des difficultés à maintenir un niveau de ponctualité et une désorganisation de l'exploitation.

¹⁴⁸ Amar, G. Girard, J. « Temps de battement et fiabilité de l'horaire ». *Transport Public*. Numéro 795 p. 42 – 46, numéro 796 p. 45 – 50, 1982.

De plus, le temps de parcours soustrait pour permettre la tension était souvent réintégré au temps de battement comme un temps supplémentaire. Cette situation pouvait rendre plus difficiles d'éventuelles recherches de productivité lors des discussions d'ordre social.

Avec l'apparition des systèmes embarqués, les échantillons de mesures sont devenus plus importants. La première étape consiste toujours à éliminer les valeurs dites « aberrantes ». Ensuite, certains praticiens déterminaient, selon la nature de l'itinéraire de la ligne, des critères permettant de diminuer le temps de parcours. Ces critères pouvaient être l'optimisation des temps consacrés au débarquement et embarquement des clients en relation avec la fréquentation des stations ou encore les éléments de voirie générant des diminutions de vitesse voir des immobilisations de véhicules. Une fois pris en compte, il est possible de déterminer une tension. Cette pratique, pour déterminer le niveau de tension, ne repose pas sur des mesures précises. La détermination de la valeur de la tension reste à dire d'expert.

Dans la pratique, il existe également différentes approches pour déterminer les temps de battement. Certains déterminent le temps de battement en retenant 10 % de la somme du temps de parcours adapté pour le sens aller et retour ajouté de 2 minutes. Ce temps est ensuite reparti sur les deux terminus.

Toujours dans l'ouvrage de Poupard, X (1982), il est indiqué que le temps de battement minimum est en relation avec la durée de l'intervalle de la ligne ainsi que l'écart type du temps de parcours. L'ouvrage propose une table de dimensionnement en fonction de l'intervalle (figure 57).

Intervalle de la ligne	Valeur du battement
de 3 à 6 min	2 écarts-types du temps de parcours
de 6 à 10 min	1,5 écart-type du temps de parcours
Plus de 10 min	1 écart-type du temps de parcours

Figure 57 : Table de dimensionnement du temps de battement

Source : Poupard, X. 1982

6.1.2 L'approche par l'occurrence

Une étude statistique de Georges Amar datant de 1986 et publiée par la revue de l'UITP¹⁴⁹ permet de formaliser les approches empiriques citées au point précédent. Cette étude se concentre sur la nature même de la distribution de la variable « temps de parcours » afin d'en connaître ses propriétés.

Le temps de parcours doit être considéré comme une variable aléatoire dont la distribution est connue au moyen d'échantillon de mesures. Cette distribution est très généralement proche

¹⁴⁹ Amar, G. « L'optimisation des temps de battement des autobus aux terminus ». *Revue de l'UITP*, 1986, p 35 - 46

d'une loi normale (Amar, G. 1986). Par conséquent, la variable temps de parcours peut être représentée par la figure 58 ci-dessous.

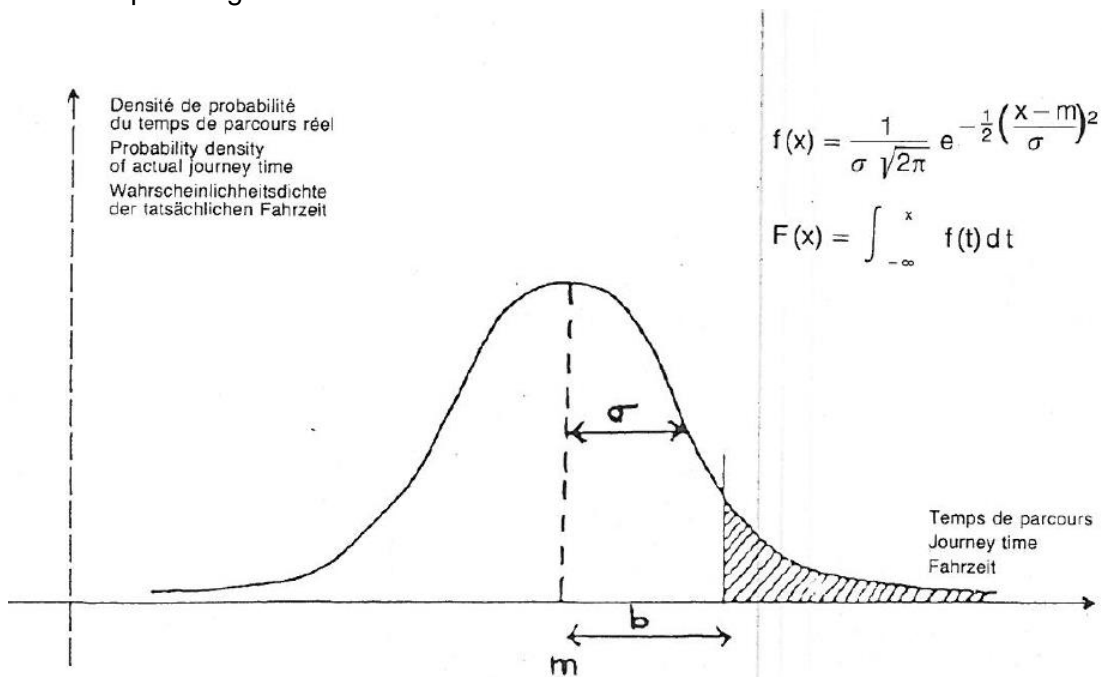


Figure 58 : Représentation de la distribution de la variable « temps de parcours »

Source : G. Amar 1986

Cette approche permet de poser une base scientifique pour la détermination du temps de parcours adapté. Les propriétés suivantes peuvent être listées en cas d'utilisation de la valeur moyenne pour déterminer les temps de parcours :

- 50 % des véhicules mettront moins de temps que la valeur moyenne et seront par conséquent en avance,
- 50 % des véhicules mettront plus de temps que la valeur moyenne et seront par conséquent en retard.

L'image ci-dessous (figure 59) permet quant à elle de retranscrire la distribution en intégrant les notions d'avance et de retard.

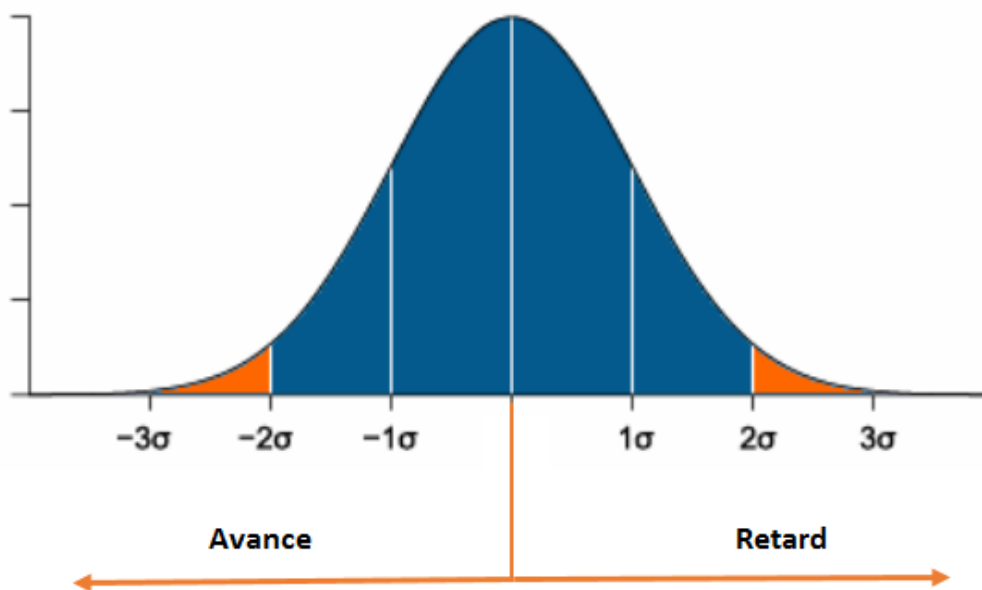


Figure 59 : Positionnement des parts avance / retard en relation avec la distribution

Source : auteur

Cette approche permet de confirmer qu'un dimensionnement de temps de parcours trop important favorise l'avance et donc des temps d'arrêt improductif. A l'inverse, un dimensionnement de temps de parcours trop court favorise le retard et donc une désorganisation du service. Les logiques de détermination du temps de parcours par Poupard, X. (1982), décrites au point précédent, sont confirmées.

Certains praticiens restent critiques vis à vis de cette approche qui consiste à conclure que la distribution de la variable « temps de parcours » est proche d'une loi normale. En effet, la distribution du temps de parcours en est proche mais possède ses propres particularités notamment un étalement de sa distribution plus important pour les valeurs hautes.

Néanmoins, la méthode par occurrence reste une méthode rigoureuse pour déterminer le temps de parcours adapté. Cette approche permet de mettre en superposition les contraintes de qualité notamment celle relative à la ponctualité.

Dans cette étude de 1986, Georges Amar aborde également la notion de temps de battement qu'il définit comme suit :

« Les lignes régulières fonctionnent selon un « horaire » c'est-à-dire pour chaque journée ou type de journée, un programme des heures de départ et d'arrivée des autobus aux terminus. Le temps laissé entre l'arrivée et le départ prévus successifs d'un autobus à un terminus est appelé temps de battement.

Le temps de battement assure essentiellement deux fonctions :

- *Fonction « personnel » : temps pendant lequel le conducteur assure des opérations de service à terre et se détend,*

- Fonction « régulation » et en particulier de « fiabilité de l'horaire » : plus le battement est important plus la probabilité pour que les départs se fassent à l'heure prévue sera élevée. »

Si l'on considère que la fiabilité de l'horaire est une fonction croissante du rapport battement / écart type du temps de parcours mesuré (figure 60), alors cela sous-entend que :

- Pour un battement donné, la fiabilité décroît lorsque l'écart-type du temps de parcours augmente,
- Pour un écart type de temps de parcours donné, la fiabilité croît avec le battement.

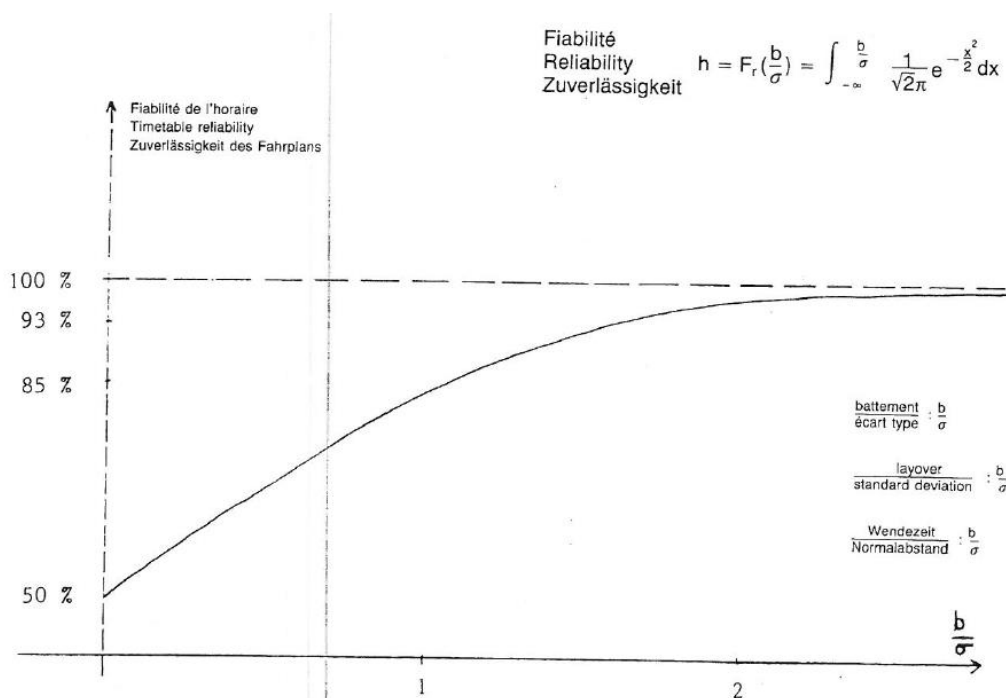


Figure 60 : Représentation de la fiabilité de l'horaire

Source : G. Amar 1986

L'auteur propose une approche mathématique permettant de dimensionner le temps de battement optimal en prenant en compte deux paramètres :

- La fiabilité de l'horaire,
- Le coût d'exploitation.

La formule proposée est la suivante :

$$b^* = \sigma \cdot \left(3 - \sqrt{\frac{25.1}{\sigma \cdot N}} \right)$$

Avec

- b^* = le battement optimal,
- σ = l'écart-type des temps de parcours amont,
- N = le nombre de véhicules en service,
- I_0 = l'intervalle moyen prévu au départ si on prend $b = 0$ (dans la formule $R = N.I$)

Dans cette étude, l'auteur cherche à déterminer le temps de battement optimal sachant que celui-ci permet de fiabiliser l'horaire mais augmente les coûts d'exploitation du fait du temps d'immobilisation des véhicules (augmentation du temps de révolution).

Nous rappelons que ces démonstrations issues du système « autobus » sont transposables aux autres systèmes de surface avec conducteur ayant des interactions avec des éléments extérieurs.

6.1.3 Les pratiques actuelles

Comme nous avons pu le constater, il existe différentes approches pour déterminer le temps de parcours adapté et le temps de battement minimum. Ces approches sont décrites dans des articles et ouvrages déjà anciens. Ce type d'études est très peu répandu et mériterait d'être complété par différentes approches sous forme de « recherche - action » afin de comparer les niveaux de ponctualité attendus en lien avec le coût d'exploitation. Le tout devrait être contextualisé selon les types de systèmes de transport.

De manière générale, les approches mises en œuvre sur les réseaux tiennent compte de la pratique historique du réseau, de la taille et du niveau de technicité des personnes en charge de la construction du tableau de marche. Bien entendu, la méthode tient également compte du niveau d'implantation des solutions informatiques dans les entreprises.

A la suite de différents entretiens menés au cours de cette recherche, nous constatons qu'il existe différentes pratiques locales. Certains utilisent des méthodes empiriques robustes et acceptées dans l'entreprise tandis que, pour d'autres, l'outil informatique se substitue aux méthodes traditionnelles. Dans les deux cas, il est courant d'observer une méconnaissance des fondements théoriques.

D'un point de vue statistique, il est recommandé de maintenir une tension sur le temps de parcours. Cette tension peut être déterminée à l'aide des quantiles. Nous rappelons qu'une mise sous tension de l'exploitation permet de diminuer les temps improductifs et engendre une dynamique de vitesse (amélioration de la productivité). Le temps alloué devrait quant à lui correspondre à une valeur permettant d'englober environ 80 à 90 % des valeurs mesurées. Georges Amar utilise le terme de « fiabilité de l'horaire », les praticiens utilisent le terme de

« robustesse de l'exploitation ». Par définition, la différence entre le temps alloué et le temps de parcours permet d'obtenir le temps de battement minimum.

Dans les réseaux qui doivent répondre à des critères de qualité vis-à-vis de leur autorité organisatrice, l'avance par rapport à l'horaire indiqué est plus sanctionnée pécuniairement que le retard, ce qui se comprend du point de vue du voyageur.

Par ailleurs cette approche n'intègre pas la dimension « sociale » pour les systèmes de transport intégrant du personnel de conduite. Cette dimension reste cependant non négligeable dans la conception des temps de parcours et des temps de battement pour le personnel de conduite.

La planification du temps de parcours n'intègre que très rarement les temps d'immobilisation des véhicules en station à l'exception des métros. Cette prise en compte de cet aspect pour les autres systèmes pourrait être une piste d'optimisation. Dès lors que la variabilité du temps de parcours existe, le but est de rechercher à maximiser la ponctualité et la robustesse de l'exploitation.

L'expérience et la connaissance des conditions d'exploitation du système de transport restent indispensables.

6.2. La fréquentation des systèmes existants

La connaissance de la fréquentation est essentielle pour proposer une offre de transport adaptée et permettre son ajustement et son évolution dans le temps.

La fréquentation repose sur le nombre de personnes utilisant le système. La fréquentation varie dans le temps dans l'espace.

Comme le précise le document de Poupard, X. (1982), le nombre de voyages¹⁵⁰ quotidiens - ou de voyageurs * Km - effectués sur une ligne d'autobus n'est pas une donnée suffisante pour caractériser la fréquentation et permettre de déterminer l'offre correspondante. En effet, ce type de données doit être considéré comme « macro » et ne donne pas de visibilité sur le détail des courses : or ce détail est nécessaire.

Comme nous l'avons déjà évoqué au point 5.7, une offre de transport est constituée de plusieurs courses. Afin de connaître les phénomènes de sous-capacité ou surcapacité, il est indispensable de connaître avec précision la fréquentation de chaque course unitaire existant sur le tableau de marche. Cette précision doit permettre de quantifier les mouvements des voyageurs (montées et descentes) à chaque arrêt pour chaque course théorique.

Dans la suite du document, nous nous attarderons sur l'utilité de connaître la fréquentation réelle d'un système de transport qui est, rappelons-le, une donnée d'entrée pour la modélisation. Tout comme pour le temps de parcours, la mesure de la variable « fréquentation » est essentielle pour le bon fonctionnement du système de transport.

La connaissance de la fréquentation doit revêtir un caractère systématique, représentatif, quantitatif et fiable. La vente de titres et l'oblitération ne constituent pas des indicateurs suffisamment fins pour évaluer la fréquentation (Poupard, X. 1982). Cette réflexion peut se transposer à l'utilisation des données des systèmes billettiques aujourd'hui largement déployés sur les réseaux de transport.

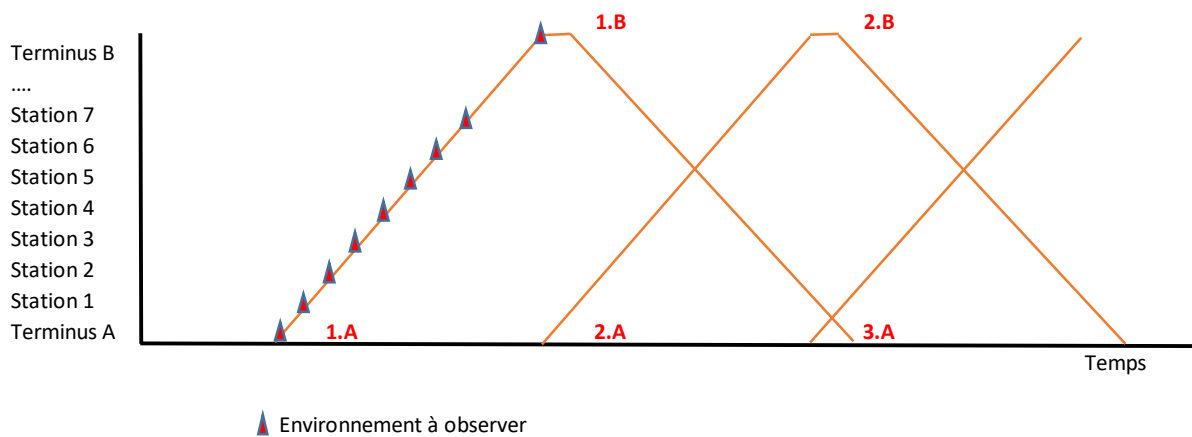
Tous ces collecteurs de données ne fournissent qu'une vue partielle des mouvements voyageurs. Tout d'abord, les ventes de tickets, les oblitérations ainsi que les données de la billettique ne permettent d'obtenir qu'un nombre correspondant aux montées. Les descentes ne sont pas visibles. Par conséquent, il est impossible de déterminer avec précision une charge par interstation qui est pourtant une donnée essentielle pour l'exploitant. De plus, ce type de données ne prend en compte que les utilisateurs des systèmes en « règle ». Tous les utilisateurs « fraudeurs », sont invisibles.

Enfin rappelons que pour certaines lignes de tramway ou d'autobus, l'affluence aux heures de pointe est telle que les voyageurs ne peuvent pas atteindre les valideurs.

¹⁵⁰ Le voyage est un trajet élémentaire effectué par un voyageur utilisant un seul véhicule. Un déplacement est l'action, par une personne de se rendre d'un lieu à un autre pour y réaliser une activité, en utilisant un ou plusieurs modes de transport. Un déplacement peut être constitué de plusieurs voyages.

En revanche, la mise en œuvre d'une procédure de « comptage des passagers » permet de prendre en compte tous les mouvements voyageurs aux arrêts indépendamment de l'affluence et de la notion de fraude.

La méthode de comptage doit permettre de quantifier la fréquentation pour l'ensemble de l'offre de transport. Pour ce faire, il est nécessaire de reprendre la structure de l'offre. Nous estimons que la représentation la plus claire reste le graphique de marche.



▲ Environnement à observer

Figure 61 : Schématisation de l'analyse de la fréquentation

Source : Auteur

Le schéma ci-dessus (figure 61) reprend la structure d'une offre de transport sous forme de graphique. Le graphique permet la représentation des courses d'un terminus à l'autre en passant par tous les arrêts de l'itinéraire. La course théorique 1.A quitte le terminus A pour rejoindre le terminus B en passant par les stations 1, 2, 3 etc. Il existe des mouvements voyageurs au terminus départ, à chaque station desservie et au terminus arrivée. Ces environnements à observer sont caractérisés par des triangles rouges. Tous ces mouvements voyageurs doivent être quantifiés pour toutes les courses du graphique de manière représentative et fiable.

Le but est donc de recueillir des données relatives aux mouvements voyageurs pour chaque course théorique et pour chaque station (y compris les terminus). Pour ce faire, il est possible soit de réaliser des comptages itinérants ou des comptages à point fixe. Un comptage itinérant peut être réalisé soit manuellement soit à l'aide d'un système embarqué dans les véhicules.

Aujourd'hui, les réseaux de transport soucieux de connaître la fréquentation de leurs lignes utilisent soit des prestations de comptage terrain soit des systèmes de comptage automatique.

En fonction du mode de comptage, les données recueillies sont structurées comme le montre le tableau 10 ci-dessous.

		Stations							
		A	B	C	D	E	F	G	H
Départs théoriques pour une direction	06:18:00	0	0	2	0	3	1	2	3
	06:37:00	2	0	3	0	2	0	2	3
	07:07:00	0	4	1	2	0	4	0	3
	07:25:00	1	1	0	2	1	0	1	1
	07:57:00	0	5	0	1	2	0	2	2
	08:08:00	1	3	1	0	3	0	3	4
	08:36:00	0	2	0	2	0	0	0	2
	09:06:00	0	1	0	0	0	0	2	0
	09:36:00	0	1	1	0	1	0	2	0
	10:06:00	0	0	1	0	0	0	0	0

Tableau 10 : Représentation matricielle du comptage pouvant intégrer soit des montées soit des descentes ou les deux

Source : auteur

La ligne horizontale correspond à un mode de comptage itinérant. La ligne verticale correspond à un mode de comptage à point fixe. Les données de comptage (montées et descentes) doivent être recueillies et rapprochées de la structure du tableau de marche.

Lorsque tous les mouvements voyageurs sont recueillis précisément avec l'identification de chaque arrêt et de chaque course théorique auxquels ils se rattachent, toutes les charges interstations peuvent être calculées indépendamment du mode de comptage.

Comme nous l'avons vu précédemment, le calcul de la charge par interstation est essentiel pour dimensionner l'offre notamment grâce au cumul de charge. Le cumul de charge le plus élevé, correspondant à une ou plusieurs interstations qui sera considéré comme le point critique de charge. Ce cumul de charge est généralement calculé par sens et par tranche horaire regroupant plusieurs départs théoriques.

Néanmoins, il reste indispensable de connaître les charges des différentes mesures avant de les moyenniser par départ théorique et de les cumuler par tranche horaire car celles-ci peuvent varier.

Pour illustrer ce propos, nous utilisons des données réelles de comptage issue d'une ligne d'autobus. Le graphique de marche propose, pour un type de jours « semaine », un départ à 07:30:00. Ce départ a été mesuré plusieurs fois à différentes dates. Les différentes valeurs sont ensuite moyennées pour déterminer le nombre moyen de passagers pour cette course. Nous constatons que la somme des montées peut passer de 125 à 70. Pour ces mêmes courses, l'interstation la plus chargée peut varier de 42 à 35.

Ces variabilités doivent être prises en considération dans l'analyse du comptage passagers d'un système de transport. Cela permet d'une part d'identifier des éventuels phénomènes de

surcharges et de faire un lien avec un phénomène d'irrégularité. Ce deuxième point sera abordé dans la partie suivante.

Nous présentons ci-dessous quelques représentations classiques du domaine du comptage (figures 62 et 63).

Pour les praticiens, l'outil d'analyse fondamental est le diagramme de charge ou serpent de charge sur lesquels les points de charge maximum sont visibles. Le point critique est défini comme étant celui où la charge est maximale : il est donc dimensionnant pour le système.

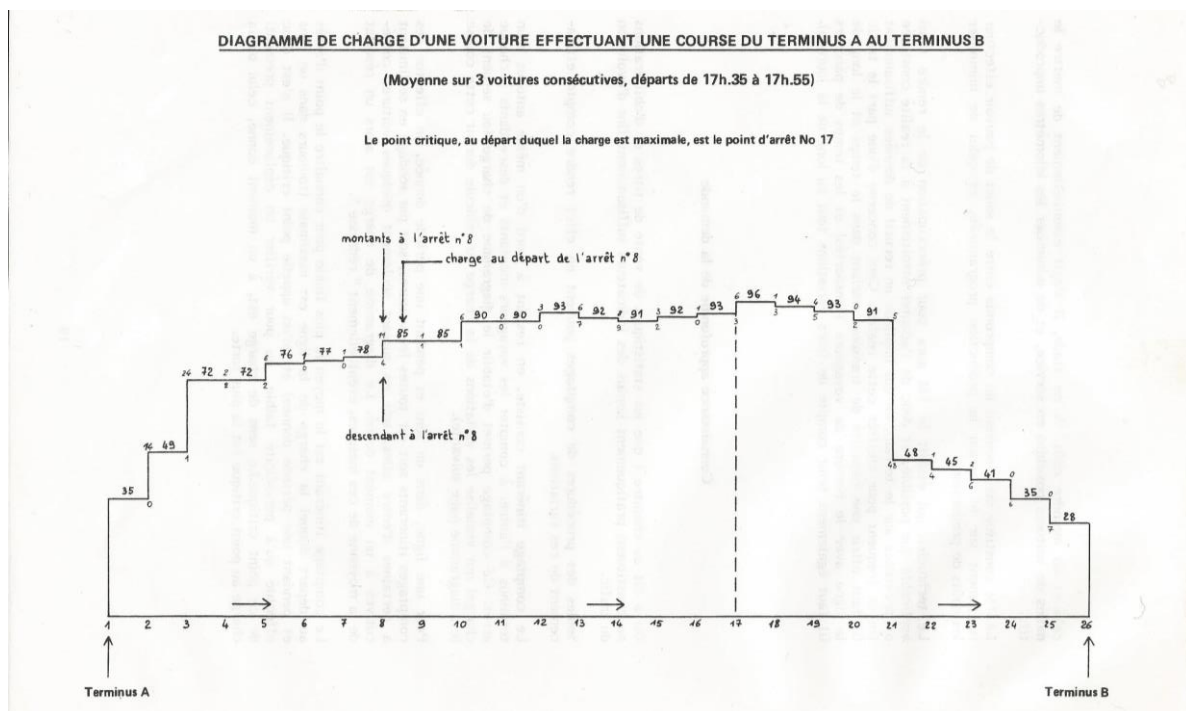


Figure 62 : Diagramme de charge manuel (valeur moyenne pour un départ théorique)

Source : Poupard, X. 1982

Cette ancienne représentation intègre les montées, les descentes et la charge au départ de la station. Pour cet exemple, le point de charge « critique » se situe au niveau de la station 17.

Le diagramme de charge permet donc de visualiser le développement de la charge tout au long de l'itinéraire. Ce type de représentation graphique peut être utilisé pour visualiser le cumul de la charge pour une direction ou une ligne tous sens confondus. Nous présentons ci-après un diagramme de charge permettant de visualiser le cumul de charge pour l'ensemble des départs théoriques d'une direction.

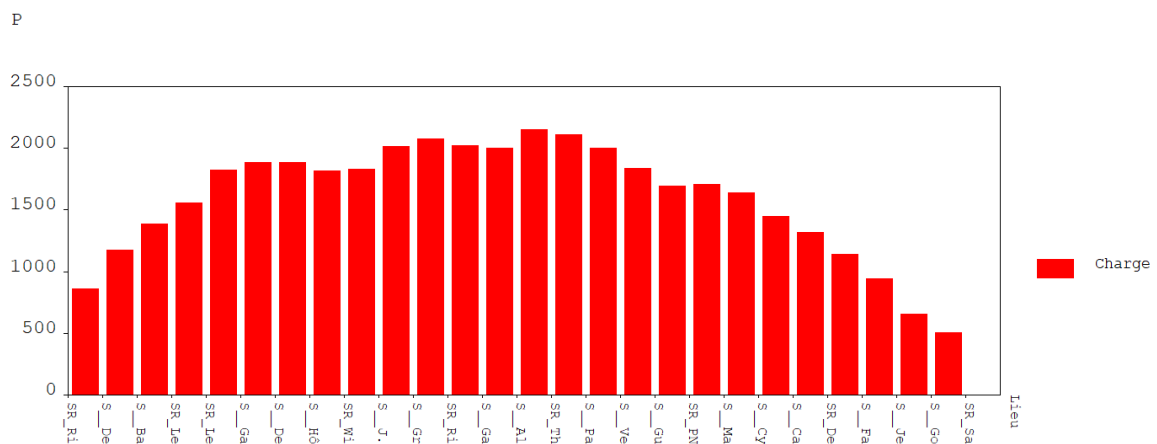


Figure 63 : Représentation graphique de la charge cumulée par interstation pour l'ensemble des départs théoriques pour une direction

Source : Auteur

Nous constatons que pour cette direction, le cumul de charge le plus élevé atteint la valeur de 2 150 au départ de la quatorzième station.

Le comptage des passagers doit bien entendu permettre également de déterminer la fréquentation globale de la ligne. Cette fréquentation globale permet de calculer des ratios de productivité tel que le V/K. La fréquence des mesures permet d'identifier des phénomènes de saisonnalité et l'évolution de la fréquentation au cours des années.

6.3 La loi d'arrivée des voyageurs

Comme nous l'avons vu au point précédent, la mesure de la fréquentation doit permettre de quantifier le nombre de voyageurs afin de proposer une offre adéquate et de la maîtriser dans le temps (optimisation de l'offre). Nous avons également souligné la variation possible de la fréquentation pour un même départ théorique. Dans ce contexte, il est intéressant de porter une attention au comportement du voyageur notamment la manière dont il arrive à la station.

Très peu d'études s'intéressent à ce sujet. Néanmoins, le STIF et les bureaux d'études Stratec et Rand Europe ont réalisé, en 2004, une étude portant le nom de *Enquêtes qualitatives et quantitatives visant à évaluer les projets de fiabilisation des radiales ferrées en Ile-de-France*¹⁵¹. La phase 1 de cette étude s'intéresse à la qualification de l'irrégularité et au comportement des usagers au travers d'une enquête loi d'arrivée. Le premier objectif de cette étude porte sur la notion d'irrégularité et ses variations dans le temps et l'espace. La seconde repose sur le comportement des voyageurs vis-à-vis d'une part de la fréquence et d'autre part de l'irrégularité.

La littérature technique abordant la problématique de la régularité des systèmes de transport rappelle régulièrement, à propos du comportement voyageurs, les postulats suivants :

- Les voyageurs arrivent à l'arrêt de façon uniforme (Froloff, E et al. 1989),

¹⁵¹ STIF, Rand Europe, Stratec SA. *Enquêtes qualitatives et quantitatives visant à évaluer les projets de fiabilisation des radiales ferrées en Ile-de-France – Phase 1*. 2004. 50 p.

- Les arrivées de voyageurs sont, supposées se faire au hasard (Heurgon, H. 1981 ; Doras, JL. 1979¹⁵²).

Malheureusement, ces postulats ne sont pas issus d'études précises. Soulignons également que les caractéristiques de l'arrivée des voyageurs conditionnent leur temps d'attente en station.

Dans la pratique, peu de réseaux s'intéressent à ce sujet. Or, comme nous le verrons au travers de cette étude, la fréquence de passage conditionne en partie le comportement des voyageurs. Dès lors, l'exploitant doit prendre en considération cet aspect afin de ne pas être confronté à une désorganisation de son exploitation.

L'étude précise que l'un des objectifs de l'enquête « loi d'arrivée » est de déterminer la distribution des arrivées des usagers sur les quais et dans les gares

Pour ce faire, il a été utilisé des compteurs postés sur les quais et des enquêteurs qui interrogent les voyageurs au fur et à mesure qu'ils arrivent sur les quais.

Les lignes sélectionnées pour l'enquête sont classées comme suit :

- Haute fréquence,
- Basse fréquence,
- Retards faibles,
- Retards importants.

Pour le réseau SNCF, les enquêtes¹⁵³ ont été réalisées le matin vers Paris et le soir vers la banlieue afin de toucher le plus grand nombre d'usagers possible.

Pour le réseau RATP¹⁵⁴, toutes les enquêtes ont été réalisées en direction de Paris, certaines le matin, d'autres le soir.

Les gares ont été sélectionnées par rapport au schéma de desserte proposé par les trains. En effet, il est préférable de partir sur des sections de ligne avec une exploitation omnibus. Par conséquent, les voyageurs arrivant sur les quais peuvent prendre le premier train arrivant en gare.

Les enquêtes et comptages ont eu lieu le mardi 13 janvier et le jeudi 15 janvier 2004 entre 7 h 00 et 9 h 30 le matin et entre 16 h 30 et 19 h 00 le soir

Le tableau 11 ci-dessous permet de visualiser les gares sélectionnées.

¹⁵² Doras, J-L. « Irrégularité des autobus en temps d'attente des voyageurs ». *TEC*, 1979, numéro 33, p 13 – 21.

¹⁵³ Versailles RG – Juvisy (RER C) Paris St Lazare – Cergy le-Haut (Paris St Lazare, groupe III)

¹⁵⁴ Les lignes A et B du RER

Gares	Groupes	Fréquence vers Paris (trains/h) moyenne sur 3 h	Lignes	Classe régularité
MATIN				
Ivry	RER C	4	Versailles Chantiers Dourdan Etampes Massy	1
		4		1
		4		1
		4		2
La Courneuve	RER B (SNCF)	4		2
Colombes	Paris St-Lazare	4.5	Groupe IV	3
Laplace	RER B (RATP)	14		2
Joinville le Pont	RER A (RATP)	11		3
Versailles RG	RER C	4	Versailles	3
Louveciennes	Paris St Lazare	6	Groupe II	3
Villepreux les Clayes	Paris Montparnasse	3	Plaisir Mantes	2
		3	Groupe III	3
		3	Groupe V	1
Lagny - Thorigny	Paris Est	3.5	La Ferté Milon	1
		3.5	Château Thierry	2
		3.5	Esbly -Crécy	3
Etampes	RER C	3.5	Etampes	1
Robinson	RER B (RATP)	5		2
Louvres	RER D	4	Nord	1
Epinay Villetaneuse	Paris Nord	7.5	Pontoise	1
		7.5	Persan (Val)	1
		7.5	Crépy	2
		7.5	Persan (Mont)	2
Bry sur Marne	RER A (RATP)	8		3
SOIR				
Hausmann St Lazare	RER E	7.5	Chelles	3
Torcy	RER A (RATP)	8		3
Laplace	RER B (RATP)	14		2
Rueil Malmaison	RER A (RATP)	11.5		3

Tableau 11: Caractéristiques des gares sélectionnées

Source : STIF, Stratec et Rand Europe 2004

Dans le cadre de notre recherche, nous nous intéressons particulièrement à la distribution des arrivées des voyageurs sur les quais. Pour cette étude, nous précisons que les compteurs et enquêteurs disposent d'un PC sur lequel ils renseignent les arrivées des voyageurs dès lors qu'ils posent un pied sur le quai (compteurs) à l'aide d'une touche et le départ du train au moment de la fermeture des portes (enquêteurs) à l'aide d'une autre touche.

Les résultats visent à déterminer la part de voyageurs ayant visé un train précis en opposition avec la part des voyageurs arrivant de manière aléatoire.

Le tableau 12 ci-dessous permet de synthétiser les résultats. On constate que, plus les fréquences de passage sont élevées, plus la part des voyageurs visant un horaire diminue. A l'inverse, plus les fréquences sont faibles et plus la part des voyageurs visant l'horaire est importante.

Gare	Fréquence horaire de trains	Classe de régularité	Nombre de voyageurs	Personnes visant l'horaire	% visant l'horaire
AUBERVILLIERS	4	2	2381	2142	90 %
IVRY	4	1	1530	1324	87 %
LOUVRES	4	1	2392	2021	84 %
LOUVECIENNES	6	3	586	475	81 %
VERSAILLES RG	4	3	1531	1144	75 %
ROBINSON	5	2	2667	1990	75 %
VILLEPREUX	3	2	1853	1326	72 %
ETAMPES	3.5	1	584	394	67 %
LAGNY	3.5	1, 2, 3	2631	1658	63 %
COLOMBES	4.5	3	1886	1107	59 %
BRY SUR MARNE	8	3	3100	1809	58 %
EPINAY VILLETANEUSE	7.5	1, 2	1870	983	53 %
<i>HAUSSMANN</i>	7.5	3	3446	1236	36 %
JOINVILLE LE PONT	11	3	3929	1203	31 %
<i>TORCY</i>	8	3	1424	404	28 %
<i>RUEIL MALMAISON</i>	11.5	3	5297	1357	26 %
LAPLACE (Matin)	14	2	1975	342	17 %
<i>LAPLACE (Soir)</i>	14	2	1846	197	11 %
Total			40928	21112	52 %

Tableau 12 : Résultat des comportements vis-à-vis de l'horaire en fonction de la fréquence et de la régularité

Source : STIF, Stratec et Rand Europe 2004

La gare de Villepreux voit passer un train toute les 20 min. on observe que 72 % des voyageurs visent un horaire précis. En revanche, la gare de Joinville Le Pont voit passer un train toutes les 5 min environ, on observe que 31 % des voyageurs seulement visent un horaire précis.

Cette étude rapporte également que la fréquence charnière, c'est-à-dire la fréquence pour laquelle plus de 50 % des voyageurs arrivent en gare sans viser un horaire, se situe aux alentours de 7 à 8 passages par heure soit un intervalle de 7 min et 30 secondes.

Notons une différence des parts des usagers visant l'horaire entre le matin et le soir. En effet, l'étude montre que la part des personnes visant un horaire est plus importante le matin que le soir. Cela peut s'expliquer notamment par les contraintes horaires matinales (travail, écoles...) qui sont atténuées le soir.

Les graphiques suivants permettent de visualiser le développement du nombre de personnes arrivant sur les quais. Nous reprenons deux représentations pour leurs caractéristiques.

La première (figure 64) représente les arrivées de voyageurs en gare de Villepreux-les-Clayes. On peut observer la suppression d'un train qui était théoriquement prévu et qui est représenté par la ligne bleue à 8 h 13. Le développement de la courbe d'arrivée des voyageurs se répète. Cela signifie que le nombre de voyageurs présent sur le quai est doublé. Tous ces voyageurs se retrouvent dans le même train. On suppose une augmentation de l'inconfort du fait de la densité de personnes à l'intérieur du train de 8 h 28.

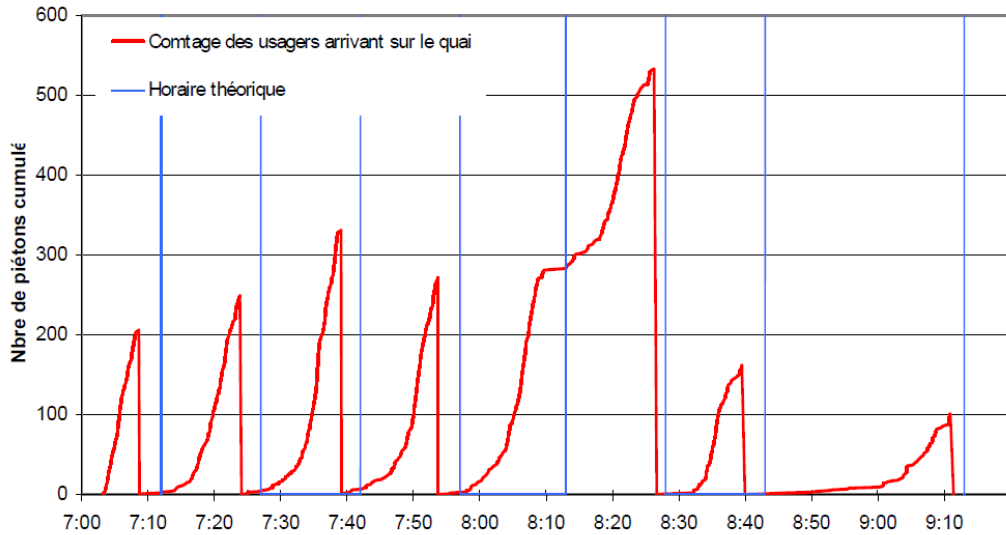


Figure 64 : Arrivées des voyageurs et des trains à Villepreux-les-Clayes

Source : STIF, Stratec et Rand Europe 2004

Le graphique suivant (figure 65) représente les arrivées des voyageurs à la gare de Laplace. On constate les effets néfastes dus au manque de régularité ou de cadencement. Certains trains sont surchargés et d'autres sous-utilisés. L'offre de transport est donc mal répartie dans le temps.

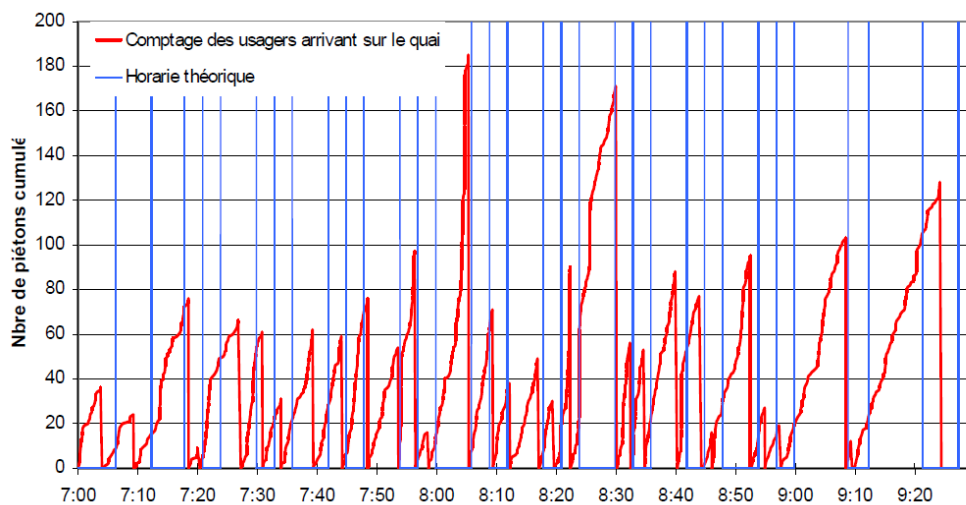


Figure 65 : Arrivées des voyageurs à Laplace

Source : STIF, Stratec et Rand Europe 2004

L'autre objectif de cette étude cherche à mesurer le temps d'attente des voyageurs sur les quais. Nous présentons ci-dessous quelques résultats intéressants (tableau 13).

Gares	Intervalle théorique entre 2 trains	Temps d'attente moyen en gare (y compris sur le quai)			Temps d'attente moyen sur le quai
		Tous voyageurs	Voyageurs visant l'horaire	Voyageurs « aléatoires »	
Laplace (matin)	04 :17.1	06:09.5	07:01.4	05:58.6	02 :55.4
Laplace (soir)	04 :17.1	06:57.7	05:23.3	07:09.2	02 :45.5
Reuil	05 :13.0	07:08.5	07:30.8	07:00.7	03 :31.9
Joinville le pont	05:27.3	07:21.8	08:07.8	07:00.8	02:47.4
Torcy	07:30.0	08:55.2	09:26.5	08:43.1	05:20.3
Bry s/marne	07 :30.0	08:08.0	09:17.7	06:00.7	03 :49.8
Epinay	08 :00.0	07:32.2	07:42.8	07:17.7	04 :47.0
Hausmann	08 :00.0	11:54.9	10:53.7	12:29.5	05 :29.0
Louvecienne	10 :00.0	08:29.1	08:13.1	09:36.7	03 :36.0
Robinson	12 :00.0	12:36.3	13:23.6	10:12.6	08 :41.1
Colombes	13 :20.0	10:16.3	08:57.3	12:06.1	07 :08.6
Louvres	15 :00.0	11:36.1	11:44.9	10:49.2	05 :17.8
Ivry	15 :00.0	14:50.9	15:24.7	10:33.0	06 :19.0
Aubervilliers	15 :00.0	11:13.4	11:21.3	08:23.3	08 :38.1
Versailles	15 :00.0	10:24.5	09:51.2	11:40.1	06 :06.7
Lagny	17 :08.6	15:49.5	15:43.1	16:00.3	05 :50.9
Etampes	17 :08.6	14:46.9	14:24.3	15:45.0	06 :23.0
Villepreux	20 :00.0	13:09.3	13:01.5	13:59.9	06 :50.4
Moyenne	10 :08	10:01.9	10:08.3	09:32.1	05 :08.8

Tableau 13 : Temps passé en gare et sur les quais en fonction du type de voyageurs (visant l'horaire ou aléatoire)

Source : STIF, Stratec et Rand Europe 2004

Naturellement, le temps d'attente diminue avec l'augmentation des fréquences. Le temps d'attente varie également en fonction du comportement des voyageurs.

En effet, les voyageurs arrivant en visant un horaire précis dans un gare où la fréquence est élevée risquent d'attendre plus longtemps que le voyageur arrivant au hasard. Ce phénomène s'explique par la prise de précaution des voyageurs visant l'horaire. Les voyageurs arrivant au hasard peuvent éventuellement avoir un train tout de suite mais arriver également juste après le départ d'un train.

La littérature technique abordant le sujet de l'attente des voyageurs est limitée. Des auteurs comme Jean-Léo Doras (1979) ou encore Georges Amar (1986) ont proposé des approches mathématiques pour déterminer cette attente en tenant compte de la fréquence de passage des véhicules et de leur régularité. Ces approches seront abordées au point suivant.

Transposabilité vers les systèmes en milieu urbain

Cet aspect « comportement voyageur » doit être pris en considération lors de la mise en œuvre de système de transport à haute fréquence en milieu urbain.

En effet, l'on constate l'importance de la relation entre le comportement des voyageurs et la fréquence de passage offerte. Plus les fréquences sont élevées et plus les voyageurs arrivent selon un processus aléatoire aux différents arrêts.

Lorsqu'un système de transport, en milieu urbain, est mis en œuvre avec de hautes fréquences, le comportement des voyageurs oblige à considérer la place importante de la régularité.

Ce type d'études devrait être réalisé dans de nombreuses agglomérations en tenant compte des différents modes de rabattement et des stations de correspondance qui engendrent structurellement des arrivées de voyageurs par « groupes » plus ou moins conséquents.

Il y a, pour certains réseaux, un niveau de connaissances de ce sujet notamment au sein des services marketing.

7. Les notions de ponctualité / régularité, leurs mesures et leurs logiques

7.1 Distinction entre ponctualité et régularité

Afin d'appréhender correctement les notions de ponctualité et de la régularité, nous considérons qu'il est essentiel de les positionner dans une perspective proche de la loi d'arrivée des voyageurs.

Telle que nous l'avons décrite au point précédent, la fréquence pour laquelle plus de 50 % des voyageurs ne se préoccupent plus de l'horaire, se situe aux alentours de 7 à 8 passages par heure soit un intervalle de 7 min et 30 secondes. Dès lors, d'un point de vue voyageur, une distinction existe entre ponctualité et régularité.

Dans un premier temps, nous rappelons d'une part la différence ainsi que la complémentarité entre ponctualité et régularité, d'autre part les différentes visions de ces notions du point de vue du voyageur comme celui de l'exploitant.

La ponctualité peut être définie comme le respect des heures de passage indiquées sur le tableau de marche théorique. Le calcul du niveau de ponctualité se fait généralement sur des systèmes à faible fréquence.

La régularité peut être définie comme le respect des intervalles de passage aux arrêts ou respect des intervalles de temps entre les véhicules. Le calcul du niveau de régularité se fait généralement sur des systèmes à forte fréquence.

Nous considérons qu'il est important de rappeler qu'un bon niveau de ponctualité permet, même pour les systèmes à forte fréquence, de maintenir la capacité inscrite au tableau de marche.

L'analyse de la régularité fait apparaître deux états dégradés : le glissement et le déséquilibre (figure 66).

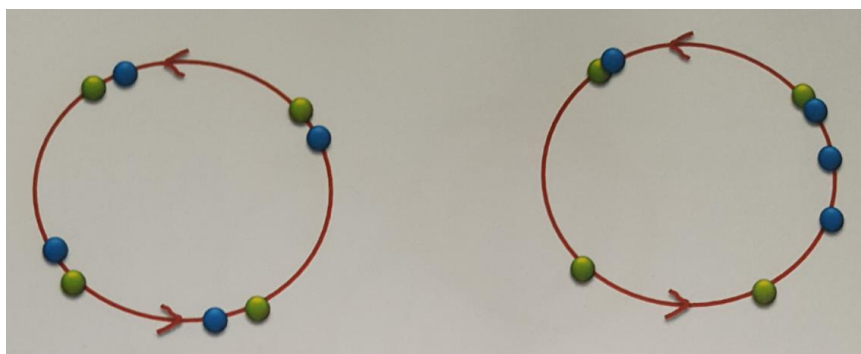


Figure 66 : Schématisation des états de glissement et de déséquilibre

Phénomène de glissement

Phénomène de déséquilibre

Représentation des positions théoriques des véhicules



Représentation des positions réelles des véhicules



Source : Keolis Lyon, document interne

L'état de glissement n'a que peu d'impact sur la clientèle. Les intervalles sont respectés mais décalés par rapport au tableau de marche. Cependant, cet état a deux conséquences. La première repose sur l'augmentation du nombre de voyageurs aux arrêts pour le premier véhicule subissant le glissement. La seconde résulte d'un impact sur la capacité. Le glissement sous-entend qu'un ou plusieurs départs ou passages ne seront pas effectués conformément au tableau de marche. La capacité théorique n'est donc plus respectée.

A l'inverse, l'état de déséquilibre a un impact fort sur la clientèle. Les intervalles ne sont plus respectés. Certains sont raccourcis et d'autres rallongés. Cet état a un effet d'amplification sur lui-même. Un état de déséquilibre amplifie le déséquilibre notamment par la mauvaise répartition des voyageurs dans les rames et aux stations. Cette mauvaise répartition des voyageurs a un impact direct sur les temps d'immobilisation des véhicules en station qui sont soit très courts soit très longs.

« Si une voiture réduit l'intervalle entre elle et la voiture qui la précède immédiatement dans le temps, la charge voyageurs en station est moindre. L'échange voyageurs en station est alors réduit et la rame stationne moins longtemps. Elle va donc amplifier la réduction de l'intervalle entre les deux voitures. Ce phénomène est un cercle vicieux. A contrario, si une voiture creuse l'intervalle avec la voiture qui la précède immédiatement dans le temps, la charge voyageurs en station va alors augmenter, les temps d'échanges vont augmenter, et la voiture va encore plus creuser l'intervalle » (Keolis Lyon. Document interne).

7.2 Les mesures de l'irrégularité

Nous considérons que la régularité est différente de la ponctualité. Cette partie est essentiellement consacrée à la notion de régularité. Néanmoins, nous caractérisons la ponctualité.

La mesure de la ponctualité repose sur le calcul du niveau de conformité entre les passages théoriques et réels aux différentes stations. Selon la norme de qualité en vigueur¹⁵⁵, un véhicule de transport est considéré comme ponctuel à partir du moment où son passage réel est compris entre moins de 59 secondes et plus de 2 minutes 59 secondes par rapport à l'horaire théorique.

Bien entendu, pour un niveau de fréquence élevé, il sera préférable d'appréhender la conformité d'une ligne selon l'approche de la régularité. Même si la conformité d'une ligne à forte fréquence est appréhendée selon la régularité, rappelons que la ponctualité permet de maintenir la capacité théorique indiquée au tableau de marche.

Nous constaterons que bien souvent, du point de vue du voyageur, la régularité intègre la ponctualité.

La régularité d'un système de transport peut être mesurée selon deux approches. La première consiste à mesurer la variabilité du temps de parcours et la deuxième la variabilité des intervalles de passage des véhicules aux différents arrêts de la ligne. Nous listons ci-après quelques définitions et approches mathématiques. Notre objectif n'est pas de recenser toutes

¹⁵⁵ NF EN 13 816 (2002) et NF EN 15 140 (2006).

les définitions et formulations mathématiques mais de donner un aperçu de ce que contient la littérature technique.

Doras J.-L. (1979) définit l'irrégularité, d'un point de vue voyageur, comme les variations des intervalles réels entre les voitures successives d'une ligne. Cependant, il précise que la régularité relève de deux points de vue : celui du voyageur et celui de l'exploitant.

- Le voyageur : Il existe une relation de cause à effet entre irrégularité et temps d'attente [temps d'attente et incertitude sur cette attente].
- Pour l'exploitant, la régularité est un critère ultime. Lorsqu'elle est obtenue, elle est le signe que tout fonctionne parfaitement (de manière conforme au tableau de marche).

Pour Jean-Léo Doras, la vision de régularité de l'exploitant englobe la notion de ponctualité.

Edith Heurgon (1981), caractérise l'irrégularité comme les variations des intervalles réels entre les diverses voitures d'une ligne d'autobus. Mais les effets en sont perçus de manière différente selon qu'il s'agit du voyageur ou de l'exploitant :

- Le voyageur s'attache au temps d'attente et à l'incertitude sur cette attente,
- L'exploitant considère en outre la variation des temps de parcours pour assurer la ponctualité des véhicules.

Une étude du STIF intitulée *Guide technique des systèmes de priorité bus aux carrefours à feux* (2011)¹⁵⁶ désigne la régularité alternativement comme :

- Le respect des horaires théoriques (la ponctualité), en particulier lorsque la fréquence est faible
- L'uniformité des intervalles, en particulier lorsque la fréquence est élevée

Dans cette étude, la ponctualité est également intégrée à la régularité mais contextualisée par un niveau de fréquence faible. De manière générale, la régularité, au sens de l'uniformité des intervalles, est généralement mesurée par l'écart type ou la variance des intervalles.

La RATP utilise un indicateur quantifiant l'intervalle ressenti par les clients. L'intervalle ressenti équivalent (IREq) se calcule comme suit :

$$IREq = Ip \cdot \left(1 + \frac{V(p)}{Ip^2} \right)$$

Avec Intervalle moyen Ip et la variance des intervalle $V(p)$

Le coefficient d'irrégularité est plus couramment repris dans la littérature. Ce coefficient est très proche de l'indicateur IREq et se calcule comme suit :

$$Ci = \left(\frac{V(i)}{E(i)^2} \right)$$

Avec Intervalle moyen $E(i)$ et la variance des intervalle $V(i)$

L'interprétation est simple. Le coefficient est égal à 0 si la régularité est parfaite, à 1 si les voitures sont groupées deux par deux, à 2 si elles sont groupées trois par trois.

¹⁵⁶ STIF. *Guide technique des systèmes de priorité bus aux carrefours à feux*. 2011. 166 p.

Courtois, X. Dobruszkes, F. (2008) s'intéressent à l'irrégularité comme étant une variation du temps de parcours. L'irrégularité des temps de parcours peut simplement s'apprécier au travers de leur écart type pour une période donnée.

Ces différentes définitions mettent en lumière la nécessité de la double vision : voyageur et exploitant. De plus, on constate que le phénomène d'irrégularité est plus généralement appréhendé sous l'angle de la variabilité des intervalles que sous l'angle de la variabilité du temps de parcours. Dans la pratique, les techniciens opérationnels utilisent davantage la vision de Courtois, X. Dobruszkes, F. (2008) qui consiste à utiliser l'écart type du temps de parcours.

Un projet IFSTTAR intitulé INDira-B (project INDicators for Reliability and Variability Of Bus)¹⁵⁷ en partenariat avec DIMTS repose sur le développement d'une solution logicielle pour l'analyse et le diagnostic de la qualité de service des lignes de bus. Le terrain d'étude est le réseau bus de la ville de Delhi en Inde. Cette étude permet, entre autres, de passer en revue les différents indicateurs en relation avec les données de temps de parcours et propose d'utiliser le coefficient de Gini et la courbe de Lorenz pour mesurer le phénomène d'irrégularité. Le coefficient de Gini et la courbe de Lorenz sont utilisés dans le domaine économique pour mesurer principalement l'inégalité des revenus et de la santé pour une population donnée. Le projet INDira-B propose d'utiliser ce coefficient et cette courbe pour mesurer la variabilité des intervalles. Plus le coefficient de Gini est proche de zéro et plus les intervalles réels sont proches des intervalles théoriques. A l'inverse, plus le coefficient de Gini est proche de 1 et plus les intervalles réels sont éloignés des intervalles théoriques.

7.3 Les logiques de la régularité

Comme nous l'avons déjà évoqué, la régularité obéit à des logiques. La première concerne le temps d'attente des voyageurs et la seconde la répartition de la charge dans les véhicules. En effet, lorsque qu'un passage de véhicule est décalé ou supprimé, le nombre de voyageurs sur le quai ou à l'arrêt augmente ainsi que le temps d'attente moyen. Les conséquences logiques sont formalisées. Ces formulations mathématiques sont issues de l'ouvrage *Bases et pratiques de la régulation* de Froloff, E. et al. (1989).

Sur la base d'une arrivée uniforme des voyageurs, une bonne régularité permet de minimiser le temps d'attente des voyageurs. L'attente moyenne $E(a)$ se calcule comme suit :

$$E(a) = \frac{E(i)}{2} \left(\frac{1 + V(i)}{E(i)^2} \right)$$

Avec Intervalle moyen $E(i)$ et la variance des intervalles $V(i)$

Une bonne régularité permet également de maintenir un équilibre de charges entre les véhicules. Le taux de charge moyen $E(t)$ se calcul comme suit :

¹⁵⁷ Bhourri, N. Scemama, G. Mahdavi, H. Tendjaoui, M. Lassarre, S. *INDira-B project INDicators for Reliability and Variability Of Bus*. Huitième anniversaire de la chaire ENPC-IDFM. 11 février 2019. Cité Descartes, Champs-sur-Marne, 32 p.

$$E(t) = \frac{UE(i)}{K} \left(\frac{1 + V(i)}{E(i)^2} \right)$$

Avec Intervalle moyen $E(i)$, la variance des intervalles $V(i)$, la capacité du véhicule (K) et le flux moyen par minute (U)

7.4 La régulation

Nous définirons la régulation comme étant le processus d'adéquation en temps réel du tableau de marche (TM).

*« Le TM est le résultat d'une optimisation de l'offre de service en fonction des objectifs et en respectant les contraintes d'exploitation. Mais cette optimisation étant réalisée en « temps différé », elle nécessite en particulier la formulation d'hypothèses sur les **conditions de circulation et la demande de transport**. Or, ces deux facteurs sont des phénomènes complexes, de nature aléatoire. C'est pourquoi le TM ne peut définir les modalités du fonctionnement optimal de la ligne que pour des conditions moyennes d'exploitation. Dès que l'on s'écarte de ce conditions moyennes, il devient nécessaire de réguler pour faire face à la dégradation de la qualité de service qui découle de cette dérive » (Froloff, E. et al (1989).*

Comme l'indique Froloff, E. et al (1989), la construction du tableau de marche théorique doit permettre la maintenabilité de l'exploitation avec des niveaux de ponctualité et de régularité élevés. Les aléas d'exploitation sont gérés par les services opérationnels « temps réel » autrement dit la régulation qui est pilotée depuis un Poste de Commande Centralisé (PCC).

La mise en œuvre d'actions de régulation doit être contextualisée par la nature du milieu urbain dans lequel l'exploitation est mise en œuvre, les habitudes et coutumes de la régulation locale. De plus, la régulation ne permet pas d'éliminer les phénomènes d'irrégularité qui sont intrinsèquement liés aux conditions d'exploitation. En revanche, lorsque le décalage entre l'exploitation réelle et le tableau de marche est trop important, alors la régulation entre en action. Les actions de régulation peuvent également intervenir par anticipation.

Pour les systèmes totalement automatisés tels que les métros GoA4, la régulation est automatisée. L'automatisme d'un métro GoA4 propose deux types de régulation : la régulation horaire et la régulation d'intervalle.

La régulation horaire a pour objectif le respect de l'horaire de chaque véhicule. En fonction du niveau de retard, le nombre de véhicules concernés par la régulation diffère. Lorsque le retard est minime, la régulation intervient sur un véhicule. L'automatisme va donc réduire les temps de stationnement de ce véhicule et augmenter sa vitesse de déplacement au niveau des interstations. Lorsque le retard est important, les mêmes procédures s'appliquent sur les trains suivant et précédent.

La régulation d'intervalle a pour objectif de maintenir les intervalles entre les trains. Dans cette configuration, chaque train est régulé au départ d'une station en fonction de l'horaire du train régulé précédent au même quai.

Pour les autres systèmes, la régulation se fait par intervention humaine, celles des régulateurs. Le régulateur suit le déplacement des véhicules en temps réel et applique différentes manœuvres de régulation si nécessaire.

Nous listons les principales manœuvres de régulation (Froloff, E. et al 1989).

Les six manœuvres au terminus :

- Le sautage
Cela consiste à modifier l'affectation de services véhicules en cours d'exploitation. Cette manœuvre repose sur l'utilisation d'un autre véhicule disponible afin d'assurer par exemple une relève.
- Le distancement
Le distancement repose sur un décalage des heures de départ initialement prévues. On peut chiffrer le distancement en avance ou en retard avec le nombre d'intervalles qui sépare l'heure initialement prévue.
- La dérive
La dérive consiste à mettre en œuvre un nouvel horaire postérieur ou antérieur à celui initialement prévu. Le nouvel horaire devient la référence. Il existe deux types de dérives : La dérive de retard ou dérive positive et la dérive d'avance ou la dérive négative.
- La suppression d'un départ
La suppression consiste à éliminer un départ à l'horaire théorique. Cette manœuvre s'impose lorsque qu'un départ ne peut être matériellement assuré. Elle s'impose également lorsqu'un terminus n'est plus desservi consécutivement à un changement de mission. Une suppression entraîne une retombe.
- L'insertion d'un départ
L'insertion consiste à injecter un départ à l'horaire théorique. Ce départ peut être consécutif à une demande de transport exceptionnel ou encore à un changement de mission par transformation. Il est généralement souhaitable, lors d'une injection, d'effectuer une retombe.
- La retombe
Une retombe permet de rééquilibrer les intervalles lors de la modification du nombre de départs d'un terminus sur une période définie (T).

Les six manœuvres de régulation en ligne

- La modification des temps de parcours alloués
La modification du temps de parcours consiste à augmenter ou diminuer le temps de parcours par rapport à l'horaire précédemment commandé.
- L'attente à un point d'arrêt

Cette manœuvre consiste à différer le départ d'un autobus à un point d'arrêt (pendant la durée de cette attente, le mouvement de voyageurs continue à s'effectuer).

- Le transbordement

Le transbordement est le transfert de voyageurs d'une voiture à une autre.

- Le dépassement sur ligne

Cette manœuvre consiste à faire doubler une voiture qui circule sur ligne par celle qui la suit. Le dépassement permet, lors de groupage, de présenter aux voyageurs en attente la voiture la moins chargée.

- La permutation de machiniste sur ligne

Cette manœuvre consiste à intervertir à leur point de croisement les machinistes de deux voitures circulant en sens opposé.

- La déviation

La déviation consiste à faire circuler un/ou plusieurs autobus sur un itinéraire différent de l'itinéraire habituel.

Les trois manœuvres de régulation en terminus ou en ligne :

- Le changement de mission par raccourcissement (demi-tour)

Le demi-tour est un changement de mission où la voiture effectue une mission plus courte que celle initialement prévue.

- Le changement de mission par allongement

Cette manœuvre consiste à affecter à une voiture prévue sur une course courte une course plus longue.

- Le changement de mission par transformation

Cette manœuvre consiste à affecter à une voiture une mission autre que celle initialement prévue.

8. Conclusion

Au travers du chapitre 2, nous avons souhaité d'une part mettre en avant le niveau de complexité du fonctionnement d'un système de transport collectif en milieu urbain, d'autre part positionner une performance d'ordre opérationnel reposant sur l'optimisation des conditions d'exploitation.

Du fait du niveau de complexité de fonctionnement, nous considérons que l'approche systémique est nécessaire car il existe de nombreuses interactions entre les différents éléments constituant le système de transport. L'approche systémique d'un système de transport peut prendre en compte les éléments tels que les caractéristiques du matériel roulant, de l'infrastructure et de son fonctionnement composé de deux processus l'un concernant le déplacement et l'autre l'immobilisation des véhicules. Le système de transport peut également être abordé au travers d'une distinction entre la planification théorique et les conditions réelles de mise en œuvre. Les conditions réelles de mise œuvre peuvent elles aussi être représentées dans un contexte d'évolution temporelle.

Le fonctionnement d'un système de transport peut, bien entendu, être décrit de manières différentes. Il est possible de le décrire sous l'angle de la capacité ou encore dans un environnement plus large qui pourrait être le système de déplacement à l'échelle urbaine. Cependant, nous considérons que les approches d'Edith Heurgon (1981) et de Froloff, E et al. (1989) sont suffisantes. Dans le cadre de la suite de notre démonstration, nous réutiliserons la modélisation Heurgon car nous considérons que la distinction des composantes fonctionnelles et organique est simple et essentielle.

Une fois le système décrit, nous portons un intérêt à sa performance. De manière générale, celle-ci doit être contextualisée. Dans le domaine des transports collectifs, la performance est souvent analysée sous l'angle économique. Nous contextualisons la performance opérationnelle comme étant la recherche d'optimisation des conditions d'exploitation. Nous considérons que les conditions d'exploitation ont un impact sur la performance économique.

Nous constatons que le modèle de planification des éléments capacitaires est universel quel que soit le système utilisé. L'approche est identique aussi bien pour une ligne de bus conventionnelle que pour une ligne de métro totalement automatisé type GoA4. Par conséquent, la recherche de mise en œuvre d'une méthode pour mesurer les conditions d'exploitation pour l'ensemble des systèmes devrait être pertinente.

Au cours du prochain chapitre, nous décrirons notre approche méthodologique en vue de mettre en œuvre une analyse microscopique des conditions d'exploitations pour trois types de TCSP différents. Pour ce faire, une analyse du contenu des données disponibles ainsi qu'une proposition de terminologie adaptée sont nécessaires. Les résultats de l'analyse des conditions d'exploitation devraient permettre de mettre en lumière des indicateurs de la mesure de la performance opérationnelle.

Chapitre 3 : Mise en œuvre de l'analyse microscopique des conditions d'exploitation

1. Introduction

Nous considérons que le « temps de parcours » est un agrégat regroupant différentes composantes temps. Ces composantes devraient correspondre aux différents états des mobiles. Dans le cadre de ce troisième chapitre, nous nous intéressons à la méthode de désagrégation du temps de parcours afin de présenter les caractéristiques de ses différentes composantes. Nous proposons de réaliser une analyse précise des différentes composantes à l'aide d'une « analyse microscopique des conditions d'exploitation ».

Comme cela a déjà été indiqué, le corpus théorique relatif à la technique de l'exploitation des systèmes de transport en milieu urbain est limité. Nous avons constaté que la terminologie relative à la variable « temps » est limitée à une vision « macro ». Par conséquent, nous proposerons une terminologie permettant de distinguer les composantes du temps de parcours et donc d'obtenir une vision « micro ».

Nous analyserons trois types de TCSP : un métro type GoA4, un tramway et un BHNS. Cette analyse microscopique des conditions d'exploitation est accompagnée d'une description du niveau organique qui conditionne structurellement la performance opérationnelle. Nous avons fait le choix d'analyser trois types de TCSP différents. Cela correspond à une approche inter-systèmes qui pourrait permettre de vérifier entre autres si une hiérarchisation des performances des systèmes est possible.

Préalablement à l'analyse microscopique des conditions d'exploitation des différents systèmes, nous proposons une analyse du niveau organique au travers d'une description de la topographie des lignes et des matériels roulants. Ensuite, nous nous attarderons sur l'aspect méthodologique permettant la désagrégation du temps de parcours.

A l'aide de calculs statistiques, nous tenterons de caractériser les différentes composantes du temps de parcours et nous discuterons tout d'abord de la variabilité de chaque composante et par ailleurs de l'existence de liens entre les différentes composantes. Cela devrait nous permettre d'identifier les sources de temps improductif et de variabilité pour les différents systèmes.

Cette méthode sera mise en œuvre pour l'ensemble de l'itinéraire tout au long de la journée ainsi que pour les heures de pointe matin et soir afin de visualiser d'éventuelles disparités. Nous réaliserons également un focus pour certaines interstations particulières.

La finalité de notre démarche repose sur une proposition méthodologique pour réaliser une analyse microscopique des conditions d'exploitation, le tout contextualisé par une description du niveau organique permettant de positionner le niveau de performance opérationnelle.

2. Caractéristiques des terrains d'étude

2.1 Ligne 4 BHNS de Nantes « busway »

Itinéraire

La ligne 4 du réseau urbain de Nantes est une radiale de 7 km comprenant 15 stations. Elle relie la cathédrale St-Pierre de Nantes à la Porte de Vertou au sud-est de l'agglomération près du périphérique.

L'itinéraire passe par Joliverie, le quartier de la Bourdonnières et l'Île de Nantes. La station Duchesse Anne est une station de correspondance avec la ligne 1 de tramway. L'itinéraire de la ligne 4 de Nantes est court et peu sinueux.



Figure 67 : Itinéraire de la ligne 4 du BHNS de Nantes

Source : Semitan

Exploitation

L'exploitation de la ligne 4 BHNS de Nantes est de type « Mission unique omnibus » complétée par quelques partiels/renforts. La ligne 4 de Nantes est exploitée par des autobus articulés EVOBUS. Les intervalles entre deux passages d'autobus peuvent atteindre, en heure de pointe, 150 secondes. La vitesse commerciale atteint environ 21 km/h. Le service s'étend de 5h00 à 0h30 et 2h30 le samedi soir.

Fréquentation / Evolutivité

En 2014, la fréquentation de la ligne BHNS de Nantes était supérieure à 36 000 voyageurs/jours en semaine scolaire. Le ratio voyageurs/km-véhicules était de 12 environ.

La ligne 4 de Nantes connaît des limites de capacité. Par conséquent, les véhicules articulés de 18 mètres actuellement en exploitation sur la ligne sont en cours de remplacement par des véhicules électriques doubles-articulés de 24 mètres. La nouvelle configuration de la ligne 4 exploitée avec ces nouveaux véhicules sera mise en œuvre pour la fin de l'année 2019.

Ci-dessous une matrice reprenant les principaux éléments permettant de caractériser la ligne (tableau 14) :

Caractéristiques	BHNS
	Ligne 04
Capacité emport véhicule 4p/m2	178
Intervalle minimum(en seconde HP)	180
Capacité heure (terminus)	3 560
Vitesse Km/h	21
Km com/jour	2 987
Total passagers/jour (LàV sco)	36 179
V/K	12

Tableau 14 : Caractéristiques de la ligne 4

Source : Auteur

2.2 Ligne 1 du réseau de tramway de Montpellier

Itinéraire

La ligne 1 de tramway de Montpellier est une ligne diamétrale avec un itinéraire d'environ 15,8 kilomètres. Cette ligne, comprenant 30 stations, a un tracé assez sinueux. La ligne 1 relie le centre commercial et de loisirs Odysseum (partie Est de la ville) à la Mosson (partie Ouest de la ville) en traversant le centre-ville notamment via la station Gare St-Roch et la station Comédie. La ligne s'inscrit aujourd'hui dans un réseau de tramway maillé qui possède de nombreux croisements de lignes et troncs communs.

Son itinéraire débute comme celui d'une radiale en se dirigeant vers le centre-ville jusqu'à la station Moularès. Ensuite, elle effectue un premier crochet pour desservir le quartier Antigone pour rejoindre ensuite la station Gare St-Roch. Un nouveau changement de direction s'opère pour rejoindre la station Corum en passant par la Station Comédie. Le tracé reprend une typologie de radiale jusqu'à la station Occitanie en contournant la vieille ville. De nouveaux changements de direction apparaissent à la station Château d'O et Euromédecine pour enfin rejoindre Mosson.

Si l'on se réfère au schéma de la ligne issue du réseau TaM, nous pouvons observer huit changements de direction.

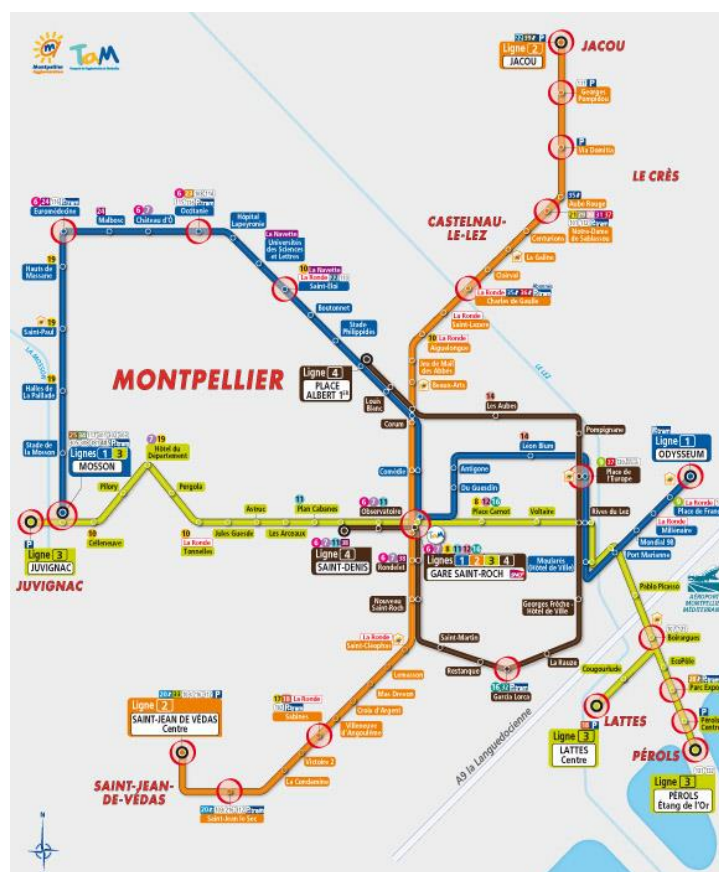


Figure 68 : Itinéraire de la ligne 1 du tramway de Montpellier

Source : TaM

Exploitation

L'exploitation de la ligne 1 du tramway de Montpellier est de type « Mission unique omnibus » complétée par quelques partiels/renforts. La ligne est essentiellement exploitée par des rames CITADIS de type 401. Les intervalles entre deux passages de rames peuvent atteindre, en heures de pointe, 180 secondes. La vitesse commerciale est d'environ 17,5 km/h. Le service s'étend de 04h40 à 00h40 et est prolongé à 01h40 les vendredis et samedis.

Fréquentation/Evolutivité

En 2014, la ligne de tramway 1 de TaM, reliant Mosson à Odysseum, était l'une des plus fréquentées de France avec environ 130 000 voyageurs/jour en semaine scolaire. Le ratio voyageurs/km-véhicules s'élevait à 19 environ.

Après nos mesures terrain, la zone Corum a été aménagée pour permettre une diminution du temps de parcours et de sa dispersion. Le projet de la 5^{ième} ligne du réseau de tramway devrait permettre d'obtenir un tronç commun avec la ligne 1 et donc de soulager cette dernière au niveau de la fréquentation.

Ci-dessous une matrice reprenant les principaux éléments permettant de caractériser la ligne (tableau 15) :

Caractéristiques	Tramway
	Ligne 1
Capacité emport véhicule 4p/m2	283
Intervalle minimum(en seconde HP)	180
Capacité heure (terminus)	5 660
Vitesse Km/h	18
Km com/jour	6 619
Total passagers/jour (LàV sco)	125 916
V/K	19

Tableau 15 : Caractéristiques de la ligne 1

Source : Auteur

2.3 Ligne A du métro de Toulouse

Itinéraire

La ligne A du métro de Toulouse est une diamétrale d'environ 12 kilomètres reliant les parties Nord-Est et Sud-Ouest de la ville et composée de 18 stations. La ligne débute sur la commune de Balma au niveau d'un centre commercial (partie Nord de la ville).

Elle entre sur le territoire de la commune de Toulouse pour desservir le quartier des Argoulets puis de la Roseraie. Elle dessert ensuite la gare SNCF et le quartier Marengo avant de rejoindre la station Jean Jaurès qui est la station la plus fréquentée du métro toulousain. La ligne poursuit son itinéraire en desservant la vieille ville. Après avoir traversé la Garonne, la ligne dessert le quartier St Cyprien République. A la station Arènes, le métro permet la correspondance avec les tramways T1 et T2 et la gare de St Cyprien. L'itinéraire relie ensuite la partie sud-ouest de la ville notamment le quartier du Mirail ainsi que l'université Toulouse Jean Jaurès. Le terminus Basso-Cambo est à proximité de la zone d'activités de Basso-Cambo.



Figure 69: Itinéraire de la ligne A du métro de Toulouse

Source : Tisséo

Exploitation

L'exploitation de la ligne A du métro de Toulouse est de type « Mission unique omnibus ». La ligne A du métro de Toulouse est exploitée par des véhicules VAL de type 206 et 208. Les intervalles entre deux passages de rames peuvent atteindre, en heures de pointe, entre 65 et 70 secondes. La vitesse commerciale moyenne est supérieure à 31 km/h. Le service s'étend de 05h15 à 00h00 et est prolongé jusqu'à 03h00 les vendredis et samedis.

Fréquentation / Evolutivité

En 2014, la fréquentation de la ligne A était d'environ 196 000 voyageurs/jour en semaine scolaire. Le ratio voyageurs/Km-véhicules s'élevait à 15 environ.

Une enquête publique pour le doublement de la capacité de la ligne A par passage des rames et des stations à 52 mètres (4 voitures) se déroule du 17 octobre au 26 novembre 2016. Le projet est déclaré d'utilité publique en mars 2017. Les travaux ont nécessité des fermetures estivales de la ligne durant les étés 2017 à 2019. La ligne A doublée de capacité sera opérationnelle à la rentrée 2019.

Ci-dessous une matrice (tableau 16) reprenant les principaux éléments permettant de caractériser la ligne :

Caractéristiques	VAL
	Ligne A
Capacité emport véhicule 4p/m2	154
Intervalle minimum(en seconde HP)	65
Capacité heure (terminus)	8 516
Vitesse Km/h	31
Km com/jour	13 222
Total passagers/jour (LàV sco)	196 400
V/K	15

Tableau 16 : Caractéristiques de la ligne A

Source : Auteur

3. Approche méthodologique

3.1 Schématisation d'une exploitation optimale : approche théorique

Dans un premier temps, nous souhaitons schématiser des conditions d'exploitation optimales. Notre positionnement de performance opérationnelle repose sur l'optimisation des conditions d'exploitation. Nous tentons ici de réaliser une description théorique de conditions d'exploitation optimales. Cette approche théorique doit être considérée comme un but à atteindre.

Comme l'indiquait Edith Heurgon (1981), la partie fonctionnelle du système de transport est constituée de deux processus : l'un étant le parcours inter stations et l'autre, le temps d'immobilisation en station. Du fait de leur influence directe sur l'exploitation, la partie organique du système est également à prendre en considération. Une exploitation optimale doit regrouper un certain nombre de caractéristiques que nous tentons de lister ci-dessous.

L'itinéraire et les distances interstations doivent permettre d'atteindre structurellement des vitesses élevées. Lors du processus de parcours inter-stations, la vitesse maximale autorisée par l'infrastructure doit être atteinte le plus rapidement possible et conservée le plus longtemps possible. Cette vitesse maximale autorisée peut varier sur un même parcours inter-stations. Les accélérations et décélérations permettant d'atteindre et de conserver la vitesse maximale autorisée par l'infrastructure doivent, bien entendu, respecter le confort voyageur. Lors du processus d'immobilisation en station, les temps d'ouverture et de fermeture des portes doivent être le plus faible possible tout en respectant également la sécurité des voyageurs. Le temps consacré aux mouvements voyageurs doit être optimisé en fonction du flux voyageurs qui est en partie conditionné par les caractéristiques du quai et du véhicule. Comme nous pouvons le constater, de nombreux aspects de la composante fonctionnelle dépendent directement du niveau organique du système notamment au travers des caractéristiques techniques des véhicules, des infrastructures, du personnel d'exploitation et du comportement des voyageurs.

Le schéma ci-dessous (figure 70) tente de représenter des conditions d'exploitation optimales. Le mobile quitte la station A et atteint la vitesse maximale autorisée le plus rapidement possible. Cette vitesse doit être maintenue et non entravée par des éléments perturbateurs propres aux caractéristiques de l'interstation. Le temps d'arrêt portes fermées encadrant l'échange passagers (portes ouvertes) doit être minimisé. L'échange passagers quant à lui doit être optimisé en relation avec le flux voyageurs.

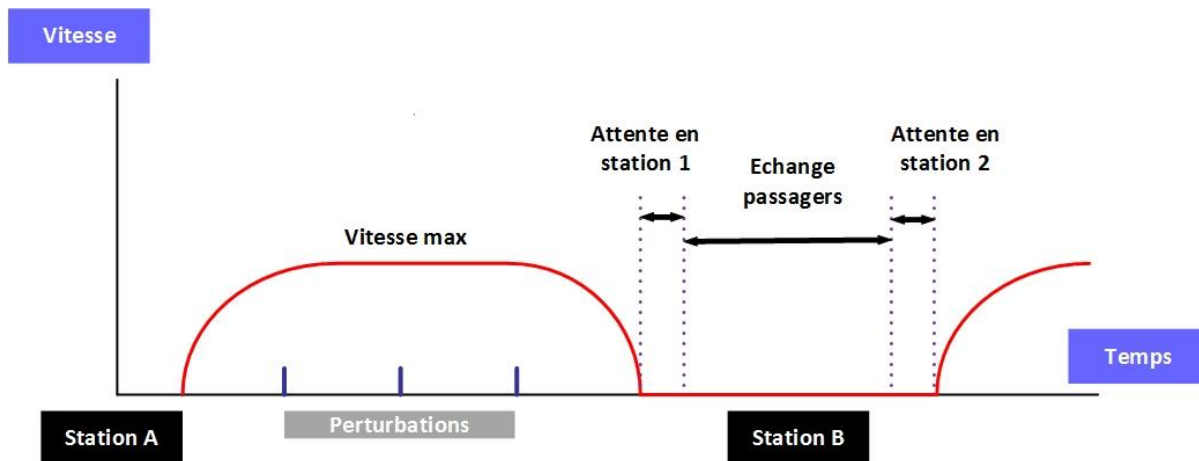


Figure 70 : Schématisation d'une exploitation optimale

Source : Auteur

Les conditions d'une exploitation optimale doivent être respectées par toutes les courses du tableau de marche. En effet, le maintien de ces conditions dans le temps permet de garantir la capacité maximale du système.

Selon la classification des voies réservées du professeur Vukan R. Vuchic (2007), les systèmes bénéficiant d'une réservation de catégorie A sans conducteur devraient atteindre les conditions d'exploitation optimales. En revanche, il semble difficile pour les systèmes bénéficiant d'une réservation de catégorie B et C avec conducteur d'atteindre ce niveau.

Cette vision de l'exploitation optimale fait partie intégrante de notre vision méthodologique et doit permettre de mettre en lumière les différents vecteurs permettant aux différents systèmes de transport d'améliorer leurs conditions d'exploitation et donc leur performance opérationnelle.

**

Notre approche méthodologique couvre deux composantes du système : une analyse de la composante organique et une analyse de la composante fonctionnelle.

La composante organique est composée de la topographie de l'itinéraire et des caractéristiques des matériel roulant y circulant.

La composante fonctionnelle est composée du processus de déplacement entre deux stations et du processus d'immobilisation en station.

Le cœur de notre recherche repose sur la composante fonctionnelle. Néanmoins, la composante organique ne peut être écartée car celle-ci conditionne en partie la composante fonctionnelle.

3.2 Analyse de la composante organique

3.2.1 Analyse de la topographie d'un itinéraire

Nous supposons que la composante fonctionnelle peut être conditionnée par la composante organique des systèmes. Par conséquent, nous considérons que les caractéristiques de l'itinéraire et des infrastructures utilisées par les mobiles pour exploiter la ligne doivent être prises en compte dans notre analyse.

Pour notre démonstration, nous cherchons à mettre en lumière les caractéristiques topographiques suivantes :

- La typologie de réservation des voies de circulation,
- Les distances :
 - o Longueur totale de la ligne,
 - o Nombre de stations,
 - o Distance interstation moyenne,
 - o Répartition statistique des distances interstations,
 - o Nombres de points entre les stations provoquant une éventuelle immobilisation des véhicules : feux, points singuliers...
- Le coefficient de sinuosité.

Typologie de réservation des voies de circulation

Pour la classification du niveau de réservation, nous retiendrons la classification de Vukan R, Vuchic (2007) car nous estimons que celle-ci est simple et facilement transposable aux systèmes étudiés.

La classification proposée par Bergeron, R (2003) permet plus difficilement de classer un système dans son intégralité. En effet, pour un même itinéraire, nous pouvons obtenir plusieurs types de classification. Il serait donc nécessaire de pondérer le niveau de réservation en fonction de la distance correspondante.

La classification de Vukan R. Vuchic propose 3 types de classification : A, B et C. Rappelons ci-dessous les principales caractéristiques de cette typologie :

- Catégorie A : Voie réservée entièrement contrôlée, dépourvue d'intersections et interdite à tout autre véhicule ou personne.
- Catégorie B : Voie réservée pourvue d'intersections
- Catégorie C : Voie majoritairement non réservée

Les distances

Les distances inter-stations peuvent être disponibles chez l'exploitant du fait de l'utilisation de certains outils tels que les solutions de graphycage ou encore les solutions SAEIV. Néanmoins, les distances entre des points au niveau d'une interstation, ne sont que rarement disponibles. Par conséquent, des mesures terrain peuvent s'imposer.

Concernant les distances sur la ligne 1 du tramway de Montpellier et la ligne 4 de Nantes, nous avons effectué une mesure terrain en parcourant la ligne à l'aide d'un véhicule équipé

du système de recueil DIALEXIS. Ces mesures terrain ont permis de recueillir toutes les informations nécessaires (figure 71).

type	nom du point final	Nom	détail du lieu	Tolérance avant	Distance	Tolérance arrière
S__	PORTE DE VERTOU	PVTO	-	0	-	30
F__	Feu Grand'Maison-Fontenelle	F_0450	-	60	145	30
F__	Feu Grand'Maison-Bois Hardy	F_0449	-	60	368	30
S__	MARAICHERS	MRAI	-	60	99	30
F__	Feu Grand'Maison-Maraichers	F_0448	Sortie site propre	60	122	30
P__	Entree site propre	L4_V1_2	Entree site propre	60	182	30
F__	Feu Route de Clisson-Maraichers	F_0328	-	60	228	30
S__	CHAPEAU VERNI	CVER	Alternance	60	142	30

Figure 71 : Exemple de mesures de terrain DIALEXIS

Source : Auteur

Concernant les distances du système VAL, nous avons utilisé des données existantes et disponibles chez l'exploitant. En effet, du fait du niveau de réservation du système et la non-existence d'intersections avec des axes sécants et de points entre les stations provoquant une éventuelle immobilisation des véhicules, la mise à disposition des distances inter-stations est suffisante.

Le coefficient de sinuosité

Pour le coefficient de sinuosité, nous rappelons la vision de Bertrand Faivre d'Arcier (2012) décrite dans le cadre du projet APEROL :

« La recherche d'un indicateur simple permettant de prendre en compte la géométrie du tracé, vise à comparer la distance à vol d'oiseau avec le kilométrage réellement effectué. Cependant, les usagers ne parcourent pas l'intégralité d'une ligne, et le calcul de terminus à terminus n'a pas de sens. C'est pourquoi le calcul se fait en tenant compte de l'arrêt le plus fréquenté (à partir des données de montées-descentes), ce qui peut bien correspondre au fonctionnement des lignes diamétrales, mais aussi aux lignes de rabattement (l'arrêt le plus fréquenté est alors l'un des terminus) : deux demi-lignes sont ainsi constituées et l'indicateur est la moyenne du ratio distance réelle / distance à vol d'oiseau, entre cet arrêt principal et chaque terminus ».

Nous avons calculé un coefficient de sinuosité de terminus à terminus. En effet, nous souhaitons calculer un indicateur de sinuosité pour l'intégralité de la ligne indépendamment des distances parcourues par les voyageurs. Idéalement, nous pourrions calculer un coefficient de sinuosité interstation. Le résultat utilisé pour la ligne correspondrait à la valeur moyenne, pondérée par la distance, de tous les coefficients interstation d'une ligne.

Le coefficient de sinuosité correspond au rapport entre la distance réelle et la distance à vol d'oiseau. Lorsque la sinuosité est nulle, le coefficient est égal à 1. Par conséquent, plus le résultat obtenu est supérieur à 1 et plus l'itinéraire est sinueux.

3.2.2 Analyse des caractéristiques du matériel roulant

Tout comme les caractéristiques de l'itinéraire et des infrastructures, les caractéristiques du matériel roulant doivent également être intégrées à notre raisonnement.

Dans le cadre de notre démonstration, nous cherchons à mettre en lumière les caractéristiques du matériel roulant suivantes :

- Puissance d'accélération,
- Puissance de freinage,
- Vitesse maximale atteignable,
- Longueur totale du véhicule,
- Nombre de portes,
- Largeur de chaque porte (dimension porte ouverte)

D'un point de vue du mobile, la notion de vitesse commerciale repose d'une part sur la distance interstations mais également sur la vitesse maximale autorisée du mobile circulant sur cette interstation. La figure 72 en donne la représentation théorique de Vukan R, Vuchic (2007)¹⁵⁸.

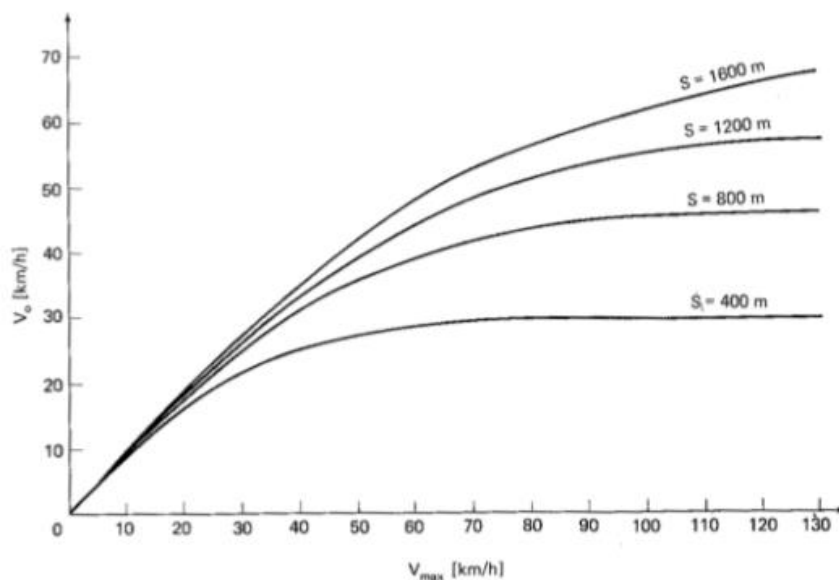


Figure 72 : Vitesse commerciale (axe des coordonnées) en fonction de la vitesse maximale et de l'espacement

Source : Vukan R, Vuchic. 2007

D'après ce graphique, une vitesse commerciale d'environ 20 km/h est atteinte avec une vitesse de mobile maximale de 30 km/h pour une distance interstation de 400 mètres. A vitesse maximale équivalente, la vitesse commerciale augmente lorsque la distance inter-station est plus importante.

Comme nous avons pu le constater dans le chapitre 2, le nombre et la largeur des portes constituent un aspect important pour faciliter le flux de voyageurs. Nous calculerons la part relative de la longueur totale de portes ouvertes par rapport à la longueur du véhicule pour chaque type de véhicules étudiés.

Plus largement, la problématique du nombre et de la largeur des portes fait partie intégrante du design intérieur des véhicules. Le design influe sur la capacité d'emport, le confort ainsi

¹⁵⁸ Vukan R, Vuchic. *Urban Transit systems and technology*. Wiley, New York : 2007, 624 p.

que la vitesse de déplacement des voyageurs à l'intérieur du mobile, notamment pour accéder aux portes.

Le temps nécessaire à l'écoulement du flux voyageurs dépend entre autres des caractéristiques techniques des véhicules mais également des caractéristiques des stations et de nombreux facteurs liés aux passagers (culture, âge, forme physique etc.)¹⁵⁹.

¹⁵⁹ Coxon, S., Sarvi, M., Shiwakoti, N. "Evaluating passenger dispersal in metro train carriages through a pedestrian crowd modelling simulation". *Annual Meeting Compendium of Papers*. Norman, M. R. (ed.). Washington D.C. USA: Transportation Research Board, p. 1 – 12 (2012)
Coxon S, Burns, K., De Bono, A, Napper, R. "The effect of suburban train carriage design upon punctuality, ingress and egress occlusion and passenger comfort". *Australasian Transport Research Forum*. 2009. 11p.

3.3 Analyse de l'aspect fonctionnel

Nous considérons que l'analyse microscopique des conditions d'exploitation permet d'apprécier la performance opérationnelle d'un système de transport collectif. Nous considérons le temps de parcours comme un agrégat composé de différentes composantes en relation avec les différents états des mobiles. Ces derniers roulent, s'immobilisent portes ouvertes et portes fermées.

3.3.1 La terminologie des composantes du temps de parcours

Pour notre démonstration, nous cherchons à désagréger les temps de parcours (TP) afin d'isoler ces composantes. Selon l'UITP (1988), le temps de parcours correspond au « *temps nécessaire à l'exécution d'une mission, applicable aux différents moments de la journée, de la semaine et de l'année. Le temps de parcours d'une course est le temps nécessaire à l'exécution de cette course* ». Cependant, comme nous l'avons spécifié, lors d'une course, les mobiles présenteront différents états à savoir soit une action de déplacement soit une action d'immobilisation qui sera elle-même caractérisée. Ces différents états correspondent à un temps spécifique qui est inclus au temps de parcours. Par conséquent, nous devons, dans le cadre de notre recherche, proposer une terminologie pour l'ensemble des composantes du temps de parcours.

- **Le temps de parcours (Temps de Parcours : TP)**
Cette composante correspond à la durée entre la dernière fermeture de porte à la station de départ et la dernière fermeture de porte à la station d'arrivée.
- **Le temps de roulage interstations (Temps de Roulage : TR)**
Cette composante correspond à la durée entre le début du déplacement et la fin du déplacement du mobile entre deux stations. Si plusieurs séquences de déplacement se succèdent, alors le temps de roulage total doit correspondre à la somme des séquences de déplacement.
- **Le temps d'échange des passagers pour chaque station (Echange Passagers : EP)**
Cette composante correspond à la durée entre la première ouverture et la dernière fermeture des portes du mobile. Si plusieurs séquences d'ouverture et fermeture se succèdent au niveau d'une station, alors le temps d'échange passagers total doit correspondre à la somme des séquences d'ouverture.
- **Le temps d'attente en station pour chaque station portes fermées (Attente en Station : AS)**
Cette composante correspond à la durée entre le début de l'immobilisation et la fin de l'immobilisation du mobile en station avec la totalité des portes fermées. Si plusieurs séquences d'immobilisation se succèdent au niveau d'une station, alors le temps d'attente en station total doit correspondre à la somme des séquences d'immobilisation.

- **Le temps d'attente inter-stations aux feux (Attente aux feux : AF)**
 Cette composante correspond à la durée entre le début de l'immobilisation et la fin de l'immobilisation du mobile au niveau d'un feu avec la totalité des portes fermées. Si plusieurs séquences d'immobilisation se succèdent au niveau d'un feu, alors le temps d'attente au feu total doit correspondre à la somme des séquences d'immobilisation
- **Le temps d'attente inter-stations aux points singuliers (Attente aux points : AP)**
 Cette composante correspond à la durée entre le début de l'immobilisation et la fin de l'immobilisation des mobiles au niveau d'un point singulier avec la totalité des portes fermées. Nous entendons par point singulier un caractère spécifique de l'itinéraire de type rond-point, aiguille, signal de manœuvre.... Si plusieurs séquences d'immobilisation se succèdent au niveau du point singulier, alors le temps d'attente total doit correspondre à la somme des séquences d'immobilisation.
- **Le temps d'attente inter-stations hors points (Attente en ligne : AL)**
 Cette composante correspond à la durée entre le début de l'immobilisation et la fin de l'immobilisation des mobiles sans point singulier avec la totalité des portes fermées. Si plusieurs séquences d'immobilisation se succèdent sans point singulier, alors le temps d'attente en ligne total doit correspondre à la somme des séquences d'immobilisation.

Par conséquent, nous proposons la formule suivante :

$$TP = TR + EP + AS + AF + AP + AL$$

3.3.2 Les données et les systèmes de recueil

Les données que nous souhaitons utiliser pour mettre en œuvre l'analyse microscopique des conditions d'exploitation doivent contenir un certain nombre d'informations relatives aux différents états des mobiles.

Dans le domaine du transport collectif, il existe une nomenclature permettant de classer les données. Cette nomenclature propose par exemple les données Floating Car Data (FCD) ou encore Automated Vehicle Location (AVL) qui correspondent à la géolocalisation des véhicules. Les données Electronic Ticketing Machines (ETM) ou encore AFC correspondent aux données issues de systèmes de billettique. Les données Automated Passenger Counting (APC) correspondent aux données issues des systèmes de comptage automatique des passagers.

Aujourd'hui, les exploitants de réseaux de transport collectif disposent de nombreux systèmes permettant le recueil et l'analyse de données dans différents domaines. Dans le cadre de notre démonstration, nous recherchons des systèmes disposant d'une information relative à la variable « temps ». Le recueil de cette variable « temps » doit être précis et structuré.

Les Systèmes d'Aide à l'Exploitation et d'Information Voyageurs SAEIV sont largement répandus et disponibles sur nos terrains d'étude. Dans la pratique, les systèmes SAEIV ont principalement trois domaines de pertinence :

- L'information voyageur à l'aide des Bornes d'Information Voyageurs (BIV). Ces bornes peuvent être situées à l'intérieur du véhicule ou au niveau d'une station.
- La régulation : tous les véhicules sont suivis en temps réel au sein des PCC (Poste de Commande Centralisé) ce qui permet au régulateur de maintenir les conditions réelles d'exploitation au plus près du tableau de marche théorique. Le SAE permet également une communication radio (phonie) entre le PCC et l'ensemble des conducteurs installés dans les véhicules en exploitation.
- L'analyse statistique des temps de parcours pour la planification du TM. Les SAE disposent de bases de données conséquentes stockant l'information sur les temps de parcours (données de type FCD).

Concernant l'analyse statistique de la variable temps, les SAEIV permettent, au niveau le plus fin, une analyse du temps de parcours inter-points de régulation voire interstations. Les données recueillies par ces systèmes ne permettent cependant pas de distinguer clairement les différentes composantes du temps de parcours telles que nous le souhaitons.

Cependant, certains SAEIV disposent de fonctionnalités spécifiques permettant d'accéder à un certain niveau de désagrégation du temps de parcours. L'existence de ces fonctionnalités dépend du modèle et de la date de mise en service du SAEIV. Par conséquent, ce type de données n'est pas systématiquement disponible. De plus, en fonction des modèles de SAEIV, la manière de déterminer et de désagréger les temps de parcours peut varier.

Par conséquent, nous avons recherché des sources de données différentes nous permettant de recueillir toutes les informations souhaitées avec la possibilité de les comparer entre-elles. Dans le cadre de notre démonstration, nous allons utiliser des données qui ne sont pas forcément rattachables à la nomenclature précédemment évoquée. Nous considérons que le type de données que nous utilisons est davantage rattaché à la catégorie plus large « Sensors Data ». Les données rattachées à la catégorie « Sensors Data » sont enregistrées grâce à des capteurs embarqués à l'intérieur d'un mobile ou au niveau d'une infrastructure utilisée par le mobile.

Nous avons donc utilisé deux systèmes : le système DIALEXIS pour le tramway et le BHNS, et la base de données EAS du système d'automatisation de Siemens pour le VAL. Il n'a pas été possible d'utiliser le système DIALEXIS pour le VAL, l'intégration des composants embarqués était techniquement délicate du fait du niveau d'automatisation du système. Nous décrivons ci-dessous ces deux sources de données.

3.3.3 La base de données EAS

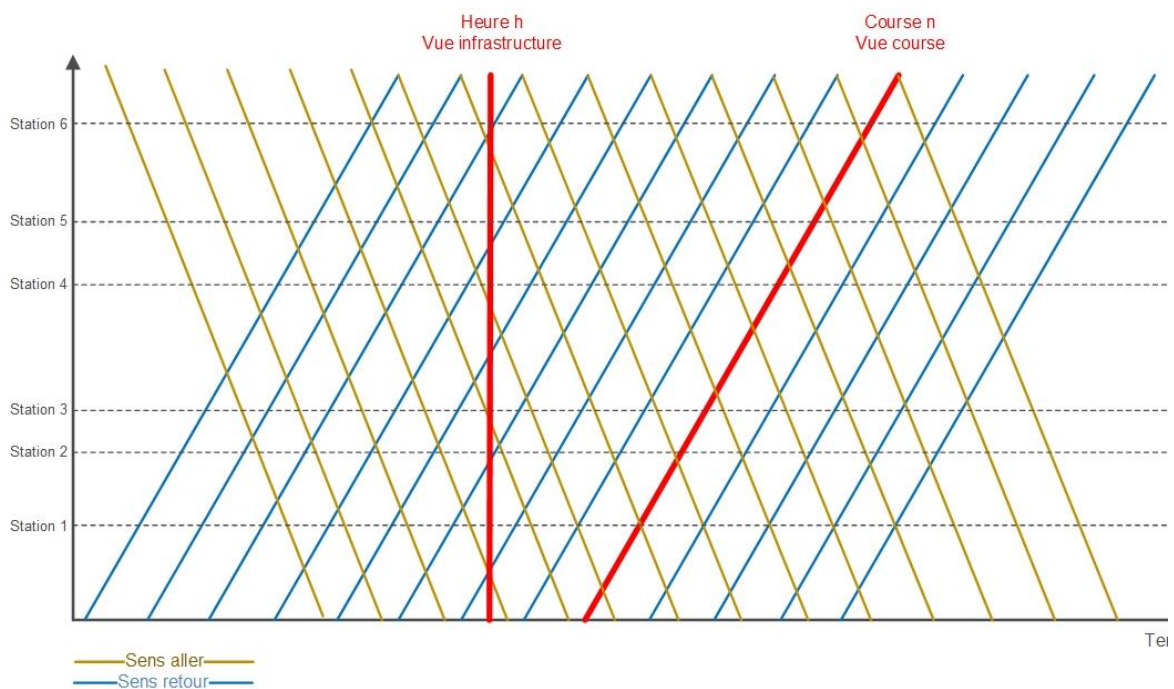
Le système d'automatisation de Siemens permet d'alimenter la base de données EAS quotidiennement via des capteurs au niveau de l'infrastructure. La donnée brute issue de la base de données EAS est une donnée intégrant les différents états de l'infrastructure notamment au niveau des stations. Chaque état de l'infrastructure est enregistré à la seconde avec un identifiant unique pour chaque véhicule. Par conséquent, il est possible de tracer le véhicule (figure 73).

19/05/2014 05:14:33	EAS	BGR	PLVP	PORTES LATERALES VEH MOD P	----	FERM	TS
19/05/2014 05:14:33	EAS	BGR	VEHP	NUMERO ELEMENT MODULE P	0	11	TS
19/05/2014 05:14:34	EAS	BGR	PVSV	PRESENCE VEH. EN STA. Q. V	NON	OUI	TS
19/05/2014 05:14:35	EAS	MBC	PLVM	PORTES LATERALES VEH MOD M	----	FERM	TS
19/05/2014 05:14:35	EAS	MBC	VEHM	NUMERO ELEMENT MODULE M	0	15	TS
19/05/2014 05:14:35	EAS	BGR	PLVP	PORTES LATERALES VEH MOD P	FERM	----	TS
19/05/2014 05:14:36	EAS	MBC	PLVM	PORTES LATERALES VEH MOD M	FERM	----	TS
19/05/2014 05:14:36	EAS	MBC	PVSV	PRESENCE VEH. EN STA. Q. U	NON	OUI	TS
19/05/2014 05:14:36	EAS	MBC	PPFU	PORTES PALIERES FERMEES Q.	OUI	NON	TS
19/05/2014 05:14:36	EAS	BGR	PPFV	PORTES PALIERES FERMEES Q.	OUI	NON	TS
19/05/2014 05:14:38	EAS	BGR	PLVP	PORTES LATERALES VEH MOD P	----	OUV	TS
19/05/2014 05:14:38	EAS	BGR	PPOPV	PORTES PALIERES OUV. MOD.	NON	OUI	TS
19/05/2014 05:14:38	EAS	MBC	PPOMU	PORTES PALIERES OUV. MOD.	NON	OUI	TS
19/05/2014 05:14:39	EAS	MBC	PLVM	PORTES LATERALES VEH MOD M	----	OUV	TS
19/05/2014 05:15:18	EAS	BGR	PLVP	PORTES LATERALES VEH MOD P	OUV	----	TS
19/05/2014 05:15:18	EAS	BGR	PPOPV	PORTES PALIERES OUV. MOD.	OUI	NON	TS
19/05/2014 05:15:18	EAS	MBC	PLVM	PORTES LATERALES VEH MOD M	OUV	----	TS
19/05/2014 05:15:18	EAS	MBC	PPOMU	PORTES PALIERES OUV. MOD.	OUI	NON	TS
19/05/2014 05:15:20	EAS	BGR	PLVP	PORTES LATERALES VEH MOD P	----	FERM	TS

Figure 73 : Exemple de donnée EAS

Source : Auteur

Chaque véhicule ayant un identifiant unique, nous avons pu restructurer la donnée brute pour basculer d'une vue d'infrastructure (repère spatial fixe) à une vue véhicule (repère spatial mobile). Le schéma qui suit (figure 74) permet de visualiser la modification structurelle de la donnée.



Source : Auteur

Une fois les courses reconstituées, les variables de temps suivantes sont disponibles :

- Temps de parcours inter-stations,
- Temps de roulage inter-stations,

- Temps des portes palières ouvertes,
- Temps des portes véhicules ouvertes,
- Temps d'arrêt des véhicules en station portes palières fermées (avec décomposition possible avant et après temps portes ouvertes),
- Temps d'arrêt des véhicules en station portes véhicules fermées (avec décomposition possible avant et après temps portes ouvertes).

Le début et la fin de déclenchement des différentes variables de temps reposent sur les enregistrements électriques des changements d'état de l'infrastructure.

Soulignons que les temps nécessaires à l'ouverture et à la fermeture des portes véhicules et palières sont également disponibles dans la base de données EAS.

Pour conclure, les composantes TP, TR, EP et AS sont disponibles. Les composantes AF, AP et AL ne sont pas visibles mais peu utiles du fait du niveau de réservation des voies de circulation et du niveau d'automatisme du système VAL.

3.3.4 Le système DIALEXIS

Le système DIALEXIS est une solution dédiée à la mesure des temps de parcours pour les systèmes de transport collectif urbain. La donnée enregistrée est précise au mètre et à la seconde et permet d'identifier les différents états des mobiles. Par conséquent, nous avons mis en œuvre des mesures DIALEXIS afin de constituer une base de données pour le tramway et pour le BHNS.

Contrairement à la donnée EAS, la donnée DIALEXIS est directement disponible avec une vue véhicule. La réorganisation de la donnée n'est pas nécessaire. Le système DIALEXIS est composé de trois couches : recueil, traitement/consolidation et analyse statistique. Le matériel de recueil est installé à bord des véhicules. Tous les états électriques du véhicule sont horodatés avec un niveau de précision à la seconde. Le système permet ensuite de réaliser une consolidation des données enregistrées sur un référentiel. Comme cela a déjà été évoqué, le référentiel est élaboré en réalisant des prises de mesures terrain. Le but étant d'obtenir une description détaillée de l'itinéraire.

Une fois les données consolidées sur le référentiel, les variables de temps suivantes sont disponibles :

- Temps de parcours entre deux stations,
- Temps de roulage des véhicules entre les stations,
- Temps des portes véhicules ouvertes en station,
- Temps d'arrêt des véhicules en station portes véhicules fermées,
- Temps d'arrêt inter-stations portes véhicules fermées (AP, AF, AL).

Le début et la fin du déclenchement des différents états des mobiles reposent sur les enregistrements électriques du véhicule.

Pour conclure, les composantes TP, TR, EP, AS, AF, AP et AL sont disponibles.

Le système est présenté en annexe page 319.

3.3.5 Terminologie commune : vers une équivalence

À la suite de l'analyse précise des différents états disponibles dans les données, nous avons remarqué deux différences. L'une concerne le temps de roulage et l'autre le temps des portes ouvertes.

Temps de Roulage (TR)

Pour le système DIALEXIS, le temps de roulage correspond au temps durant lequel le véhicule se déplace (réception d'un signal odométrique). Dans la donnée EAS, le temps de roulage n'est pas directement disponible. Par conséquent, celui-ci est calculé de la manière suivante : Heure arrivée station N moins Heure de départ de la station N-1.

Contrairement à la donnée EAS, DIALEXIS permet de mesurer un temps d'immobilisation inter-stations. Néanmoins, un temps d'immobilisation d'un véhicule du système VAL en interstation reste une exception. Par conséquent, ce temps doit être considéré comme marginal.

Echange Passagers (EP)

La base de données EAS permet de faire la distinction entre le temps nécessaire à l'ouverture et le temps nécessaire à la fermeture des portes palières et véhicules

Le système DIALEXIS intègre les temps nécessaires à l'ouverture et à la fermeture des portes dans le temps global d'ouverture des portes.

Dans le cadre de notre recherche, nous considérons que les temps nécessaires à l'ouverture et à la fermeture des portes sont intégrés dans la variable « temps portes ouvertes » pour les deux types de sources de données : EAS et DIALEXIS.

Par conséquent, nous retirons du périmètre de notre analyse ces temps mécaniques nécessaires à l'ouverture et la fermeture des portes. Néanmoins, nous considérons que ces temps sont importants et pourraient faire l'objet d'analyses intéressantes notamment dans le cadre d'une approche intra-système.

Après avoir uniformisé la liste des variables, nous avons vérifié si les enregistrements de début et fin des composantes temps était identique. Par exemple, l'élément déclencheur du début du temps d'ouverture de la porte est la réception de l'information électrique pour les deux types de système.

Ci-dessous la liste des variables temps retenus et leurs caractéristiques respectives.

- *Le temps de parcours inter-stations*
Temps écoulé entre le dernier signal « portes fermées » de la station de départ et le dernier signal « portes fermées » de la station d'arrivée.
- *Le temps d'échange passagers pour chaque station*
Temps écoulé entre le premier signal « Portes ouvertes » et le dernier signal « Portes fermées » à la station considérée.
- *Le temps de roulage inter-stations*
Temps durant lequel le véhicule se déplace entre deux stations.
- Le temps d'attente en station pour chaque station
Temps durant lequel le véhicule est immobilisé portes fermées à la station considérée.
- Les temps d'immobilisation inter-stations avec une distinction en fonction de la nature du point : feu, points singuliers.
Temps durant lequel le véhicule est immobilisé portes fermées au type de point considéré

Nous proposons ci-dessous (figure 75) une représentation de la terminologie commune aux deux systèmes de recueil de données.

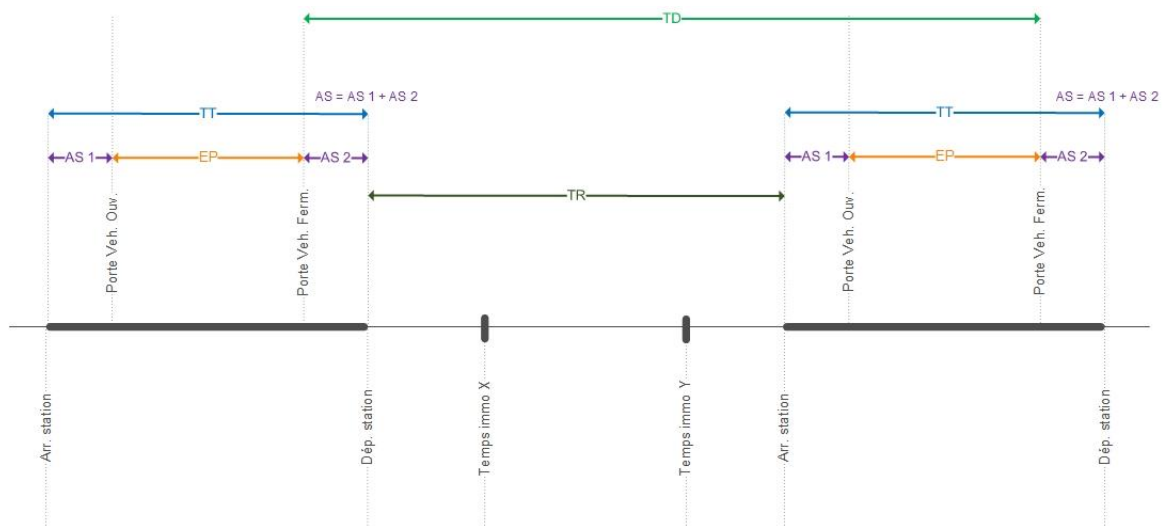


Figure 75 : Equivalence des terminologies EAS et DIALEXIS

Source : Auteur

3.3.6 Présentation des valeurs statistiques utilisées pour l'analyse microscopique

- La distribution statistique

Les valeurs des séries relatives au temps de parcours et à ses composantes seront représentées sous forme graphique afin de pouvoir les caractériser. Nous souhaitons classer les différentes séries selon une distribution symétrique ou asymétrique.

- Les valeurs centrales (moyenne et médiane)

Nous utiliserons la valeur moyenne ainsi que la valeur médiane. La moyenne correspond à la somme des valeurs divisée par le nombre d'éléments. La médiane correspond à la valeur qui partage une série en deux ensembles d'effectifs égaux : 50 % des valeurs lui sont supérieures et 50 % lui sont inférieures.

- Les valeurs de dispersion absolue (écart type et intervalle interquartile)

L'écart-type est une valeur correspondant à la moyenne du carré des écarts à la moyenne. L'intervalle interquartile correspond à l'étendue de la distribution une fois que l'on a retiré les 25 % des valeurs les plus faibles et les 25 % des valeurs les plus fortes. 50 % des observations sont donc concentrées entre Q1 et Q3.

- Les valeurs de dispersion relative (coefficient de variation et coefficient interquartile)

Afin de comparer le niveau de variabilité des composantes entre elles, nous utilisons les valeurs de dispersion relative. Le coefficient de variation correspond au rapport entre l'écart type et la valeur moyenne et le coefficient interquartile correspond au rapport entre l'écart interquartile et Q2.

Nous avons fait le choix d'utiliser des valeurs centrales et des valeurs de dispersion pertinentes pour des distributions symétriques et asymétriques. De plus, nous souhaitons comparer des composantes temps de différents systèmes, Par conséquent, l'utilisation de valeurs de dispersion relative est nécessaire.

3.3.7 Présentation de la méthode pour mesurer l'impact de la variabilité du temps de parcours dans l'hypothèse d'invariance des composantes

Pour déterminer l'influence de la variabilité d'une composante temps sur le temps de parcours global, nous recalculons les temps de parcours. Pour chaque nouveau temps de parcours nous rendons une composante temps immuable c'est à dire sans variabilité. Ensuite, nous recalculons, pour chaque nouveau temps de parcours, la variabilité.

Pour rendre immuable les composantes du temps de parcours, nous remplaçons pour une composante de temps donnée toutes les valeurs réelles rattachées aux courses enregistrées par la valeur moyenne de tout l'échantillon. De cette manière, nous pouvons déterminer dans quelle mesure la variabilité générale du temps de parcours est affectée.

Nous recalculons les temps de parcours suivants :

- **Temps de parcours 0 (TP0) :**
Correspond au temps de parcours originel
- **Temps de parcours 1 (TP1 = AL im) :**
Correspond au temps de parcours intégrant la composante de l'attente en ligne immuable
- **Temps de parcours 2 (TP2 = AF im) :**
Correspond au temps de parcours intégrant la composante de l'attente aux feux immuable
- **Temps de parcours 3 (TP3 = AP im) :**
Correspond au temps de parcours intégrant la composante de l'attente aux points immuable
- **Temps de parcours 4 (TP4 = AS im) :**
Correspond au temps de parcours intégrant la composante de l'attente en station immuable
- **Temps de parcours 5 (TP5 = EP im)**
Correspond au temps de parcours intégrant la composante de l'échange passager immuable
- **Temps de parcours 6 (TP6 = TR im) :**
Correspond au temps de parcours intégrant la composante du temps de roulage immuable

3.3.8 Présentation de la modélisation des analyses

Les données réelles recueillies dans le cadre de notre recherche nous permettent de réaliser une analyse statistique du temps de parcours désagrégé pour l'ensemble d'une direction tout au long de la journée. Nous présenterons également les mêmes mesures statistiques pour les heures de pointe matin (07 h 00 à 09 h 00) et soir (16 h 30 à 19 h 00) afin de visualiser une éventuelle évolution. Nous réaliserons également un focus pour certaines interstations particulières. Ces interstations particulières seront sélectionnées en fonction de leurs particularités.

Nous schématisons la structure de nos analyses à l'aide de l'image ci-dessous (figure 76).

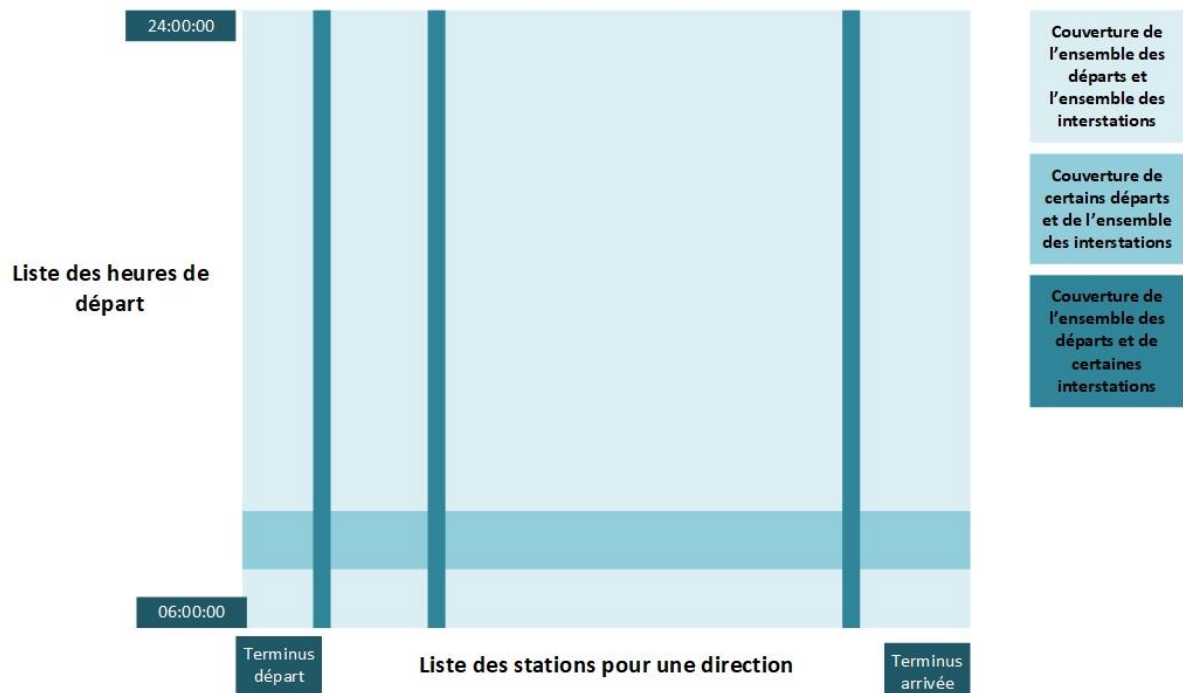


Figure 76: Schématisation spatiale et temporelle de l'analyse microscopique des conditions d'exploitation

Source : Auteur

Le but de cette organisation des résultats est de vérifier l'existence d'une disparité temporelle et spatiale du temps de parcours et de ces composantes.

4. Résultats par système

4.1 Système BHNS

4.1.1 Description de l'aspect organique

La typologie de réservation des voies de circulation

Le système BHNS entre dans la catégorie B. Les voies de circulation sont majoritairement séparées des autres circulations. Les voies en surface sont pourvues d'intersection avec d'autres véhicules et piétons. Ces caractéristiques permettent de dire que le BHNS est un système de transport semi rapide.

Les distances inter-stations

La longueur totale de la ligne pour les deux directions (hors boucle de retournement) s'élève à 13 244 mètres.

La ligne 4 de Nantes comporte 27 stations pour les deux directions. La longueur moyenne interstation est de **473,00 mètres**. La matrice ci-dessous (tableau 17) permet de visualiser le nombre de distances inter-stations par classe.

Classe	Nombre
0 - 250	0
250 - 500	14
500 - 750	14
750 - 1000	0
1000 - 2000	0

Tableau 17 : Nombre d'interstations par classe de distance sur la ligne 4

Source : Auteur

Nous remarquons qu'il n'y a pas de distance inter-station comprise entre 0 et 250 mètres. Toutes les interstations sont comprises entre 250 et 500 mètres et 500 et 750 mètres à parts égales. Au-dessus de 750 mètres, il n'y a aucune distance inter-stations.

Les valeurs relatives permettent de constater que **50 %** des distances interstations sont supérieures à 500 mètres.

Classe	Pourcentage
0 - 250	0
250 - 500	50
500 - 750	50
750 - 1000	0
1000 - 2000	0

Tableau 18 : Répartition des distances sur la ligne 4

Source : Auteur

Les points inter-stations

Du fait de sa catégorie de réservation des voies, l'itinéraire de la ligne 4 comprend de nombreuses intersections et par conséquent de nombreux points physiques provoquant un éventuel temps d'immobilisation inter-stations. Tous ces points ont été relevés lors de mesures de terrain. Les catégories de points physiques inter-stations relevés sont :

- Sorties et entrées de réservation des voies,
- Feu d'intersection,
- Stop d'alternance de réservation des voies.

Nous considérons que certains points relevés ne sont pas générateurs de temps d'immobilisation mais font partie intégrante de l'infrastructure tel que les sorties et entrées de réservation des voies.

Dans certains cas, en raison de la distance très faible entre deux points, nous considérons qu'un regroupement est nécessaire. Par conséquent, nous tenons à préciser les particularités suivantes :

- Certains feux sont rattachés à des stations. Le temps d'immobilisation en station porte fermée en station sera rattaché au temps d'attente aux feux

Pour les deux directions de la ligne, nous avons relevé **50** lieux susceptibles d'engendrer un temps d'immobilisation.

Les intersections sont équipées de feux de type R17 avec Système d'Aide à la Conduite (figure 77)¹⁶⁰. Tous ces points sont codés en tant que feux (AF). Il existe également quelques lieux tel que des entrées et sorties de couloir bus codés en tant que points singuliers (AP).

¹⁶⁰ Le feu R17 est un équivalent au feu tricolore R11. Le feu R17 présente 3 phases pouvant être transposées aux couleurs vertes, orange et rouge du R11. Le SAC permet au conducteur du mobile de vérifier sa bonne prise en compte lors de son arrivée sur l'intersection.



Figure 77 : Exemple de feux R17 avec SAC

Source : Auteur

Le coefficient de sinuosité

Le coefficient de sinuosité est le rapport entre la distance réelle et la distance à vol d'oiseau. Afin de calculer le coefficient de sinuosité, nous devons reprendre la longueur de l'itinéraire indépendamment des directions. La distance de la direction Porte de Vertou vers Foch Cathédrale est de 6,644 km. L'autre direction, de Foch Cathédrale vers Porte de Vertou est de 6,600 Km. Cette différence repose sur la position des stations au terminus ou la manière d'y accéder. Pour le calcul du coefficient de sinuosité, nous retenons la distance la plus longue. Le coefficient de sinuosité est de **1,215**.

La matrice ci-dessous (tableau 19) reprend les éléments de l'analyse topographique.

	Ligne 4 Nantes
Niveau de réservation	Catégorie B
Longueur totale (hors retournement) en mètre	13 244
Longueur itinéraire (hors retournement) en mètre	6 644
Distance vol oiseau (Google Maps) en mètre	5 470
Nombre de stations (Aller et Retour)	27
Nombre de feux carrefour (Aller et retour)	44
Nombre de points (Aller et Retour)	6
Distance inter-station moyenne en mètre	473
Pourcentage d'interstations avec distance supérieur ou égale à 500 mètres	50,00%
Coefficient de sinuosité	1,215

Tableau 19 : Synthèse des résultats de l'analyse topographique ligne 4

Source : Auteur

Les caractéristiques des véhicules

La ligne 4 de réseau de transport collectif de Nantes est exploitée par des autobus articulés EVOBUS de type CITARO. Ces véhicules d'une longueur de 18 mètres disposent de 4 portes dont 3 doubles. La porte simple est positionnée à l'avant du véhicule. La part relative de la distance totale d'ouverture des portes en rapport avec la longueur totale du véhicule est d'environ 23 %.

La matrice ci-dessous (tableau 20) reprend les caractéristiques principales du matériel roulant.

Caractéristiques	Valeurs
Puissance accélération nominale	1,5 m/s ²
Puissance freinage maximale	1 m/s ²
Puissance freinage d'urgence	NC
Vitesse maximale atteignable	80 Km/h
Longueur totale du véhicule	18 m
Nombre de portes simples (par façade)	1
Nombre de portes doubles (par façade)	3
Largeur porte simple ouverte	0,6
Largeur porte double ouverte	1,2
Part de la largeur totale de l'ouverture par rapport à la longueur totale véhicule	23,33%

Tableau 20 : Synoptique du mobile de la ligne 4

Source : Auteur



Figure 78 : Matériel Citaro G 4 portes de la ligne 4

Source : Auteur

4.1.2 Analyse de l'aspect fonctionnel

Présentation de l'échantillon

Dans le cadre de notre recherche, nous avons souhaité recueillir des données d'exploitation réelles durant les périodes les plus contraignantes. En effet, nous privilégions les périodes où l'offre de transport, la fréquentation et les autres circulations sont les plus importantes. Par conséquent, nous retenons les périodes « semaine scolaire ».

Pour recueillir les données d'exploitation, nous avons équipé 2 autobus de la ligne 4 du système DIALEXIS durant les semaines 40 à 42 et 46 à 48 incluses de l'année 2013. Les véhicules équipés du système ont été planifiés durant plusieurs jours sur l'ensemble des services voiture qui composent le TM de la ligne. Par conséquent, la base de données constituée couvre l'ensemble du service. Notre échantillon de mesures comprend 1 059 courses réparties comme suit :

- Porte de Vertou vers Foch Cathédrale : 540 courses dont 11 courses considérées comme atypiques [2 %]
- Foch Cathédrale vers Porte de Vertou : 519 courses dont 14 courses considérées comme atypiques [2,7 %]

Pour déterminer les courses atypiques, nous réalisons un tri croissant et décroissant pour toutes les composantes temps de tous les points de la topographie. Les valeurs extrêmes sont donc identifiées et écartées de l'analyse statistique.

Nous rappelons que la donnée recueillie dispose d'une précision mètre/seconde.

4.1.1.1 Le temps de parcours comme agrégat

Nous rappelons que nous considérons le temps de parcours comme un agrégat de différentes composantes temps. Dans un premier temps, nous représentons le temps de parcours mesuré tout au long de la journée de terminus à terminus. La représentation du temps de parcours prendra deux formes : un histogramme et un nuage de points.

La représentation sous forme d'historgramme (figures 79 et 80) permet de caractériser la nature de la distribution statistique. Les données de temps réelles sont regroupées par occurrence. Comme cela a été évoqué précédemment, nous constatons que cette distribution est plus ou moins symétrique. Le centre de la distribution correspond aux valeurs de temps les plus fréquentes. Nous remarquons également que la distribution s'étire davantage vers les valeurs hautes que les valeurs faibles. Ces caractéristiques sont communes aux deux directions.

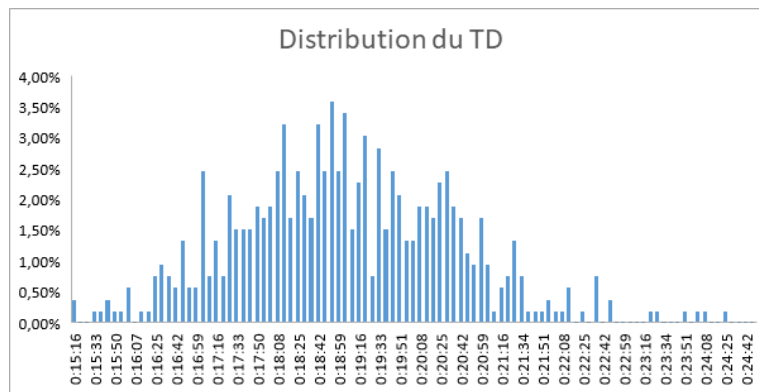


Figure 79 : Distribution du temps de parcours de Porte de Vertou vers Foch

Source : Auteur

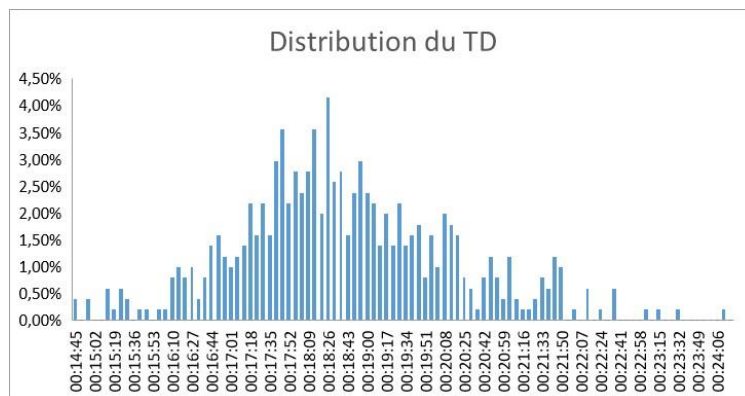


Figure 80 : Distribution du temps de parcours de Foch vers Porte de Vertou

Source : Auteur

Ce type de représentation n'est pas très adapté pour observer les différents temps de parcours tout au long de la journée. Par conséquent, les praticiens utilisent d'avantage une représentation sous forme de nuage de points (figures 81 et 82).

Le nuage de points permet de visualiser toutes les données réelles de temps de parcours enregistrées. Dans cet exemple, chaque point de couleur orange correspond à une donnée enregistrée. En fonction de l'échelle de l'axe des ordonnées, la dispersion est plus ou moins visible. Le nuage de points permet de visualiser les variations du temps de parcours tout au

long de la journée. Nous remarquons des hausses de temps de parcours le matin et le soir. Cette hausse peut s'expliquer entre autres par une fréquentation plus importante sur ces périodes de la journée.

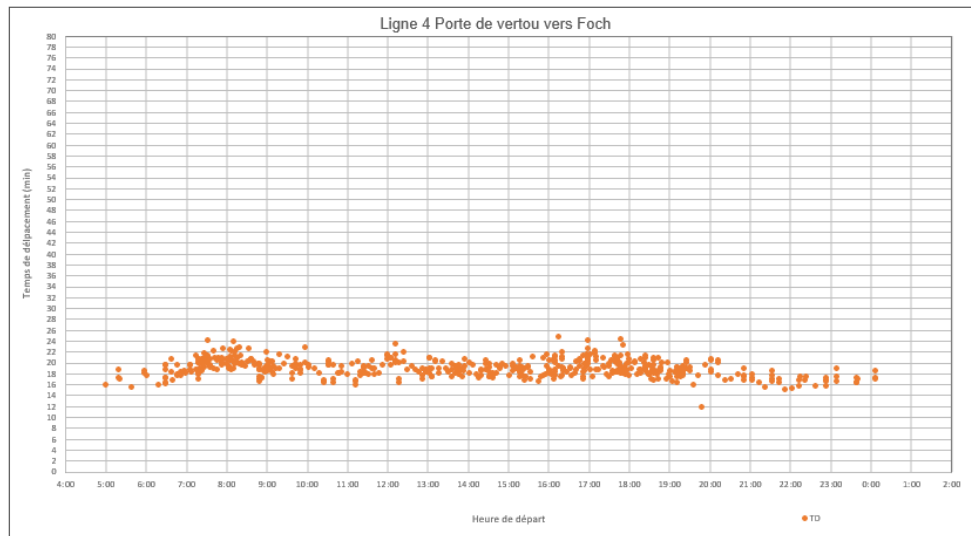


Figure 81 : Nuage de points des temps de parcours de Porte de Vertou vers Foch

Source : Auteur

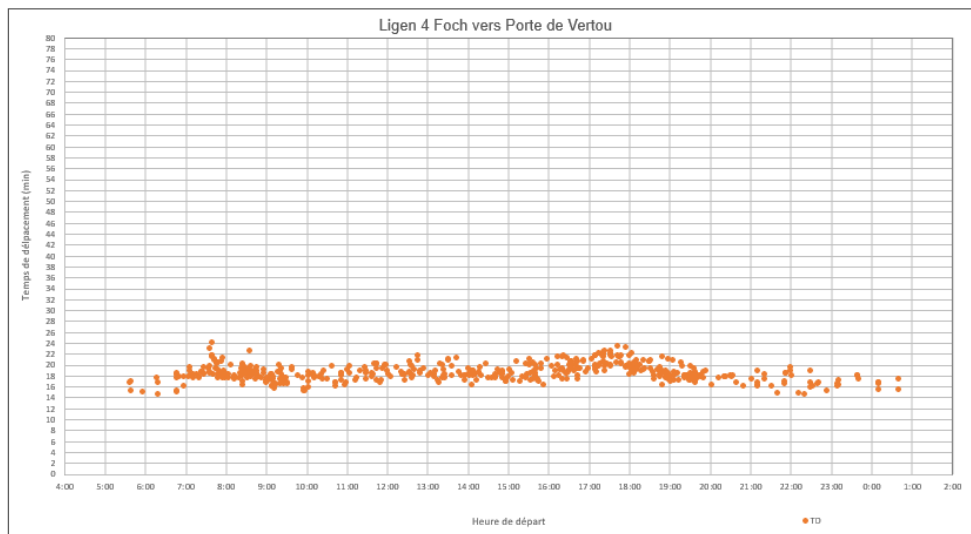


Figure 82 : Nuage de points des temps de parcours Foch vers Porte de Vertou

Source : Auteur

Pour la direction de Porte de Vertou vers Foch, le temps de parcours minimum enregistré est de 15 minutes et 16 secondes (départ enregistré à 21:50:32) et le temps de parcours maximum est de 24 minutes et 48 secondes (départ enregistré à 16:12:06).

Pour la direction de Foch vers Porte de Vertou, le temps de parcours minimum enregistré est de 14 minutes et 45 secondes (départ enregistré à 22:16:52) et le temps de parcours maximum est de 24 minutes et 12 secondes (départ enregistré à 07:36:37).

Pour les deux directions, les temps de parcours les plus élevés correspondent à des départs en heure de pointe.

Pour la direction Porte de Vertou vers Foch, la tranche horaire ayant le temps de parcours moyen le plus élevé est celle de la pointe du matin (entre 07h et 09h). Pour la direction de Foch vers Porte de Vertou, la tranche horaire ayant le temps de parcours moyen le plus élevé est celle de la pointe du soir (entre 16h30 et 19h).

La représentation des composantes temps sous forme d'histogramme

Comme nous l'avons évoqué dans notre approche méthodologique, nous cherchons à mettre en lumière les composantes du temps de parcours qui sont les suivantes :

- Le temps de roulage (TR)
- Le temps d'échange passagers (EP)
- Le temps d'attente en station (AS)
- Les temps d'attente aux feux (AF)
- Les temps d'attente aux points AP)
- Les temps d'attente en ligne (AL)

Dans un premier temps, nous souhaitons visualiser la distribution statistique des différentes composantes afin de les classer selon leur nature à savoir : distribution symétrique ou asymétrique.

Toutes les représentations graphiques sont annexées.

Le temps de roulage et le temps d'échange des passagers ont une distribution symétrique. En revanche, le temps d'attente en station, le temps d'attente aux feux, le temps d'attente ont des distributions asymétriques.

Par les deux directions, nous constatons une certaine ressemblance au niveau des valeurs pour chaque composante.

La caractérisation statistique des composantes

Afin de caractériser les composantes du temps de parcours, nous regroupons par intervalle de temps et par direction quelques calculs statistiques regroupés dans des matrices. Le point précédent nous a permis, à l'aide d'une représentation graphique, de caractériser les distributions. Les calculs statistiques suivants intègrent les différentes valeurs centrales et différentes valeurs relatives de dispersion.

Les résultats pour l'ensemble de la journée

Porte de Vertou vers Foch							
Composantes	Valeurs moyennes (s)	Pourcentage	Médiane	Ecart type (s)	Coefficient de variation (%)	Écart interquartile (s)	Coefficient interquartile (%)
TP	1146,0	100,0	1143,0	93,0	8,1	127,0	11,1
TR	856,0	74,7	855,0	51,0	6,0	72,0	8,4
EP	217,0	18,9	217,0	58,0	26,7	68,0	31,5
AS	32,0	2,8	30,0	12,0	37,5	13,0	43,3
AP	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
AF	41,0	3,6	35,0	25,0	61,0	32,0	91,4
AL	2,0	0,2	0,0	9,0	450,0	0,0	0,0

Tableau 21 : Valeurs des composantes du temps de parcours pour l'ensemble de la journée

Source : Auteur

Foch vers Porte de Vertou							
Composantes	Valeurs moyennes (s)	Pourcentage	Médiane	Ecart type (s)	Coefficient de variation (%)	Écart interquartile (s)	Coefficient interquartile (%)
TP	1123,0	100,0	1112,0	94,0	8,4	115,0	10,3
TR	830,0	73,9	828,0	45,0	5,4	60,0	7,3
EP	212,0	18,9	210,0	71,0	33,5	82,0	39,5
AS	30,0	2,7	28,0	13,0	43,3	11,0	39,3
AP	5,0	0,4	0,0	13,8	275,8	0,0	0,0
AF	46,0	4,1	41,0	21,0	45,7	26,0	63,4
AL	0,0	0,0	0,0	3,0	0,0	0,0	0,0

Tableau 22 : Valeurs des composantes du temps de parcours pour l'ensemble de la journée

Source : Auteur

Dans un premier temps, nous portons un intérêt aux valeurs relatives des différentes composantes par rapport au temps de parcours global. Les ordres de grandeur semblent être proches indépendamment des directions. En effet, le temps de roulage (TR) correspond à environ 75 % du temps de parcours. Cette composante temps est la plus importante. Ensuite, la composante d'échange des passagers représente presque 20 %. L'attente aux feux représente environ 4 % et l'attente en station environ 3 %. Les véhicules passent plus de temps immobilisés portes fermées aux feux qu'aux stations. Les temps relatifs aux attentes aux points singuliers et attentes en ligne sont proches de zéro. Cela révèle que les véhicules ne sont que très peu immobilisés portes fermées en dehors des feux et des stations.

Concernant la variabilité de ces composantes, il est intéressant de constater que les indicateurs de dispersion relatifs classent plus ou moins les composantes de manière identique.

Notons une particularité lorsque la composante intègre beaucoup de valeurs à zéro. Le coefficient de variation devient très élevé et le coefficient interquartile est égal à zéro. Cette situation se retrouve pour l'attente en ligne pour la direction Porte de Vertou vers Foch et l'attente aux points singuliers pour la direction de Foch vers Porte de Vertou.

Le temps de roulage semble être la composante la moins variable. En prenant en compte les deux indicateurs de dispersion relatifs, la variabilité se situe entre 5,4 et 8,4 %. Cette fourchette est valable pour les deux directions.

L'échange passagers est nettement plus variable et présente un écart entre les deux directions. En effet, pour la direction Porte de Vertou et Foch, la variabilité se situe entre 26,7 % et 31,5 %. Pour la direction Foch vers Porte de Vertou, la variabilité se situe entre 33,5 % et 39,5 %.

Le temps d'attente aux feux, qui correspond à la troisième composante la plus importante, présente une variabilité importante avec également un écart entre les deux directions. Pour la direction entre Porte de Vertou vers Foch, la variabilité se situe entre 61 % et 91,4 %. Pour la direction Foch vers Porte de Vertou, la variabilité se situe entre 45,7 % et 63,4 %

Le temps d'attente en station, légèrement inférieur au temps d'attente aux feux en part relative, se caractérise pour une variation relativement proche d'une direction à une autre. Cette variation se situe généralement aux alentours de 40 %.

Les temps d'attente aux points et en ligne doivent être considérés comme particuliers. En effet, l'échantillon présente une grande majorité voire la totalité de valeurs à zéro. Cela implique une part relative du temps du parcours faible et une variabilité soit égale à zéro soit très importante pouvant atteindre plus de 400 % avec le calcul du coefficient de variation. A la vue de la nature de la distribution statistique, il serait plus adapté de considérer la variation de ces variables au travers du coefficient interquartile qui est égale à 0 pour ces deux composantes et les deux directions.

Cette première analyse nous permet de dresser un premier bilan relatif à la caractérisation statistique des composantes temps pour l'ensemble des valeurs enregistrées. Nous souhaitons désormais porter un regard selon cette même approche mais pour des tranches horaires différentes en particulier les heures de pointe du matin et du soir. L'idée est de vérifier si les caractéristiques des composantes diffèrent.

Les résultats pour l'heure de pointe du matin

Porte de Vertou vers Foch							
Composantes	Valeurs moyennes (s)	Pourcentage	Médiane	Ecart type (s)	Coefficient de variation (%)	Écart interquartile (s)	Coefficient interquartile (%)
TP	1203,0	100,0	1202,0	84,0	7,0	98,0	8,2
TR	876,0	72,8	878,0	56,0	6,4	81,0	9,2
EP	258,0	21,4	253,0	50,0	19,4	77,0	30,6
AS	28,0	2,3	27,0	8,0	28,6	9,0	34,3
AP	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
AF	40,0	3,5	35,0	23,0	57,5	30,0	87,7
AL	1,0	0,1	0,0	2,0	200,0	0,0	0,0

Tableau 23 : Valeurs des composantes du temps de parcours entre 07h00 et 09H00

Source : Auteur

Foch vers Porte de Vertou							
Composantes	Valeurs moyennes (s)	Pourcentage	Médiane	Ecart type (s)	Coefficient de variation (%)	Écart interquartile (s)	Coefficient interquartile (%)
TP	1138,0	100,0	1118,0	84,0	7,4	97,0	8,7
TR	849,0	74,6	844,0	46,0	5,4	52,0	6,2
EP	196,0	17,2	190,0	71,0	36,2	82,0	43,2
AS	32,0	2,8	30,0	11,0	34,4	15,0	50,0
AP	9,0	0,8	0,0	17,0	188,9	16,0	0,0
AF	54,0	4,7	49,0	19,0	35,2	27,0	54,1
AL	1,0	0,1	0,0	3,0	300,0	0,0	0,0

Tableau 24 : Valeurs des composantes du temps de parcours entre 07h00 et 09H00

Source : Auteur

Les valeurs relatives des différentes composantes par rapport au temps de parcours global se situent globalement dans les mêmes ordres de grandeur par rapport à celles décrites pour l'ensemble de la journée. Nous constatons également une certaine symétrie des valeurs entre les deux directions. Le temps de roulage reste prédominant avec plus de 70 % suivi par l'échange passagers qui se maintient aux alentours de 20 %. Notons tout de même une différence de 4 points entre les deux directions.

L'attente aux feux représente environ 4 % et l'attente en station est inférieure à 3 %. Les temps relatifs aux attentes aux points et attentes en ligne sont également proches de zéro.

Pour les composantes relatives aux attentes aux points et aux attentes en ligne la variabilité se caractérise de manière identique par rapport à celles de l'ensemble de la journée. Les parts relatives sont très faibles et la dispersion nulle si l'on considère le coefficient interquartile.

Pour la tranche horaire de l'heure de pointe du matin, le temps de roulage reste la composante la plus stable avec des indicateurs de variabilité relatifs inférieur à 10 %. Néanmoins, notons la différence entre les deux directions. La dispersion de la direction de Porte de Vertou vers Foch se situe entre 6 % et 9 %. Pour l'autre direction, la dispersion se situe entre 5 % et 6 %.

L'échange passagers reste une composante relativement variable et différente d'une direction à une autre. Pour la direction Porte de Vertou vers Foch, l'échange passagers représente 21,4 % du temps de parcours avec une dispersion comprise entre 19,4 % et 30,6 %. En revanche, pour la direction Foch vers Porte de Vertou, l'échange passagers correspond à 17,2 % du temps de parcours avec une variabilité comprise entre 36,2 % et 43,2 %. Cette variabilité plus importante est en relation avec des valeurs basses plus prononcées pour cette direction.

Le temps d'attente aux feux correspond de nouveau à la troisième composante. Celui-ci correspond à 3,5 % pour la direction Porte de Vertou vers Foch et 4,7 % pour la direction de Foch vers Porte de Vertou. Cette différence entre les directions reste identique à celle observée pour l'ensemble de la journée. Les variabilités sont également différentes. Pour la direction de Porte de Vertou vers Foch, elle se situe entre 57,5 % et 87,7 %. Pour la direction Foch vers Porte de Vertou, elle se situe entre 35,2 % et 54,1 %. Cette différence de variabilité est également présente pour l'ensemble de la journée.

L'attente en station reste en dessous de l'attente aux feux au niveau de sa part relative avec une variabilité proche de celle de l'attente aux feux pour la direction de Foch vers Porte de Vertou. Pour la direction Porte de Vertou vers Foch, la variabilité de l'attente en station est inférieure et encore plus éloignée de celle de l'attente aux feux.

Les résultats pour l'heure de pointe du soir

Porte de Vertou vers Foch							
Composantes	Valeurs moyennes (s)	Pourcentage	Médiane	Ecart type (s)	Coefficient de variation (%)	Écart interquartile (s)	Coefficient interquartile (%)
TP	1173,0	100,0	1160,0	88,0	7,5	122,0	10,6
TR	868,0	74,0	865,0	48,0	5,5	68,0	7,8
EP	216,0	18,4	207,0	45,0	20,8	63,0	30,4
AS	35,0	3,0	32,0	14,0	40,0	13,0	40,6
AP	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
AF	50,0	4,3	42,0	33,0	66,0	40,0	97,0
AL	5,0	0,4	0,0	15,0	300,0	1,0	0,0

Tableau 25 : Valeurs des composantes du temps de parcours entre 16h30 et 19H00

Source : Auteur

Foch vers Porte de Vertou							
Composantes	Valeurs moyennes (s)	Pourcentage	Médiane	Ecart type (s)	Coefficient de variation (%)	Écart interquartile (s)	Coefficient interquartile (%)
TP	1197,0	100,0	1191,0	84,0	7,0	113,0	9,5
TR	854,0	71,3	849,0	45,0	5,3	61,0	7,2
EP	254,0	21,2	246,0	73,0	28,7	95,0	38,6
AS	30,0	2,5	28,0	12,0	40,0	10,0	35,7
AP	8,0	0,7	0,0	18,0	225,0	7,0	0,0
AF	50,0	4,2	246,0	28,0	56,0	95,0	38,6
AL	1,0	0,1	0,0	4,0	400,0	0,0	0,0

Tableau 26 : Valeurs des composantes du temps de parcours entre 16h30 et 19H00

Source : Auteur

Tout comme pour l'ensemble de la journée et les heures de pointe du matin, le temps de parcours et ses composantes présentent globalement les mêmes tendances pour les heures de pointe du soir. La symétrie entre les deux directions ainsi que les parts relatives des composantes se confirment à nouveau. Le temps de roulage reste la composante principale et représente plus de 70 % du temps de parcours. L'échange passagers se situe environ à 20 %, l'attente aux feux est légèrement au-dessus de 4 % et l'attente en station est à environ 3 %. Les temps relatifs aux attentes aux points et attente en ligne sont également proches de zéro.

La variabilité se caractérise également de la même manière à l'exception de l'attente en station qui s'avère plus variable que l'échange passagers (sauf coefficient interquartile direction Foch Porte de Vertou). L'échange passagers conserve ses caractéristiques à savoir une composante importante en relation avec sa part relative accompagnée d'une variabilité conséquente. Notons l'inversion des différences entre l'heure de pointe du matin et celle du soir au niveau des parts relatives par direction. Le matin, le temps d'échange passagers est plus important dans la direction Porte de Vertou vers Foch alors que le soir le temps d'échange passagers est plus important pour la direction Foch vers Porte de Vertou.

Pour l'attente aux feux, les parts relatives sont identiques et l'on observe la même différence de variabilité d'une direction à une autre.

L'attente en station reste une composante mineure avec une variabilité plus importante le soir. Les composantes relatives aux attentes aux points et aux attentes en ligne présentent les mêmes caractéristiques.

Après avoir analysé les résultats des composantes temps du BHNS de Nantes, nous constatons que les ordres de grandeur restent identiques indépendamment des périodes de la journée et des directions. Cela signifie que dans son fonctionnement et interaction avec son environnement, le système se comporte de manière identique tout au long de la journée indépendamment des directions. Néanmoins, notons qu'il existe des disparités plus ou moins marquées au niveau de la variabilité.

Le temps de roulage reste la composante principale avec une faible variation. La part relative de l'échange passagers est intéressante. Elle est plus importante dans une direction par rapport à l'autre avec une inversion des tendances entre le matin et le soir. Cela devrait correspondre au mouvement pendulaire des voyageurs. Sa variabilité est conséquente.

Les parts des temps d'attente en ligne et le temps d'attente aux points sont toujours très bases. Pour l'attente aux points, cela correspond au faible nombre de points physiques de l'itinéraire associés à cette composante. Pour l'attente en ligne, cela correspond au type de voie de circulation qui est en partie exclusivement dédiée au matériel roulant de la ligne.

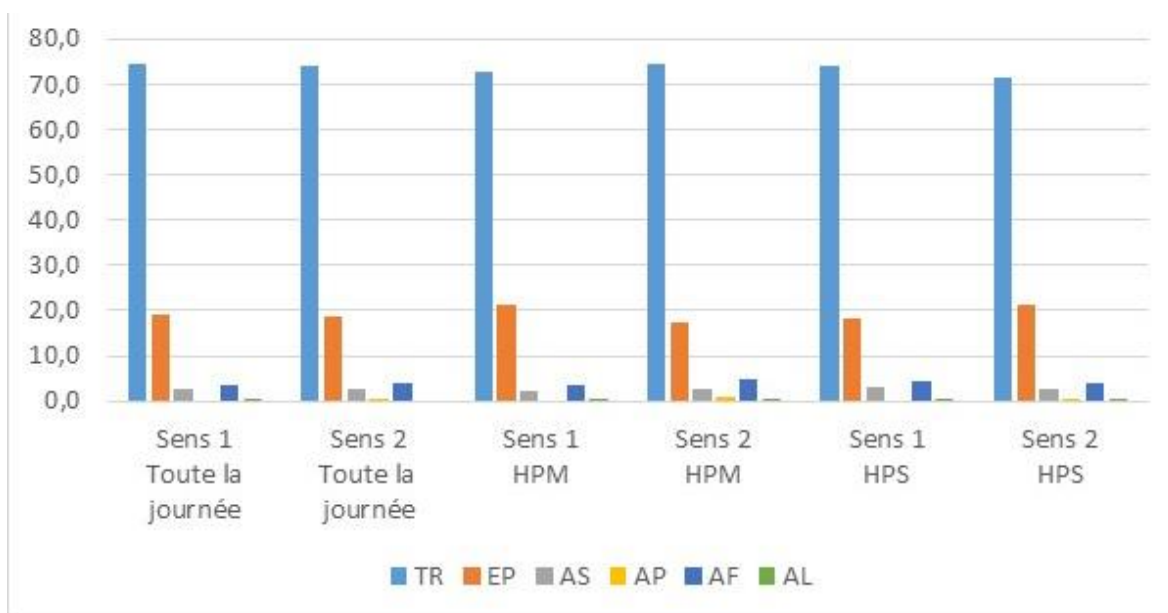


Figure 83 : Parts relatives des composantes (%) de la ligne 4

Source : Auteur

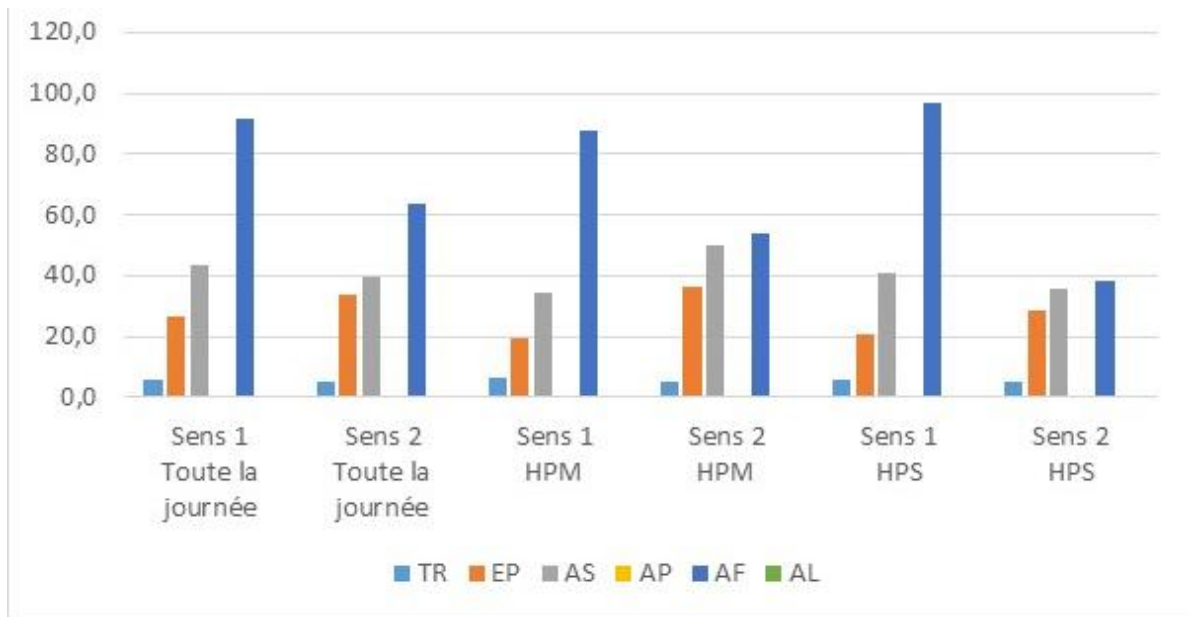


Figure 84 : Niveau de variabilité des composantes (%) de la ligne 4

Source : Auteur

Pour représenter la variabilité de l'ensemble de composantes, nous choisissons de reprendre les coefficients de variation des composantes ayant une distribution symétrique et les coefficients interquartiles des composantes ayant une distribution asymétrique. Le rapprochement des deux indicateurs de dispersion relatifs montre que les ordres de grandeur sont identiques à l'exception des composantes constituées de série avec beaucoup de valeurs à zéro. Les composantes ayant des séries avec beaucoup de valeurs à zéro présentent les coefficients de variation élevés et des coefficients interquartiles égaux à zéro. Une fois représentées sur l'histogramme ci-dessus (figure 84), ces distributions asymétriques (AP et AL) ne sont pas visibles et donc considéré comme sans variabilité. Or, nous constaterons au point suivant, qu'elles ont tout de même un impact sur la variabilité globale du temps de parcours.

Selon cette approche, les composantes les plus variables indépendamment des directions et tranches horaires de la journée sont l'attente aux feux, l'attente en station, l'échange passagers et le temps de roulage.

A ce stade, nous constatons que les composantes temps les plus variables sont également les moins représentatives dans le temps de parcours global. Par conséquent, il est intéressant de mesurer leur impact sur la variabilité du temps de parcours.

La variabilité du temps de parcours dans l'hypothèse d'invariance des composantes

Nos calculs portent sur le temps de parcours et ses composantes pour l'ensemble d'une direction pour une tranche horaire donnée. La moyenne des temps de parcours de TP1 à TP6 est égale à la moyenne du temps de parcours originel. Seul le niveau de variabilité est altéré. En considérant le coefficient de variation pertinent du fait de la nature de la distribution statistique du temps de parcours, nous portons un intérêt à son augmentation et à sa diminution (tableau 27).

Porte de Vertou vers Foch							
Composantes	Valeurs moyennes (s)	Pourcentage	Médiane	Ecart type (s)	Coefficient de variation (%)	Écart interquartile (s)	Coefficient interquartile (%)
TP'0	1146,0	100,0	1143,0	93,0	8,1	127,0	11,1
TP'1	1146,0	100,0	1145,0	90,0	7,9	126,0	11,3
TP'2	1146,0	100,0	1146,0	84,0	7,3	111,0	9,7
TP'3	1146,0	100,0	1143,0	93,0	8,1	127,0	11,1
TP'4	1146,0	100,0	1144,0	93,0	8,1	125,0	10,9
TP'5	1146,0	100,0	1140,0	69,0	6,0	88,0	7,7
TP'6	1146,0	100,0	1146,0	64,0	5,6	85,0	7,4

Tableau 27 : Impact des composantes du temps de parcours pour l'ensemble de la journée

Source : Auteur

Pour la direction de Porte de Vertou vers Foch, le TP0 a un coefficient de variation de 8,1 %. On constate, lorsque les composantes temps de l'attente aux points et l'attente en station sont immuables, que le coefficient de variation des temps de parcours TP3 et TP4 sont à 8,1 %. La composante relative à l'attente en ligne a un faible impact. Le coefficient de variation passe de 8,1 % à 7,9 %.

La composante du temps d'attente au feu a un impact plus important que l'attente en ligne. Le coefficient de variation du temps de parcours TP2 passe à 7,3 %.

Les deux composantes ayant un impact fort sur la variabilité du temps de parcours sont l'échange des passagers et le temps de roulage. Les coefficients de variation des TP5 et TP6 atteignent respectivement 6 % et 5,6 %.

Pour la direction de Foch vers Porte de Vertou, la situation semble assez proche si ce n'est que toutes les composantes ont un impact, même limité, sur le temps de parcours (tableau 28).

Foch vers Porte de Vertou							
Composantes	Valeurs moyennes (s)	Pourcentage	Médiane	Ecart type (s)	Coefficient de variation (%)	Écart interquartile (s)	Coefficient interquartile (%)
TP'0	1123,0	100,0	1112,0	94,0	8,4	115,0	10,3
TP'1	1123,0	100,0	1112,0	93,0	8,3	115,0	10,3
TP'2	1123,0	100,0	1115,0	91,0	8,1	112,0	10,1
TP'3	1123,0	100,0	1116,0	91,0	8,1	111,0	10,0
TP'4	1123,0	100,0	1112,0	93,0	8,3	123,0	11,6
TP'5	1123,0	100,0	1118,0	62,0	5,5	79,0	7,1
TP'6	1123,0	100,0	1121,0	71,0	6,3	85,0	7,6

Tableau 28 : Impact des composantes du temps de parcours pour l'ensemble de la journée

Source : Auteur

Le TP0 à un coefficient de variation de 8,4 %. On constate, lorsque les composantes temps de l'attente aux points et l'attente en station sont immuables, que les coefficients variation des temps de parcours TP3 et TP4 sont respectivement à 8,1 % et 8,3 %. Pour la composante

relative à l'attente en ligne, le coefficient de variation passe de 8,3 %. Pour la composante du temps d'attente au feu le coefficient de variation du temps de parcours TP2 est à 8,1 %.

Tout comme pour l'autre direction, les deux composantes ayant un impact fort sur la variabilité du temps de parcours sont l'échange des passagers et le temps de roulage. Les coefficients de variation des TP5 et TP6 atteignent respectivement 5,5 % et 6,3 %.

En fonction des directions, certaines composantes temps n'ont peu ou pas d'impact sur le temps de parcours. Par exemple, l'attente au feu présente un impact plus fort pour la direction Porte de Vertou vers Foch que pour l'autre direction. Cette situation s'explique par la forte variabilité du temps d'attente aux feux pour la direction Porte de Vertou vers Foch.

Les composantes de l'échange passagers et le temps de roulage doivent être considérées comme les composantes ayant le plus fort impact sur les temps de parcours. En général, lorsque ces composantes sont immuables, la variabilité générale baisse de plus de 2 %.

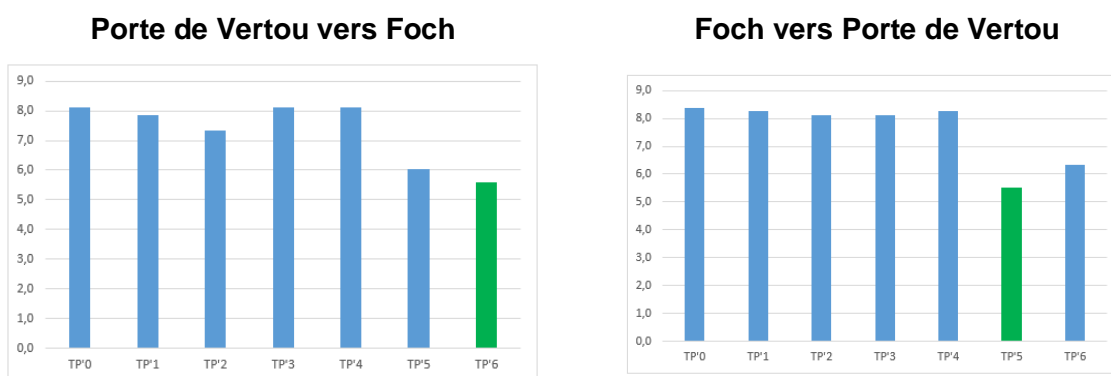


Figure 85 : Les coefficients de variation des temps de parcours

Source : Auteur

Nous avons procédé à une caractérisation statistique des différentes composantes du temps de parcours et tenté de mesurer leur impact sur le temps de parcours. Cette démarche concerne l'analyse du temps de parcours et de ses composantes pour l'ensemble des directions de terminus à terminus. Nous souhaitons désormais mettre en œuvre cette même analyse mais à une échelle différente : celle de l'interstation.

4.1.1.2 L'échelle de l'interstation

Nous cherchons à identifier des interstations remarquables afin de vérifier ou non si les tendances globales analysées pour l'ensemble d'une direction se retrouvent à l'échelle des interstations. Pour identifier les interstations remarquables, nous proposons une lecture de la vitesse commerciale et du coefficient de variation du temps de parcours sous forme de matrice numérique.

Les deux matrices ci-dessous (figures 86 et 87) représentent les vitesses commerciales interstations par tranche horaire d'une heure de 5 h 00 à 1 h 00 le lendemain. Nous remarquons que les vitesses commerciales varient en fonction des interstations. En fonction des tranches horaires, les vitesses interstations restent plus ou moins stables. Les vitesses commerciales inter-station hautes le sont tout au long de la journée. Il en est de même pour les vitesses commerciales basses.

Intervalle de temps	PORTE DE VERTOU	MARAICHERS	CHAPEAU VERNI	JOLIVERIE	BOURDONNIERES	MAUVOISINS	CLOS TOREAU	BONNE GARDE	GRENERAIE	BEAULIEU	ILE DE NANTES	TRIPODE	CITE INTERNATIONALE DES CONGRES	DUCHESSE ANNE-CHATEAU	FOCH CATHEDRALE
04:00:00-04:59:59	35,5	29,2	32,1	24,2	29,8	32,9	24,6	20,3	24,6	19,1	15,5	27,5	15,3	19,6	
05:00:00-05:59:59	27,4	23,7	25,5	19,5	26,1	26,3	21,0	20,3	26,6	19,4	16,8	26,6	16,0	17,8	
06:00:00-06:59:59	30,0	23,5	25,5	18,4	26,7	26,7	20,7	18,7	25,9	18,1	16,2	26,1	16,2	15,5	
07:00:00-07:59:59	26,8	21,5	22,9	16,6	25,2	25,5	18,9	16,2	23,8	15,8	13,8	23,4	14,6	13,8	
08:00:00-08:59:59	28,2	21,8	24,4	16,9	25,4	23,7	18,6	15,8	24,1	15,4	13,8	22,8	14,7	14,3	
09:00:00-09:59:59	29,8	22,7	23,9	18,1	25,1	24,9	19,5	17,4	24,1	16,7	15,0	23,7	15,1	12,7	
10:00:00-10:59:59	31,1	23,0	24,6	18,4	26,6	25,5	19,9	19,6	24,4	16,6	16,6	25,2	16,0	14,3	
11:00:00-11:59:59	30,0	23,2	23,6	17,7	25,6	25,6	19,8	17,9	24,6	17,5	13,7	24,7	15,3	15,4	
12:00:00-12:59:59	28,8	23,1	23,0	17,3	26,4	24,9	18,3	17,8	23,1	16,6	15,0	23,5	14,8	13,7	
13:00:00-13:59:59	29,4	23,2	24,6	18,6	26,6	25,7	19,6	17,9	23,6	16,9	14,8	24,3	15,6	14,4	
14:00:00-14:59:59	30,4	24,0	25,0	18,7	26,7	25,2	20,1	17,6	23,4	17,5	16,0	25,1	15,3	14,6	
15:00:00-15:59:59	30,1	23,2	23,6	18,4	26,8	26,2	19,7	18,7	23,6	16,8	14,9	24,9	14,9	15,0	
16:00:00-16:59:59	29,4	23,4	24,0	17,8	26,7	25,7	18,7	17,8	23,7	15,8	13,8	23,8	14,3	12,4	
17:00:00-17:59:59	29,6	23,3	23,8	17,4	26,8	25,3	19,7	18,4	23,8	15,2	14,7	23,4	14,4	12,0	
18:00:00-18:59:59	29,8	23,2	25,4	18,5	27,1	26,0	19,7	19,1	24,2	15,3	14,0	24,6	16,1	13,4	
19:00:00-19:59:59	30,2	23,9	25,5	19,5	27,2	27,1	21,0	19,6	25,3	17,1	15,6	25,1	16,6	13,9	
20:00:00-20:59:59	27,3	24,1	25,1	19,4	27,1	27,2	21,0	20,1	24,7	17,0	15,8	25,1	16,1	14,5	
21:00:00-21:59:59	32,1	26,0	27,5	21,2	28,7	28,2	22,3	21,5	26,8	19,6	15,7	27,1	18,0	16,7	
22:00:00-22:59:59	30,6	24,7	26,5	20,4	28,6	29,1	22,9	22,8	27,4	21,1	17,3	26,4	17,8	17,2	
23:00:00-23:59:59	28,6	23,4	26,0	19,0	26,7	28,7	22,6	22,0	24,7	21,9	17,3	27,6	18,3	16,7	
24:00:00-24:59:59	25,5	22,8	24,8	19,0	25,2	27,0	21,0	20,9	26,2	20,6	16,2	27,7	17,9	17,9	

Figure 86 : Matrice de la vitesse commerciale de Porte de Vertou vers Foch Cathédrale

Source : Auteur

Intervalle de temps	FOCH CATHEDRALE	DUCHESS ANNE-CHATEAU	CITE INTERNATIONALE DES CONGRES	TRIPODE	ILE DE NANTES	BEAULIEU	GRENERAIE	BONNE GARDE	CLOS TOREAU	MAUVOISINS	BOURDONNIERES	JOLIVERIE	CHAPEAU VERNI	MARAICHERS	PORTE DE VERTOU
04:00:00-04:59:59	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
05:00:00-05:59:59	-	17,6	19,8	29,2	20,3	18,3	28,0	23,3	23,2	30,2	30,1	22,3	21,5	24,8	33,3
06:00:00-06:59:59	-	15,8	19,3	27,7	18,6	19,2	26,7	21,7	22,5	28,5	27,5	21,5	20,2	24,8	28,6
07:00:00-07:59:59	-	15,1	17,0	25,2	14,9	15,6	20,5	19,4	19,7	26,7	24,4	17,3	19,7	21,7	26,8
08:00:00-08:59:59	-	15,7	16,4	24,9	15,7	15,8	23,2	19,9	20,7	27,8	26,0	19,5	18,6	23,7	31,2
09:00:00-09:59:59	-	16,7	17,8	25,8	17,1	17,1	22,5	21,4	20,8	28,6	28,6	22,0	21,2	23,8	32,3
10:00:00-10:59:59	-	16,2	17,5	27,5	17,0	15,7	23,0	21,1	20,0	27,2	27,4	20,1	23,6	22,6	29,3
11:00:00-11:59:59	-	16,0	17,0	27,5	16,9	15,6	19,2	18,8	18,9	26,2	25,1	19,6	22,3	21,3	28,4
12:00:00-12:59:59	-	15,4	14,5	25,2	14,8	14,7	22,5	19,3	19,1	25,9	25,5	19,1	24,5	21,2	28,1
13:00:00-13:59:59	-	15,5	16,2	26,1	15,2	14,8	18,1	18,9	20,1	27,5	26,5	20,2	23,0	23,3	29,3
14:00:00-14:59:59	-	14,5	16,5	27,0	16,6	15,7	22,7	19,5	19,8	26,5	26,5	20,6	22,9	23,4	29,2
15:00:00-15:59:59	-	15,0	16,0	26,4	16,6	15,1	20,8	19,1	19,7	26,2	25,8	20,1	22,8	21,4	27,8
16:00:00-16:59:59	-	14,3	15,5	24,6	14,8	13,5	20,7	19,2	19,2	26,7	25,7	19,7	20,3	21,0	26,0
17:00:00-17:59:59	-	13,5	14,9	23,1	13,2	12,0	17,6	17,8	18,9	25,8	24,8	19,1	19,1	20,4	26,3
18:00:00-18:59:59	-	15,0	16,0	25,6	15,1	14,8	23,0	19,7	19,3	26,5	25,5	19,9	19,6	21,1	27,4
19:00:00-19:59:59	-	16,3	16,7	26,2	16,9	15,4	21,3	19,9	20,6	26,4	27,3	21,2	22,3	22,8	28,5
20:00:00-20:59:59	-	15,2	16,9	27,0	17,6	15,6	26,5	21,4	21,4	28,0	26,8	20,8	24,4	22,6	29,5
21:00:00-21:59:59	-	17,3	18,4	28,4	18,5	17,2	19,1	19,8	21,4	28,2	27,6	21,8	22,7	23,3	30,4
22:00:00-22:59:59	-	16,9	17,5	28,8	18,9	18,4	26,5	22,2	22,5	29,6	28,4	22,5	26,8	25,8	33,8
23:00:00-23:59:59	-	15,8	18,1	27,0	16,7	16,1	25,8	22,4	21,9	28,2	28,5	21,8	26,4	22,5	30,3
24:00:00-24:59:59	-	16,0	18,2	28,0	18,8	19,2	26,8	21,8	20,6	28,4	28,3	22,9	25,8	25,1	36,4

Figure 87 : Matrice de la vitesse commerciale de Foch Cathédrale vers Porte de Vertou

Source : Auteur

Indépendamment des directions, les vitesses commerciales inter-stations les plus basses sont situées sur l'interstation Duchesse Anne-Château et Foch.

Pour la direction Porte de Vertou vers Foch, le secteur entre Beaulieu et Tripode donne des vitesses commerciales relativement basses. Pour la direction opposée, on retrouve une vitesse commerciale basse entre Tripode et Beaulieu.

Les deux matrices suivantes (figures 88 et 89) présentent le coefficient de variation du temps de parcours interstations par tranche horaire d'une heure de 5 h 00 à 1 h 00.

Pour la direction de Porte de Vertou vers Foch, nous constatons que les coefficients de variation du temps de parcours les plus élevés correspondant également aux interstations présentant les vitesses commerciales les plus basses (Duchesse Anne Château vers Foch et Beaulieu Ile de Nantes).

Pour la direction entre Foch et porte de Vertou, nous retrouvons une correspondance entre une vitesse commerciale basse et un coefficient de variation élevé pour l'interstation entre Foch et Duchesse Anne Château. En revanche, certains interstations comme Beaulieu vers Grènerais ou encore Joliverie vers Chapeau Verni présentent des coefficients de variation élevés.

Intervalle de temps	PORTE DE VERTOU													
	MARAICHERS	CHAPEAU VERNI	JOLIVERIE	BOURDONNIERES	MAUVOISINS	CLOS TOREAU	BONNE GARDE	GRENERAIE	BEAULIEU	ILE DE NANTES	TRIPODE	CITE INTERNATIONALE DES CONGRES	DUCHESS ANNE-CHATEAU	FOCH CATHEDRALE
05:00:00-05:59:59	12,2	6,6	7,5	8,0	14,3	7,4	6,3	7,2	9,3	13,0	7,7	11,4	19,4	11,6
06:00:00-06:59:59	11,0	11,4	11,2	7,2	8,1	11,1	6,0	9,3	5,9	23,0	9,6	8,4	8,3	23,3
07:00:00-07:59:59	10,3	10,1	10,1	10,1	7,9	9,0	11,7	10,3	12,0	22,0	16,9	9,7	12,4	21,1
08:00:00-08:59:59	11,2	7,7	11,0	11,8	10,1	14,6	12,0	15,7	10,0	16,0	17,9	10,2	12,0	22,4
09:00:00-09:59:59	8,2	7,9	15,6	11,9	9,9	7,0	8,7	13,1	7,9	15,2	12,2	8,0	15,8	27,5
10:00:00-10:59:59	8,8	9,3	9,9	10,6	7,0	7,9	9,1	11,5	7,0	28,0	7,3	6,7	7,9	25,4
11:00:00-11:59:59	10,3	7,2	12,8	15,0	13,2	12,0	10,0	17,0	7,9	12,7	22,4	10,2	13,4	16,6
12:00:00-12:59:59	9,1	8,9	13,7	10,1	6,6	10,2	13,4	10,8	8,6	17,0	12,2	9,8	10,9	29,6
13:00:00-13:59:59	9,8	7,7	8,7	8,3	8,1	8,1	10,3	13,2	8,9	12,2	10,3	6,9	9,3	23,2
14:00:00-14:59:59	6,2	5,5	10,0	10,2	8,1	6,9	9,1	15,4	12,5	13,3	10,9	7,7	12,1	21,0
15:00:00-15:59:59	11,0	9,4	11,4	9,1	8,9	9,1	9,6	9,4	10,4	17,3	18,1	8,2	12,6	17,1
16:00:00-16:59:59	9,5	10,5	10,2	13,8	9,1	11,7	11,9	12,1	10,0	17,5	18,1	9,1	15,1	37,9
17:00:00-17:59:59	9,3	9,2	13,4	11,1	10,7	10,4	11,2	11,6	10,4	20,3	16,3	11,0	13,0	45,8
18:00:00-18:59:59	8,9	9,0	8,4	10,7	12,9	13,0	10,7	10,6	11,3	26,9	17,9	7,6	11,0	25,0
19:00:00-19:59:59	8,2	11,8	16,4	12,5	10,2	8,8	9,0	8,3	7,6	24,4	16,9	12,6	16,3	25,8
20:00:00-20:59:59	14,1	12,2	14,3	11,2	10,9	4,2	8,7	13,0	12,0	10,2	4,9	5,7	8,9	25,7
21:00:00-21:59:59	5,8	7,3	13,9	9,7	7,7	11,3	10,5	10,6	8,3	8,6	23,3	6,8	10,2	16,1
22:00:00-22:59:59	9,1	4,5	13,6	9,2	8,9	9,4	6,9	8,2	8,2	6,0	7,5	7,4	6,1	9,1
23:00:00-23:59:59	5,5	9,2	6,8	7,0	8,8	5,9	7,0	8,6	26,6	7,9	5,8	4,5	12,9	8,2
24:00:00-24:59:59	7,0	5,7	11,5	4,6	2,0	13,4	13,7	7,4	9,8	7,7	13,5	1,7	8,0	5,6

Figure 88 : Matrice de coefficient de variation de Porte de Vertou vers Foch Cathédrale

Source : Auteur

Intervalle de temps	FOCH CATHEDRALE													
	DUCHESS ANNE-CHATEAU	CITE INTERNATIONALE DES CONGRES	TRIPODE	ILE DE NANTES	BEAULIEU	GRENERAIE	BONNE GARDE	CLOS TOREAU	MAUVOISINS	BOURDONNIERES	JOLIVERIE	CHAPEAU VERNI	MARAICHERS	PORTE DE VERTOU
05:00:00-05:59:59	29,5	12,9	6,7	7,5	7,4	11,2	7,6	10,3	8,2	6,2	5,0	23,9	3,0	12,7
06:00:00-06:59:59	22,2	7,2	6,8	13,3	10,1	10,6	7,6	10,5	10,1	13,4	7,3	22,4	11,8	9,0
07:00:00-07:59:59	20,1	11,2	9,0	23,6	16,3	20,7	12,8	14,4	8,2	12,2	18,7	27,5	11,0	9,2
08:00:00-08:59:59	17,8	11,2	9,7	13,3	13,0	20,2	14,2	9,7	9,7	12,3	10,1	25,1	14,5	13,6
09:00:00-09:59:59	19,7	11,4	11,2	14,2	15,7	31,8	10,2	12,0	10,4	7,7	6,4	22,6	12,3	12,6
10:00:00-10:59:59	17,2	7,2	5,9	13,3	11,5	20,8	9,5	9,6	9,1	7,7	11,0	14,5	11,4	11,7
11:00:00-11:59:59	17,3	10,0	7,5	11,3	12,0	30,2	12,4	12,1	9,4	9,1	10,4	22,0	10,0	10,8
12:00:00-12:59:59	13,4	14,6	9,9	15,4	12,5	12,3	13,0	8,7	8,6	7,6	7,3	9,4	10,5	7,0
13:00:00-13:59:59	17,3	13,8	10,1	21,7	13,2	23,8	10,3	11,0	9,6	10,6	10,3	14,9	11,0	9,4
14:00:00-14:59:59	20,0	11,4	7,9	12,0	11,2	19,7	14,6	10,7	8,2	7,9	7,0	20,2	8,2	10,4
15:00:00-15:59:59	21,6	9,3	6,7	13,9	14,2	25,5	14,5	12,0	8,0	10,0	8,7	19,8	9,0	11,7
16:00:00-16:59:59	20,7	14,9	12,8	18,8	15,1	22,3	11,8	11,2	6,1	6,7	6,2	30,8	10,0	9,3
17:00:00-17:59:59	17,4	13,4	14,5	18,9	22,0	27,2	15,2	10,7	8,0	8,3	7,5	27,8	10,0	7,7
18:00:00-18:59:59	16,5	13,9	10,9	19,2	14,3	14,7	9,4	10,2	6,7	9,3	10,6	32,4	13,5	9,4
19:00:00-19:59:59	16,6	11,8	7,9	10,5	12,6	33,8	11,0	8,0	7,9	5,6	9,0	19,3	8,9	8,7
20:00:00-20:59:59	18,2	9,2	5,2	9,1	9,0	3,7	6,0	6,1	6,2	5,5	8,4	10,1	10,2	5,4
21:00:00-21:59:59	11,5	8,7	5,9	11,3	12,4	37,4	14,2	10,5	9,0	12,1	8,5	26,1	9,6	9,1
22:00:00-22:59:59	18,8	29,2	7,9	7,8	8,2	11,5	7,5	7,7	10,3	6,3	12,2	11,6	8,6	13,7
23:00:00-23:59:59	5,0	8,8	5,9	13,8	25,9	11,0	6,8	8,4	7,4	6,5	9,8	5,6	17,2	6,8
24:00:00-24:59:59	9,4	7,8	9,8	14,7	9,0	12,6	3,4	12,2	14,0	8,6	5,3	13,4	5,5	15,3

Figure 89 : Matrice de coefficient de variation de Foch Cathédrale vers Porte de Vertou

Source : Auteur

Les interstations spécifiques

Direction Porte de Vertou vers Foch

- Beaulieu – Ile de Nantes

Cette interstation est intéressante car elle présente d'une part une vitesse commerciale basse d'autre part, un coefficient de variation important. Pour cette direction, cette interstation est la première à rassembler ces deux caractéristiques.

Description de l'aspect organique

Entre Beaulieu et Ile de Nantes, il existe peu de points spécifiques. On dénombre un feu positionné à 92 mètres de la station Beaulieu dans le sens de la marche. La longueur de l'interstation est de 265 mètres. La distance à vol d'oiseau est également 265 mètres (Google maps). Par conséquent, le coefficient de sinuosité est de 1 ce qui signifie que l'itinéraire est totalement droit.

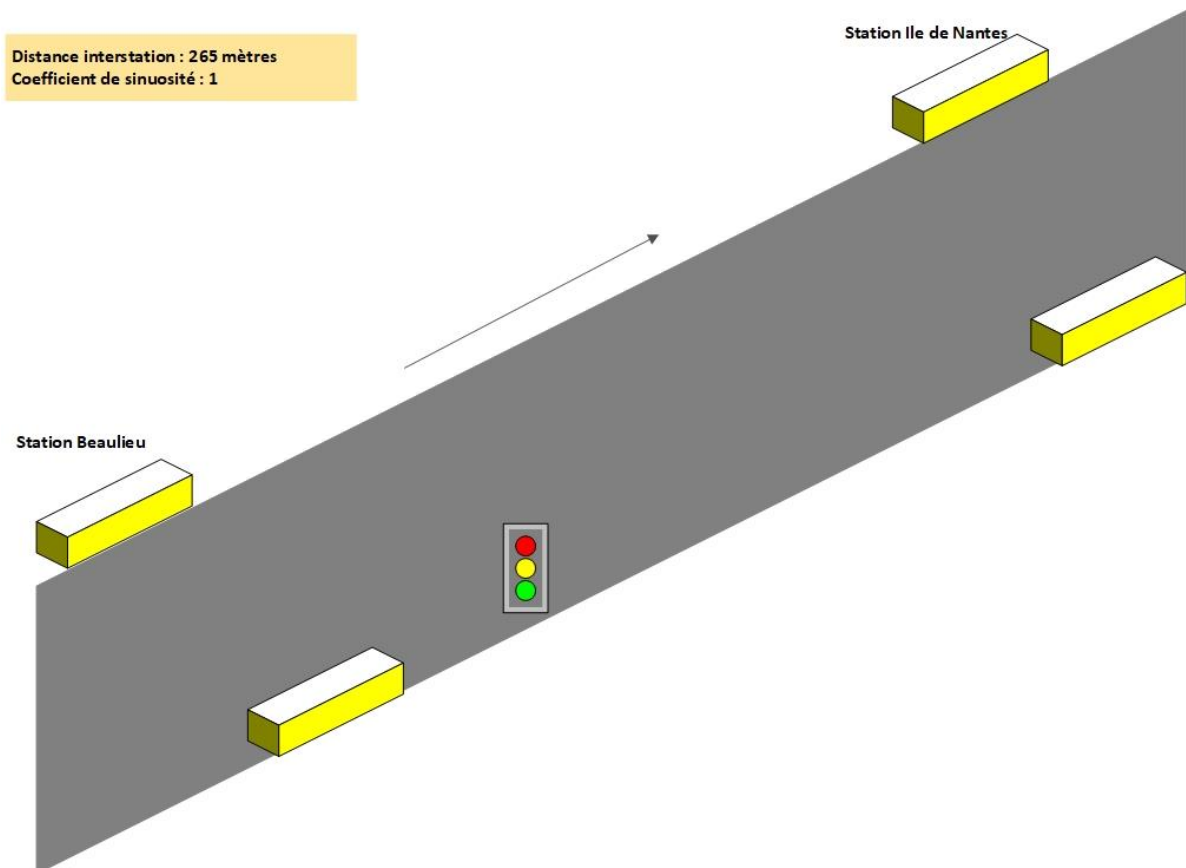


Figure 90 : Schématisation de l'interstation Beaulieu vers Ile de Nantes

Source : auteur

La caractérisation statistique des composantes

Sens1_Beaulieu_Ile de Nantes							
Composantes	Valeurs moyennes (s)	Pourcentage	Médiane	Ecart type (s)	Coefficient de variation (%)	Écart interquartile (s)	Coefficient interquartile (%)
TP	66,0	100,0	63,0	13,0	19,7	12,0	19,5
TR	42,0	63,6	41,0	6,0	14,3	6,0	14,6
EP	19,0	28,8	18,0	7,0	36,8	8,0	44,4
AS	3,0	4,5	3,0	3,0	100,0	2,0	91,4
AP	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
AF	2,0	3,0	0,0	6,0	300,0	1,0	0,0
AL	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Tableau 29 : Valeurs des composantes du temps de parcours pour l'ensemble de la journée

Source : auteur

Pour cette interstation, le temps de roulage correspond à plus de 63,6 %. Généralement cette composante représente, pour l'ensemble d'une direction, environ 75 % du temps. L'échange passagers correspond à presque 30 % et l'attente aux feux à 3 %.

La variabilité du temps de parcours est importante avec 19,7 %. Le temps de roulage reste la composante la plus stable avec 14,3 %. En revanche, l'échange passagers atteint 36,8 %, l'attente en station 100% et l'attente au feu 300%.

La variabilité du temps de parcours dans l'hypothèse d'invariance des composantes

Sens1_Beaulieu_Ile de Nantes							
Composantes	Valeurs moyennes (s)	Pourcentage	Médiane	Ecart type (s)	Coefficient de variation (%)	Écart interquartile (s)	Coefficient interquartile (%)
TP'0	66,0	100,0	63,0	13,0	19,7	12,0	19,5
TP'1	66,0	100,0	63,0	13,0	19,7	12,0	19,5
TP'2	66,0	100,0	65,0	10,0	15,2	11,0	16,9
TP'3	66,0	100,0	63,0	13,0	19,7	12,0	19,1
TP'4	66,0	100,0	63,0	13,0	19,7	12,0	18,9
TP'5	66,0	100,0	63,0	11,0	16,7	6,0	9,6
TP'6	66,0	100,0	64,0	10,0	15,2	9,0	14,0

Tableau 30 : Impact des composantes du temps de parcours pour l'ensemble de la journée

Source : auteur

Pour cette interstation, il n'y a ni d'attente en ligne ni d'attente aux points. Par conséquent, les TP1 et TP4 restent identiques au TP0. A la lecture des coefficients de variation, on constate que les deux composantes ayant un fort impact sur le temps de parcours sont le temps de roulage, l'attente aux feux et l'échange passagers.

Les valeurs mesurées montrent que l'échange passagers peut atteindre presque 1 minute et 30 secondes à la station Ile de Nantes. Le temps d'immobilisation au feu situé dans l'interstation peut dépasser les 50 secondes. Ces valeurs hautes créent un niveau de variabilité élevé et pénalise la vitesse commerciale.

La ligne 4 est une radiale qui relie la périphérie au centre. La charge moyenne des véhicules ne cesse de croître tout au long de du parcours entre Porte de Vertou et Foch, notamment le matin.

Lorsque les véhicules arrivent à cette station, la charge est assez importante. A cela s'ajoute des mouvements voyageurs montant et descendant. Le temps d'ouverture des portes est par conséquent important.



Figure 91 : R17 avec SAC station Beaulieu

Source : auteur

- Cité Internationale – Duchesse Anne

Cette interstation présente également une vitesse commerciale basse et un coefficient de variabilité du temps de parcours élevé.

Description de l'aspect organique

Entre Cité internationale et Duchesse Anne, il existe peu de points spécifiques. On dénombre un feu positionné à 21 mètres de la station Cité internationale dans le sens de la marche. Le feu est rattaché à la station. La longueur de l'interstation est de 328 mètres. La distance à vol d'oiseau est également 321 mètres (Google maps). Par conséquent, le coefficient de sinuosité est de 1,05.

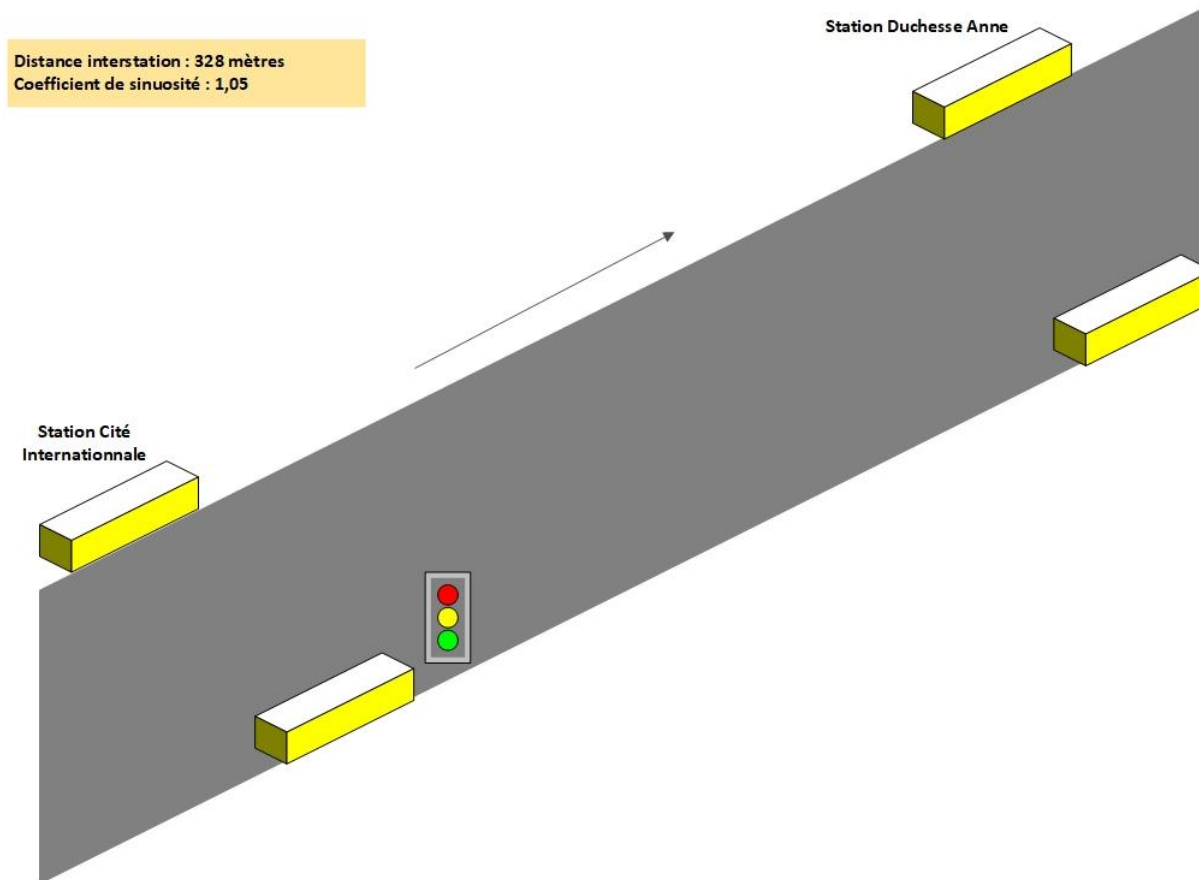


Figure 92 : Schématisation de l'interstation Cité internationale vers Duchesse Anne

Source : auteur

La caractérisation statistique des composantes

Sens1_Citée International_Duchesse							
Composantes	Valeurs moyennes (s)	Pourcentage	Médiane	Ecart type (s)	Coefficient de variation (%)	Écart interquartile (s)	Coefficient interquartile (%)
TP	77,0	100,0	76,0	11,0	14,3	13,0	17,1
TR	49,0	63,6	48,0	5,0	10,2	4,0	8,3
EP	24,0	31,2	24,0	7,0	29,2	9,0	37,5
AS	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
AP	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
AF	4,0	5,2	3,0	4,0	100,0	2,0	66,7
AL	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Tableau 31 : Valeurs des composantes du temps de parcours pour l'ensemble de la journée

Source : auteur

Pour cette interstation, le temps de roulage correspond à plus de 63,6 % donc inférieur à ce que cette composante représente pour l'ensemble de l'itinéraire. L'échange passagers correspond à plus 30 % et l'attente aux feux à 5,2 %.

La variabilité du temps de parcours est importante avec 14,3 %. Le temps de roulage reste la composante la plus stable avec 10 %. En revanche, l'échange passagers atteint 29,2 %, et l'attente au feu 100%.

La variabilité du temps de parcours dans l'hypothèse d'invariance des composantes

Sens1_Cité Internationale_Duchesse							
Composantes	Valeurs moyennes (s)	Pourcentage	Médiane	Ecart type (s)	Coefficient de variation (%)	Écart interquartile (s)	Coefficient interquartile (%)
TP'0	77,0	100,0	76,0	11,0	14,3	13,0	17,1
TP'1	77,0	100,0	76,0	11,0	14,3	13,0	17,1
TP'2	77,0	100,0	76,0	10,0	13,0	12,0	15,8
TP'3	77,0	100,0	76,0	11,0	14,3	13,0	17,1
TP'4	77,0	100,0	76,0	11,0	14,3	13,0	17,1
TP'5	77,0	100,0	76,0	7,0	9,1	6,0	7,3
TP'6	77,0	100,0	77,0	8,0	10,4	10,0	13,0

Tableau 32 : Impact des composantes du temps de parcours pour l'ensemble de la journée

Source : auteur

Comme pour l'interstation Beaulieu vers Ile de Nantes, il n'y a pas d'attente en ligne ni d'attente aux points. Par conséquent, les TP1 et TP4 restent identiques au TP0. A la lecture des coefficients de variation, on constate que les deux composantes ayant un fort impact sur le temps de parcours sont l'échange des passagers et le temps de roulage. Lorsque l'échange passagers est immuable, le coefficient de variation du temps de parcours passe de 14,3 % à 9,1 %.

Pour cette interstation, l'échange passagers est de nouveau impactant pour le temps de parcours. Notre échantillon de mesures montre que les valeurs, par course, peuvent être supérieure à 1 minute.

La station Duchesse Anne, qui est station de correspondance avec le tramway ligne 1, est caractérisée par un grand nombre de descentes de voyageurs. Les temps d'ouverture des portes sont donc importants et variables. En heure de pointe du matin, les temps d'ouverture des portes sont compris entre 15 et 50 secondes.

- Duchesse Anne – Foch Cathédrale

Cette interstation a la vitesse commerciale la plus basse de la ligne avec une moyenne de 15 km/h pour l'ensemble de la journée. Le coefficient de variation est également le plus haut de l'itinéraire.

Description de l'aspect organique

Entre Duchesse Anne et Foch Cathédrale, il existe une concentration importante de feux. Cette dernière interstation ne possède plus de réservation de voirie. Les véhicules se retrouvent donc sur un espace de circulation partagé. On dénombre 5 feux dont celui permettant de traverser la ligne 1 de tramway. La longueur de l'interstation est de 538 mètres. La distance vol d'oiseau est également 422 mètres (Google maps). Par conséquent, le coefficient de sinuosité est de 1,27.

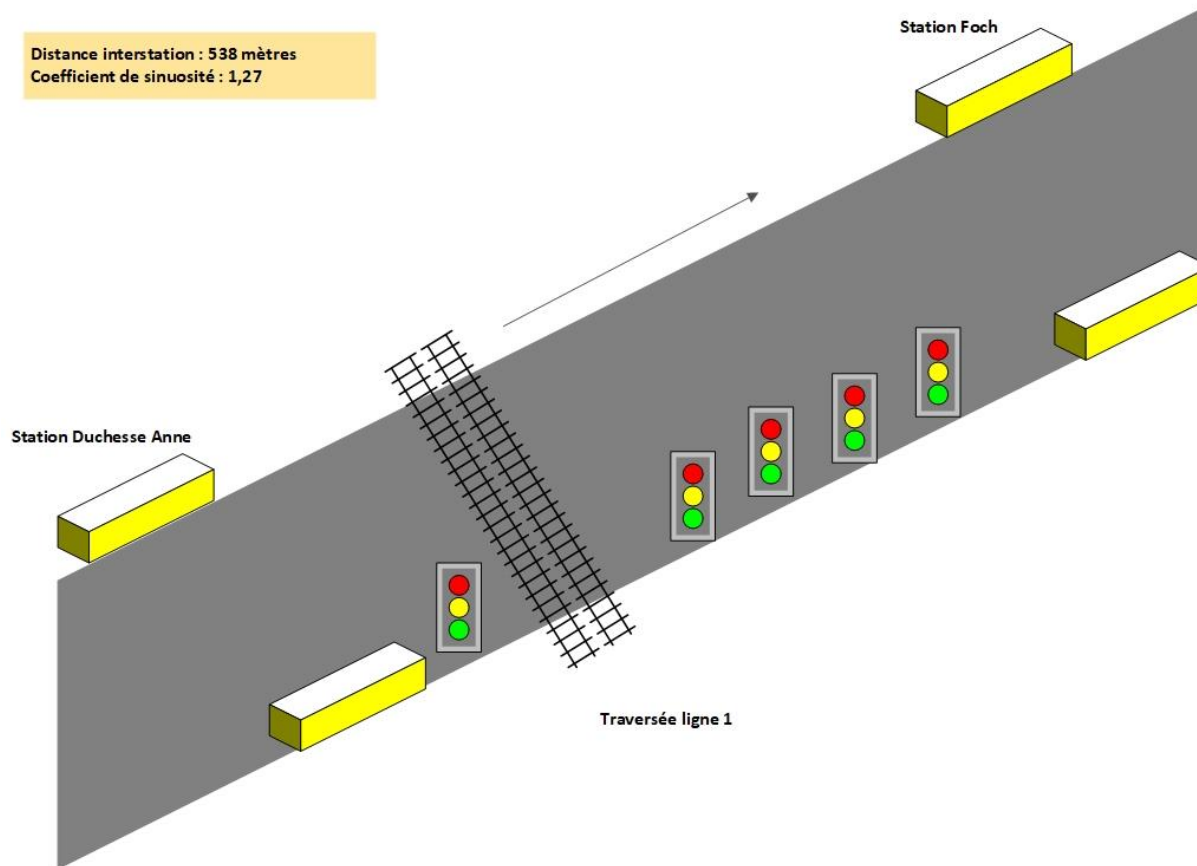


Figure 93 : Schématisation de l'interstation Duchesse Anne vers Foch

Source : auteur

La caractérisation statistique des composantes

Sens1_Duchesse_Foch							
Composantes	Valeurs moyennes (s)	Pourcentage	Médiane	Ecart type (s)	Coefficient de variation (%)	Écart interquartile (s)	Coefficient interquartile (%)
TP	139,0	100,0	126,0	42,0	30,2	39,0	30,8
TR	97,0	69,8	92,0	19,0	19,6	20,0	21,6
EP	19,0	13,7	20,0	3,0	15,8	0,0	0,0
AS	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
AP	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
AF	21,0	15,1	14,0	22,0	104,8	26,0	179,3
AL	2,0	1,4	0,0	9,0	450,0	0,0	0,0

Tableau 33 : Valeurs des composantes du temps de parcours pour l'ensemble de la journée

Source : auteur

Pour cette interstation, le temps de roulage correspond à presque 70 %. L'échange passagers correspond à 13,7 % alors que l'attente aux feux dépasse les 15 %. La variabilité du temps de parcours est importante avec un coefficient de variation qui dépasse les 30 %. Le temps de roulage n'est pas, pour cette interstation la composante la plus stable. Le coefficient de variation du temps de roulage atteint presque 20 %. L'attente aux feux représente plus de 15 % ce qui correspond à une part relative supérieure à l'échange des passagers. La composante temps de l'attente en ligne, qui est généralement quasi inexistante, correspond ici à plus de 1 %.

L'attente aux feux et l'attente en ligne sont des composantes variables avec respectivement des coefficients de variation de presque 105 % et 450 %

La variabilité du temps de parcours dans l'hypothèse d'invariance des composantes

Pour cette interstation, les composantes attente en station et attente en ligne ne sont pas présentes. Par conséquent, les TP3 et TP4 sont identiques à TP0.

En revanche, nous constatons que le temps de roulage et l'attente aux feux ont le même niveau d'impact sur le temps de parcours. En effet, ces deux composantes, une fois immuables, permet d'obtenir un coefficient de variation du temps de parcours de 18,7. Notons également l'impact de la composante attente en ligne.

Sens1_Duchesse_Foch							
Composantes	Valeurs moyennes (s)	Pourcentage	Médiane	Ecart type (s)	Coefficient de variation (%)	Écart interquartile (s)	Coefficient interquartile (%)
TP'0	139,0	100,0	126,0	42,0	30,2	39,0	30,8
TP'1	139,0	100,0	128,0	36,0	25,9	38,0	29,7
TP'2	139,0	100,0	134,0	26,0	18,7	21,0	15,7
TP'3	139,0	100,0	126,0	42,0	30,2	39,0	30,8
TP'4	139,0	100,0	126,0	42,0	30,2	39,0	30,8
TP'5	139,0	100,0	126,0	42,0	30,2	41,0	32,6
TP'6	139,0	100,0	132,0	26,0	18,7	28,0	21,3

Tableau 34 : Impact des composantes du temps de parcours pour l'ensemble de la journée

Source : auteur

Cette interstation présente des niveaux de vitesse commerciale et de variabilité du temps de parcours de mauvaise qualité. Cela s'explique en partie par la traversée d'un axe fort (ligne 01 de tramway) et la disparition de la réservation de voirie. Cette interstation repose sur un espace de circulation mutualisé aux autres circulations et à la présence de 4 feux. Par conséquent, la circulation des véhicules du BHNS s'apparente plus à une ligne conventionnelle.

Les caractéristiques statistiques de composantes du temps de parcours, pour cette interstation, pourraient faire l'objet d'une comparaison plus approfondie.



Figure 94 : Traversée axe fort (ligne 1 de tramway)

Source : Google street view mai 2018



Figure 95 : Voie de circulation mutualisée avec feux tricolores

Source : auteur

Direction Foch vers Porte de Vertou

- Foch – Duchesse Anne

Tout comme pour la direction opposée, l'interstation Foch vers Duchesse Anne correspond à l'interstation la plus lente et l'une des plus variables de l'itinéraire. La vitesse commerciale moyenne est inférieure à 16 km/h et le coefficient de variation est en moyenne supérieur à 17 %.

Description de l'aspect organique

Pour cette direction, cette première interstation ne possède pas de réservation de voirie et intègre également plusieurs feux. Cette interstation est également concernée par la traversée de l'axe fort tramway ligne 1 avant d'atteindre la station Duchesse-Anne. La longueur de l'interstation est de 500 mètres. La distance à vol d'oiseau est également 433 mètres (Google maps). Par conséquent, le coefficient de sinuosité est de 1,15.

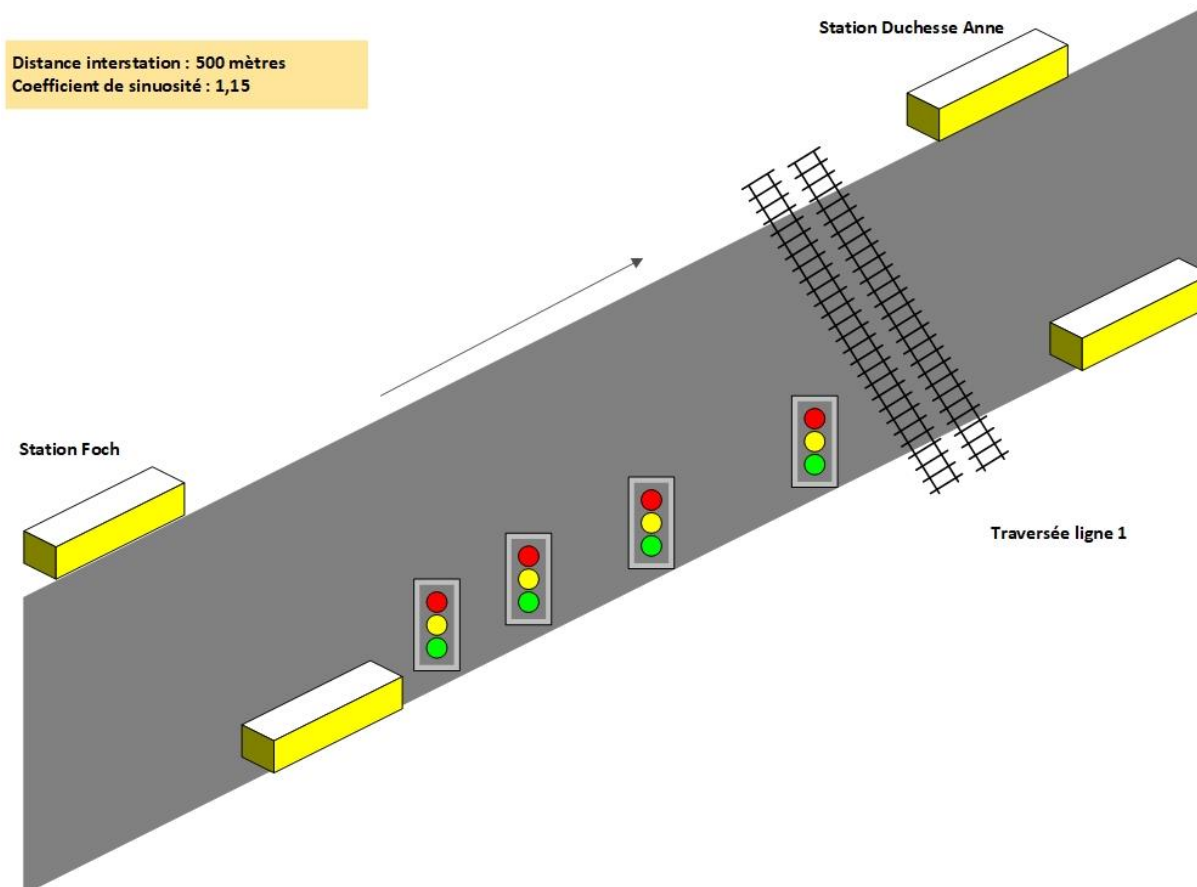


Figure 96 : Schématisation de l'interstation Foch vers Duchesse Anne

Source : auteur

La caractérisation statistique des composantes

Sens2_Foch_Duchesse							
Composantes	Valeurs moyennes (s)	Pourcentage	Médiane	Ecart type (s)	Coefficient de variation (%)	Écart interquartile (s)	Coefficient interquartile (%)
TP	118,0	100,0	114,0	22,0	18,6	30,0	26,3
TR	83,0	70,3	83,0	10,0	12,0	14,0	16,9
EP	27,0	22,9	24,0	12,0	44,4	13,0	54,2
AS	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
AP	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
AF	8,0	6,8	0,0	13,0	162,5	13,0	0,0
AL	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Tableau 35 : Valeurs des composantes du temps de parcours pour l'ensemble de la journée

Source : auteur

Le temps de roulage représente 70 % du temps de parcours ; l'échange des passagers 22 % et l'attente aux feux presque 7 %. Le niveau de variabilité du temps de roulage est le plus faible de l'ensemble des composantes avec 12 %. La composante de l'échange des passagers atteint un niveau de variabilité de plus de 44% et l'attente aux feux de plus de 162 %.

La variabilité du temps de parcours dans l'hypothèse d'invariance des composantes

Sens2_Foch_Duchesse							
Composantes	Valeurs moyennes (s)	Pourcentage	Médiane	Ecart type (s)	Coefficient de variation (%)	Écart interquartile (s)	Coefficient interquartile (%)
TP'0	118,0	100,0	114,0	22,0	18,6	30,0	26,
TP'1	118,0	100,0	114,0	22,0	18,6	30,0	26,
TP'2	118,0	100,0	116,0	16,0	13,6	20,0	17,
TP'3	118,0	100,0	114,0	22,0	18,6	30,0	26,
TP'4	118,0	100,0	114,0	22,0	18,6	30,0	26,
TP'5	118,0	100,0	114,0	19,0	16,1	24,0	21,
TP'6	118,0	100,0	114,0	17,0	14,4	22,0	19,

Tableau 36 : Impact des composantes du temps de parcours pour l'ensemble de la journée

Source : auteur

Les TP1, 3 et 4 sont identiques au TP0. Les composantes relatives à l'échange des passagers, du temps de roulage et de l'attente aux feux ont un impact conséquent sur la variabilité générale du temps de parcours. La composante ayant le plus fort impact est l'attente aux feux. En effet, lorsque cette composante devient immuable, le coefficient de variation du temps de parcours qui passe de 18,6 % à 13,6 %.

De nouveau, on constate que la suppression de la réservation redistribue les parts relatives des composantes temps et leur niveau d'impact sur le temps de parcours. L'attente aux feux ne représente que 8 % du temps de parcours, mais impacte de manière significative la variabilité générale. Le temps d'immobilisation total au niveau des différents feux peut atteindre, par course, presque 1 minutes et 30 secondes.

Cette particularité doit être prise en compte car, dès le début de l'itinéraire, les véhicules sont sujets à d'importants phénomènes de variabilité du temps de parcours. Cette variabilité peut se propager sur l'ensemble de la course.

Tout comme pour la direction opposée, une comparaison des caractéristiques statistiques des composantes du temps de cette interstation avec celle d'une ligne de bus conventionnelle serait intéressante.

- Beaulieu – Grènerais

L'interstation Beaulieu vers Grènerais présente une assez bonne vitesse commerciale moyenne (20 km/h) mais avec niveau de variabilité élevé.

Description de l'aspect organique

Entre Beaulieu et Grènerais il n'y a qu'un seul feu. Celui-ci est situé 27 mètres après la station Beaulieu. La distance interstation totale est de 561 mètres et la distance à vol d'oiseau de 554 m (Google maps) ce qui donne un coefficient de sinuosité est de 1,01. La sinuosité est quasi inexistante.

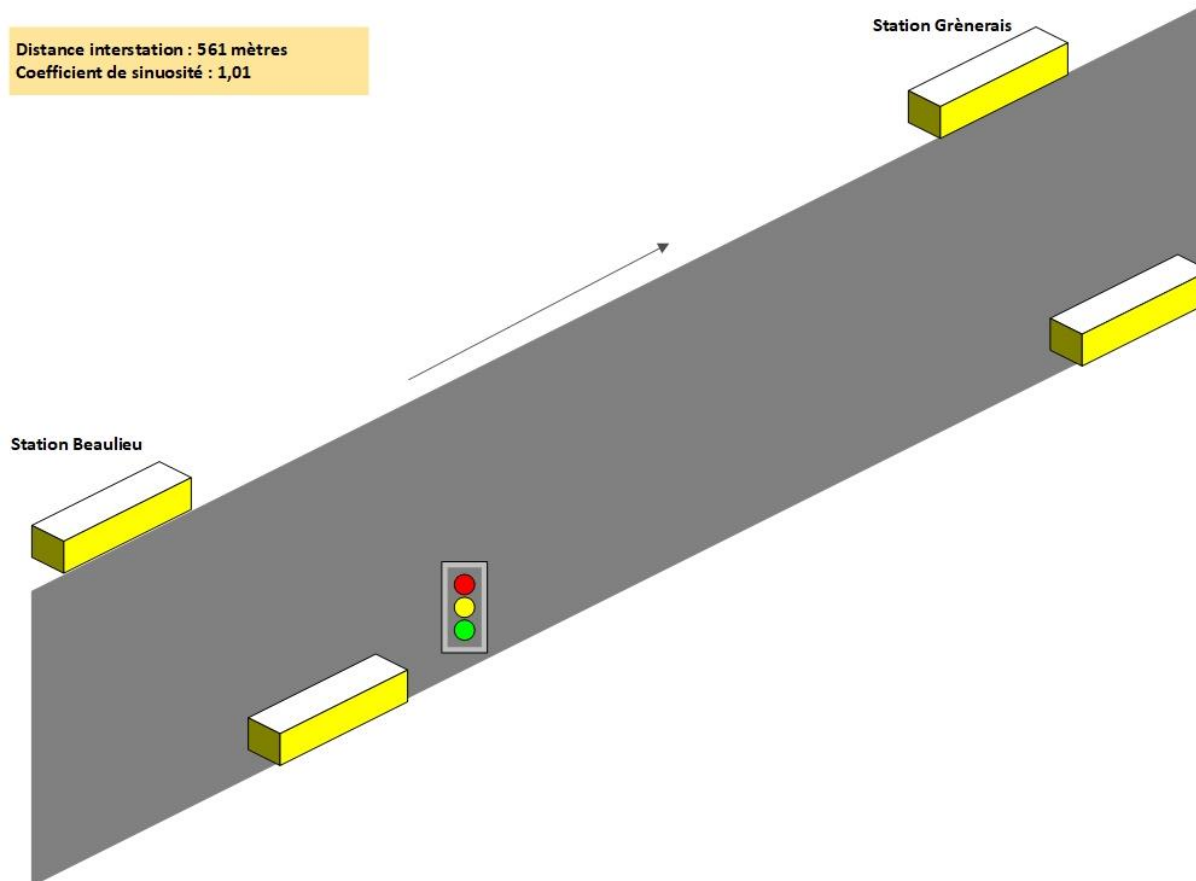


Figure 97 : Schématisation de l'interstation Beaulieu vers Grènerais

Source : auteur

La caractérisation statistique des composantes

Sens2_Beaulieu_Grènerais							
Composantes	Valeurs moyennes (s)	Pourcentage	Médiane	Ecart type (s)	Coefficient de variation (%)	Écart interquartile (s)	Coefficient interquartile (%)
TP	95,0	100,0	85,0	25,0	26,3	30,0	35,0
TR	60,0	63,2	60,0	4,0	6,7	5,0	8,3
EP	31,0	32,6	21,0	24,0	77,4	26,0	122,6
AS	1,0	1,1	0,0	7,0	700,0	0,0	0,0
AP	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
AF	3,0	3,2	3,0	2,0	66,7	2,0	66,7
AL	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Tableau 37 : Valeurs des composantes du temps de parcours pour l'ensemble de la journée

Source : auteur

Le temps de parcours présente un coefficient de variation de plus de 26 %. Le temps de roulage ne représente plus que 60 % En revanche, le temps d'échange passagers est supérieur à 30 %. Le temps d'attente aux feux ne représente que 3 % du temps de parcours. En plus d'être une composante majeure, l'échange passagers est très variable et atteint un coefficient de variabilité de plus de 77 %.

La variabilité du temps de parcours dans l'hypothèse d'invariance des composantes

Sens2_Beaulieu_Grènerais							
Composantes	Valeurs moyennes (s)	Pourcentage	Médiane	Ecart type (s)	Coefficient de variation (%)	Écart interquartile (s)	Coefficient interquartile (%)
TP'0	95,0	100,0	85,0	25,0	26,3	30,0	35,0
TP'1	95,0	100,0	85,0	25,0	26,3	30,0	35,0
TP'2	95,0	100,0	85,0	25,0	26,3	30,0	35,0
TP'3	95,0	100,0	85,0	25,0	26,3	30,0	35,0
TP'4	95,0	100,0	86,0	25,0	26,3	28,0	32,4
TP'5	95,0	100,0	94,0	9,0	9,5	5,0	5,4
TP'6	95,0	100,0	85,0	25,0	26,3	29,0	33,6

Tableau 38 : Impact des composantes du temps de parcours pour l'ensemble de la journée

Source : auteur

Seule la composante relative à l'échange passagers a un impact sur le coefficient de variation du temps de parcours. Celui-ci reste à 26,3 % par ailleurs. La composante de l'échange passagers, une fois immuable, permet de passer à un niveau de variabilité de 9,5 %.

Pour cette interstation, la distribution des parts relatives des composantes est particulière. En effet, le temps de roulage ne représente plus que 60 % contre 30 % pour l'échange des passagers.

Cette proportion s'explique principalement par une fonction spécifique de la station Grènerais qui est un point de relève conducteur. Les relèves conducteur existent à différents moments de la journée généralement juste après les heures de pointe. Certaines tranches horaires sont très variables car toutes les courses ne sont pas concernées par ces relèves. Lors d'une relève, le temps d'immobilisation d'un véhicule portes ouvertes peut atteindre presque 3 minutes.



Figure 98 : Relève conducteur à la station Grènerais

Source : auteur

- Joliverie Chapeau Verni

Tout comme pour l'interstation Beaulieu vers Gréneraie, entre Joliverie et Chapeau Verni la vitesse commerciale est correcte et atteint une valeur moyenne pour l'ensemble de la journée supérieure à 22 km/h. En revanche, le coefficient de variation pour cette interstation est élevé, notamment lors des heures de pointe.

Description de l'aspect organique

Entre Joliverie et Chapeau Verni, la réservation des voies de circulation du BHNS, en provenance de Foch, intègre un marquage au sol pour signifier un stop. Celui-ci est situé 157 mètres avant la station Chapeau Verni. Cette interstation intègre également un feu situé à 232 mètres de la station Joliverie.

La longueur de l'interstation est de 507 mètres. La distance à vol d'oiseau est également 500 mètres (Google maps). Par conséquent, le coefficient de sinuosité est de 1,01.

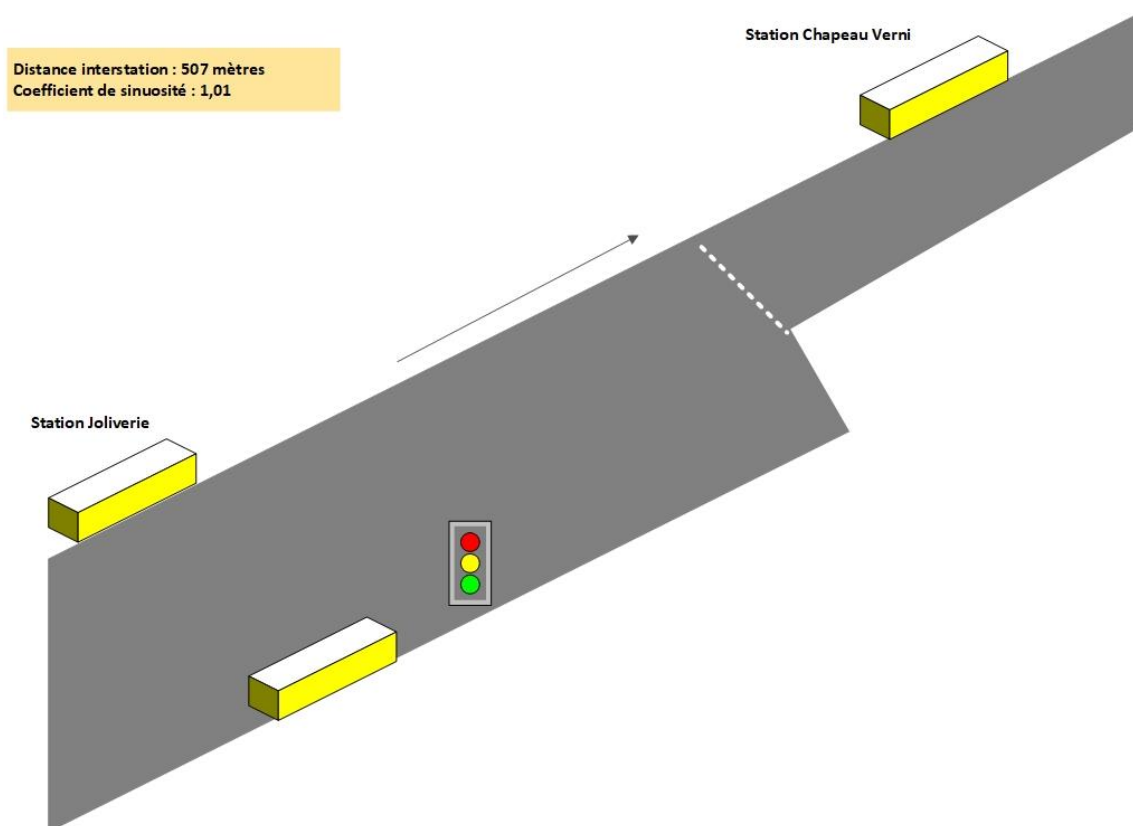


Figure 99 : Schématisation de l'interstation Joliverie vers Château Verni

Source : SEMITAN

La caractérisation statistique des composantes

Sens2_Joliverie_Chapeau Verni							
Composantes	Valeurs moyennes (s)	Pourcentage	Médiane	Ecart type (s)	Coefficient de variation (%)	Écart interquartile (s)	Coefficient interquartile (%)
TP	84,0	100,0	78,0	20,0	23,8	15,0	18,9
TR	65,0	77,4	63,0	9,0	13,8	9,0	14,3
EP	11,0	13,1	10,0	4,0	36,4	4,0	40,0
AS	3,0	3,6	3,0	3,0	100,0	2,0	66,7
AP	4,0	4,8	0,0	12,0	300,0	0,0	0,0
AF	1,0	1,2	0,0	4,0	400,0	1,0	0,0
AL	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Tableau 39 : Valeurs des composantes du temps de parcours pour l'ensemble de la journée

Source : auteur

Pour cette interstation, le temps de roulage représente plus de 77 % du temps de parcours avec le plus bas niveau de variabilité. L'échange passagers correspond à 13 % avec un niveau de variabilité supérieur à 30 %. Pour ce qui est des temps d'immobilisation, nous porterons un intérêt plus particulier à l'attente au point qui représente 4 % du temps de parcours avec un niveau de variabilité de 300 %.

La variabilité du temps de parcours dans l'hypothèse d'invariance des composantes

Sens2_Joliverie_Chapeau Verni							
Composantes	Valeurs moyennes (s)	Pourcentage	Médiane	Ecart type (s)	Coefficient de variation (%)	Écart interquartile (s)	Coefficient interquartile (%)
TP'0	84,0	100,0	78,0	20,0	23,8	15,0	18,9
TP'1	84,0	100,0	78,0	20,0	23,8	15,0	18,9
TP'2	84,0	100,0	78,0	19,0	22,6	14,0	17,9
TP'3	84,0	100,0	82,0	12,0	14,3	13,0	15,9
TP'4	84,0	100,0	77,0	20,0	23,8	14,0	18,1
TP'5	84,0	100,0	77,0	20,0	23,8	13,0	17,0
TP'6	84,0	100,0	80,0	15,0	17,9	7,0	8,8

Tableau 40 : Impact des composantes du temps de parcours pour l'ensemble de la journée

Source : auteur

Les deux composantes ayant le plus fort impact sur le temps de parcours sont l'attente au point et le temps de roulage. Une fois immuable, l'attente au point permet de passer le coefficient de variation de 23,8 % à 14,3 %. Le temps de roulage permet d'atteindre un coefficient de variation de 17,9 %.

La particularité de cette interstation repose sur l'aménagement des voies de circulation. En effet, la largeur totale de la bande de roulage n'est pas suffisante pour accueillir une double voie pour les véhicules du BHNS. Par conséquent, les véhicules en provenance de Foch doivent laisser passer les véhicules en provenance de la direction opposée.

Cette caractéristique impacte la variabilité du temps de parcours car certains véhicules peuvent rester immobilisés plus de 2 minutes. Cette situation n'existe pas pour la direction opposée.



Figure 100 : Marquage sur voirie¹⁶¹

Source : auteur

La ligne 4 de Nantes présente, au travers des résultats, des caractéristiques intéressantes. De manière générale, le niveau de variabilité du temps de parcours, pour l'ensemble des directions, avoisine les 8 %. Les composantes les plus irrégulières sont le temps de roulage et l'échange passagers. Ces tendances sont identiques indépendamment des tranches horaires.

Ces caractéristiques sont très différentes lorsque l'on observe les éléments statistiques à l'échelle de l'interstation.

Nous porterons un intérêt à la composante de l'échange passagers . La fréquentation de la ligne 4 est conséquente et les mobiles utilisés disposent de 3 portes doubles et 1 porte simple (un vantail de la porte 1 est réservé au poste de conduite). La variabilité de l'échange passagers est peut être en lien avec le design du mobile. Cela pourrait être vérifié à l'aide de nouvelles mesures lorsque les nouveaux mobiles plus capacitaires seront mis en exploitation. Une autre caractéristique intéressante concerne le niveau de réservation des voies de circulation. Nous constatons que les parts ainsi que le niveau de variabilité des composantes sont très différents lorsque les mobiles circulent sur une infrastructure sans réservation.

La ligne 4 de Nantes met également en lumière l'importance du niveau de réservation et de priorisation des transports collectifs. Les interstations sans réservation permettent de constater que les caractéristiques du temps de parcours sont très différentes et que le niveau de performance opérationnelle est détérioré.

¹⁶¹ En raison de travaux, le marquage au sol initialement positionné sur la voie de circulation réservée est temporairement déplacé sur la voie de circulation mutualisée.

4.2 Système Tramway

4.2.1 Description de l'aspect organique

Typologie de réservation des voies de circulation

Tout comme le BHNS, le système tramway entre dans la catégorie B. Les voies de circulation sont majoritairement séparées des autres circulations. Les voies en surface comportent des intersections avec d'autres véhicules et piétons. Ces caractéristiques permettent de dire que le tramway est un système de transport semi-rapide. La ligne 1 du réseau de Montpellier est intégrée à un réseau maillé composé de 4 lignes qui comprend également des intersections avec les autres lignes du réseau.

Les distances interstations

La longueur totale de la ligne pour les deux directions (hors boucle de retournement) est de 31 651 mètres. Le ligne 1 de Montpellier comporte 60 stations pour les deux directions. La longueur moyenne inter-station est de **545,07 mètres**.

La matrice ci-dessous (tableau 41) permet de visualiser la répartition des distances inter-station par classe.

Classe	Nombre
0 - 250	0
250 - 500	32
500 - 750	18
750 - 1000	6
1000 - 2000	2

Tableau 41 : Nombre d'interstations par classe de distance sur la ligne 1

Source : Auteur

Nous remarquons qu'il n'y a pas de distances interstation comprises entre 0 et 250 mètres. La majorité des interstations sont comprises entre 250 et 500 mètres. Au-dessus de 500 mètres, on compte 18 distances comprises entre 500 et 750 mètres, 6 entre 750 et 1000 mètres et 2 supérieures à 1000 mètres.

Les valeurs relatives permettent de constater que près de **45 %** des distances interstations sont supérieures à 500 mètres (tableau 42).

Classe	Pourcentage
0 - 250	0,0
250 - 500	55,2
500 - 750	31,0
750 - 1000	10,3
1000 - 2000	3,4

Tableau 42 : Répartition des distances sur la ligne 1 en valeur relative

Source : Auteur

Les points inter-stations

Du fait de sa catégorie de réservation des voies, l'itinéraire de la ligne 1 franchit de nombreuses intersections et par conséquent de nombreux points physiques provoquant un

éventuel temps d'immobilisation inter-stations. L'ensemble de ces points ont été relevés lors de mesures terrains. Les catégories de points physiques inter-station relevés sont :

- Signalisation lumineuse de trafic (SLT) : feu d'intersection routier (interface avec circulations routière et piétons/2 roues ;
- Signalisation ferroviaire : signal de manœuvre ¹⁶², indicateur de direction et indicateur de destination. Lorsqu'un signal de manœuvre est isolé, nous l'avons considéré en dehors de la SLT. A l'inverse, lorsqu'un SM est intégré à un feu carrefour, celui-ci est intégré à la SLT ;
- Aiguille ;
- Limitation de vitesse ;

Signal de Manoeuvre



R17 + SAC (SLT)



Figure 101 : Exemples de signalisation ferroviaire et de SLT

Source : Auteur

Nous considérons que les limitations de vitesse ne sont pas génératrices de temps d'immobilisation mais font partie intégrante de l'infrastructure. Elles sont en tout cas révélatrices de la sinuosité de la ligne, qui impose des vitesses réduites en fonction des rayons de courbure rencontrés.

¹⁶² Sur les itinéraires de tramway, un signal de manœuvre (sauf cas particulier) est un signal vert/rouge :

- qui autorise ou non l'engagement sur un canton (Voie unique, ou Voie double avec espacement imposé entre deux rames par exemple sous tunnel) ;
- qui autorise ou non l'engagement sur une section de voie en conflit potentiel avec d'autres circulations (zones de terminus, zones de croisement de lignes...).

Dans les deux cas, la rame n'obtient son vert qu'une fois les autres circulations potentielles mises au rouge et une fois validé le bon positionnement des aiguilles (cohérence sur l'ensemble de la zone de manœuvre et bon placage).

Dans certains cas, en raison de la distance très faible entre deux points, nous considérons qu'un regroupement est nécessaire. Une infrastructure tramway peut présenter une densité importante de points à certains endroits particuliers de son itinéraire. Certains points sont donc très rapprochés et leur distinction devient difficile. Par conséquent, nous tenons à préciser les particularités suivantes :

- Certains feux sont rattachés à des stations. Le temps d'immobilisation en station porte fermée en station sera rattaché au temps d'attente aux feux ;
- Certains SM sont intégrés à un environnement de carrefour à feux. Les temps d'immobilisation sont donc rattachés au temps d'attente aux feux ;
- Certains SM isolé du reste des carrefours sont considérés comme des points. Les temps d'immobilisation sont donc rattachés au temps d'attente au point.

Pour les deux directions de la ligne, nous avons relevé **221** points singuliers.

Coefficient de sinuosité

La distance de la direction Mosson vers Odysseum est de 15,813 km. Dans l'autre sens, d'Odysseum vers Mosson, elle est de 15,838 Km. Cette différence repose sur la position des stations au terminus ou la manière d'y accéder (aiguille). Pour le calcul du coefficient de sinuosité, nous retenons la distance la plus longue. Le coefficient de sinuosité est de **1,924**. La matrice ci-dessous (tableau 43) reprend les éléments de l'analyse topographique.

	Ligne 1 Montpellier
Niveau de réservation	Catégorie B
Longueur totale (hors retournement) en mètre	31 651
Longueur itinéraire (hors retournement) en mètre	15 838
Distance vol oiseau (Google Maps) en mètre	8 230
Nombre de stations (Aller et Retour)	60
Nombre de feux carrefour (Aller et retour)	114
Nombre de points (Aller et Retour)	107
Distance inter-station moyenne en mètre	545,7
Pourcentage d'interstations avec distance supérieur ou égale à 500 mètres	44,80%
Coefficient de sinuosité	1,924

Tableau 43 : Synthèse des résultats de l'analyse topographique de la ligne 1

Source : Auteur

Résultats de l'analyse des caractéristiques véhicules

La ligne 1 de réseau de transport collectif de Montpellier est exploitée essentiellement par des tramways CITADIS TGA 401. Ces véhicules, d'une longueur de 40.96 mètres, disposent de 16 portes dont 12 doubles. Les portes simples sont positionnées aux extrémités du véhicule. La part relative de la distance totale d'ouverture des portes en rapport avec la longueur totale du véhicule est d'environ 22,95 %.

La matrice ci-dessous (tableau 44) reprend les caractéristiques principales du matériel roulant.

Caractéristiques	Valeurs
Puissance accélération	1,1 m/s ²
Puissance freinage maximale	1,4 m/s ²
Puissance freinage d'urgence	3 m/s
Vitesse maximale atteignable	70 Km/h
Longueur totale du véhicule	40,96 m
Nombre de portes simples (par façade)	2
Nombre de portes doubles (par façade)	6
Largeur porte simple ouverte	0,8 m
Largeur porte double ouverte	1,3 m
Part de la largeur totale de l'ouverture par rapport à la longueur totale véhicule	22,95%

Tableau 44 : Synoptique du véhicule-type de la ligne 1

Source : Auteur



Figure 102 : le matériel CITDIS TGA 401 circulant sur le ligne 1

Source : Auteur

4.2.2 Analyse de l'aspect fonctionnel

Présentation de l'échantillon

Dans le cadre de notre recherche, nous souhaitons recueillir des données d'exploitation sur les systèmes pendant les périodes les plus contraignantes. En effet, nous privilégions les périodes où l'offre de transport, la fréquentation et les autres circulations sont les plus importantes. Par conséquent, nous retenons les périodes « semaine scolaire ».

Pour recueillir les données d'exploitation, nous avons équipé 4 tramways de la ligne 1 du système DIALEXIS durant les semaines 37 à 41 incluses de l'année 2014 (5 semaines). Les véhicules équipés du système ont été planifiés durant plusieurs jours sur l'ensemble des services voitures qui composent le TM de la ligne. L'offre de transport de la ligne 1 est constituée de 31 services-voiture. Les différents services-voiture sont constitués de différents tronçons. Dans le cadre de notre recherche, nous nous intéressons uniquement aux tronçons les plus parcourus, c'est-à-dire Mosson vers Odysseum et Odysseum vers Mosson. Les tronçons partiels, correspondant à des prises ou à des fins de service, sont écartés.

Par conséquent, la base de données constituée couvre l'ensemble du service. Notre échantillon de mesures comprend 1 006 courses réparties comme suit :

- Mosson vers Odysseum : 475 courses dont 30 courses considérées comme atypiques [6 %]
- Odysseum vers Mosson : 531 courses dont 50 courses considérées comme atypiques [9 %]

La disparité du nombre de courses entre les directions repose en partie sur l'organisation des sorties véhicules à partir du dépôt situé près de la station Saint Paul.

Pour déterminer les courses atypiques, nous réalisons un tri croissant et décroissant pour toutes les composantes temps de tous les points de la topographie. Les valeurs extrêmes sont donc identifiées et écartées de l'analyse statistique.

4.2.1.1 Le temps de parcours comme agrégat

Nous rappelons que nous considérons le temps de parcours comme un agrégat de différentes composantes de temps. Dans un premier temps, nous représentons le temps de parcours mesuré tout au long de la journée de terminus à terminus. La représentation du temps de parcours prendra deux formes : un histogramme et un nuage de points.

La représentation sous forme d'histogramme (figures 103 et 104) permet de caractériser la nature de la distribution statistique. Les données de temps réelles sont regroupées par occurrence. Comme cela a déjà été évoqué précédemment, nous constatons que cette distribution est plus ou moins symétrique. Le centre de la distribution correspond aux valeurs de temps les plus fréquentes. Nous remarquons également que la distribution s'étire davantage vers les valeurs hautes que les valeurs faibles. Ces caractéristiques sont communes aux deux directions.

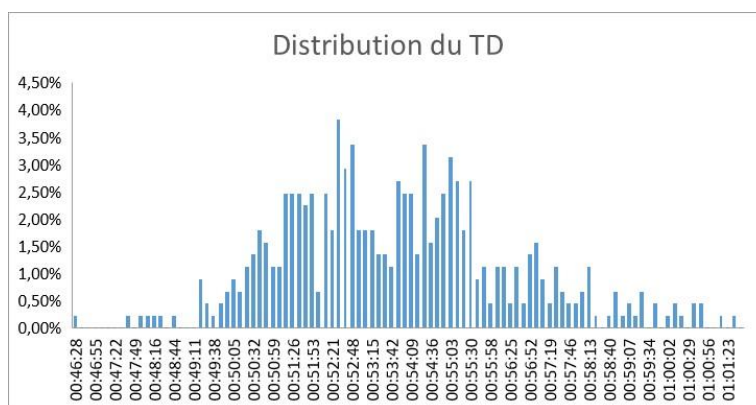


Figure 103 : Distribution du temps de parcours de Mosson vers Odysseum

Source : Auteur

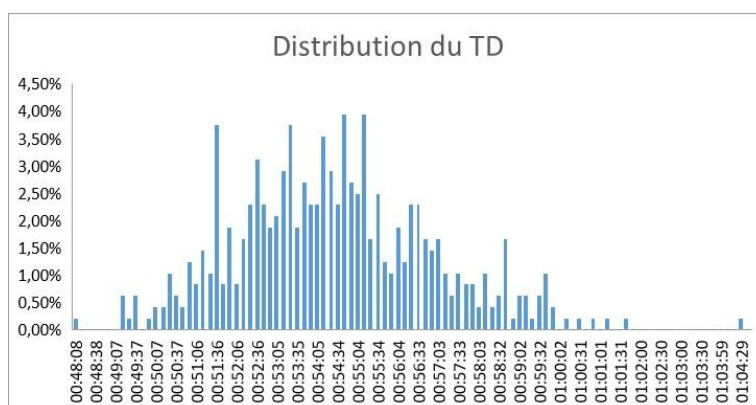


Figure 104 : Distribution du temps de parcours de Odysseum vers Mosson

Source : Auteur

Comme nous l'avons déjà évoqué, ce type de représentation ne permet pas de visualiser le temps de parcours tout au long de la journée. Dans la pratique, la représentation des temps de parcours sous forme de nuage de points est plus appréciée.

Les nuages de points ci-dessous (figures 105 et 106) permettent de visualiser l'ensemble de l'échantillon pour la direction précitée. Chaque point orange correspond à une course enregistrée. En fonction de l'échelle de l'axe des ordonnées, la dispersion est plus ou moins visible. Le nuage de points permet de constater les variations du temps de parcours tout au long de la journée. Nous remarquons des augmentations de temps de parcours le matin et le soir. Cette hausse peut s'expliquer entre autres par une fréquentation plus importante sur ces périodes de la journée.

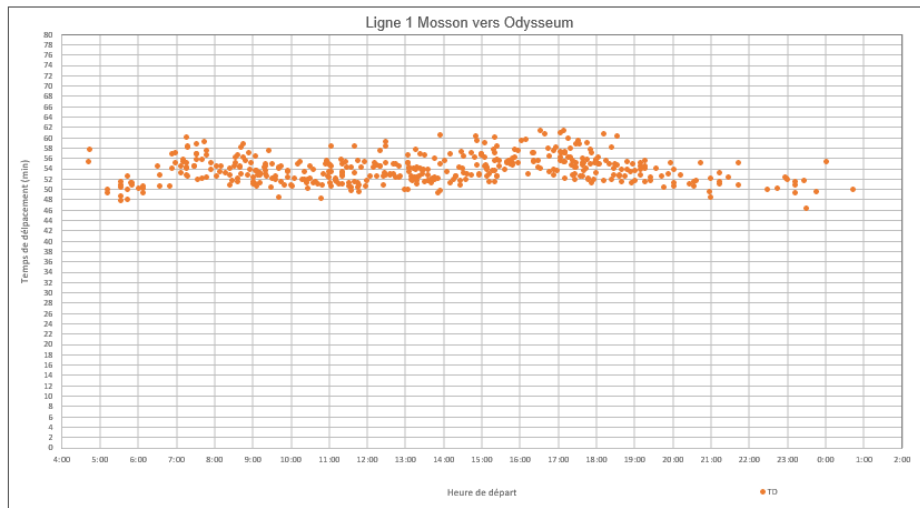


Figure 105 : Nuage de points des temps de parcours de Mosson vers Odysseum

Source : Auteur

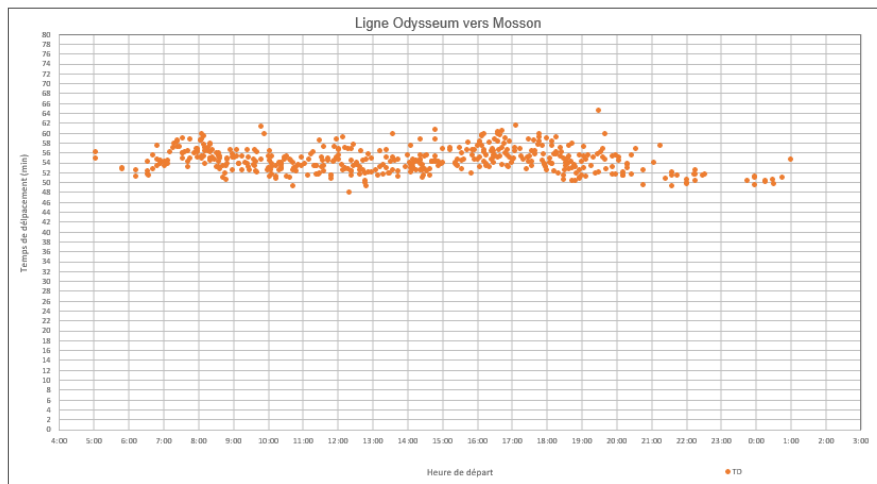


Figure 106 : Nuage de points des temps de parcours d'Odysseum vers Mosson

Source : Auteur

Nous pouvons constater qu'il existe une dispersion des temps de parcours tout au long de la journée, les durées des courses étant comprises entre 46 et 62 minutes. Des temps de parcours particulièrement élevés sont enregistrés tôt le matin, ce qui peut surprendre. Cela correspond aux premières courses qui ont pour mission d'ouvrir la ligne en marche prudente. Pour la direction de Mosson vers Odysseum, le temps de parcours le plus élevé est de 1 heure 4 minute et 39 secondes et correspond à un départ enregistré à 19:29:06. La course la plus

rapide a un temps de parcours de 48 min et 08 secondes. Son heure de départ réelle est à 12:16:09. Pour le même parcours, la différence de temps s'élève à plus 16 minutes .

Pour la direction de Mosson vers Odysseum, la tranche horaire ayant le temps de parcours moyen le plus élevé est celle de la pointe du soir (entre 16h30 et 19h). Pour la direction de Odysseum vers Mosson, les deux périodes de pointe ont le même temps de parcours moyen qui est le plus élevé.

La représentation des composantes temps sous forme d'histogramme

Comme nous l'avons évoqué dans notre approche méthodologique, nous cherchons à mettre en lumière les composantes du temps de parcours qui sont les suivantes :

- Le temps de roulage (TR),
- Le temps d'échange passagers (EP),
- Le temps d'attente en station (AS),
- Les temps d'attente aux feux (AF),
- Les temps d'attente aux points AP),
- Les temps d'attente en ligne (AL).

Dans un premier temps, nous souhaitons visualiser la distribution statistique des différentes composantes afin de les classer selon leur nature à savoir distribution symétrique ou asymétrique.

Toutes les représentations graphiques sont annexées.

Le temps de roulage et le temps d'échange des passagers ont une distribution symétrique. En revanche, le temps d'attente en station, le temps d'attente aux feux, le temps d'attente ont des distributions asymétriques.

Dans les deux directions, nous constatons une certaine ressemblance au niveau des valeurs pour chaque composante.

La caractérisation statistique des composantes temps

Afin de caractériser les composantes du temps de parcours, nous regroupons par intervalle de temps et par direction quelques calculs statistiques regroupés dans des matrices. Le point précédent nous a permis, à l'aide d'une représentation graphique, de caractériser les distributions. Les calculs statistiques suivants intègrent les différentes valeurs centrales et différentes valeurs de dispersion absolues et relatives.

Les résultats pour l'ensemble de la journée (tableaux 45 et 46)

Mosson vers Odysseum							
Composantes	Valeurs moyennes (s)	Pourcentage	Médiane	Ecart type (s)	Coefficient de variation (%)	Écart interquartile (s)	Coefficient interquartile (%)
TP	3234,0	100,0	3225,0	155,0	4,8	206,0	6,4
TR	2411,0	74,6	2407,0	105,0	4,4	141,0	5,9
EP	532,0	16,5	525,0	103,0	19,4	128,0	24,4
AS	188,0	5,8	181,0	36,2	19,3	34,0	18,8
AP	5,0	0,2	0,0	13,3	266,2	2,0	0,0
AF	94,0	2,9	79,0	46,0	48,9	48,0	60,4
AL	3,0	0,1	0,0	13,0	433,3	0,0	0,0

Tableau 45 : Valeurs des composantes du temps de parcours pour l'ensemble de la journée

Source : Auteur

Odysseum vers Mosson							
Composantes	Valeurs moyennes (s)	Pourcentage	Médiane	Ecart type (s)	Coefficient de variation (%)	Écart interquartile (s)	Coefficient interquartile (%)
TP	3275,0	100,0	3269,0	145,0	4,4	200,0	6,1
TR	2459,0	75,1	2447,0	107,0	4,4	142,0	5,8
EP	509,0	15,5	502,0	93,0	18,3	128,0	25,5
AS	158,0	4,8	157,0	21,0	13,3	24,0	15,3
AP	30,0	0,9	8,0	44,1	147,1	43,0	537,5
AF	117,0	3,6	105,0	42,0	35,9	57,0	54,3
AL	2,0	0,1	0,0	8,0	400,0	0,0	0,0

Tableau 46 : Valeurs des composantes du temps de parcours pour l'ensemble de la journée

Source : Auteur

Tout comme pour les composantes du BHNS, les valeurs relatives des composantes par rapport au temps de parcours global présentent les mêmes ordres de grandeur.

Le temps de roulage représente environ 75 % du temps de parcours. Cette composante est de nouveau la plus importante. Le temps nécessaire au transfert des voyageurs (EP) du quai vers l'intérieur du véhicule et inversement représente entre 16,5 % (direction 1) et 15,5 % (direction 2) du temps de parcours. L'attente en station est comprise entre 4,8 % et 5,8 % et l'attente aux feux est d'environ 3 % pour les deux directions. L'attente aux points représente moins de 1 %. Notons tout de même que la part de l'attente aux points s'élève à 0,9 pour la direction Odysseum vers Mosson. L'attente en ligne qui correspond au temps d'immobilisation interstation non rattaché à un point représente 0,1 % pour les deux directions. Les temps d'immobilisation portes fermées aux points ou en ligne sont faible. Cette situation est identique pour le système BHNS. Les tramways de la ligne 1 ne subissent que peu de temps d'immobilisation portes fermées en dehors des stations et des feux.

Concernant la variabilité des différentes composantes, nous constatons à nouveau que les indicateurs de dispersion relatifs classent les composantes dans le même ordre. Nous retrouvons également la particularité des composantes ayant une série statistique avec des valeurs à zéro. Pour les données relatives au tramway, cela correspond à l'attente aux points pour la direction Mosson vers Odysseum et l'attente en ligne pour les deux directions. L'attente

aux points pour la direction de Mosson vers Odysseum n'intègre que peu de valeurs à zéro. Par conséquent nous constatons que les indicateurs relatifs de dispersion indiquent des valeurs élevées.

Le temps de roulage reste la composante principale du temps de parcours et la moins variable quelle que soit la direction. En prenant en compte les deux indicateurs de variabilité relatifs, la variabilité se situe entre 4,4 et 5,9 %.

L'échange passagers, qui est également, pour le système tramway, la deuxième composante temps la plus importante en part relative présente une variabilité plus importante. En effet, celle-ci se situe entre 18,3 et 25,5 %.

Le temps d'attente aux feux qui représente environ 3 % de la part du temps de parcours connaît un niveau de variabilité plus élevé que l'échange passagers. Pour la direction Mosson vers Odysseum le pourcentage de variabilité est compris entre 48,9 et 60,4 %. Pour la direction inverse, le niveau de variabilité est compris entre 35,9 et 54,3 %. Les niveaux de variabilité présentent une différence entre les deux directions.

Le temps d'attente en station a une part relative plus importante que le temps d'attente aux feux, de presque de 2 % pour la direction Mosson vers Odysseum et de 1 % pour la direction opposée. En revanche, le niveau de variabilité est moins important que l'attente aux feux et est compris entre 13,3 et 19,3 %. Les niveaux de variabilité présentent une différence entre les deux directions

Les temps d'attente aux points singuliers et en ligne présentent de nouveau une particularité au niveau de la mesure de la variabilité car ces séries statistiques comprennent de nombreuses valeurs à zéro. Bien que la part du temps de parcours soit inférieure à 1%, les niveaux de variabilité peuvent être élevés si l'on considère le coefficient de variation. L'attente aux points pour la direction d'Odysseum vers Mosson montre cependant une autre particularité. Pour cette direction, cette composante présente un niveau de variabilité important aussi bien à la lecture du coefficient de variation que du coefficient interquartile. Cette série ne contient que très peu de valeurs à zéro et doit donc être considérée comme importante. Dans la suite du document, nous vérifierons si cette caractéristique se confirme pour d'autres tranches horaires et si l'impact sur le temps de parcours est remarquable.

Nous souhaitons désormais porter un regard selon cette même approche mais pour des tranches horaires différentes en particulier les heures de pointes du matin et du soir avec l'idée de vérifier si les caractéristiques des composantes diffèrent.

Les heures de pointe du matin (tableaux 47 et 48)

Mosson vers Odysseum							
Composantes	Valeurs moyennes (s)	Pourcentage	Médiane	Ecart type (s)	Coefficient de variation (%)	Écart interquartile (s)	Coefficient interquartile (%)
TP	3285,0	100,0	3271,0	135,0	4,1	208,0	6,4
TR	2441,0	74,3	2434,0	110,0	4,5	123,0	5,0
EP	531,0	16,2	521,0	86,0	16,2	115,0	22,0
AS	203,0	6,2	192,0	53,0	26,1	42,0	22,0
AP	9,0	0,3	0,0	22,0	244,4	3,0	0,0
AF	96,0	2,9	86,0	43,0	44,8	39,0	45,1
AL	6,0	0,2	0,0	25,0	416,7	0,0	0,0

Tableau 47 : Valeurs des composantes du temps de parcours entre 07h00 et 09H00

Source : Auteur

Odysseum vers Mosson							
Composantes	Valeurs moyennes (s)	Pourcentage	Médiane	Ecart type (s)	Coefficient de variation (%)	Écart interquartile (s)	Coefficient interquartile (%)
TP	3347,0	100,0	3353,0	116,0	3,5	139,0	4,2
TR	2491,0	74,4	2475,0	93,0	3,7	123,0	5,0
EP	517,0	15,4	505,0	74,0	14,3	109,0	21,6
AS	160,0	4,8	160,0	22,0	13,8	23,0	14,2
AP	45,0	1,3	22,0	57,0	126,7	59,0	269,3
AF	132,0	3,9	148,0	44,0	33,3	61,0	47,7
AL	2,0	0,1	0,0	9,0	450,0	0,0	0,0

Tableau 48 : Valeurs des composantes du temps de parcours entre 07h00 et 09H00

Source : Auteur

Pour l'heure de pointe du matin, les parts relatives des composantes temps, en comparaison avec l'ensemble de la journée, présentent une forte similitude. En effet, le temps de roulage reste la composante principale avec une part de plus de 74 %. Ensuite, nous retrouvons l'échange des passagers avec respectivement 16,2 % pour la direction de Mosson vers Odysseum et 15,4 % pour la direction d'Odysseum vers Mosson. L'attente en station représente entre 4,8 et 6,2 %. Elle est suivie de l'attente aux feux qui représente entre 2,9 et 3,9 % en fonction des directions. Les composantes de l'attente aux points et l'attente en ligne sont inférieures à 1 %, à l'exception de l'attente aux points pour la direction Odysseum vers Mosson qui atteint 1,3 %.

Les ordres de grandeur et le positionnement des niveaux de variabilité restent plus ou moins identiques pour l'heure de pointe du matin en comparaison avec l'ensemble de la journée. Nous retrouvons également les différences de variabilité entre les directions pour l'attente en station et l'attente aux feux. La composante de l'attente aux points reste particulière également au niveau de sa variabilité avec notamment une série de valeur composée de peu de zéros pour la direction Odysseum et Mosson. Cette situation amène donc à considérer sa variabilité notamment du fait de sa part relative du temps de parcours globale supérieure à 1%.

Le temps de roulage reste la composante la plus stable avec des valeurs comprises entre 3,7 et 5 % et présente peu de différences entre les deux directions. L'échange passagers reste la deuxième composante la plus importante avec une variabilité conséquente comprise entre 14,3 et 22 %.

Le temps d'attente aux feux est plus variable que l'échange passagers avec un niveau de variation qui peut atteindre plus de 40 %. Nous remarquons également une différence de niveau de variabilité entre les deux directions, notamment à la lecture du coefficient de variation.

Comme cela a déjà été indiqué, le temps d'attente en station a une part relative plus importante que l'attente aux feux. Sa variabilité est plus basse que l'attente aux feux et est comprise entre 18,8 et 26,1 %. Il existe une différence du niveau de variabilité de cette composante en fonction des directions. Tout comme pour l'ensemble de la journée, la direction Mosson vers Odysseum présente un niveau de variabilité plus important.

Les composantes d'attente aux points et d'attente en ligne restent particulières tout comme nous l'avions évoqué pour le système BHNS à l'exception de l'attente aux points pour la direction d'Odysseum vers Mosson qui présente les mêmes caractéristiques que pour l'ensemble de la journée.

Les heures de pointe du soir (tableaux 49 et 50)

Mosson vers Odysseum							
Composantes	Valeurs moyennes (s)	Pourcentage	Médiane	Ecart type (s)	Coefficient de variation (%)	Écart interquartile (s)	Coefficient interquartile (%)
TP	3316,0	100,0	3301,0	152,0	4,6	224,0	6,8
TR	2445,0	73,7	2447,0	102,0	4,2	147,0	6,0
EP	566,0	17,1	560,0	85,0	15,0	117,0	21,0
AS	194,0	5,9	185,0	42,0	21,6	38,0	20,5
AP	5,0	0,2	0,0	11,0	220,0	5,0	0,0
AF	101,0	3,0	91,0	44,0	43,6	59,0	64,3
AL	4,0	0,1	0,0	16,0	400,0	0,0	0,0

Tableau 49 : Valeurs des composantes du temps de parcours entre 16h30 et 19H00

Source : Auteur

Odysseum vers Mosson							
Composantes	Valeurs moyennes (s)	Pourcentage	Médiane	Ecart type (s)	Coefficient de variation (%)	Écart interquartile (s)	Coefficient interquartile (%)
TP	3325,0	100,0	3315,0	151,0	4,5	208,0	6,3
TR	2456,0	73,9	2460,0	93,0	3,8	134,0	5,5
EP	551,0	16,6	553,0	107,0	19,4	164,0	29,7
AS	159,0	4,8	158,0	22,0	13,8	26,0	16,6
AP	39,0	1,2	21,0	48,0	123,1	56,0	269,1
AF	117,0	3,5	107,0	40,0	34,2	55,0	51,4
AL	2,0	0,1	0,0	7,0	350,0	0,0	0,0

Tableau 50 : Valeurs des composantes du temps de parcours entre 16h30 et 19H00

Source : Auteur

Pour l'heure de point du soir, les parts des composantes ainsi que les niveaux de variabilité restent plus ou moins identiques par comparaison avec l'ensemble de la journée et les heures de pointe du matin.

Le temps de roulage reste la composante la plus importante et la moins variable. L'échange passagers est toujours la deuxième composante avec un niveau de variabilité plus élevé que le temps de roulage. Le temps d'attente en station est plus important en part relative que l'attente aux feux et ce pour les deux directions. L'attente aux feux se situe entre 3,5 et 4 % alors que l'attente en station représente 4,8 % et 5,9 % en fonction des directions. La direction Mosson vers Odysseum reste celle ayant la part d'attente en station la plus importante. En revanche la variabilité de l'attente aux feux est plus importante que celle liée à l'attente en station. Pour ces deux composantes, les niveaux de variation diffèrent en fonction des directions. La direction de Mosson vers Odysseum présente des niveaux de variabilité plus élevés pour ces deux composantes.

Les composantes d'attente aux points et d'attente en ligne restent inférieures à 1 % avec des séries composées essentiellement de valeurs à zéro à l'exception de l'attente aux points pour la direction d'Odysseum vers Mosson.

Tout comme pour le système BHNS, après avoir observé les différents indicateurs statistiques, nous constatons que les caractéristiques des composantes temps sont très proches indépendamment des périodes de la journée et des directions. Le système tramway se comporte également de manière identique au niveau de son fonctionnement et des intersections avec l'environnement extérieur tout au long de la journée (figures 107 et 108).

Le temps de roulage reste la composante principale avec une faible variation. La part relative de l'échange passagers est la deuxième composante avec un niveau de variation plus élevé.

Les parts des temps d'attente en ligne et le temps d'attente aux points singuliers sont toujours très bas. La particularité de l'attente aux points pour la direction d'Odysseum vers Mosson s'explique notamment par la présence de signaux de manœuvre isolés et non rattachés à la SLT. Ce type de signal intégré à la signalisation ferroviaire alimente donc l'attente aux points. Pour l'attente en ligne, cela correspond à la catégorie de voie de circulation qui est en partie exclusivement dédiée au matériel roulant de la ligne.

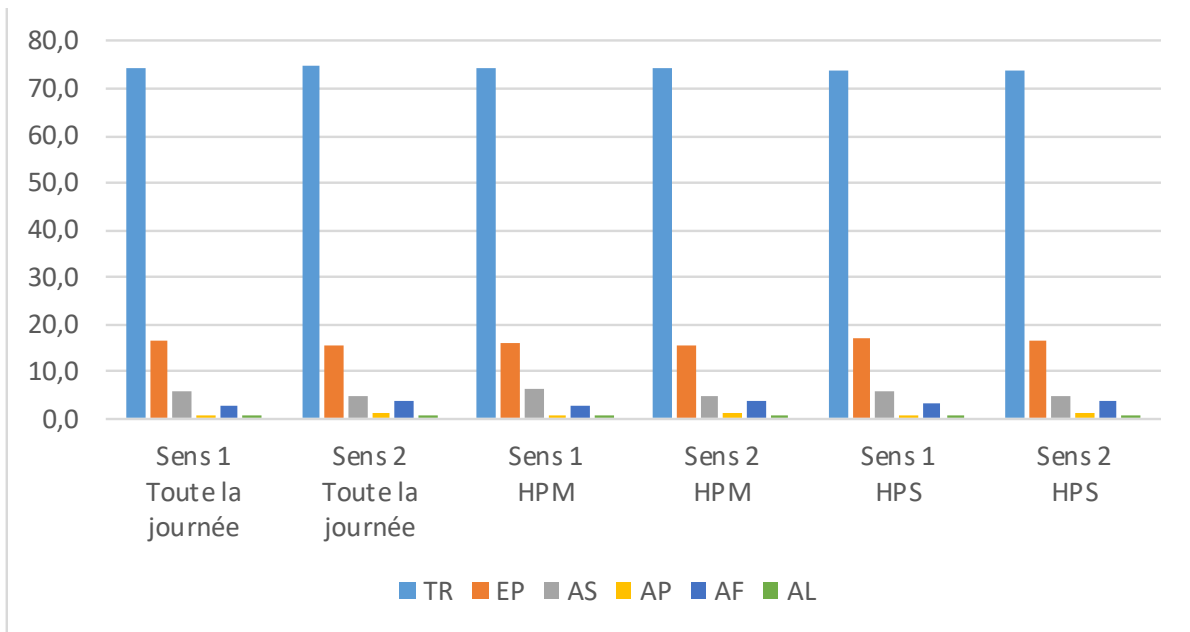


Figure 107 : Parts relatives des composantes (%) de la ligne 01

Source : Auteur

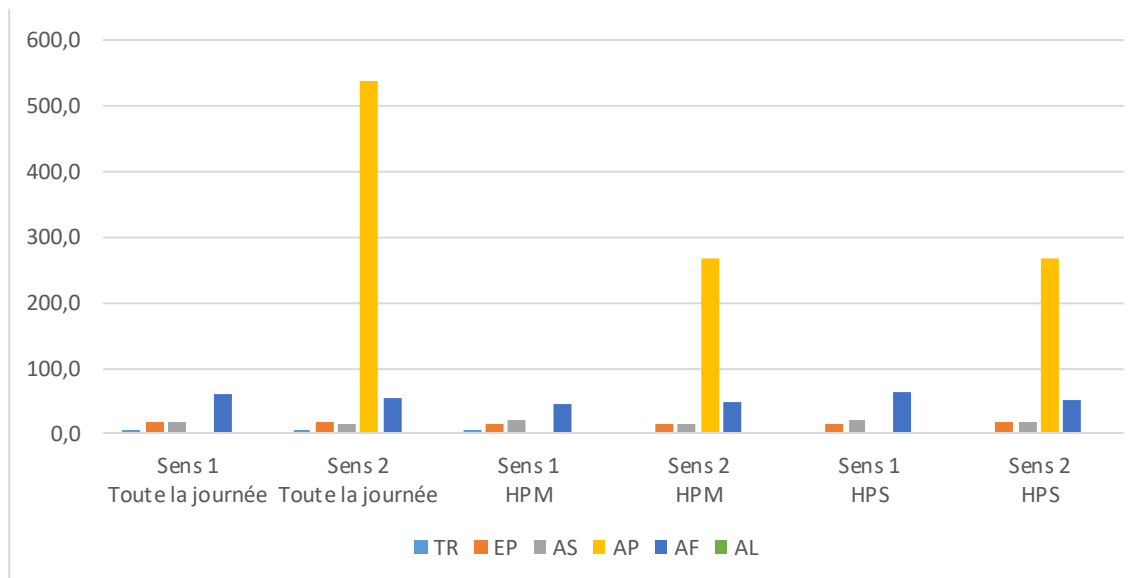


Figure 108 : Niveau de variabilité des composantes (%) de la ligne 01

Source : Auteur

Tout comme pour le BHNS, nous représentons la variabilité de l'ensemble des composantes, avec les coefficients de variation pour les composantes ayant une distribution symétrique et les coefficients interquartiles des composantes ayant une distribution asymétrique.

Comme nous avons pu le constater, l'attente aux points pour la direction d'Odysseum vers Mosson présente un niveau de variabilité très élevé pouvant atteindre des valeurs supérieures à 500 %.

Selon notre approche, les composantes les plus variables indépendamment des tranches horaires de la journée sont l'attente aux points pour la direction d'Odysseum vers Mosson et l'attente aux feux pour les deux directions. L'attente en station et l'échange passagers ont des niveaux de variabilité très proches indépendamment des directions.

A ce stade, nous constatons que la composante temps la plus variable du système tramway ne représente qu'une part relative légèrement supérieure à 1 %. L'attente aux feux qui est la deuxième composante la plus variable représente également une part relative faible (entre 3 et 4 %). Seul l'échange passagers qui est à niveau de variabilité plus au moins égal à l'attente en station représente plus de 15 % du temps de parcours.

Nous allons désormais vérifier leur impact sur la variabilité des temps de parcours.

La variabilité du temps de parcours dans l'hypothèse d'invariance des composantes

Nos calculs portent sur le temps de parcours et ses composantes pour l'ensemble d'une direction pour une tranche horaire donnée. La moyenne des temps de parcours de TP0 à TP6 est égale à la moyenne du temps de parcours originel. Seul le niveau de variabilité est altéré. En considérant le coefficient de variation pertinent du fait de la nature de la distribution statistique du temps de parcours, nous portons un intérêt à son augmentation et à sa diminution.

Mosson vers Odysseum							
Composantes	Valeurs moyennes (s)	Pourcentage	Médiane	Ecart type (s)	Coefficient de variation (%)	Écart interquartile (s)	Coefficient interquartile (%)
TP'0	3254,0	100,0	3225,0	155	4,8	206,00	6,4
TP'1	3254,0	100,0	3225,0	154	4,7	201,00	6,2
TP'2	3254,0	100,0	3228,0	140	4,3	191,00	5,9
TP'3	3254,0	100,0	3224,0	153	4,7	201,00	6,2
TP'4	3254,0	100,0	3227,0	147	4,5	189,00	5,9
TP'5	3254,0	100,0	3224,0	133	4,1	176,00	5,5
TP'6	3254,0	100,0	3224,0	125	3,8	164,00	5,1

Tableau 51 : Impact des composantes du temps de parcours pour l'ensemble de la journée dans le sens Mosson - Odysseum

Source : Auteur

Pour la direction de Mosson vers Odysseum (tableau 51), le temps de parcours originel (TP0) connaît un coefficient de variation égal à 4,8 %. Lorsque la composante temps de l'attente en ligne est immuable, le coefficient de variation du TP1 varie peu pour atteindre 4,7 %. Il en est de même pour l'attente aux points avec un coefficient de variation du TP3 égal à 4,7%. La composante de l'attente en station a également un impact relativement faible avec un TP4 qui atteint un niveau de variation à 4,5 %.

Les trois composantes ayant les impacts les plus importants sont l'attente aux feux avec un TP2 à 4,3 %, l'échange passagers avec un TP5 à 4,1 % et le temps de roulage avec un TP 6 à 3,8 %.

Pour la direction de Odysseum vers Mosson (tableau 52), la situation est assez proche si ce n'est que que l'attente en ligne n'a aucun impact sur la variabilité du temps de parcours et que le coefficient TP0 est strictement égale au coefficient du TP1.

Odysseum vers Mosson							
Composantes	Valeurs moyennes (s)	Pourcentage	Médiane	Ecart type (s)	Coefficient de variation (%)	Écart interquartile (s)	Coefficient interquartile (%)
TP'0	3275,0	100,0	3269,0	145	4,4	200,00	6,1
TP'1	3275,0	100,0	3271,0	145	4,4	197,00	6,0
TP'2	3275,0	100,0	3268,0	133	4,1	171,00	5,2
TP'3	3275,0	100,0	3275,0	138	4,2	170,00	5,2
TP'4	3275,0	100,0	3272,0	142	4,3	182,00	5,6
TP'5	3275,0	100,0	3272,0	131	4,0	159,00	4,9
TP'6	3275,0	100,0	3267,0	117	3,6	157,00	4,8

Tableau 52 : Impact des composantes du temps de parcours pour l'ensemble de la journée dans le sens Odysseum - Mosson

Source : Auteur

Le TP0 et le TP1 ont un coefficient de variation de 4,4%, ce qui est légèrement inférieur en comparaison avec le TP0 de la direction opposée.

L'attente aux points singuliers et l'attente en station permettent d'atteindre des niveaux de variation à 4,2 % pour le TP3 et 4,3 % pour le TP4. L'attente aux points de la direction

Odysseum vers Mosson a été identifiée au point précédent comme la composante la plus variable. Cependant, elle ne perturbe que peu la variabilité générale du temps de parcours. Notons tout de même que l'attente en station qui ne représente que 1,2 % du temps de parcours permet de diminuer la variabilité générale de 0,1 % de plus que l'attente en station qui représente 4,8 % du temps de parcours.

Une fois de plus, les composantes qui ont un impact le plus important sur le temps de parcours sont l'attente aux feux avec un TP2 à 4,1 %, l'échange passagers avec TP5 à 4,0 % et le temps de roulage avec TP6 à 3,6 %.

Tout comme pour le système BHNS, les deux composantes ayant le plus fort impact sur la variabilité du temps de parcours sont l'échange passagers et le temps de roulage. Cela s'explique entre autres par l'importance de la part relative de ces deux composantes. En revanche, le passage de TP0 à TP6 permet de diminuer au maximum de 1 % le niveau de variabilité pour le tramway alors que cette même diminution pour le BHNS peut atteindre 2,5 %. Cela peut s'expliquer par le niveau de variabilité de départ en TP0 qui est tout de même deux fois plus important sur notre exemple BHNS que sur notre exemple tramway.

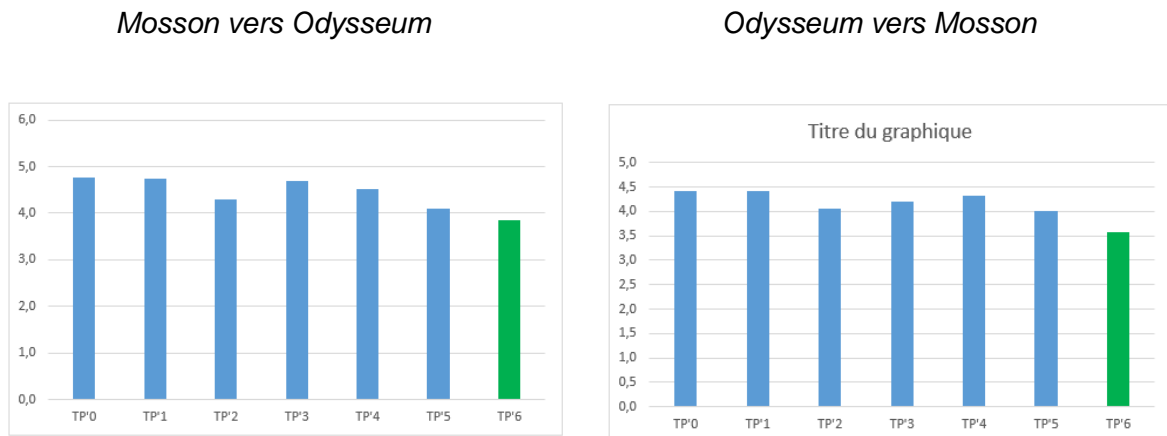


Figure 109 : Les coefficients de variation des temps de parcours

Source : Auteur

Nous avons procédé à une caractérisation statistique des différentes composantes du temps de parcours et tenté de mesurer leur impact sur le temps de parcours. Cette démarche concerne l'analyse du temps de parcours et de ses composantes pour l'ensemble des directions de terminus à terminus. Nous souhaitons désormais porter notre intérêt, à l'aide de cette même approche, à une échelle différente, celle de l'interstation.

Les interstations spécifiques

Nous sélectionnons les interstations suivantes :

- Louis Blanc vers Corum

Pour la direction Mosson vers Odysseum, l'interstation Louis Blanc vers Corum se situe dans une zone où la vitesse commerciale diminue. La vitesse commerciale de cette interstation se situe entre 9 km/h et 14 km/h. La variabilité du temps de parcours est importante, notamment aux heures de pointe.

Description de l'aspect organique

L'interstation Louis Blanc vers Corum est également empruntée par les véhicules de la ligne 4. Le tronç commun avec la ligne 4 débute plus tôt à la station Place Albert 1^{er} - Saint Charles. La station Corum est un lieu où se croisent les lignes 1, 4 et 2. Après la station Corum, la ligne 4 poursuit son itinéraire tandis que la ligne 2 est en tronç commun avec la ligne 1 jusqu'à la station Gare St-Roch. La distance interstation est de 331 mètres et la distance vol d'oiseau est de 305 mètres (Google maps). Par conséquent, le coefficient de sinuosité est de 1,08. Cette interstation intègre un feu et un signal de manœuvre à la station Corum en direction de la station Comédie.

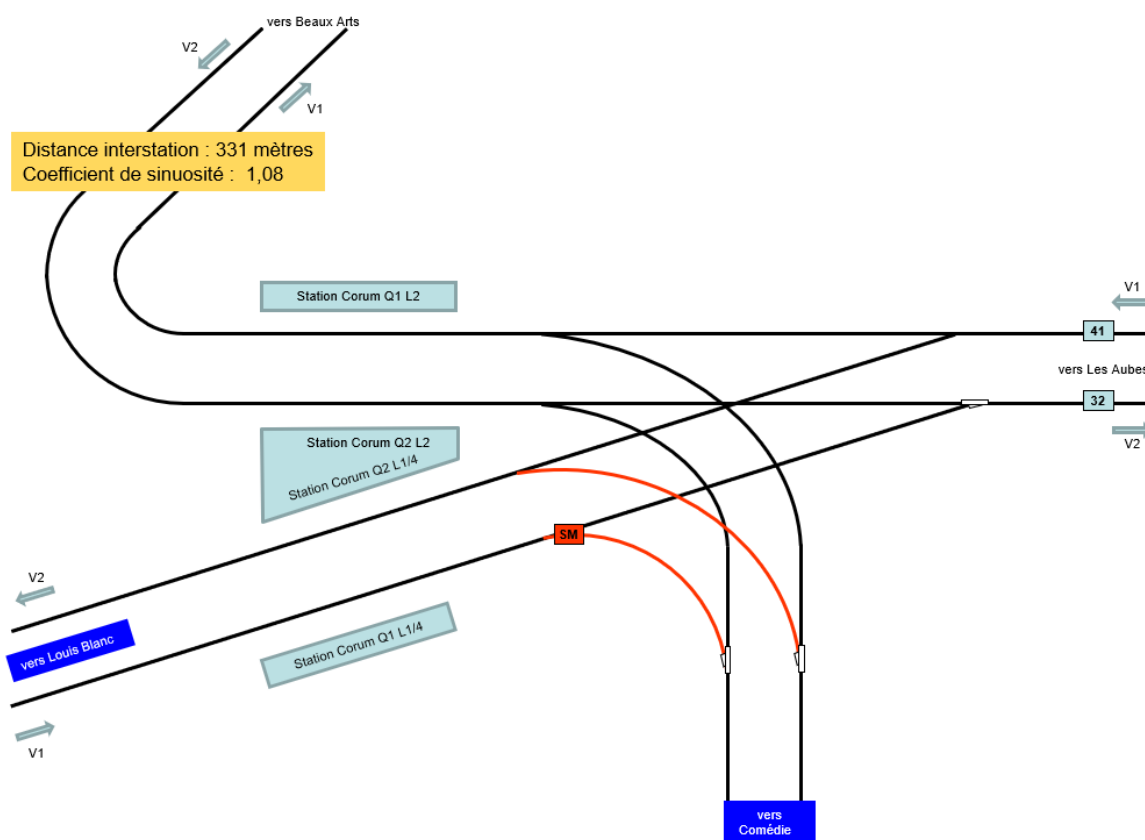


Figure 114 : Schématisation de l'interstation Louis Blanc vers Corum (nouveau réseau)

Source : TaM

La caractérisation statistique des composantes

Sens1_LouisBlanc_Corum							
Composantes	Valeurs moyennes (s)	Pourcentage	Médiane	Ecart type (s)	Coefficient de variation (%)	Écart interquartile (s)	Coefficient interquartile (%)
TP	104,0	100,0	91,0	36,0	34,6	25,0	27,5
TR	61,0	58,7	60,0	9,0	14,8	8,0	13,3
EP	26,0	25,0	21,0	16,0	61,5	10,0	47,6
AS	15,0	14,4	9,0	22,0	146,7	3,0	33,3
AP	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
AF	1,0	1,0	0,0	7,0	700,0	0,0	0,0
AL	1,0	1,0	0,0	11,0	1100,0	0,0	0,0

Tableau 53 : Valeurs des composantes du temps de parcours pour l'ensemble de la journée

Source : Auteur

Le temps de roulage représente moins de 58,7 %. Le temps d'échange passagers correspond à une part importante avec 25 %. L'attente en station correspond quant à elle une part relative de 14,4 %. Cette composante est importante en comparaison avec la part pour l'ensemble de la direction ou encore les autres interstations. L'attente aux feux et l'attente en ligne représentent toutes les deux chacune 1 % du temps de parcours.

La variabilité du temps de parcours atteint 34,6 %. Les coefficients de variation de l'attente aux feux et l'attente en ligne ont des valeurs très importantes. Cela est dû au nombre important de valeurs à zéro. L'échange passagers a un coefficient de variation de 61,5 % et l'attente en station de 146,7 %. Le temps de roulage reste la composante la plus stable avec 14,8 %. Notons tout de même que ce niveau de variation pour cette composante est élevé.

La variabilité du temps de parcours dans l'hypothèse d'invariance des composantes

Entre Louis Blanc et Corum, il n'y a pas d'attente aux points singuliers. Par conséquent, le TP3 reste identique aux TP0. L'attente en ligne ainsi que l'attente aux feux ne représentent que 1 %. Les coefficients de variation des TP1 et TP2 atteignent tous les deux 32,7 % contre 34,6 pour le TP0. Le TP6 permet d'atteindre un niveau de variabilité égale à 31,7 %. En revanche les TP4 et TP5 ont un fort impact. En effet, le TP5 permet d'atteindre 28,8 % et le TP4 24 %.

Sens1_LouisBlanc_Corum							
Composantes	Valeurs moyennes (s)	Pourcentage	Médiane	Ecart type (s)	Coefficient de variation (%)	Écart interquartile (s)	Coefficient interquartile (%)
TP'0	104,0	100,0	91,0	36,0	34,6	25,0	27,5
TP'1	104,0	100,0	92,0	34,0	32,7	24,0	26,0
TP'2	104,0	100,0	92,0	34,0	32,7	25,0	27,3
TP'3	104,0	100,0	91,0	36,0	34,6	25,0	27,5
TP'4	104,0	100,0	96,0	25,0	24,0	19,0	19,7
TP'5	104,0	100,0	96,0	30,0	28,8	11,0	11,5
TP'6	104,0	100,0	92,0	33,0	31,7	19,0	20,7

Tableau 54 : Impact des composantes du temps de parcours pour l'ensemble de la journée

Source : Auteur

Pour cette interstation, la part de l'attente en station (AS) est importante. Dans ce cas précis, le temps d'attente en station s'organise en deux séquences. La première séquence est intégrée aux valeurs entre Louis Blanc et Corum et la seconde aux valeurs entre Corum et Comédie. Cela est en relation avec la définition du temps de parcours.

La première séquence repose sur le temps d'accès à la station. Certains véhicules doivent attendre portes fermées avant de pouvoir se mettre complètement à quai. En effet, les véhicules doivent être correctement positionnés à des points particuliers le long de la station. Si les positions sont déjà occupées, les véhicules suivants doivent attendre.

La seconde séquence fait suite à l'échange des passagers. Certains véhicules doivent de nouveau attendre l'autorisation du signal de manœuvre pour rejoindre la station Comédie. Le débit de croisement à Corum oblige à cette situation d'attente.

Depuis nos mesures, ce croisement a été modifié (août 2017). Les règles de croisement de l'environnement de Gare St-Roch ont été transposées à Corum (mode priorité à droite). Le plan des voies de Corum est annexé.



Tableau 55 : Tramway de la ligne 1 réalisant son « échange passagers » en station Corum

Source : Auteur

- Gare St-Roch vers Du Guesclin

La vitesse commerciale moyenne de cette interstation est la plus basse de cette direction. Elle se situe entre 5,7 km/h et 11,5 km/h. La variabilité du temps de parcours pour cette interstation ne présente pas de particularités remarquables. La variabilité peut être considérée comme moyenne.

Description de l'aspect organique

Une partie de cette interstation est commune avec la ligne 3. Cette interstation intègre différentes aiguilles, un feu ainsi qu'un signal de manœuvre. La particularité de cette interstation repose sur le croisement de toutes les lignes du réseau au niveau de Gare St-Roch. Afin d'en augmenter la capacité, celui-ci est dépourvu de signalisation ferroviaire classique. Le carrefour fonctionne avec la logique de la priorité à droite¹⁶³. La distance interstation est de 418 mètres et la distance vol d'oiseau est de 316 mètres (Google maps). Par conséquent, le coefficient de sinuosité est de 1,32.

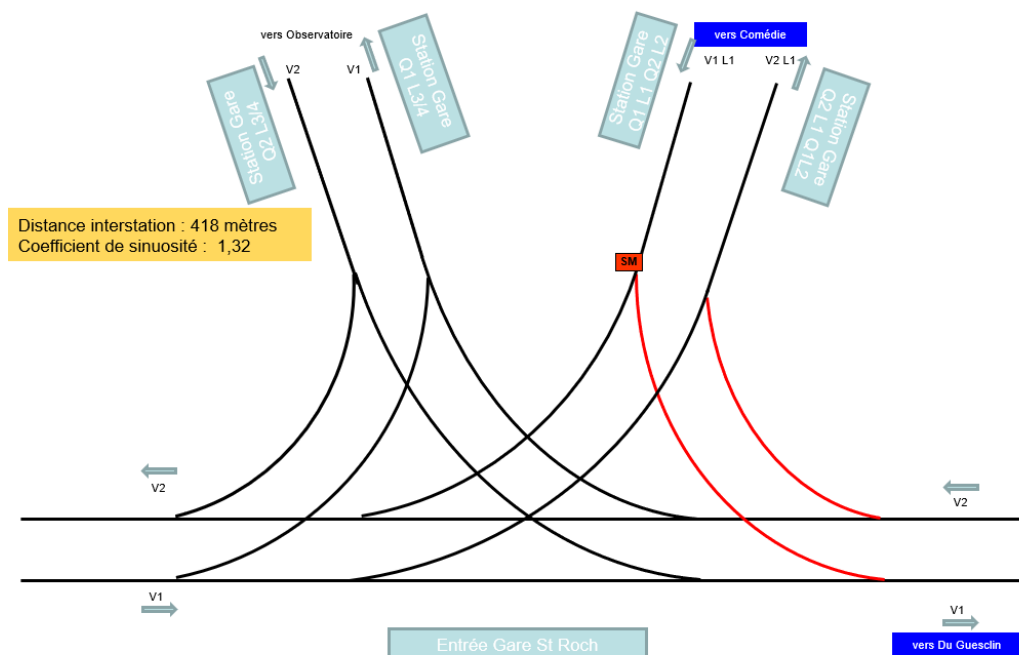


Figure 115 : Schématisation de l'interstation Gare St-Roch vers Du Guesclin

Source : TaM

¹⁶³ L'organisation du carrefour de la Gare St-Roch de Montpellier est la première réalisation de ce type en France. Avec la mise en service de deux nouvelles lignes (3 et 4) le croisement de Gare St-Roch ne permettait plus, dans sa configuration « signalisation ferroviaire classique », d'absorber les fréquences de passage de quatre lignes. Par conséquent, la signalisation ainsi que les aiguilles ont été modifiées pour permettre le fonctionnement de « priorité à droite ». La vitesse maximale pour le franchissement de cette zone est de 10 km/h. À la suite de quelques mois de tests, cette nouvelle organisation est mise en œuvre en avril 2012.

cf. Dupuy, X. « Les enjeux liés au maillage des réseaux tramway ». *Transports Urbains*. 2016, numéro 129, p. 21 – 25.

La caractérisation statistique des composantes

Sens1_Gare ST Roch vers du Guesclin							
Composantes	Valeurs moyennes (s)	Pourcentage	Médiane	Ecart type (s)	Coefficient de variation (%)	Écart interquartile (s)	Coefficient interquartile (%)
TP	157,0	100,0	151,0	25,0	15,9	24,0	15,
TR	128,0	81,5	126,0	14,0	10,9	19,0	15,
EP	13,0	8,3	12,0	6,0	46,2	5,0	41,
AS	10,0	6,4	8,0	8,0	80,0	3,0	37,
AP	2,0	1,3	0,0	7,0	350,0	0,0	0,
AF	4,0	2,5	0,0	15,0	375,0	0,0	0,
AL	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,

Tableau 56 : Valeurs des composantes du temps de parcours pour l'ensemble de la journée

Source : Auteur

Entre Gare St-Roch et Du Guesclin, le temps de roulage correspond à plus de 80 % du temps de parcours. L'échange passagers ne représente que 8,3 % et l'attente en station 6,4 %. Les parts de l'attente aux feux et de l'attente aux points sont faibles et représentent respectivement 2,5 % et 1,3 %.

Les composantes les plus variables sont l'attente en station et l'attente aux feux. Les coefficients de variation sont supérieurs à 300 %. La variabilité de l'attente en station est égale à 80 % et l'échange passagers à 46,2 %. Le temps de roulage est la composante la moins variable.

La variabilité du temps de parcours dans l'hypothèse d'invariance des composantes

Sens1_Gare ST Roch vers du Guesclin							
Composantes	Valeurs moyennes (s)	Pourcentage	Médiane	Ecart type (s)	Coefficient de variation (%)	Écart interquartile (s)	Coefficient interquartile (%)
TP'0	157,0	100,0	151,0	25,0	15,9	24,0	15,
TP'1	157,0	100,0	151,0	25,0	15,9	24,0	15,
TP'2	157,0	100,0	154,0	19,0	12,1	22,0	14,
TP'3	157,0	100,0	152,0	23,0	14,6	22,0	14,
TP'4	157,0	100,0	151,0	25,0	15,9	23,0	15,
TP'5	157,0	100,0	150,0	25,0	15,9	26,0	17,
TP'6	157,0	100,0	150,0	19,0	12,1	9,0	5,

Tableau 57 : Impact des composantes du temps de parcours pour l'ensemble de la journée

Source : Auteur

Les TP1, TP4 et TP5 restent identiques au TP0. Cela signifie que, pour cette interstation, l'attente en ligne, l'attente en station et l'échange passagers n'impactent pas le temps de parcours. En revanche, l'attente au point, l'attente aux feux et le temps de roulage permettent de diminuer le coefficient de variation. Le TP3 permet d'atteindre un coefficient de variation de 14,6 % et les TP2 et TP6 de 12,1% tous les deux.

Le fonctionnement « priorité à droite » du carrefour Gare St-Roch est la caractéristique principale de cette interstation. Ce carrefour ne présente pas de temps d'immobilisation particulier. Le feu ayant un impact sur le temps de parcours est situé à environ 192 mètres de la station Gare St-Roch. Le plan des voies de Gare St-Roch est annexé.



Figure 116 : Tramway de la ligne 1 positionné au point de limite de priorité (PLP)

Source : Auteur

- **Place de l'Europe vers Rive du Lez (direction Mosson vers Odyseum)**

Nous retenons cette interstation pour deux raisons. Tout d'abord, la vitesse commerciale est basse tout au long de la journée, notamment aux heures de pointe. Celle-ci varie entre 10 km/h et 14 km/h en fonction des heures de la journée. De plus, elle présente un coefficient de variation du temps de parcours relativement élevé pour l'ensemble de la journée.

Description de l'aspect organique

Cette interstation est également empruntée par les véhicules de la ligne 4. Le tronc commun des lignes 1/4 débute avant la station Place de l'Europe et se termine après la station Moularès. Quelques mètres après la station Rive du Lez, les véhicules de la ligne 3 utilisent également la même infrastructure que la ligne 1 jusqu'à la station Port Marianne.

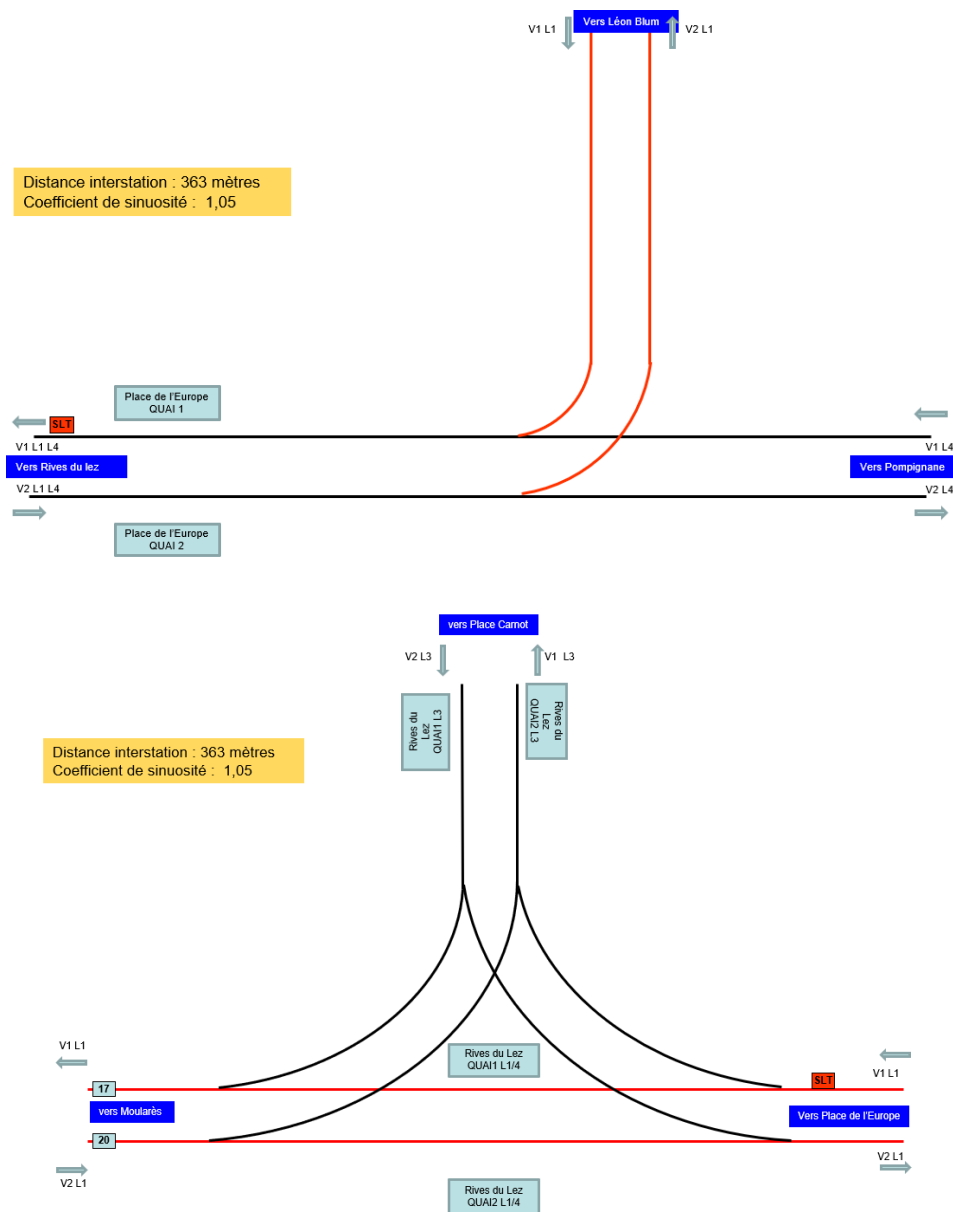


Figure 117 : Shématisation de l'interstation Place de l'Europe vers Rives du Lez

Source : TaM

La distance inter-station est de 363 mètres et la distance vol d'oiseau est de 345 mètres (Google maps). Par conséquent, le coefficient de sinuosité est de 1,05.

Cette interstation, du fait de la mutualisation de l'infrastructure, présente un certain nombre de points spécifiques. La station Place de l'Europe intègre un feu. En direction de Rive du Lez, l'infrastructure intègre deux nouveaux feux routiers, un signal de manœuvre et une aiguille. La station Rive du Lez intègre également un feu ainsi qu'un signal de manœuvre.

La caractérisation statistique des composantes

Sens1_PlacedelEurope_RiveduLez							
Composantes	Valeurs moyennes (s)	Pourcentage	Médiane	Ecart type (s)	Coefficient de variation (%)	Écart interquartile (s)	Coefficient interquartile (%)
TP	118,0	100,0	106,0	32,0	27,1	40,0	38,0
TR	80,0	67,8	76,0	10,0	12,5	12,0	16,0
EP	20,0	16,9	15,0	14,0	70,0	8,0	55,0
AS	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
AP	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
AF	18,0	15,3	9,0	23,0	127,8	12,0	133,3
AL	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Tableau 58 : Valeurs des composantes du temps de parcours pour l'ensemble de la journée

Source : Auteur

Pour cette interstation, le temps de roulage représente 67,8 %. Il est intéressant de constater que cette part relative perd environ 8 % en comparaison avec l'ensemble de la direction (Mosson vers Odysseum). L'échange passagers représente quant à lui presque 17 %. Les composantes relatives à l'attente en station, l'attente aux points et l'attente en ligne sont égales à zéro. L'attente aux feux atteint 15,3 % contre 3 % pour l'ensemble de la direction.

Concernant la variabilité, le coefficient de variation du temps de parcours atteint 27,1 %. Rappelons que le coefficient de variation du temps de parcours de terminus à terminus indépendamment des directions est compris entre 4,4 et 4,8 %. Tous les coefficients de variation sont augmentés notamment l'échange des passagers et l'attente aux feux avec un CV de 127,8 %. Tout comme nous l'avons déjà constaté, le temps de roulage reste la composante la plus stable.

La variabilité du temps de parcours dans l'hypothèse d'invariance des composantes

Sens1_PlacedelEurope_RiveduLez							
Composantes	Valeurs moyennes (s)	Pourcentage	Médiane	Ecart type (s)	Coefficient de variation (%)	Écart interquartile (s)	Coefficient interquartile (%)
TP'0	118,0	100,0	106,0	32,0	27,1	40,0	38,0
TP'1	118,0	100,0	106,0	32,0	27,1	40,0	38,0
TP'2	118,0	100,0	113,0	17,0	14,4	22,0	19,6
TP'3	118,0	100,0	106,0	32,0	27,1	40,0	38,0
TP'4	118,0	100,0	106,0	32,0	27,1	40,0	38,0
TP'5	118,0	100,0	106,0	29,0	24,6	24,0	22,9
TP'6	118,0	100,0	106,0	27,0	22,9	28,0	26,7

Tableau 59 : Impact des composantes du temps de parcours pour l'ensemble de la journée

Source : Auteur

Pour cette interstation, nous n'avons pas d'attente en ligne et d'attente en station. Par conséquent, les TP'1 et TP'4 ne sont pas concernés par un quelconque impact. En revanche, l'impact de l'attente aux feux est important. La variabilité générale du temps de parcours TP'2 perd presque 13 %. Les deux autres composantes ayant un impact sont l'échange des passagers et le temps de roulage.

La station Place de l'Europe est associée à un feu. Lorsque les véhicules mettent fin au temps consacré à l'échange des passagers, les véhicules sont pour certains obligés d'atteindre portes fermées l'autorisation de poursuivre leur itinéraire. De plus, quelques mètres avant l'accès à la station Rive Du Lez, les véhicules rencontrent de nouveau un feu les obligeant à rester immobiles sur l'infrastructure. Tous les véhicules ne sont pas concernés par ces temps d'immobilisation ; c'est en partie pour cela que le temps d'attente au feu varie.



Figure 118 : Tramway de la ligne 1 en station Place de l'Europe en direction d'Odysseus

Source : Auteur



Figure 119 : Tramway de la ligne 1 au pied du feu 124

Source : Auteur

- Port Marianne et Moularès (direction Odyseum vers Mosson)

Tout comme pour l'interstation précédente, nous retenons cette nouvelle interstation aussi bien pour sa vitesse commerciale basse que pour le niveau de variabilité du temps de parcours. La vitesse commerciale moyenne de cette interstation est d'environ 11 km/h pour l'ensemble de la journée et est légèrement diminuée aux heures de pointes. Le coefficient de variation du temps de parcours est élevé notamment aux heures de pointes.

Description de l'aspect organique

Cette interstation est également empruntée par les véhicules de la ligne 2 dans son intégralité et en partie par la ligne 4. Les véhicules de la ligne 3 sont connectés à l'infrastructure quelques mètres avant la station Port Marianne. Les véhicules de la ligne 4 viennent quant à eux rejoindre l'itinéraire quelques mètres avant la station Moularès.

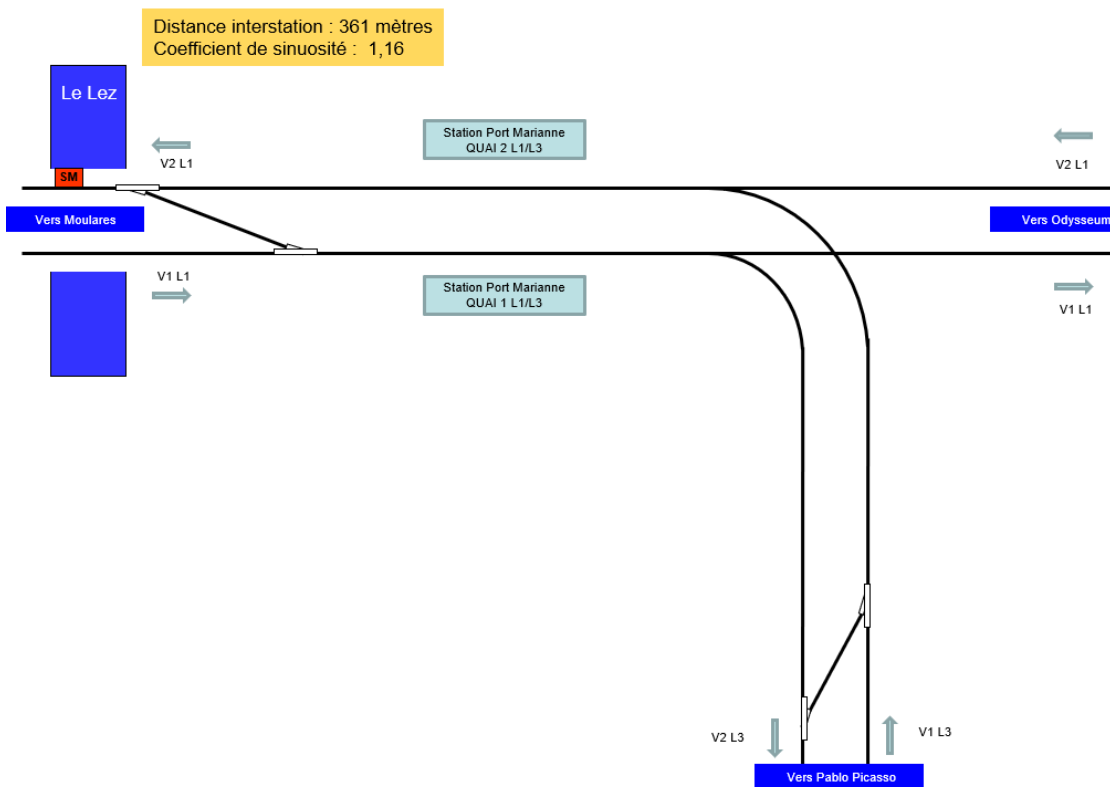


Figure 120 : Schématisation de l'interstation Port Marianne vers Moularès

Source : TaM

La distance inter-station entre Port Marianne et Moularès est de 361 mètres et la distance vol d'oiseau est de 310 mètres (Google maps). Par conséquent le coefficient de variation est de 1,16. L'itinéraire est relativement direct à l'exception d'une courbe assez marquée juste avant la station Moularès.

Cette interstation présente également quelques spécificités au niveau de son infrastructure. Elle intègre trois aiguilles, deux feux (dont un rattaché à la station Moularès) ainsi qu'un signal de manœuvre pour le croisement avec la ligne 4.

La caractérisation statistique des composantes

Sens2_PortMarianne_Moularès							
Composantes	Valeurs moyennes (s)	Pourcentage	Médiane	Ecart type (s)	Coefficient de variation (%)	Écart interquartile (s)	Coefficient interquartile (%)
TP	120,0	100,0	111,0	25,0	20,8	22,0	19,8
TR	88,0	73,3	87,0	8,0	9,1	11,0	12,6
EP	14,0	13,5	14,0	6,0	42,9	5,0	35,3
AS	8,0	7,7	8,0	2,0	25,0	2,0	25,0
AP	10,0	9,6	0,0	21,0	210,0	8,0	0,0
AF	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
AL	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Tableau 60 : Valeurs des composantes du temps de parcours pour l'ensemble de la journée

Source : Auteur

Le temps de roulage représente 73 %, ce qui correspond davantage à ce que nous avons pu observer pour l'ensemble de la direction (Odysseum vers Mosson). L'échange passagers présente également un ordre de grandeur connu. L'attente en station représente 7,7 % et est légèrement supérieure à ce qui a été observé pour l'ensemble de la direction. Les composantes relatives à l'attente aux feux et l'attente en ligne sont égales à zéro. En revanche, l'attente aux points atteint presque 10 % du temps de parcours alors que cette composante est inférieure à 1 % pour l'ensemble de la direction.

La variabilité du temps de parcours atteint 20 %, l'échange passager presque 43 % et l'attente en station 25 %. Le temps de roulage reste la composante la plus stable. Notons le niveau de variabilité de l'attente aux points qui atteint 210 %

La variabilité du temps de parcours dans l'hypothèse d'invariance des composantes

Sens2_PortMarianne_Moularès							
Composantes	Valeurs moyennes (s)	Pourcentage	Médiane	Ecart type (s)	Coefficient de variation (%)	Écart interquartile (s)	Coefficient interquartile (%)
TP'0	120,0	100,0	111,0	25,0	20,8	22,0	19,8
TP'1	120,0	100,0	111,0	25,0	20,8	22,00	19,8
TP'2	120,0	100,0	111,0	25,0	20,8	22,00	19,8
TP'3	120,0	100,0	119,0	10,0	8,3	11,00	9,2
TP'4	120,0	100,0	111,0	25,0	20,8	21,00	19,1
TP'5	120,0	100,0	111,0	24,0	20,0	20,00	18,0
TP'6	120,0	100,0	112,0	22,0	18,3	14,00	12,6

Tableau 61 : Impact des composantes du temps de parcours pour l'ensemble de la journée

Source : Auteur

L'attente en station n'a que peu d'impact sur le temps de parcours. L'échange des passagers ainsi que le temps de roulage ont de nouveau un impact sur le temps de parcours. Pour cette interstation, l'impact de l'attente au point est remarquable. En effet, le TP'3 permet de passer d'un niveau de variabilité de 20,8 % à 8,3 %.

Cette interstation intègre un croisement avec la ligne 4. Lorsque les véhicules de la ligne 4 s'engagent en premier sur le croisement, les véhicules de la ligne 1 doivent attendre l'autorisation du signal de manœuvre pour rejoindre la station Moularès. Tous les véhicules ne sont pas concernés par ces temps d'immobilisation qui peuvent être importants. Cela explique en partie le niveau de variation élevé.



Figure 121 : Tramway de la ligne 1 au pied du signal de manœuvre quelques mètres avant la station Rive du Lez

Source : Auteur

Après avoir présenté les résultats de la ligne 1 du tramway de Montpellier, nous constatons que les parts relatives des composantes temps présentent les mêmes ordres de grandeurs. Nous constatons également que les coefficients de variation du temps de parcours pour l'ensemble d'une direction du système tramway se situent entre 4,4 et 4,8 % alors que ceux du système BHNS sont d'environ 8 %. Si l'on se réfère à ces deux exemples, la différence de variabilité du temps de parcours entre ces deux systèmes de surface est visible. Néanmoins, ce constat ne vaut que pour ces deux exemples étudiés.

Pour le système tramway étudié, les composantes les plus variables sont également le temps de roulage et l'échange passagers. Néanmoins, la variabilité de l'échange des passagers, en comparaison avec le système BHNS étudié, est moins importante.

Nous remarquons que la ligne 1 présente des spécificités propres à l'exploitation d'un réseau de tramways maillé. En effet, les interstations spécifiques sélectionnées sont toutes concernées par un tronç commun ou/et une zone de conflits de circulation. Notons tout de même la spécificité du carrefour de la Gare St-Roch qui ne présente pas de temps d'immobilisation particulier. Il serait intéressant de comparer les résultats disponibles de l'interstation Louis-Blanc vers Corum avec de nouvelles données suite à la modification du carrefour (transposition du principe de priorité à droite de Gare St-Roch).

4.3 Système VAL

4.3.1 Description de l'aspect organique

Typologie de réservation des voies de circulation

Le système VAL entre dans la catégorie A. Les voies de circulation sont totalement contrôlées par des automates et l'accès est interdit à toute autre circulation. Les voies sont dépourvues d'intersection et sont soit en souterrain soit en viaduc. Ces caractéristiques permettent de dire que le VAL est un système de transport rapide.

Les distances interstations

La longueur totale de la ligne pour les deux directions (hors boucle de retournement) mesure 23 903 mètres.

Le ligne A de Toulouse comprend 36 stations pour les deux directions. La longueur moyenne inter-station est de **703,03** mètres.

La matrice ci-dessous (tableau 62) permet de visualiser le nombre de distances inter-station par classe.

Classe	Nombre
0 - 250	0
250 - 500	7
500 - 750	16
750 - 1000	7
1000 - 2000	4

Tableau 62 : Nombre d'interstations par classe de distance sur la ligne A du VAL de Toulouse

Source : Auteur

Nous remarquons qu'il n'y a pas de distances interstations comprise entre 0 et 250 mètres. Seules 7 interstations sont comprises entre 250 et 500 mètres. Au-dessus de 500 mètres, il y a 16 distances comprises entre 500 et 750 mètres, 7 entre 750 et 1000 mètres et 4 supérieures à 1000 mètres.

Les valeurs relatives permettent de constater que près de **80 %** des distances interstations sont supérieures à 500 mètres.

Classe	Pourcentage
0 - 250	0,0
250 - 500	20,0
500 - 750	48,6
750 - 1000	20,0
1000 - 2000	11,4

Tableau 63 : Répartition des distances ligne A, en valeur relative

Source : Auteur

Les points singuliers inter-stations

Du fait de sa catégorie de réservation des voies, l'itinéraire de la ligne A est dépourvu de points relatifs aux intersections. Il n'y a donc pas de points physiques provoquant un éventuel temps d'immobilisation inter-stations.

Coefficient de sinuosité

La distance de la direction Basso Cambo vers Balma Gramont est de 12 km. L'autre direction, de Balma Gramont vers Basso Cambo est de 11,9 Km. Cette différence repose sur la position des stations au terminus ou la manière d'y accéder (aiguille). Pour le calcul du coefficient de sinuosité, nous retenons la distance la plus longue. Le coefficient de sinuosité est de **1,228**.

La matrice ci-dessous (tableau 64) reprend les éléments de l'analyse topographique.

	Ligne A Toulouse
Niveau de réservation	Catégorie A
Longueur totale (hors retournement) en mètre	23 903
Longueur itinéraire (hors retournement) en mètre	12 000
Distance vol oiseau (Google Maps) en mètre	9 770
Nombre de station (Aller et Retour)	26
Nombre de feux carrefour (Aller et retour)	0
Nombre de points (Aller et Retour)	0
Distance inter station moyenne en mètre	703
Pourcentage d'inter station avec distance supérieur ou égale à 500 mètres	79,40%
Coefficient de sinuosité	1,228

Tableau 64 : Synthèse des résultats de l'analyse topographique ligne A

Source : Auteur

Résultats de l'analyse des caractéristiques véhicules

La ligne A du réseau de métro de la ville de Toulouse est exploitée par des véhicules VAL de type 206 et 208. Les véhicules sont composés de 2 voitures d'une longueur totale de 26,14 mètres et disposent de 12 portes doubles. La part relative de la distance totale d'ouverture des portes en rapport avec la longueur totale du véhicule est d'environ 29,83 %.

Caractéristiques	Valeurs
Puissance accélération nominale	1,3 m/s ²
Puissance freinage maximale	1,3 m/s ²
Puissance freinage d'urgence	3 m/s
Vitesse maximale atteignable	80 Km/h
Longueur totale du véhicule (composé de 2 voitures)	26,14
Nombre de portes simples (par façade)	0
Nombre de portes doubles (par façade)	6
Largeur porte simple ouverte	0
Largeur porte double ouverte	1,3 m
Part de la largeur totale de l'ouverture par rapport à la longueur totale véhicule	29,83%

Tableau 65 : Résultats de l'analyse des caractéristiques véhicules ligne A

Source : Auteur



Figure 122 : VAL 208 Toulouse

Source : https://fr.wikipedia.org/wiki/Fichier:VAL_P93_Toulouse_m%C3%A9tro.jpg

4.3.2 Analyse de l'aspect fonctionnel

Présentation de l'échantillon

Dans le cadre de notre recherche, nous souhaitons recueillir de la donnée d'exploitation sur les systèmes pendant les périodes les plus contraignantes. En effet, nous privilégions les périodes où l'offre de transport, la fréquentation et les autres circulations sont les plus importantes. Par conséquent, nous retenons les périodes « semaine scolaire ».

Les données EAS du VAL correspondent à un échantillon d'enregistrements de tous les véhicules pendant toute la durée du service durant 4 jours : Les 19, 20, 21, 22 et 23 mai 2014. Cet échantillon est constitué de 2 713 courses pour la direction Balma Gramont vers Basso Cambo dont 10 sont écartées (courses atypiques)

Cet échantillon est constitué de 2 734 courses pour la direction Basso Cambo vers Balma Gramont dont 9 sont écartées (courses atypiques)

4.3.1.1 Le temps de parcours comme agrégat

Nous rappelons que nous considérons le temps de parcours comme un agrégat de différentes composantes temps. Dans un premier temps, nous représentons le temps de parcours mesuré tout au long de la journée de terminus à terminus. La représentation du temps de parcours prendra deux formes : un histogramme et un nuage de points.

La représentation sous forme d'histogramme (figures 123 et 124) permet de caractériser la nature de la distribution statistique. Les données de temps réelles sont regroupées par occurrence. Comme cela a été évoqué précédemment, nous constatons que cette distribution est plus ou moins symétrique. Le centre de la distribution correspond aux valeurs de temps les plus fréquentes. Après avoir visualisé la distribution du temps de parcours pour les systèmes BHNS et tramway, nous remarquons la particularité de celle du métro automatique. En effet, celle-ci est très concentrée avec peu de dispersion. Pour les deux directions, les distributions sont plus étalées vers les valeurs hautes que les valeurs basses.

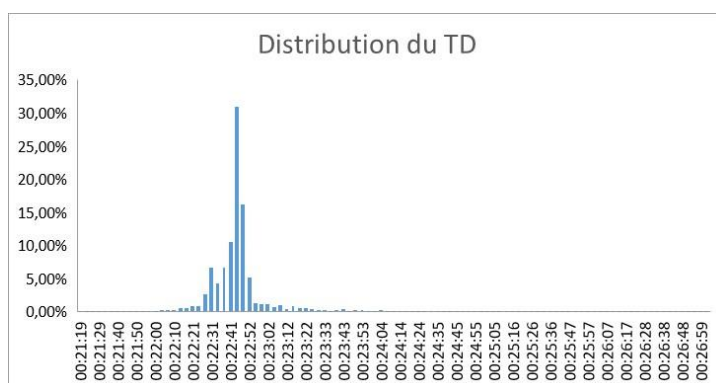


Figure 123 : Distribution des temps de parcours de Balma Gramont vers Basso Cambo

Source : Auteur

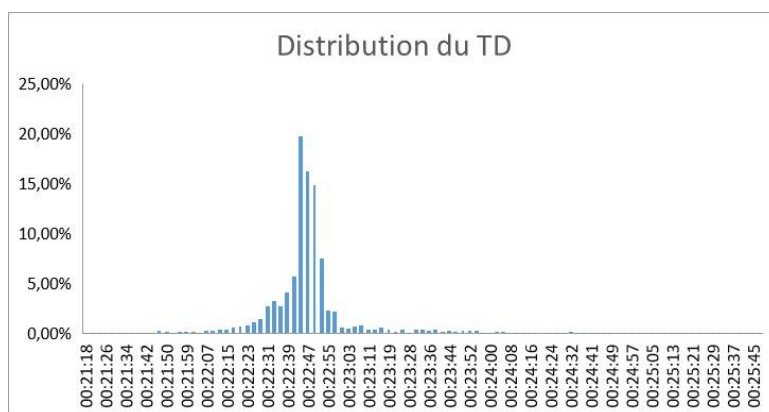


Figure 124 : Distribution des temps de parcours de Basso Cambo vers Balma Gramont

Source : Auteur

Nous avons souhaité présenter les temps de parcours sous forme de nuages de points bien que les exploitants de métro automatique n'utilisent guère cette présentation (figures 125 et 126).

Une fois représentée sous forme de nuage de points, les temps de parcours mesurés montrent une stabilité certaine. Le temps de parcours semble être identique tout au long de la journée. Nous remarquons qu'il y a plus de points donc plus de courses aux heures de pointe matin et soir.

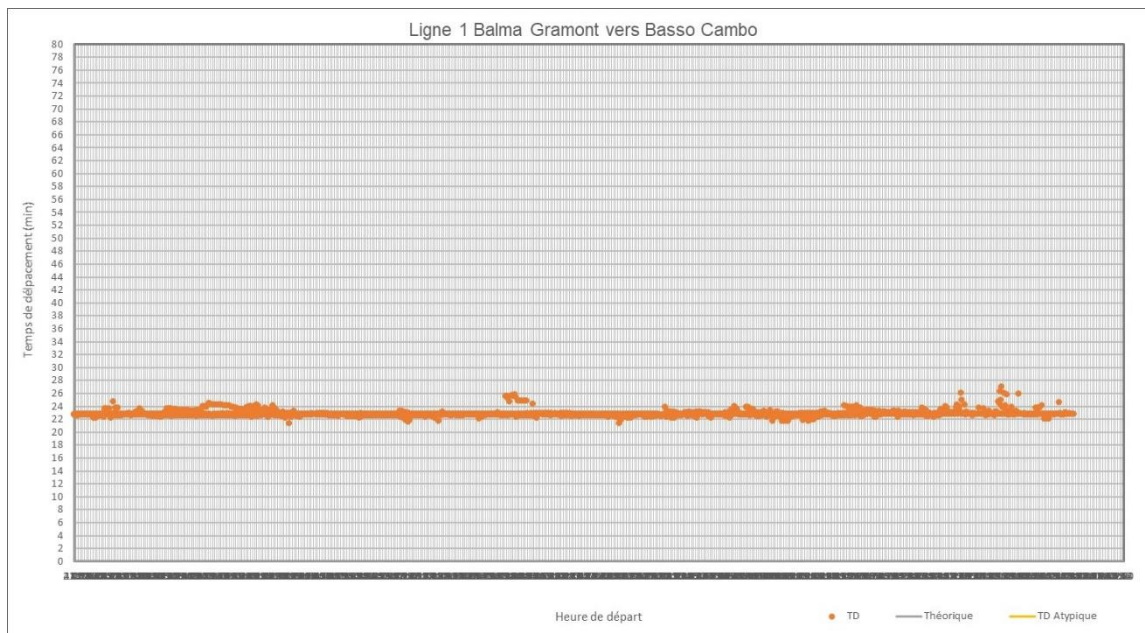


Figure 125 : Nuage de points des temps de parcours de Balma Gramont vers Basso Cambo

Source : Auteur



Figure 126 : Nuage de points des temps de parcours Basso Cambo vers Balma Gramont

Source : Auteur

Pour la direction de Balma Gramont vers Basso Cambo, le temps de parcours minimum enregistré est de 21 minutes et 19 secondes (départ enregistré à 09:06:39) et le temps de parcours maximum enregistré est de 27 minutes et 2 secondes (départ enregistré à 20:31:44)

Pour la direction de Basso Cambo vers Balma Gramont, le temps de parcours minimum enregistré est de 21 minutes et 18 secondes (départ enregistré à 22:41:46) et le temps de parcours maximum enregistré est de 25 minutes et 48 secondes (départ enregistré à 13:14:08).

Pour le système VAL, les temps de parcours enregistrés les plus élevés ne correspondent pas aux heures de pointe.

La désagrégation du temps de parcours : La représentation sous forme d'histogramme

Comme nous l'avons évoqué dans notre approche méthodologique, nous cherchons à mettre en lumière les composantes du temps de parcours qui sont les suivantes :

- Le temps de roulage (TR)
- Le temps d'échange passagers (EP)
- Le temps d'attente en station (AS)
- Les temps d'attente aux feux (AF)
- Les temps d'attente aux points AP)
- Les temps d'attente en ligne (AL)

Dans un premier temps, nous souhaitons visualiser la distribution statistique des différentes composantes afin de les classer selon leur nature à savoir : distribution symétrique ou asymétrique.

Toutes les représentations graphiques sont annexées.

Toutes les composantes ont une distribution symétrique avec un étalement des valeurs les plus élevées.

Par les deux directions, nous constatons une certaine ressemblance au niveau des valeurs pour chaque composante.

La caractérisation statistique des composantes

Afin de caractériser les composantes du temps de parcours, nous regroupons par intervalle de temps et par direction quelques calculs statistiques regroupés dans des matrices. Le point précédent nous a permis, à l'aide d'une représentation graphique, de caractériser les distributions. Les calculs statistiques suivants intègrent les différentes valeurs centrales et différentes valeurs de dispersion absolues et relatives.

Une fois désagrégé, le temps de parcours du système VAL comprend moins de composantes que les systèmes BHNS et tramway. En effet, comme nous l'avons évoqué plus haut, le système VAL est dépourvu d'intersection à niveau avec d'autres circulations et n'est pas soumis à des temps d'immobilisation entre les stations. Par conséquent, désagréger le temps de parcours consiste à isoler le temps de roulage, l'échange passagers et l'attente en station.

Les résultats pour l'ensemble de la journée

Balma vers Basso							
Composantes	Valeurs moyennes (s)	Pourcentage	Médiane	Ecart type (s)	Coefficient de variation (%)	Écart interquartile (s)	Coefficient interquartile (%)
TP	1369,0	100,0	1367,0	23	1,68	8,00	0,6
TR	913,0	66,7	912,0	13	1,42	10,00	1,1
EP	310,0	22,6	309,0	22	7,10	18,00	5,8
AS	145,0	10,6	143,0	10	6,76	10,00	7,0
AP	0,0	0,0	0,0	0	0,00	0,00	0,0
AF	0,0	0,0	0,0	0	0,00	0,00	0,0
AL	0,0	0,0	0,0	0	0,00	0,00	0,0

Tableau 66 : Valeurs des composantes du temps de parcours pour l'ensemble de la journée dans le sens Balma – Basso Cambo

Source : Auteur

Basso vers Balma							
Composantes	Valeurs moyennes (s)	Pourcentage	Médiane	Ecart type (s)	Coefficient de variation (%)	Écart interquartile (s)	Coefficient interquartile (%)
TP	1371,0	100,0	1368,0	25	1,82	8,00	0,6
TR	917,0	66,9	916,0	14	1,53	10,00	1,1
EP	308,0	22,5	307,0	21	6,82	17,00	5,5
AS	146,0	10,6	144,0	9	6,16	10,00	6,9
AP	0,0	0,0	0,0	0	0,0	0,00	0,0
AF	0,0	0,0	0,0	0	0,0	0,00	0,0
AL	0,0	0,0	0,0	0	0,0	0,00	0,0

Tableau 67 : Valeurs des composantes du temps de parcours pour l'ensemble de la journée dans le sens Basso Cambo - Balma

Source : Auteur

Les parts relatives des trois composantes temps identifiées sont très proches d'une direction à l'autre. Le temps de roulage représente presque 67 % ; l'échange passagers environ 22,5 % indépendamment des directions et l'attente en station 10,6 % pour la direction Balma vers Basso et inversement.

En comparaison avec les autres systèmes de surface observés, nous constatons que les parts sont sensiblement dans les mêmes proportions à l'exception d'une diminution de la part du temps de roulage et une augmentation de l'attente en station.

Concernant la variabilité, nous remarquons une nouvelle fois que les indicateurs de dispersion classent les composantes de manière plus ou moins identiques.

Pour le système VAL, le temps de roulage reste la composante la moins variable avec un coefficient de variation d'environ 1,5 % pour chacune des directions.

L'échange passagers demeure une composante particulière car elle correspond à une part importante du temps de parcours et est accompagnée d'un niveau de variabilité élevé. Si l'on observe le coefficient de variation, l'échange passagers est la composante la plus variable.

L'attente en station est également une composante variable avec un coefficient de variation d'environ compris entre 6 et 7 %. Ce niveau de variabilité est très proche de celui de l'échange passagers. Le coefficient interquartile est plus important pour l'attente en station que pour l'échange passagers.

Nous souhaitons vérifier si ces tendances sont identiques pour les heures de pointe matin et soir.

Les heures de pointes du matin

Balma vers Basso							
Composantes	Valeurs moyennes (s)	Pourcentage	Médiane	Ecart type (s)	Coefficient de variation (%)	Écart interquartile (s)	Coefficient interquartile (%)
TP	1373,0	100,0	1366,0	26	1,89	17,00	1,9
TR	919,0	66,9	913,0	21	2,29	13,00	2,3
EP	308,0	22,4	307,0	17	5,52	19,00	6,2
AS	146,0	10,6	145,0	9	6,16	9,00	5,8
AP	0,0	0,0	0,0	0	0,0	0,00	0,0
AF	0,0	0,0	0,0	0	0,0	0,00	0,0
AL	0,0	0,0	0,0	0	0,0	0,00	0,0

Tableau 68 : Valeurs des composantes du temps de parcours entre 07h00 et 09H00 dans le sens Balma – Basso Cambo

Source : Auteur

Basso vers Balma							
Composantes	Valeurs moyennes (s)	Pourcentage	Médiane	Ecart type (s)	Coefficient de variation (%)	Écart interquartile (s)	Coefficient interquartile (%)
TP	1366,0	100,0	1369,0	24	1,76	21,00	1,5
TR	915,0	67,0	915,0	14	1,53	12,00	1,3
EP	306,0	22,4	306,0	18	5,88	21,00	6,9
AS	145,0	10,6	144,0	8	5,52	10,00	6,9
AP	0,0	0,0	0,0	0	0,0	0,00	0,0
AF	0,0	0,0	0,0	0	0,0	0,00	0,0
AL	0,0	0,0	0,0	0	0,0	0,00	0,0

Tableau 69 : Valeurs des composantes du temps de parcours entre 07h00 et 09H00 dans le sens Basso Cambo - Balma

Source : Auteur

Les valeurs relatives restent très proches de celles annoncées pour l'ensemble de la journée. Nous retrouvons également une symétrie en fonction des directions. Le temps de roulage est toujours la composante la plus importante avec 67 % suivie de l'échange passagers avec presque 22,5 % et enfin l'attente en station qui représente 10,6 % pour chacune des directions.

En ce qui concerne la variabilité, la composante du temps de roulage reste stable. Pour la direction de Balma Gramont vers Basso Cambo le coefficient est plus important et atteint 2,29 %.

L'échange passagers et l'attente en station ont des niveaux de variabilité très proche. Les deux composantes sont comparables avec des coefficients de variation de 6 %. Pour la direction

Balma Gramont vers Basso Cambo, le niveau de variabilité de l'attente en station est plus important que celui de l'échange passagers avec 6,16 % contre 5,52 %.

Les heures de pointe du soir

Balma vers Basso							
Composantes	Valeurs moyennes (s)	Pourcentage	Médiane	Ecart type (s)	Coefficient de variation (%)	Écart interquartile (s)	Coefficient interquartile (%)
TP	1368,0	100,0	1368,0	19	1,39	13,00	1,0
TR	914,0	66,8	913,0	13	1,42	11,00	1,2
EP	308,0	22,5	308,0	19	6,17	20,00	6,5
AS	146,0	10,7	144,0	11	7,53	9,00	6,3
AP	0,0	0,0	0,0	0	0,0	0,00	0,0
AF	0,0	0,0	0,0	0	0,0	0,00	0,0
AL	0,0	0,0	0,0	0	0,0	0,00	0,0

Tableau 70 : Valeurs des composantes du temps de parcours entre 16h30 et 19H00 dans le sens Balma – Basso Cambo

Source : Auteur

Basso vers Balma							
Composantes	Valeurs moyennes (s)	Pourcentage	Médiane	Ecart type (s)	Coefficient de variation (%)	Écart interquartile (s)	Coefficient interquartile (%)
TP	1379,0	100,0	1369,0	34	2,47	12,00	0,9
TR	924,0	67,0	918,0	23	2,49	12,00	1,3
EP	308,0	22,3	304,0	22	7,14	20,00	6,6
AS	148,0	10,7	145,0	10	6,76	11,00	7,6
AP	0,0	0,0	0,0	0	0,0	0,00	0,0
AF	0,0	0,0	0,0	0	0,0	0,00	0,0
AL	0,0	0,0	0,0	0	0,0	0,00	0,0

Tableau 71 : Valeurs des composantes du temps de parcours entre 16h30 et 19H00 dans le sens Basso-Cambo - Balma

Source : Auteur

La structure des valeurs relatives se confirme. Nous retrouvons les mêmes ordres de grandeur entre les différentes composantes. Il en est de même pour les niveaux de variabilité.

Pour la variabilité en heure de pointe du soir, le coefficient de variation du temps de roulage est plus important pour la direction Basso Cambo vers Balma Gramont en comparaison avec l'autre direction. C'est la situation inverse à l'heure de pointe du matin.

Toujours en considérant le coefficient de variation, pour la direction de Balma Gramont vers Basso Cambo, le niveau de variabilité de l'attente en station est de nouveau plus important que celui de l'échange des passagers. Cette situation est identique à celle décrite pour l'heure de pointe du matin.

Nous remarquons que les composantes propres au temps d'immobilisation des mobiles portes ouvertes ou fermées en station sont les plus variables.

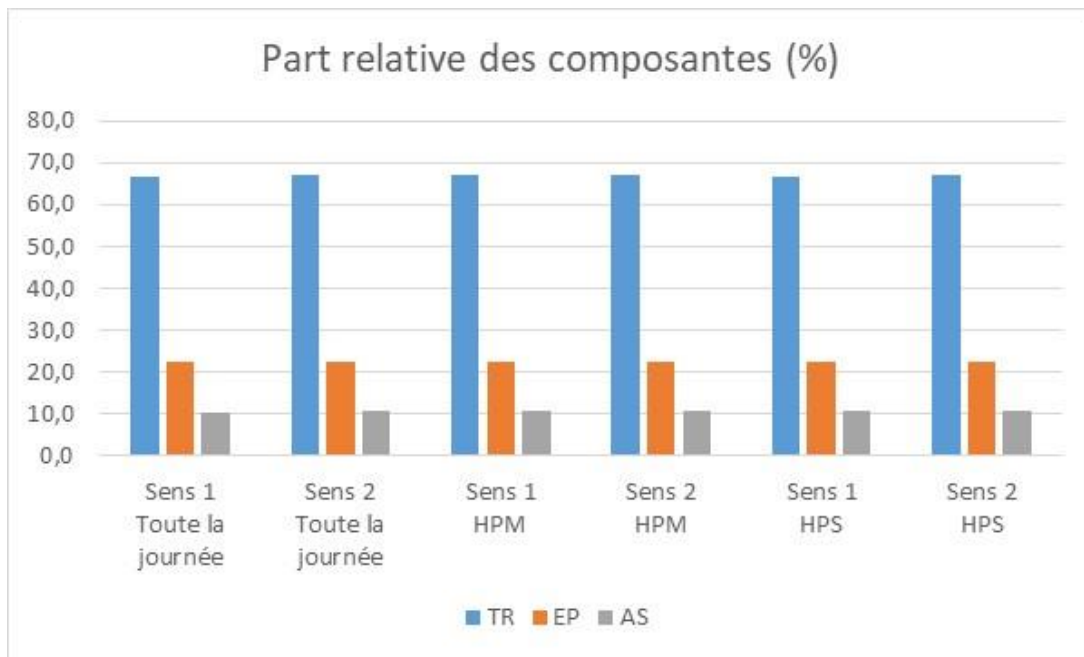


Figure 127 : Parts relatives des composantes (%) de la ligne A

Source : Auteur

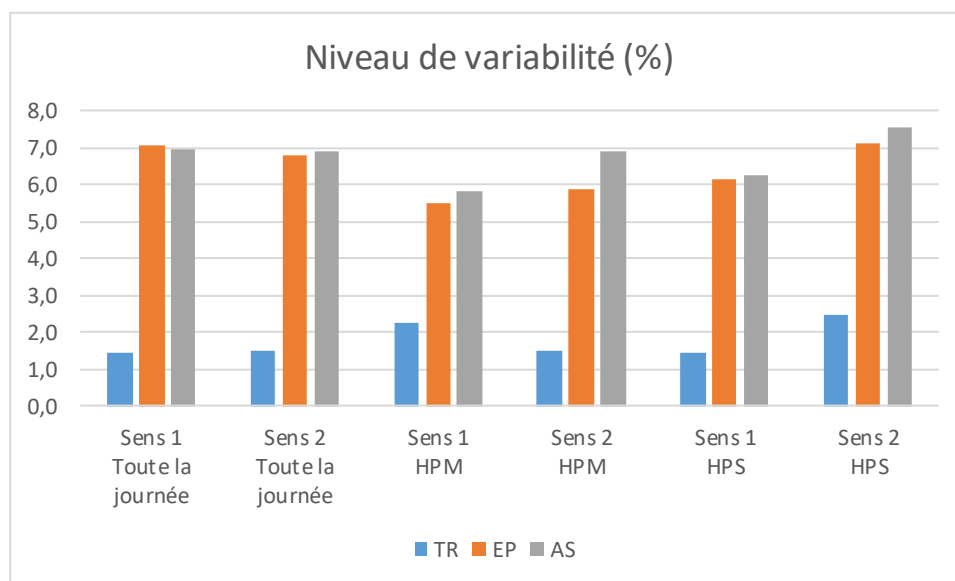


Figure 128 : Niveau de variabilité des composantes (%) de la ligne A

Source : Auteur

Tout comme pour les autres systèmes de surface, nous représentons la variabilité de l'ensemble de composantes, avec les coefficients de variation pour les composantes ayant une distribution symétrique et les coefficients interquartiles des composantes ayant une distribution asymétrique.

Pour le système VAL, seule la composante « attente en station » est considérée comme asymétrique.

Les parts relatives des composantes temps restent stables tout au long de la journée indépendamment des périodes. Au niveau de la variabilité, les ordres de grandeur restent plus au moins identiques. Notons tout de même des disparités entre les périodes de la journée.

Les niveaux de variabilité les plus hauts sont atteints en heure de pointe du soir dans la direction Basso Cambo vers Balma Gramont

La variabilité de la composante « Attente en station » se retrouve, à plusieurs reprises, supérieure au niveau de variabilité de l'échange passagers.

Nous allons désormais vérifier l'impact de leur variabilité sur le temps de parcours.

La variabilité du temps de parcours dans l'hypothèse d'invariance des composantes

Nos calculs portent sur le temps de parcours et ses composantes pour l'ensemble d'une direction pour une tranche horaire donnée (tableaux 72 et 73). La moyenne des temps de parcours de TP0 à TP6 est égale à la moyenne du temps de parcours originel. Seul le niveau de variabilité est altéré. En considérant le coefficient de variation pertinent du fait de la nature de la distribution statistique du temps de parcours, nous portons un intérêt à son augmentation et à sa diminution.

Balma vers Basso							
Composantes	Valeurs moyennes (s)	Pourcentage	Médiane	Ecart type (s)	Coefficient de variation (%)	Écart interquartile (s)	Coefficient interquartile (%)
TP'0	1369,0	100,0	1367,0	23	1,68	8,00	0,6
TP'1	1369,0	100,0	1367,0	23	1,68	8,00	0,6
TP'2	1369,0	100,0	1367,0	23	1,68	8,00	0,6
TP'3	1369,0	100,0	1367,0	23	1,68	8,00	0,6
TP'4	1369,0	100,0	1367,0	25	1,83	16,00	1,2
TP'5	1369,0	100,0	1366,0	16	1,17	16,00	1,17
TP'6	1369,0	100,0	1366,0	20	1,46	12,00	0,9

Tableau 72 : Impact des composantes du temps de parcours pour l'ensemble de la journée, sens Balma – Basso Cambo

Source : Auteur

Pour la direction de Balma Gramont vers Basso Cambo, le coefficient de variation du TP0 est de 1,68. Les TP1, 2 et 3 ne sont pas à prendre en considération car les composantes relatives à l'attente en ligne, l'attente aux feux et l'attente en ligne sont inexistantes.

Lorsque l'attente en station devient virtuellement immuable, le niveau de variabilité du TP4 augmente par rapport au TP0. Le coefficient de variation du TP4 est de 1,83 %.

Les deux composantes ayant un impact sur la variabilité générale sont l'échange passagers et le temps de roulage. Le TP5 permet d'atteindre un niveau de variabilité de 1,17 % et le TP6 1,46 %.

Pour le système VAL, la composante de l'échange passagers a un impact plus important que le temps de roulage sur la variabilité générale contrairement à ce qui a été observé notamment pour le tramway.

Basso vers Balma							
Composantes	Valeurs moyennes (s)	Pourcentage	Médiane	Ecart type (s)	Coefficient de variation (%)	Écart interquartile (s)	Coefficient interquartile (%)
TP'0	1371,0	100,0	1368,0	25	1,82	8,00	0,6
TP'1	1371,0	100,0	1368,0	25	1,82	8,00	0,6
TP'2	1371,0	100,0	1368,0	25	1,82	8,00	0,6
TP'3	1371,0	100,0	1368,0	25	1,82	8,00	0,6
TP'4	1371,0	100,0	1370,0	26	1,90	16,00	1,2
TP'5	1371,0	100,0	1368,0	17	1,24	16,00	1,2
TP'6	1371,0	100,0	1368,0	19	1,39	13,00	1,0

Tableau 73 : Impact des composantes du temps de parcours pour l'ensemble de la journée, dans le sens Basso Cambo - Balma

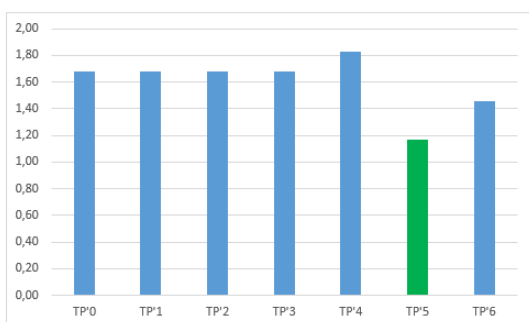
Source : Auteur

Pour la direction de Basso Cambo vers Balma Gramont, le coefficient de variation du TP0 est de 1,82. Tout comme pour la direction précédente, les TP1, 2 et 3 ne sont pas à prendre en considération. Nous constatons de nouveau que le TP4 présente un niveau de variabilité plus important que le TP0. Le coefficient du TP4 est de 1,90 %

De nouveau, les deux composantes ayant un impact sur la variabilité générale sont l'échange passagers et le temps de roulage. Le TP5 permet d'atteindre un niveau de variabilité de 1,24 % et le TP6 1,39%.

De nouveau, la composante de l'échange passagers est la composante ayant le plus fort impact sur la variabilité générale.

Balma vers Basso



Basso vers Balma

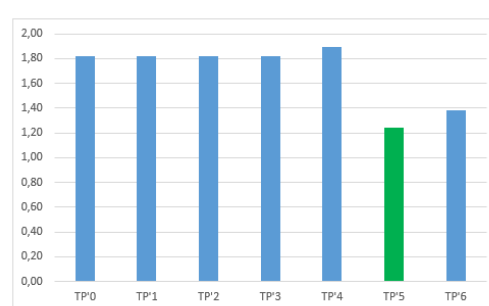


Figure 129 : Les coefficients de variation des temps de parcours

Source : Auteur

Nous avons procédé à une caractérisation statistique des différentes composantes du temps de parcours et tenté de mesurer leur impact sur le temps de parcours. Cette démarche concerne l'analyse du temps de parcours et de ses composantes pour l'ensemble des directions de terminus à terminus. Nous souhaitons désormais porter un intérêt à l'aide de cette même approche à une échelle différente, celle de l'interstation.

4.3.1.2 L'échelle de l'interstation

Nous cherchons à identifier des interstations remarquables afin de vérifier ou non si les tendances globales analysées pour l'ensemble d'une direction sont identiques. Pour identifier les interstations remarquables, nous proposons une lecture de la vitesse commerciale et du coefficient de variation du temps de parcours sous forme de matrice numérique.

Les deux matrices ci-dessous (figures 130 et 131) représentent les vitesses commerciales interstations par tranche horaire d'une heure de 5 h 00 à 1 h 00. Nous remarquons que les vitesses commerciales varient en fonction des interstations. En fonction des tranches horaires, les vitesses inter-stations restent plus ou moins stables. Les vitesses commerciales inter-stations hautes le sont tout au long de la journée. Il en est de même pour les vitesses commerciales basses.

	Balma - Gramont [BGR-02]	Aygoulets [ARG-02]	Roseraie [ROS-02]	Jolimont [JOL-02]	Marengo - SNCF [MAR-02]	Jean Jaurès [JAU-02]	Capitole [CAP-02]	Esquirol [ESQ-02]	St Cyprien - République [SCY-02]	Patte d'Oie [PAT-02]	Arènes [ARE-02]	Fontaine Lestang [FLE-02]	Mermoz [MER-02]	Bagatelle [BAG-02]	Mirail - Université [MUN-02]	Reynerie [REY-02]	Bellefontaine [BEL-02]	Basso Combo [MBC-02]
05:00:00-05:59:59	32,8	34,9	30,5	34,7	33,0	23,1	25,4	41,7	33,8	27,9	31,8	24,1	24,5	38,8	23,7	33,4	30,5	
06:00:00-06:59:59	32,4	34,9	30,5	34,7	32,2	23,5	25,7	41,7	33,8	27,9	32,3	24,1	24,5	38,8	23,3	32,9	30,8	
07:00:00-07:59:59	32,8	35,8	30,5	35,0	32,2	23,5	25,7	41,3	33,8	27,5	31,8	24,1	24,1	38,8	23,0	32,5	30,1	
08:00:00-08:59:59	32,8	36,3	30,8	35,5	32,6	23,8	26,1	41,3	33,8	27,9	31,8	24,1	24,1	38,4	23,0	32,1	27,9	
09:00:00-09:59:59	32,8	35,3	30,5	35,0	32,2	23,5	25,7	41,7	33,8	27,9	31,8	24,1	24,5	38,8	23,7	32,9	30,5	
10:00:00-10:59:59	32,8	35,3	30,5	35,5	32,2	23,5	25,4	41,7	33,8	27,9	31,8	24,1	24,5	38,8	23,7	33,4	30,5	
11:00:00-11:59:59	32,4	35,3	30,8	35,5	32,6	23,5	25,4	41,7	33,8	27,9	32,3	24,1	24,5	38,8	23,7	33,4	30,5	
12:00:00-12:59:59	32,8	34,9	30,5	35,0	32,2	23,1	25,4	41,7	33,8	27,9	31,8	24,1	24,5	38,8	23,7	33,4	30,5	
13:00:00-13:59:59	32,4	35,3	30,5	35,0	32,2	23,1	25,4	41,7	33,8	27,5	31,8	24,1	24,5	38,8	23,7	33,4	30,5	
14:00:00-14:59:59	32,4	35,8	30,8	35,5	32,6	23,5	25,4	41,7	33,8	27,9	31,8	24,1	24,5	38,8	23,7	32,9	30,5	
15:00:00-15:59:59	32,4	35,8	30,8	35,5	32,6	23,5	25,4	41,7	33,8	27,9	31,8	24,1	24,5	38,8	23,3	32,9	30,8	
16:00:00-16:59:59	32,4	35,8	30,5	35,0	32,2	23,5	25,4	40,9	33,8	27,9	31,8	24,1	24,5	38,8	23,0	32,5	30,5	
17:00:00-17:59:59	32,4	36,3	30,8	35,5	32,2	23,5	25,7	41,3	33,8	27,9	32,3	24,1	24,5	38,8	23,0	32,9	31,2	
18:00:00-18:59:59	32,4	36,3	30,8	35,0	32,2	23,1	25,4	41,3	33,8	27,5	31,8	24,1	24,5	38,8	23,0	32,5	28,8	
19:00:00-19:59:59	32,4	35,3	30,5	34,7	32,2	23,1	25,4	41,7	33,8	27,9	31,8	24,1	24,5	38,8	23,3	32,9	29,8	
20:00:00-20:59:59	32,4	35,3	30,1	34,3	32,2	23,5	25,4	41,7	33,8	27,9	31,8	24,1	24,5	38,8	23,7	33,4	29,8	
21:00:00-21:59:59	32,4	34,9	30,1	33,9	32,2	23,5	25,7	41,7	33,8	27,9	31,8	24,1	24,5	38,8	23,7	33,4	30,5	
22:00:00-22:59:59	32,4	35,3	30,5	34,3	32,2	23,8	25,7	42,2	34,3	27,9	32,3	24,1	24,5	38,8	23,7	33,4	30,5	
23:00:00-23:59:59	32,4	34,9	30,5	35,0	32,2	23,5	25,4	41,7	33,8	27,9	31,8	24,1	24,5	38,8	23,7	33,4	30,5	

Figure 130 : Matrice de la vitesse commerciale de Balma Gramont vers Basso Combo

Source : Auteur

	Basso Combo [MBC-01]	Bellefontaine [BEL-01]	Reynerie [REY-01]	Mirail - Université [MUN-01]	Bagatelle [BAG-01]	Mermoz [MER-01]	Fontaine Lestang [FLE-01]	Arènes [ARE-01]	Patte d'Oie [PAT-01]	St Cyprien - République [SCY-01]	Esquirol [ESQ-01]	Capitole [CAP-01]	Jean Jaurès [JAU-01]	Marengo - SNCF [MAR-01]	Jolimont [JOL-01]	Roseraie [ROS-01]	Argoulets [ARG-01]	Balma - Gramont [BGR-01]
05:00:00-05:59:59	33,9	34,2	22,6	41,1	24,9	29,4	31,0	29,1	33,8	41,5	26,1	21,9	30,1	33,9	32,0	34,0	29,8	
06:00:00-06:59:59	34,3	34,7	22,6	41,1	24,9	29,0	30,6	29,1	33,8	41,5	26,1	21,0	29,8	33,5	31,6	33,6	29,8	
07:00:00-07:59:59	34,3	35,7	23,3	41,5	25,7	29,9	30,6	29,5	33,4	42,7	27,2	21,3	29,8	32,8	30,8	33,2	30,4	
08:00:00-08:59:59	34,3	34,7	22,6	40,7	24,9	29,4	30,6	29,1	33,0	42,3	26,8	21,3	29,4	32,8	30,8	32,4	28,3	
09:00:00-09:59:59	33,9	34,7	22,6	40,7	24,9	29,0	31,0	29,1	33,8	41,9	26,5	21,3	30,1	33,5	31,6	33,6	29,8	
10:00:00-10:59:59	33,9	34,7	23,0	40,7	24,9	29,0	31,0	29,1	33,8	41,5	26,1	21,3	30,1	33,9	32,0	34,0	29,8	
11:00:00-11:59:59	33,9	34,7	23,0	40,7	24,9	29,0	31,0	29,1	33,8	41,5	26,1	21,3	30,1	33,9	32,0	34,0	29,8	
12:00:00-12:59:59	34,3	35,2	23,0	41,1	25,3	29,4	31,0	29,1	33,8	41,5	26,1	21,3	30,1	33,9	32,0	34,0	29,5	
13:00:00-13:59:59	33,5	34,2	22,6	40,7	24,5	29,0	30,6	28,7	33,8	41,5	25,7	20,7	29,8	33,9	31,6	34,0	29,5	
14:00:00-14:59:59	33,9	34,7	23,0	40,7	24,9	29,0	31,0	29,1	33,8	41,5	26,1	21,3	30,1	33,9	32,0	34,4	29,5	
15:00:00-15:59:59	34,3	34,7	22,6	40,7	25,3	29,4	31,0	29,1	33,4	41,5	26,1	21,3	30,1	33,5	31,6	34,0	29,8	
16:00:00-16:59:59	34,3	35,7	23,0	41,1	25,7	29,4	31,0	29,1	32,6	41,9	26,5	21,0	29,8	32,8	30,5	33,6	30,1	
17:00:00-17:59:59	34,3	34,7	22,6	40,7	25,3	29,4	31,0	29,1	33,0	41,9	26,5	20,7	30,1	32,8	30,5	33,2	28,3	
18:00:00-18:59:59	34,3	34,7	22,6	40,7	25,3	29,4	31,0	29,1	33,0	41,5	26,1	21,0	29,8	32,8	30,1	32,0	27,8	
19:00:00-19:59:59	33,9	34,7	22,6	40,7	25,3	29,0	31,0	29,1	33,8	41,5	26,1	21,3	29,8	33,5	30,8	33,2	29,2	
20:00:00-20:59:59	33,9	34,2	23,0	40,7	25,3	29,4	31,0	29,1	33,8	41,5	26,1	21,3	29,4	33,9	31,6	34,4	29,5	
21:00:00-21:59:59	31,5	34,2	23,0	39,9	25,3	29,4	31,0	29,5	33,8	40,7	26,5	21,6	29,8	33,9	31,6	34,0	29,5	
22:00:00-22:59:59	33,1	35,2	23,3	40,7	25,3	29,0	31,0	29,5	33,8	41,5	26,5	21,0	30,1	34,3	31,2	34,4	29,5	
23:00:00-23:59:59	34,3	34,7	23,0	41,1	24,9	29,0	30,6	29,1	33,8	41,5	26,1	21,3	30,1	33,9	31,6	34,0	29,5	

Figure 131 : Matrice de la vitesse commerciale de Basso Cambo vers Balma Gramont

Source : Auteur

Les vitesses commerciales interstations les plus basses ainsi que les plus élevées correspondent aux mêmes interstations d'une direction à une autre tout au long de la journée. Les vitesses les plus élevées se situent entre Esquirol et St-Cyprien et Bagatelle et Mirail pour la direction de Balma Gramont vers Basso Cambo. Pour l'autre direction, les vitesses interstations les plus hautes se situent entre Mirail et Bagatelle et St-Cyprien et Esquirol. L'interstation avec la vitesse la plus basse se situe, indépendamment des directions, entre Jean Jaurès et Capitole.

Les matrices de coefficient de variation montrent deux phénomènes. Le premier concerne la hausse de la variabilité du temps de parcours durant les heures de pointe du matin et du soir. Les coefficients de variation des temps de parcours interstations augmentent soit sur une succession d'interstations par exemple entre 7 h 00 et 9 h 00 pour la direction Balma Gramont vers Basso Cambo soit pour l'ensemble de l'itinéraire par exemple entre 17 h 00 et 19 h 00 pour la direction opposée. Le deuxième phénomène concerne le niveau de variabilité des dernières interstations dans le sens de marche.

	Balma - Gramont	Argoulets	Roseraie	Jolimont	Marengo - SNCF	Jean Jaurès	Capitole	Esquirol	St Cyprien - République	Patte d'Oie	Arènes	Fontaine Lestang	Mermoz	Bagatelle	Mirail - Université	Reynerie	Bellefontaine	Basso Combo
05:00:00-05:59:59	1,1	2,6	1,2	2,3	2,4	1,5	1,3	1	1,3	1,4	1,3	1,5	1,5	1	1,6	1,3	3,2	
06:00:00-06:59:59	2,2	2,6	1,2	2,3	10	3	2,7	1	1,3	9,6	2,6	1,5	11	1	3,1	8,8	4,4	
07:00:00-07:59:59	2,2	6,6	5,8	6,9	13	4,5	2,7	2	1,3	1,4	1,3	1,5	3	1	3	2,5	14	
08:00:00-08:59:59	2,2	4,1	2,4	4,7	3,6	3,1	2,7	2	2,6	2,8	2,6	1,5	3	1,9	3	13	25	
09:00:00-09:59:59	2,2	2,6	1,2	2,3	2,4	3	2,7	1	1,3	2,8	2,6	3	3,1	1	3,1	2,5	4,3	
10:00:00-10:59:59	2,2	2,6	2,3	8	2,4	3	2,7	2	1,3	1,4	1,3	1,5	1,5	1	1,6	1,3	1,1	
11:00:00-11:59:59	2,2	2,6	2,3	3,5	3,6	3	2,7	2	1,3	2,8	2,6	1,5	1,5	1	1,6	1,3	7,4	
12:00:00-12:59:59	3,4	2,6	1,2	2,3	2,4	1,5	1,3	1	2,6	2,8	1,3	1,5	1,5	1,9	1,6	1,3	4,3	
13:00:00-13:59:59	1,3	2,9	1,4	2,7	1,8	2	1,7	1	1	1,5	1,2	1,2	1,3	0,8	2,3	2,5	3,6	
14:00:00-14:59:59	1,1	2,7	2,4	4,7	2,4	1,5	1,3	2	1,3	1,4	1,3	1,5	1,5	1	3,1	1,3	4,3	
15:00:00-15:59:59	1,1	4	2,3	3,5	3,6	3	2,7	2	2,6	2,8	1,3	1,5	1,5	1	3,1	2,5	7,6	
16:00:00-16:59:59	2,2	2,7	2,3	4,6	5,9	6	4	2	5,2	8,2	5,3	6,1	3,1	1,9	6,1	5	11	
17:00:00-17:59:59	9,9	2,7	2,4	3,5	4,7	6	4,1	6,9	6,5	6,8	6,6	6,1	6,2	1,9	3	3,8	6,7	
18:00:00-18:59:59	1,1	2,7	2,3	2,3	2,4	2,9	1,3	2	1,3	5,5	5,2	6,1	6,2	3,8	7,6	6,3	14	
19:00:00-19:59:59	3,3	2,6	1,2	3,4	2,4	2,9	2,7	1	1,3	2,8	1,3	1,5	1,5	1	3,1	14	26	
20:00:00-20:59:59	1,1	1,3	1,2	2,2	3,5	3	2,7	1	1,3	1,4	2,6	1,5	1,5	1	1,6	1,3	44	
21:00:00-21:59:59	1,1	10	2,3	3,3	3,5	3	4,1	2	1,3	1,4	2,6	1,5	1,5	1	1,6	1,3	26	
22:00:00-22:59:59	1,1	2,6	1,2	2,2	10	3	4,1	8,9	2,6	2,8	2,6	13	1,5	1	12	1,3	1,1	
23:00:00-23:59:59	1,1	3,9	1,2	1,1	2,4	3	1,4	3	1,3	1,4	2,6	1,5	1,5	1	1,6	1,3	17	

Figure 132 : Matrice de coefficient de variation de Balma Gramont vers Basso Combo

Source : Auteur

	Basso Combo	Bellefontaine	Reynerie	Mirail - Université	Bagatelle	Mermoz	Fontaine Lestang	Arènes	Patte d'Oie	St Cyprien - République	Esquirol	Capitole	Jean Jaurès	Marengo - SNCF	Jolimont	Roseraie	Argoulets	Balma - Gramont
05:00:00-05:59:59	1,3	1,3	1,5	3	4,7	3	1,3	1,5	1,3	0,9	1,4	4,3	2,4	1,1	1,2	1,3	1,9	
06:00:00-06:59:59	1,3	2,7	3	2	1,6	1,5	7,5	8,7	7,8	5,5	8,2	8,2	7,2	2,2	7,2	7,5	8,9	
07:00:00-07:59:59	3,8	5,5	6,2	3,1	8,1	7,7	3,8	2,9	3,8	1,9	2,9	1,4	2,4	2,2	1,2	2,5	6,3	
08:00:00-08:59:59	2,5	2,7	3	2	3,1	3	2,5	1,4	2,5	1,9	2,8	2,8	2,4	2,2	2,4	8,4	16	
09:00:00-09:59:59	1,3	2,7	3	2	1,6	1,5	1,3	1,4	3,9	1,9	2,8	1,4	2,4	2,2	2,4	2,5	2,9	
10:00:00-10:59:59	1,3	2,7	3	1	3,1	1,5	2,5	2,9	1,3	0,9	1,4	2,8	1,2	1,1	2,4	1,3	2	
11:00:00-11:59:59	1,3	2,7	3	1	1,6	1,5	2,5	1,4	1,3	0,9	1,4	2,8	1,2	1,1	1,2	1,3	6,8	
12:00:00-12:59:59	2,5	2,7	4,5	2	3,2	3	6,3	2,9	2,6	0,9	2,7	2,8	2,4	1,1	2,4	1,3	2,9	
13:00:00-13:59:59	2	2,4	2,9	1,1	1,9	1,6	1,2	2,9	2,3	1,3	4,1	6,3	2,3	1,3	1,1	1,6	2,5	
14:00:00-14:59:59	2,5	2,7	3	2	3,1	1,5	2,5	2,9	5,2	1,8	4,1	2,8	2,4	1,1	1,2	1,3	4,9	
15:00:00-15:59:59	1,3	2,7	3	2	3,2	3	2,5	1,4	2,6	0,9	1,4	2,8	2,4	2,2	2,4	2,5	5	
16:00:00-16:59:59	1,3	4,1	9,1	3	6,5	6,1	5,1	5,8	10	1,9	2,8	5,5	6	3,2	3,5	3,8	11	
17:00:00-17:59:59	2,6	12	10	4	3,2	7,6	5,1	4,3	5,1	2,8	8,3	8,1	3,7	7,4	4,7	7,4	20	
18:00:00-18:59:59	5,1	6,7	7,5	6	3,2	7,6	6,3	7,2	6,3	6,4	6,8	6,8	2,4	4,3	8	17	23	
19:00:00-19:59:59	10	2,7	3	1	3,2	3	2,5	2,9	2,6	1,8	1,4	1,4	2,4	2,2	4,7	4,9	13	
20:00:00-20:59:59	2,5	2,6	3	1	1,6	1,5	1,3	1,4	1,3	0,9	1,4	1,4	1,2	1,1	1,2	1,3	24	
21:00:00-21:59:59	34	3,9	3	3	3,2	1,5	1,3	1,4	1,3	2,8	1,4	4,1	3,6	3,3	1,2	2,6	9,6	
22:00:00-22:59:59	20	4,1	3,1	1	3,2	13	3,8	2,9	12	2,8	2,8	11	4,9	2,2	1,2	2,6	3,9	
23:00:00-23:59:59	1,3	2,7	3	1	3,1	1,5	2,5	1,4	1,3	0,9	1,4	1,4	1,2	1,1	1,2	1,3	25	

Figure 133 : Matrice de coefficient de variation de Basso Combo vers Balma Gramont

Source : Auteur

Les interstations spécifiques

Le système métro GoA4 est particulier car son niveau d'automatisation lui permet d'obtenir une bonne performance opérationnelle. Les vitesses commerciales sont élevées et les niveaux de variabilité bas. Nous rappelons un point essentiel, celui de l'inexistence de points particuliers au niveau des interstations.

Pour les vitesses, nous constatons une relation avec la longueur de l'interstation. Les vitesses les plus élevées se situent aux interstations Esquirol et St-Cyprien pour les deux directions. Ces interstations sont les plus longues et dépassent les 1 000 mètres. A l'inverse, les vitesses les moins élevées se situent aux interstations Jean Jaurès et Capitole pour les deux directions. Ces interstations sont les plus courtes avec environ 420 mètres.

Les niveaux de variabilité du temps de parcours importants se situent essentiellement au niveau des dernières interstations qui sont Bellefontaine vers Basso Cambo et Argoulets vers Balma Gramont. Nous présentons ci-dessous deux matrices qui permettent de caractériser les composantes du temps de parcours (tableaux 74 et 75).

Sens_1 Bellefontaine vers Basso Cambo							
Composantes	Valeurs moyennes (s)	Pourcentage	Médiane	Ecart type (s)	Coefficient de variation (%)	Écart interquartile (s)	Coefficient interquartile (%)
TP	95,0	100,0	93,0	17,0	17,9	6,0	6,5
TR	67,0	70,5	65,0	10,0	14,9	2,0	3,1
EP	24,0	25,3	24,0	13,0	54,2	6,0	25,0
AS	4,0	4,2	4,0	3,0	75,0	0,0	0,0
AP	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
AF	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0
AL	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0

Tableau 74 : Valeurs des composantes du temps de parcours pour l'ensemble de la journée - Bellefontaine vers Basso Cambo

Source : Auteur

Sens_2 Argoulets vers Balma Grammont							
Composantes	Valeurs moyennes (s)	Pourcentage	Médiane	Ecart type (s)	Coefficient de variation (%)	Écart interquartile (s)	Coefficient interquartile (%)
TP	102,0	100,0	101,0	15,0	14,7	8,0	7,
TR	76,0	74,5	75,0	10,0	13,2	1,0	1,
EP	22,0	21,6	21,0	10,0	45,5	10,0	47,
AS	4,0	3,9	4,0	1,0	25,0	1,0	25,
AP	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,
AF	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,
AL	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,0	0,

Tableau 75 : Valeurs des composantes du temps de parcours pour l'ensemble de la journée – Argoulets vers Balma Gramont

Source : Auteur

Nous remarquons que la part de la composante échange de passagers est, indépendamment des directions, supérieure à 20 % et a un niveau de variabilité compris entre 45 % et 54 %.

Cela s'explique en partie par les phases de retournement et les sorties de véhicules au terminus. Ces manœuvres, non commerciales, entraînent pour certains véhicules qui précèdent, des temps d'immobilisation portes ouvertes plus importants. La variabilité du temps d'attente en station portes fermées est également important. Ces temps d'immobilisation ont un impact sur le temps de roulage des véhicules. Certains véhicules ralentissent pour atteindre la dernière station de l'itinéraire. Cette situation engendre également une forte variabilité de la composante temps de roulage.

Les parts relatives des composantes du temps de parcours sont différentes pour le système VAL. En effet, certaines composantes en lien avec l'immobilisation des mobiles sont inexistantes, la part du temps de roulage est diminuée et celle du temps d'attente en station est augmentée.

Les coefficients de variation du temps de parcours pour l'ensemble des directions sont inférieurs à 2 %. La composante de l'échange passagers est la composante la plus impactante sur le niveau de variabilité du système.

Les résultats obtenus sur nos trois exemples montrent que l'attente en station est augmentée lorsque l'on passe d'un système bus à un système tramway. Elle augmente à nouveau lorsque l'on passe d'un système tramway à un système métro GoA4. Cela est peut-être dû au niveau d'exigence sécuritaire accru entre la phase de fermeture des portes et le départ des mobiles.

Ce constat pourra être confirmé lorsque des applications d'analyse microscopiques seront mises en œuvre sur des plusieurs systèmes de même catégorie.

Les résultats du métro montrent clairement que le niveau de performance opérationnelle se détache de celui des systèmes de surface mesurés.

A l'exception des temps enregistrés à l'approche des terminus, le métro ligne A de Toulouse se caractérise par de bonnes conditions d'exploitation.

5. Proposition d'une liste d'inducteurs

La mise en œuvre d'une analyse microscopique des conditions d'exploitation pour trois TCSP différents doit être considérée comme une comparaison inter-système.

L'analyse microscopique qui repose sur la désagrégation du temps de parcours doit permettre, en premier lieu, de caractériser ses différentes composantes. Ces composantes peuvent être répertoriées selon leur degré « d'utilité » à l'exploitation des systèmes. En nous rapportant à l'approche théorique de l'exploitation optimale que nous avons décrite en début de chapitre, nous pouvons considérer que certaines composantes peuvent être considérées comme « productives » et d'autres comme « improductives ».

Les composantes qui ne sont pas nécessaires au fonctionnement de l'exploitation (composantes improductives) telles que les immobilisations entre les stations doivent être réduites au plus près de zéro. La réduction de ces composantes permet d'éliminer une éventuelle source de variabilité, de diminuer le temps de parcours et donc d'augmenter la vitesse commerciale.

Les composantes nécessaires au fonctionnement de l'exploitation (composantes productives) telles que le déplacement des mobiles, les temps en station avec les portes ouvertes ou fermées doivent être optimisées. Le temps d'immobilisation relatif aux portes fermées en station peut être réduit si les mobiles déclenchent leur « ouverture de porte » lorsqu'ils sont encore en mouvement à vitesse basse. L'optimisation de ces composantes permettrait de conditionner le niveau de variabilité. On peut imaginer que cette optimisation permette, dans certains cas, de diminuer le temps de parcours et donc d'augmenter la vitesse commerciale.

Cette première comparaison inter-système permet de constater que pour l'ensemble des itinéraires, la part relative des composantes temps est sensiblement identique indépendamment des systèmes. Le temps de roulage et l'échange passagers sont des composantes majeures et également les plus impactantes sur le temps de parcours (le temps de roulage pour le BHNS et le tramway et le temps d'échange passagers pour le BHNS et VAL).¹⁶⁴. Toujours à l'échelle de l'itinéraire, les composantes improductives sont mineures et impactent peu le temps de parcours global.

A l'échelle de l'interstation, nous avons pu observer des situations très différentes. Les composantes improductives peuvent devenir majeures et donc fortement impacter le temps de parcours. Les composantes productives peuvent être minimisées que ce soit au niveau de la part relative ou au niveau de l'impact.

¹⁶⁴ Dans le cas d'un TCSP, les composantes productives sont celles qui sont les plus impactantes au niveau de la variabilité. Il en est peut-être de même pour la vitesse. Cette répartition des composantes TCSP et ces degrés d'impact devraient être comparés avec les résultats d'un système non TCSP.

Nous considérons que les valeurs statistiques utilisées pour l'analyse microscopique peuvent correspondre aux indicateurs de la performance opérationnelle. Par conséquent, nous proposons les indicateurs suivants :

- Les parts relatives des composantes du temps de parcours,
- Les coefficients de variation et interquartile des composantes temps (y compris temps de parcours),
- La vitesse,
- Les nouveaux temps de parcours recalculés (nouvelle variabilité et nouvelle vitesse¹⁶⁵),
- Les coefficients de variation des temps de parcours recalculés.

Nous rappelons que la mise en œuvre d'un indicateur de performance doit être associée aux éléments ayant un impact sur celui-ci : les inducteurs de performance (Addouche, S. et all, 2005).

Nous tenterons de lister au travers de nos résultats, d'observations terrain et de discussions avec des praticiens, les différents inducteurs de la performance opérationnelle. Pour ce faire, nous proposons de discuter composante par composante de ce qui suscite la variabilité en prenant en compte les éléments mis en lumière à l'échelle de l'interstation. Nous tentons également de lister les liens possibles entre les composantes.

Nous précisons que certaines caractéristiques concernant les composantes sont en relation avec le système étudié. Néanmoins, celles-ci peuvent être applicables à d'autres types de systèmes.

Le temps de roulage

Comme nous avons pu le constater, la composante relative au déplacement des mobiles est toujours la plus importante. Elle représente en général presque 75 % du temps de parcours pour les deux systèmes TCSP de surface étudiés et 66 % pour le métro. Le temps de roulage présente généralement une certaine stabilité. A l'échelle de l'itinéraire complet et pour l'ensemble de la journée, les coefficients de variation du temps de roulage sont toujours les plus bas. Cela étant, même si le niveau de variabilité est faible, cette composante impacte le temps de parcours car elle est une composante majeure.

- **Planification théorique**

Pour les systèmes avec conducteur, une mauvaise planification du temps de parcours entraîne un dérèglement de l'exploitation. Ce dérèglement engendre des conduites différentes de la part des conducteurs et se traduit par des écarts importants de temps de roulage. Ce dérèglement de l'exploitation peut également entraîner des temps d'immobilisation des mobiles aux arrêts permettant ainsi de reconstruire les intervalles. Par conséquent, il est essentiel que le tableau de marche soit correctement dimensionné.

- **Comportement de conduite**

Chaque conducteur offre un « service » de conduite « personnel ». Les comportements individuels de conduite se traduisent également par des écarts du temps de roulage. Pour un

¹⁶⁵ Dans le cadre de notre recherche, nous n'avons pas pu recalculer de temps de parcours afin de vérifier les éventuels gains de vitesse. Nous considérons que cette approche pourrait être intégrée dans le cadre de travaux complémentaires.

système tel que le tramway, le comportement individuel de conduite est visible en comparant les conduites en fonction des années d'expérience. Les temps de roulage des conducteurs non expérimentés seront plus importants que ceux des conducteurs expérimentés (la situation inverse peut également être constatée notamment sur les systèmes routiers). Cette différence de temps peut se concentrer sur quelques phases spécifiques de l'exploitation telles que les arrivées en station avec présence importante de clientèle sur les quais ainsi que les traversées de carrefours.

Les conducteurs doivent également respecter les limitations de vitesse. Le non-respect des limitations de vitesse entraîne des écarts du temps de roulage. Ce non-respect peut se caractériser par des survitesses mais également des sous-vitesses s'agissant de conducteurs n'osant pas atteindre la vitesse maximale autorisée. L'influence du comportement individuel de conduite sur le temps de roulage met en lumière l'importance de la formation.

- **Spécificité des voies de circulation**

Le temps de roulage peut être affecté par les spécificités des voies de circulation qui peuvent entraîner une adaptation de la vitesse. Nous pouvons, par exemple, illustrer notre propos en décrivant les systèmes de priorité aux carrefours. Les systèmes de priorité permettent aux mobiles d'accéder à la priorité de passage lors d'un franchissement de carrefour. Cette priorité, qui repose sur une communication entre les mobiles et l'infrastructure, demande une anticipation au niveau de la conduite. En effet, pour être pris en compte par le système de priorité, le conducteur peut être amené à adapter sa conduite soit par une accélération soit par une décélération. Par conséquent, le temps de roulage varie. De manière générale, il en est de même pour tout ce qui relève de l'anticipation de la part de la conduite (traversée de piétons, circulations individuelles motorisées...).

- **Caractéristiques des mobiles**

Comme nous l'avons évoqué, les mobiles présentent leurs propres caractéristiques techniques. L'accélération et le freinage influent sur le temps de roulage. Plus ces caractéristiques techniques sont efficaces et plus le temps de roulage diminue. On peut citer par exemple le choix de la RATP du matériel métro sur pneumatique à partir des années 1950 car il dispose d'une meilleure qualité d'accélération et de freinage. Ces spécificités influent sur le temps de roulage.

Cette variation des temps de roulage en lien avec le matériel roulant peut être encore plus visible lorsqu'un système est exploité par différents mobiles présentant eux-mêmes des caractéristiques différentes.

- **La circulation des autres mobiles**

Lorsque le temps d'immobilisation d'un mobile est trop important (en station ou au niveau de l'interstation), il interfère avec le mobile suivant. Le mobile suivant doit adapter sa vitesse via l'action d'un conducteur ou d'un automatisme. Ce facteur est important lorsque les systèmes sont exploités avec des intervalles réduits. Lorsque des ralentissements forcés apparaissent, les temps de roulage diffèrent. Ce phénomène peut concerner plusieurs mobiles qui se suivent les uns derrière les autres.

L'échange des passagers

La composante de l'échange passagers est importante car elle représente entre 15 et 20 % du temps pour le BHNS et le tramway. Pour le système VAL, cette composante est supérieure à 20 %. C'est pour le tramway que cette composante est la moins importante. Le niveau de

variabilité de cette composante est plus important que celui du temps de roulage. Il est important de constater que ce niveau de variabilité reste élevé même lorsque nous observons l'échantillon uniquement aux heures de pointe.

- Flux voyageurs

Le temps d'échange passagers est bien évidemment en relation avec le nombre de voyageurs montant et descendant du mobile. La volumétrie des mouvements dimensionne le temps d'ouverture des portes du mobile. En plus des mouvements voyageurs, il est important de considérer la charge voyageurs à l'intérieur du véhicule à son arrivée en station. Plus la charge est importante et plus les mouvements montants et descendants des voyageurs peuvent être longs. La planification du tableau de marche d'un système métro intègre les temps d'immobilisation des mobiles en station. Cette approche est plus rare sur les TCSP de surface. Il serait peut-être intéressant de vérifier si une prise en compte de cet aspect dans la planification permet de diminuer le niveau de variabilité et de rendre plus robuste le tableau de marche

- Loi d'arrivée des voyageurs et intervalle entre les mobiles

Comme nous l'avons vu au cours du chapitre 2, la fréquence de passage des mobiles oriente le comportement du voyageur. Les systèmes TCSP que nous avons étudiés ont des fréquences de passage élevées. Nous pouvons donc considérer que la grande majorité des voyageurs se dirigent vers le système sans viser un horaire précis notamment aux heures de pointes.

Cette situation oblige à respecter les intervalles. En effet, comme nous avons pu le constater au cours du chapitre 2, un non-respect des intervalles entraîne un déséquilibre du nombre de voyageurs présents aux stations. Si l'intervalle est réduit, le nombre de voyageurs présents aux stations sera réduit. Le temps nécessaire pour l'échange des passagers sera également réduit. A l'inverse, si l'intervalle de temps entre deux mobiles est allongé, le nombre de personnes présent aux stations sera augmenté et le temps nécessaire pour l'échange des passagers sera plus important.

Maintenir un niveau de variabilité de la composante relative à l'échange passagers oblige à respecter les intervalles qui peuvent être eux-mêmes désorganisés par une autre composante, par exemple l'attente au feux.

- Relève des conducteurs

L'analyse des mesures que nous avons effectuées démontre que la relève des conducteurs entraîne une variabilité importante de l'échange passagers. Le temps nécessaire à l'action de la relève peut durer plusieurs minutes. Certaines courses sont concernées, d'autres non. Cette configuration entraîne une forte variation des temps d'ouverture des portes.

Nos résultats montrent que ces relèves ont lieu en dehors des heures de pointe. Ces actions de relève seraient moins contraignantes si celles-ci pouvaient être réalisées au terminus au cours des temps de retournement et de régulation. Bien entendu, cela n'est possible que si la configuration du réseau le permet (facilité d'acheminement des conducteurs aux points de relève).

- Le design des mobiles

Le design du mobile conditionne, en partie, le temps d'échange passagers. Le nombre de portes, leur largeur et l'aménagement intérieur du véhicule influencent la « productivité » du temps d'échange passagers. Lorsque les conditions relatives au design ne sont pas réunies,

Is temps nécessaire à l'échange des passagers est allongé. L'aménagement intérieur des véhicules permet d'une part d'optimiser la capacité d'emport (sièges en position longitudinale ou transversale) et de fluidifier les flux des passagers de l'intérieur vers l'extérieur et inversement. Lorsque l'aménagement intérieur des mobiles repose sur une recherche d'augmentation de la capacité d'emport, il est essentiel de considérer la distance moyenne parcourue par les voyageurs. En effet, l'augmentation de la capacité d'emport repose en grande partie sur la suppression de sièges. Cependant, le confort des voyageurs, notamment ceux pour qui la distance à parcourir est longue, ne doit pas être écarté.

Aujourd'hui, sur notre territoire, de nombreux tramways en exploitation disposent de portes étroites (un seul vantail) aux extrémités. Cette configuration existe sur les tramways de la ligne 1 de Montpellier. Cela est largement critiqué par les exploitants et tend à disparaître avec le renouvellement du parc existant (par exemple avec les nouveaux CITADIS phase 2 de Strasbourg). La conception des mobiles devrait intégrer cette dimension opérationnelle.

- Design des quais

Le design du quai conditionne également le temps d'échange passagers. La largeur des quais, la présence d'obstacles entravant la bonne circulation des voyageurs influencent également sur la « productivité » du temps d'échange passagers.

Les quais, notamment ceux des métros, disposent de signalisation au sol pour répartir les flux voyageurs ce qui participe à l'optimisation des temps d'ouverture des portes des mobiles. Ce type de signalisation est beaucoup plus rare sur les TCSP de surface.

Tout comme pour les mobiles, la conception des quais devrait intégrer cette dimension opérationnelle.

- Les règles d'exploitation

Généralement, les règles d'exploitation des TCSP sont relativement proches. Par exemple une règle d'exploitation pour un système métro ou tramway consiste à ce que chaque mobile marque un arrêt à toutes les stations. Cette règle qui ne s'applique pas pour les lignes de bus conventionnelles, existe pour le TCSP routier type BHNS. Tel est le cas du BHNS nantais. D'autres règles d'exploitation peuvent avoir un impact fort sur la composante du temps d'échange des passagers. Nous pouvons citer par exemple la vente de titres à bord des véhicules ou bien l'obligation de monter par la porte avant du mobile afin de lutter contre la fraude. L'application de ces règles serait contre-productive sur les systèmes TCSP.

- Le comportement voyageur

Le temps d'échange des passagers est également en lien avec le comportement des voyageurs. Les voyageurs doivent adopter un comportement qui permet de ne pas entraver la bonne circulation des personnes à l'intérieur, vers l'extérieur et vers l'intérieur des mobiles. Les gestes d'incivisme tels que le blocage de la fermeture de portes influencent également la variabilité des temps d'ouverture des portes.

L'attente en station

L'attente en station est une composante qui correspond à des parts relatives différentes en fonction des systèmes étudiés. Pour le système BHNS, cette composante représente 2 %, pour le tramway 5 % et 10 % pour le VAL. Les niveaux de variabilité diffèrent également. Pour le BHNS, la variabilité de l'attente en station est supérieure à celle de l'échange des passagers.

En revanche, pour les système tramway et VAL, la variabilité de cette composante est légèrement inférieure à celle de l'échange des passagers.

- Niveau de sécurisation des systèmes

Les écarts des parts relatives de la composante de l'attente en station est peut-être en relation avec le niveau sécuritaire des systèmes notamment la validation que toutes les portes (des mobiles et de l'infrastructure) soient bien fermées avant d'enclencher un départ.

- Environnement de la station

Les temps d'immobilisation portes fermées peuvent être en lien avec la possibilité ou non du mobile à quitter la station. L'exemple du signal de manœuvre à la station Corum pour la ligne 1 du tramway de Montpellier en témoigne. Une fois l'échange des passagers réalisé, les mobiles peuvent attendre portes fermées plus de 40 secondes. La variabilité de la composante repose en partie sur le fait que certains mobiles vont être concernés par ces temps d'immobilisation et d'autres non. Ce type de temps d'immobilisation peut avoir un caractère aléatoire. Il peut être transféré vers la composante échange passagers dès lors que le mobile reste en station avec les portes ouvertes.

Ce type de temps d'immobilisation en station peut se retrouver sur des lignes de bus conventionnelles lorsque l'emplacement pour le stationnement du bus est hors chaussée (arrêt en encoche). Une fois l'échange passagers terminé, le mobile peut rencontrer des difficultés à se réintroduire sur la voie de circulation si celle-ci est encombrée par d'autres circulations.

L'attente aux feux

Pour le système VAL, cette composante n'existe pas. Pour le tramway, l'attente aux feux correspond à environ 3 % du temps de parcours avec un niveau de variabilité compris entre 35 % et 50 %. Pour le BHNS, cette composante est plus près de 4 % avec un niveau de variabilité compris entre 45 % et 60 %.

- Le système de priorité aux feux

L'une des caractéristiques des TCSP de surface est la mise en œuvre d'un système de priorité aux feux. On constate que dans l'ensemble, le système de priorité aux feux fonctionne correctement. Néanmoins, certains feux peuvent engendrer des temps d'immobilisation. Pour en comprendre la raison, il est nécessaire de faire une rapide description du fonctionnement de ce système. Nous décrivons le fonctionnement général du système le plus répandu.

Pour le tramway, les feux de carrefour sont regroupés au sein de la Signalisation Lumineuse de Trafic¹⁶⁶ (SLT). Le fonctionnement général de la SLT repose sur une prise en compte automatique de mobiles via des balises. Au niveau d'un carrefour qui est traversé par différentes lignes de tramways, le principe est simple : le premier mobile détecté est le premier à avoir la priorité. Une fois que le mobile a traversé le carrefour, le système de priorité au feu enregistre un acquittement. Dès lors, le carrefour relance son cycle afin de donner un droit de franchissement aux autres circulations notamment individuelles.

¹⁶⁶ La SLT se distingue de la Signalisation Ferroviaire (SIG Ferro.). La SIG ferroviaire gère les carrefours ferroviaires non routiers. Elle intègre les signaux de manœuvre, les indicateurs de direction (INDIR) et les indicateurs de destination (INDES).

Le BHNS de Nantes fonctionne selon la même méthode avec le même type de signalisation à savoir R17 avec SAC.

La variabilité de la composante d'attente aux feux repose sur le fait que certains véhicules se retrouvent avec une priorité et d'autres sans. Dans la majorité de nos mesures, les mobiles sont peu ou pas immobilisés. Néanmoins, d'autres enregistrent des temps d'immobilisation important. Les raisons peuvent être les suivantes :

- Défaut technique de détection (balise HS) :
Dans ce cas, la détection du mobile n'est pas prise en compte et la priorité de fonctionne pas. Le mobile est alors obligé de se positionner en pied de feu ou de demander la priorité au Poste de Commande Centralisé (PCC).
- Intervalle entre les véhicules non respecté :
Un système de priorité aux feux est régi par un ensemble de règles permettant d'assurer l'écoulement de différentes circulations collectives et individuelles. Par conséquent, la priorisation ne peut être entièrement dédiée au transport collectif. Lorsque deux mobiles de transport collectif se suivent, le premier pourra obtenir la priorité de passage et le second sera contraint d'attendre le passage d'un cycle complet. Cela entraîne un temps d'immobilisation.
- Positionnement de feux en sortie de station :
Pour les feux implantés en sortie de station, le temps d'immobilisation nécessaire à l'échange des passagers peut être dimensionné dans le système qui gère la priorité. Lorsque le temps d'immobilisation en station est conforme avec le temps renseigné dans le système de priorité, le mobile pourra quitter la station sans devoir s'immobiliser de nouveau. En revanche, si le temps d'immobilisation est plus long que celui paramétré, le mobile devra de nouveau signaler sa présence en se positionnant au pied du feu et attendre que le cycle lui redonne la priorité.

Par conséquent, le bon fonctionnement du système de priorité au feu exige un bon niveau de respect des intervalles et donc de régularité globale. L'irrégularité de la ligne dûe à la variabilité d'une autre composante peut entraîner un dysfonctionnement de la SLT et donc une augmentation de la variabilité de l'attente aux feux.

- Niveau de priorisation entre les différents systèmes.
Lorsque deux systèmes TCSP se croisent en surface, une hiérarchie des priorisations est nécessaire. Dans le cas du BHNS de Nantes qui traverse la ligne 1 de tramway, la priorité est toujours à l'avantage du tramway. Par conséquent, les mobiles BHNS peuvent être immobilisés.

L'attente aux points

Tout comme pour la composante relative à l'attente aux feux, le système VAL n'est pas concerné par la composante d'attente aux points. Les données concernant les systèmes tramway et BHNS montre que l'attente aux points est inférieure à 1 % voir égale à zéro notamment pour une direction du BHNS. En revanche, le niveau de variabilité de cette composante est très important.

Il est essentiel de rappeler que le concept même du TCSP doit permettre d'éliminer tout ou partie de ce type de temps d'immobilisation. Pour le tramway, nous avons considéré que la signalisation ferroviaire, lorsqu'elle était isolée et donc non rattachée à la SLT, était considérée

comme un point singulier lors de la description de la ligne. Lors de l'analyse de certaines interstations remarquables, nous avons pu constater que cette composante pouvait être la plus impactante sur le temps de parcours aussi bien pour le système tramway que le système BHNS.

Pour le BHNS, cela s'explique par la particularité des voies de réservation et de la nécessité d'alterner les circulations en fonction des directions. Cet alternat de circulation oblige, pour une direction, l'immobilisation de certains mobiles. Notre terrain d'étude tramway ne présente pas de configurations de voies uniques mais cette particularité pourrait éventuellement être visible. Cela met en lumière la problématique des conflits de circulation.

Pour le tramway, cette composante du temps de parcours est en relation avec la signalisation ferroviaire lorsque celle-ci est isolée de la SLT. Le principe de fonctionnement est très proche de la SLT à savoir que le premier mobile détecté devient prioritaire. Notons tout de même une différence fondamentale avec la SLT. La demande de prise en compte de la signalisation ferroviaire se fait par le conducteur depuis la cabine de conduite alors que la demande de prise en compte de la SLT se fait automatiquement via des communications entre balises embarqué/sol.

La variabilité de cette composante repose sur le fait que la plupart des véhicules ne sont pas concernés par ce type d'immobilisation alors que d'autres peuvent rester immobilisés un temps certain.

L'attente en ligne

Tout comme la composante attente aux points, le concept même du TCSP doit permettre d'éliminer tout ou partie de ce type de temps d'immobilisation. Pour le système VAL, cette composante est inexistante et pour les deux systèmes TCSP de surface, les parts relatives sont proches de zéro voir égales à zéro.

Ces temps d'immobilisation sont en relation avec la congestion des voies de circulation ou la gêne à la circulation des mobiles.

Pour le BHNS, nous observons ce type de temps d'immobilisation sur la section Duchesse Anne – Foch qui ne possède pas de réservation de voirie. Pour le tramway, cette composante est visible au niveau des croisements entre les lignes de tramway. Cela met en lumière la relation de cette composante avec la capacité des carrefours.

On peut imaginer que cette composante soit plus importante pour un système de catégorie non TCSP englué dans les autres circulations.

Comme les autres composantes lié à un temps d'immobilisation, le niveau de variabilité réside dans l'existence ou non d'un temps d'immobilisation.

Ci-dessous (figure 134), nous proposons une représentation des différents inducteurs de la performance opérationnelle. Nous intégrons également les caractéristiques topographiques de l'itinéraire notamment la distance interstation ainsi que le coefficient de sinuosité.

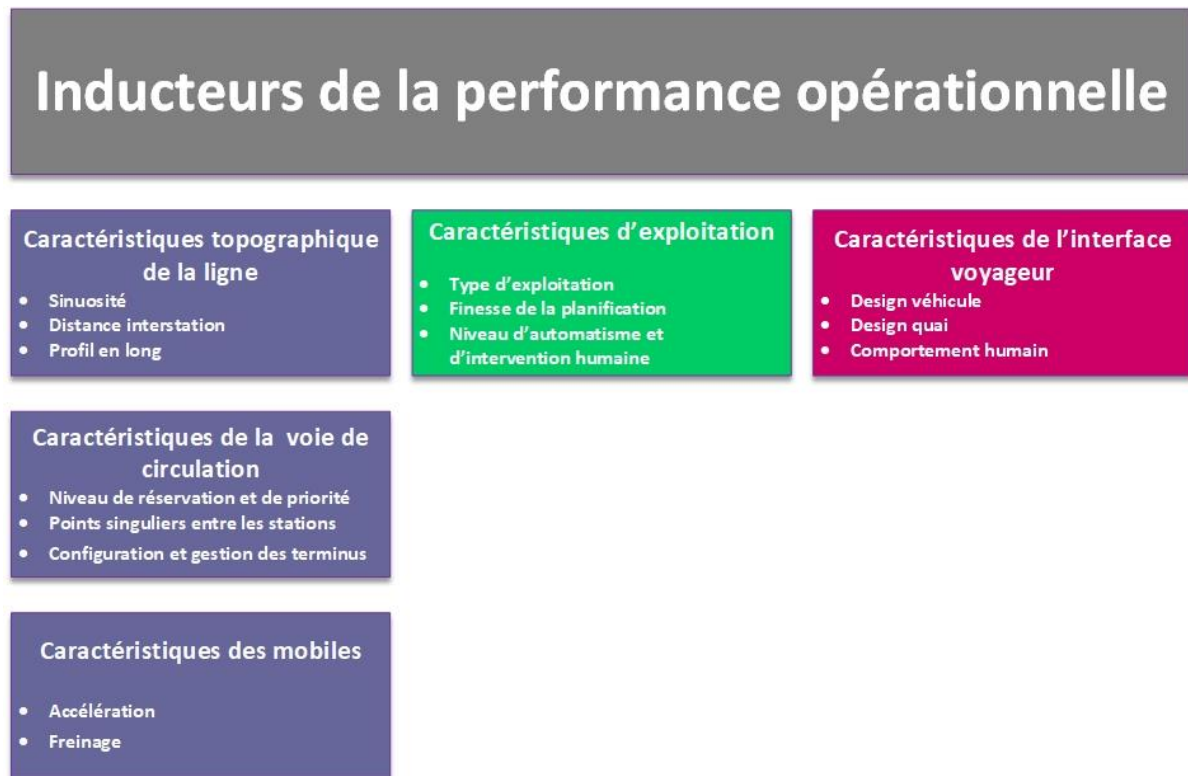


Figure 134: Inducteurs de la performance opérationnelle

Source : Auteur

Nous constatons que les composantes peuvent être liées entre elles et qu'elles s'impactent mutuellement. Les temps d'immobilisation entre les stations de certains mobiles génèrent de la variabilité et peuvent entraîner également une variation du temps de roulage des mobiles suivants. De manière générale, lorsque les intervalles ne sont pas respectés, le problème de répartition de charge apparaît notamment aux heures de pointes. Ce problème de répartition de charge se cumule tout au long de l'itinéraire et peut entraîner des non-prises en compte de la SLT.

Par conséquent, nous constatons que la régularité globale de la ligne repose sur la maîtrise de la variabilité de toutes les composantes du temps de parcours. De plus, un mobile peut être sujet à des effets accumulateurs qui se propagent sur les mobiles suivants. Les mobiles sont donc liés les uns aux autres. La recherche de performance opérationnelle doit s'appréhender dans sa globalité.

6. Conclusion

Au cours du troisième chapitre, nous avons cherché mettre en œuvre l'analyse microscopique des conditions d'exploitation. Nous considérons que l'analyse microscopique, c'est-à-dire la désagrégation du temps de parcours, est nécessaire pour mesurer la performance opérationnelle des systèmes de transport collectif.

Une fois la performance définie et contextualisée, les questions relatives à sa mesure et à la disponibilité de la donnée sont essentielles. Depuis plusieurs décennies, le transport collectif intègre de plus en plus de technologies embarquées au niveau des mobiles. Ces technologies permettent de mettre à disposition de plus en plus de données qui pourraient être également analysées dans le cadre de la performance opérationnelle. La terminologie que nous avons proposée pourrait être complétée et enrichie notamment en fonction de la finesse de la donnée disponible. La liste des indicateurs de la performance opérationnelle se verrait alors élargie.

Notre démonstration permet de constater que la désagrégation du temps de parcours est possible bien que nous ayons dû utiliser deux sources de données différentes. Une donnée est issue d'un système de recueil embarqué à l'intérieur du mobile qui enregistre différents états. L'autre est issue d'un système qui recueille également les états des mobiles via l'infrastructure.

Une fois les différents temps délimités, nous avons proposé une terminologie commune aux différentes données afin de pouvoir comparer les résultats des différents indicateurs de la performance opérationnelle retenus. Nous avons fait le choix de retenir des indicateurs « objectifs » de performance opérationnelle.

La méthode proposée de mise en œuvre de l'analyse microscopique des conditions d'exploitation semble fonctionner. Nous observons, au travers des résultats, qu'il est possible de hiérarchiser les niveaux de performance des systèmes, de classer / caractériser les différentes composantes du temps de parcours et d'identifier des inducteurs.

Nous considérons ce que premier travail d'analyse des composantes du temps de parcours permet de vérifier la faisabilité technique d'une telle mesure de performance mais que chaque composante devrait faire l'objet d'études plus poussées. La composante de l'échange passagers, par exemple, devrait être analysée en prenant en compte plus de systèmes de même catégorie (analyse intra système), en réalisant un lien plus approfondi avec les caractéristiques de l'interface voyageurs et en intégrant les variables de la charge et des mouvements voyageurs.

L'analyse microscopique des conditions d'exploitation démontre que le diagnostic d'un système en vue d'améliorer sa vitesse commerciale et le diagnostic portant sur la régularité sont très proches. La désagrégation des temps de parcours permet de classer les composantes du temps de parcours en « productives » et « improductives ». Une fois ce premier travail réalisé, les objectifs sont d'éliminer les temps improductifs et d'optimiser les temps productifs. Cela permet inévitablement d'augmenter la vitesse commerciale des mobiles et de diminuer le niveau de variabilité du temps de parcours.

Conclusion générale

Un rappel du contexte général

A l'échelle mondiale, l'homme est de plus en plus urbain et la taille des villes ne cessent d'augmenter. Par conséquent, les déplacements urbains se multiplient et ils doivent s'intégrer dans une logique de durabilité en ce qui concerne les externalités relatives aux consommations d'énergie, d'espace ainsi que des nuisances sonores. La mobilité urbaine doit reposer sur un système de transport en site propre, capacitaire et accessible au plus grand nombre. Les transports collectifs doivent répondre à ces exigences pour les villes d'aujourd'hui et de demain.

L'histoire des systèmes de transport collectif montre que la recherche de performance notamment au travers de la vitesse et la capacité est nécessaire pour redistribuer les parts modales au sein d'une aire urbaine. Cette recherche d'augmentation de la performance de système s'est traduite par la réorganisation des espaces de circulation pour les systèmes en surface et la substitution de l'automatisme à la conduite humaine pour les systèmes disposant d'une réservation de type A selon la classification de Vukan R Vuchic (2007).

La réservation d'espace de circulation pour les transports collectifs était obligatoire dans le cadre de la réintroduction du tramway moderne à partir des années 1985. Sans cette réservation, la réintroduction de ce système ferroviaire de surface n'aurait très certainement pas pu obtenir un tel succès aussi bien en tant que système de transport qu'outil pour le réaménagement urbain. Cette réservation sera ensuite étendue à la technique routière avec la mise en œuvre du concept BHNS largement inspiré par le concept BRT américain. Cette réservation de voirie doit être considérée encore aujourd'hui comme un sujet important notamment pour diminuer l'espace dédié à la circulation et au stationnement du transport individuel. Comme nous avons pu le constater, une voie de circulation urbaine multimodale est bien plus capacitaire qu'une voirie dédiée à la circulation automobile tout en étant plus respectueuse de l'environnement.

Le système métro, qui est déjà totalement isolé des autres circulations, continue à se développer en intégrant l'automatisation de la conduite et de la surveillance. Celle-ci arrive, sur le territoire français plus précisément à la RATP, à partir de la moitié du vingtième siècle avec l'arrivée du matériel roulant MP 51. Cette automatisation correspond au pilotage automatique et introduit le degré d'automatisation GoA2. Cette automatisation sera également présente pour l'intégralité du fonctionnement du métro VAL en 1983. Le degré d'automatisation sera alors de type GoA4. Aujourd'hui, les lignes de métro existantes sont modernisées avec davantage d'automatisme et les nouvelles lignes sont directement conçues avec un degré d'automatisation GoA4.

Tout naturellement, cette automatisation des tâches relatives à la conduite humaine pourrait présenter un intérêt pour les systèmes de transport de surface, dans un premier temps pour les mouvements hors clientèle notamment sur les dépôts. Néanmoins, nous devons tout de même préciser que certains automatismes sont déjà présents sur les systèmes BHNS notamment celui de la Métropole de Rouen pour l'accostage des véhicules en station (système de guidage immatériel CIVIS).

La réservation et l'automatisation des systèmes de transport collectif permettent d'augmenter la vitesse, la régularité et donc la capacité offerte. La tendance générale liée au développement des aires urbaines oblige à développer des systèmes capacitaires et rapides. Nous considérons qu'il est important de porter un intérêt aux conditions d'exploitation des différents systèmes de transport collectif en milieu urbain afin d'en comprendre le fonctionnement.

Retour sur les objectifs de la recherche

Au cours de notre travail de recherche, nous avons souhaité mettre en lumière la technique en lien avec l'exploitation des systèmes de transport collectif que nous considérons complexe et peu diffusée. Ce premier travail permet de constater que le sujet du domaine de l'exploitation est peu abordé dans le milieu académique alors que celui-ci devrait être considéré comme essentiel. Il n'existe que peu d'études abordant les sujets des conditions d'exploitation qui devraient pourtant être largement approfondis en vue de mettre en œuvre des systèmes de transports collectifs performants. Notons tout de même l'existence d'un certain nombre d'articles et d'ouvrages techniques rédigés aux cours des années 1970 et 1980. Il est également fort probable que beaucoup de documents existent mais restent confinés chez les exploitants et les opérateurs. Ce type de documentation est généralement considérée comme le savoir-faire de chacun et, de ce fait, peu ou pas diffusée.

Pourtant, la compréhension des éléments clés du fonctionnement des systèmes de transport collectif nécessiterait des études. Cela est d'autant plus important dans un contexte où les réseaux de transport collectifs se développent avec des systèmes nécessitant une exploitation performante afin de répondre à la demande croissante de déplacements.

Nous avons voulu repositionner le caractère technique de l'exploitation. Pour ce faire, nous avons cherché à positionner une performance en lien avec cette technicité que nous avons caractérisée « d'opérationnelle ». La performance opérationnelle correspond à l'évaluation des conditions d'exploitation des systèmes de transport collectif. Pour permettre cette évaluation, nous proposons d'utiliser une analyse microscopique des conditions d'exploitation qui repose sur la désagrégation des temps de parcours afin d'en isoler les différentes composantes. L'analyse des composantes du temps de parcours devrait permettre de comprendre les déterminants de la performance opérationnelle avec pour indicateurs principaux la régularité et la vitesse.

Une performance contextualisée doit être accompagnée de mesure. La mesure nécessite la disponibilité de données ou d'informations. La performance opérationnelle telle que nous la définissons doit être mesurée avec des données particulières qui contiennent des informations précises et détaillées relatives à la variable du temps de parcours.

Les données de type AVL largement présentes sur les réseaux de transport ne sont pas directement utilisables pour analyser la désagrégation du temps de parcours. Les données AVL, qui sont d'une grande utilité notamment pour la localisation des mobiles en temps réel, ne disposent pas d'informations détaillées en lien avec les différents états des mobiles en circulation sur leur infrastructure respective. Par conséquent, nous avons utilisé des données

réelles issue du système EAS Siemens pour le métro VAL et DIALEXIS pour les systèmes de surface.

Au travers de cette démonstration, nous cherchons à mettre à disposition de la communauté technique une base de travail. Cette base doit bien entendu être complétée d'une part par un périmètre de systèmes de transport mesuré plus étendu, et d'autre part par l'intégration de nouvelles données, soit plus détaillées soit complémentaires. La méthode, qui intègre les données et la mesure, doit être apte à contribuer à la formulation et à la résolution du problème considéré : augmenter la performance opérationnelle des systèmes de transport collectif en milieu urbain.

Les futurs résultats toujours basés sur l'utilisation de données réelles doivent servir à alimenter la planification des systèmes, l'amélioration de l'existant ainsi que la conception des nouveaux systèmes.

Les premiers résultats

Les premiers résultats semblent être pertinents. Les chiffres présentent une certaine cohérence d'ensemble. Il est également possible de hiérarchiser les systèmes en fonction du niveau de performance opérationnelle. Le métro GoA4 présente des caractéristiques en adéquation avec ses composantes organique et fonctionnelle.

Les premiers résultats nous permettent également de répondre aux questionnements initiaux que nous avons abordés au cours de notre introduction. L'analyse du contenu des données réelles que nous avons utilisées permet d'identifier des « états » de mobiles identiques aussi bien pour un BHNS que pour un métro GoA4 en passant par le tramway moderne. Il est également possible d'établir une terminologie commune à deux sources de données réelles différentes.

Nous constatons qu'une fois désagrégées, les composantes temps peuvent présenter les mêmes proportions et les mêmes caractéristiques indépendamment de nos terrains d'études. Les composantes du temps de parcours que nous avons caractérisées de « productives » sont des composantes majeures et ayant un impact important sur le temps de parcours notamment à l'échelle de l'itinéraire. Ce constat met en lumière l'importance de prendre en considération certains aspects de l'exploitation, sources d'amélioration de la performance opérationnelle, comme notamment tout ce qui est en relation avec la productivité du déplacement des mobiles entre les arrêts ainsi que les temps d'immobilisation aux arrêts.

Les composantes que nous avons caractérisées « d'improductives » sont des composantes mineures pour l'ensemble de la ligne mais majeures pour certaines interstations. Ces composantes doivent être traitées avec pour objectif de les amener au plus près de zéro seconde.

L'analyse microscopique permet également d'identifier clairement les sources de ces temps improductifs ainsi que les leviers d'optimisation des temps productifs (inducteurs) tels qu'un aménagement de la voie de circulation, un conflit avec la signalisation ou encore l'aménagement d'un quai.

La finalité de notre recherche s'oriente aussi bien vers les exploitants que vers les concepteurs. Nous entendons par « concepteur » tous les acteurs en lien avec la construction du système c'est à dire, l'infrastructure, le matériel roulant et l'intégration urbaine.

Les difficultés pour l'obtention des premiers résultats

Comme nous l'avons précisé, cette première analyse microscopique doit être considérée comme exploratoire. Comme cette approche semble être pertinente, il est essentiel de lister ses difficultés de mise en œuvre, d'approfondir son approche statistique ou encore de compléter les données d'entrée afin d'en perfectionner l'usage.

La disponibilité des données réelles utilisables semble être une difficulté. En effet, peu de réseaux disposent de telles données directement exploitables. Le niveau d'automatisme d'un métro GoA4 doit permettre, après retraitement, de disposer de telles informations. Pour les autres systèmes, notamment ceux de surface avec conducteur, il serait intéressant de réaliser un panorama de données utilisables. En effet, les mobiles rattachés à la technique ferroviaire disposent de centrales tachymétriques qui enregistrent des informations en lien avec le comportement du matériel roulant. On peut également mentionner l'infrastructure qui enregistre également des informations (par exemple les systèmes de priorité aux feux). Après avoir étudié le contenu de la donnée, il est important de porter un intérêt à son extraction. En effet, ces données doivent être disponibles en vue d'être traitées et analysées régulièrement.

Les perspectives et les compléments

L'analyse microscopique des conditions d'exploitation que nous proposons désagrège le temps de parcours en cinq composantes. Une désagrégation encore plus fine serait certainement intéressante notamment au niveau des temps d'arrêt en station pour mesurer par exemple les temps mécaniques nécessaires à l'ouverture et à la fermeture des portes. Cette hausse du niveau de désagrégation doit être accompagnée d'une terminologie élargie.

De manière générale, la terminologie des composantes du temps de parcours devrait faire l'objet d'études complémentaires. Nous avons constaté qu'il existe un premier niveau de terminologie en relation avec l'exploitation mais celle-ci mériterait d'être complétée et officialisée.

Il serait également intéressant de caractériser de manière plus élaborée la nature des distributions des différentes composantes, notamment pour clarifier l'utilisation des différents valeurs de dispersions relatives.

Un travail complémentaire doit également être mené sur le lien entre les indicateurs de performance et l'infrastructure, par exemple le lien entre la vitesse et le coefficient de sinuosité à l'échelle de l'interstation.

La mise en œuvre de l'analyse microscopique des conditions d'exploitation sur différents systèmes de même catégorie (intra-système) et de systèmes de catégories différentes (inter-système) permettrait d'établir un référentiel de la performance opérationnelle (abaque).

L'approche inter-système repose sur une analyse de systèmes de familles différentes, par exemple une ligne d'autobus et une ligne de tramway. Cette approche permet d'analyser (selon des critères définis) des systèmes différents afin de vérifier ou non l'hétérogénéité des résultats. Une représentation des résultats dans un repère devrait permettre de vérifier le positionnement d'une hiérarchie.

L'approche intra-système, quant à elle, repose sur une analyse de système appartenant à la même famille par exemple « ligne d'autobus conventionnelle ». Cette approche permet d'analyser (selon des critères définis) une famille de systèmes afin de vérifier ou non l'homogénéité des résultats. Une représentation des résultats dans un repère devrait permettre de visualiser une ellipse de variation plus ou moins importante. Une surface d'ellipse de variation étendue démontre une disparité de valeurs pour les critères retenus. Néanmoins, l'intuition voudrait que les surfaces d'ellipse de variation soient restreintes.

Une représentation des mesures « inter-système » et « intra-système » devrait permettre de visualiser des ellipses de variation plus ou moins distinctes et plus ou moins étendues en fonction du positionnement du niveau de performance. Les formes des ellipses ainsi que leurs zones de superposition devraient faire l'objet d'études complémentaires.

Dans le cadre de notre démonstration, nous proposons une méthode pour recalculer la variabilité du temps de parcours afin de présenter l'impact des différentes composantes sur la variabilité générale. Il serait nécessaire de proposer une méthode proposant de nouvelles vitesses basées sur un temps de parcours recalculé. Le temps de parcours recalculé devrait tenir compte des composantes improductives et productives. Concernant les composantes productives, il paraît plus difficile d'en soustraire une partie pour recalculer un temps de parcours optimisé. Ces temps, nécessaires à l'exploitation, devraient faire l'objet d'une étude complémentaire permettant de considérer qu'elle pourrait être la part pouvant être soustraite en vue d'améliorer la vitesse commerciale.

Pour compléter l'analyse microscopique des conditions d'exploitation, nous considérons qu'il est important que la donnée de la charge réelle des mobiles soit prise en considération notamment pour affiner l'analyse des temps d'immobilisation en station.

Enfin, la mesure de l'impact de la variabilité du temps de parcours et de ses composantes sur la régularité des intervalles est essentielle notamment pour faire le lien entre les inducteurs de la performance opérationnelle et la capacité des systèmes.

Bibliographie

Addouche, S. Dafaoui EM, El Mhamedi, A. *Identification des relations entre inducteurs et indicateurs de performance des processus d'entreprise. Conception et Production Intégrées*. Casablanca (Maroc), 2005, 17 p.

Abe, N. *Vécus dans les foules tokyoïte et parisienne*. Présentation lors d'une conférence CERTU dans le cadre de la préparation d'un doctorat. 2011, 25 p.

Alexis P. et Delerve O. 1987 : « Val ou Tramway ? A Toulouse et ailleurs, beaucoup plus qu'un choix de technologie ». *Transports Urbains*. Numéro 60, 1987, p. 3-8

Amar, G. « L'optimisation des temps de battement des autobus aux terminus ». *Revue de l'UITP*, 1986, p 35 – 46

Amar, G. Girard, J. « Temps de battement et fiabilité de l'horaire ». *Transport Public*. Numéro 795 p. 42 – 46, numéro 796 p. 45 – 50, 1982.

Ambroise-Rendu, M. « Toulouse, avec les rêves et les cauchemars d'une capitale ». *Le Monde*. 4 mars 1981.

AN J. *Le choix d'un système de transport durable : analyse comparative des systèmes de transport guidé de surface*. Doctorat : Transport. Université Paris Est, 2011, 364 p.

Anderson, RJ. Harris, NG. "An international comparaison of urbain rail boardibg and alighting rates". *Proc. Inst. Mech. Eng. Part F J. Rail and Rapid Transit*. 2007, numéro 221, p. 521 – 526.

AMTUIR. Le musée des transports urbains de France. Disponible sur <https://amtuir.org/>. Consulté en 2015

Baird L., *Managing Performance*, John Willey, 1986.

Baumstark, L. Ménard, C. Roy, W. Yvrande-Billon, A. *Modes de gestion et efficience des opérateurs dans le secteur des transports urbains personnes*. Prédit 3, groupe 1, Mobilités, territoire te développement durable. 2005, 154 p.

Beaucire, F. « BHNS : une déclinaison française à géométrie variable ». *Transports Urbains*, 2006, numéro 109, p. 14

Beaucire, F. « La souplesse : joker ou talon d'achille du TVR ? » *Transports Urbains*. numéro 85, 1994. p. 3 – 6.

Beauvais, JM. Cureau, M. Gradelle. J. Perez, M. Trubert, E. *Les retours d'expériences des choix tramways - BHNS dans les agglomérations françaises*. 2016, 107 p

Beauvais. JM. « Les transports publics urbains sont économes en espace et en énergie ». in-UTP. *Entreprise et politique des transports Publics Urbains*. Nice. 1984. P 14 – 16

Belle, D. « Le cas pionnier d'Evry : un site propre pour autobus dans une ville nouvelle ». *Transports Urbains*. 2006, numéro 109 ; p. 10 - 13.

Bergeron, R. *Le nouveau Tramway : Contribution à la réflexion en cours, concernant un possible retour du tramway dans les rues de Montréal*, Agence métropolitaine de transport (AMT) 2003, 64 p

Bhourri, N. Scemama, G. Mahdavi, H. Tendjaoui, M. Lassarre, S. *INDira-B project INDicators for Reliability and Variability Of Bus*. Huitième anniversaire de la chaire ENPC-IDFM. 11 février 2019. Cité Descartes, Champs-sur-Marne, 32 p.

Bigey, M. « Le retour du tramway en France, 1973 – 1990 ». In- Gardon S. (dir.) *Quarante ans de tramways en France*. Lyon : Libel, 2018, 507 p

Bigey. M. « Problèmes posés par le tramway dans les villes françaises ». *Transports Urbains*, 1975, numéro 31, p. 17 – 28

Bonnafous, A. « Le choix entre voiture et transport collectif ». In Institut des villes. *Villes et économie*. La documentation française. 2004. p.185 – 206

Bonnefous, C. and A. Courtois. *Indicateurs de performance*. Paris, Hermès Science. 2011. 282 p

Bourguignon, A. « Peut-on définir la performance ? », *Revue Française de Comptabilité*, juillet-août 1995, p. 61-66.

Bouquin H., *Le contrôle de gestion*, PUF, Collection Gestion, 6^{ème} édition, Paris, 2004, 508 p.

Bousquet, D. Lhomet, E. Rouffet, JM. « La structuration des réseaux de province, quelles réponses à leur saturation ? Le cas de l'agglomération bordelaise ». *TEC*, 2009, numéro 203, p 44 – 50.

Casumet.F. « Metz, la pointe de 08h00 ». *TEC* numéro 44 janvier 1981, pp 20-21

Cerema. *Référentiel pour le choix des systèmes de transports collectifs à haut niveau de service*. 2018, 39 p

Certu. *BRT nord-américain / BHNS français*. Paris : Certu, 2011, 9p

Certu. *Bus à Haut Niveau de Service : du choix du système à sa mise en œuvre*. Lyon : Certu, 2009, 160 p

Certu. *Comprendre le trafic routier : Méthodes et calculs*. CERTU. Lyon : 2010, 114 p

Certu. *Tramway et Bus à Haut Niveau de Service (BHNS) en France : domaines de pertinence en zone urbaine*, CERTU, Lyon : 2009, 11p

Certu. *Evaluation socio-économique pour les projets TCSP*. Certu. Lyon, 2002, 147 p

CGEDD. *Mission de diagnostic et de prospective sur les réseaux de transports urbains de Caen et Nancy*. 2010. 68 p

Clément, L. *Offre intermédiaire et organisation hiérarchique des réseaux de transports collectifs urbains*. Doctorat : Economie des transports. Université Lyon 2, 1995, 538 p.

Comité des constructeurs français d'automobiles. <https://ccfa.fr/> (consulté juillet 2017)

Cour des comptes. *Les transports publics urbains de voyageurs : un nouvel équilibre à rechercher*. Rapport annuel 2015. p 261 – 320

Courtois, X. Dobruszkes, F. « L'(in)efficacité des trams et bus à Bruxelles : une analyse désagrégée ». *Brussels Studies*, numéro 20, 2008, 24 p

Coxon S, Burns, K., De Bono, A. Napper, R. "The effect of suburban train carriage design upon punctuality, ingress and egress occlusion and passenger comfort". *Australasian Transport Research Forum*. 2009. 11p.

Coxon, S., Sarvi, M., Shiwakoti, N. "Evaluating passenger dispersal in metro train carriages through a pedestrian crowd modelling simulation". *Annual Meeting Compendium of Papers*. Norman, M. R. (ed.). Washington D.C. USA: Transportation Research Board, p. 1 – 12 (2012)

COST TU0603 BHNS – Caractéristiques fondamentales et recommandations pour la prise de décision et la recherche. Paris : CERTU, 2011, 224 p

CPT / UTPUR. *Les transports collectifs et la ville*. Paris. CELSE. 1973

Cure, C. Faivre d'Arcier, D. « Irrégularité et régulation des autobus ». IRT, rapport 1980, 41p

Debano, P. « Les transports de l'agglomération nancéienne : évolution et perspectives ». *Stadtverkehr*. Numéro 44, 1999, p. 9-16.

Debano, P. « TVR : Moderniser ou remplacer ? » *Stadtverkehr*. Numéro 57, 2012, p. 34-36

Debrincat, L., Meyère A. (1998). *L'aide multicritère à la décision : « Des potentialités pour l'évaluation des projets de transport collectif en Ile-de- France »*, *METROPOLIS*. 1998. Numéro 106-107, p 57-67.

Démoulin, B. & Salmer, G. « Le parcours scientifique du professeur Robert Gabillard : de la résonance magnétique nucléaire au métro VAL ». *Les nouvelles d'Archimède*. 2010, Numéro 53, p. 49 – 52.

Doras, JL. Irrégularité des autobus en temps d'attente des voyageurs. TEC, 1979, numéro 33, p 13 – 21.

Dupuy, X. « Les enjeux liés au maillage des réseaux tramway ». *Transports Urbains*. 2016, numéro 129, p. 21 – 25

Durand, D. *La systémique*. PUF, collection Que sais-je ?, Paris, 2013, 128 p.

Eichler et Daganzo, "Bus lanes with intermittent priority : strategy formula and an evaluation". *Transportation Research Part B: Methodological*, 2006, 40(9): p 731–744

Emangard. P-H : « Du tramway au tramway : l'histoire de Dijon, Reims, Angers et Le Havre en quatre livres ». *Transports urbains*. 2015, numéro 126, p. 21 – 27

Emangard, PH. « Les tramways en Europe : une vision diachronique ». *Transports Urbains*, 2012, numéro 120, p. 3 – 8

ENERTRANS. *Consommation d'espace des différents modes de transport urbain. Phase 1 ; Recherche méthodologique*. Paris, 1982, 29 p.

Extrait conférence Association pour l'histoire des chemins de fer et de l'UMR AUSser n° 3329 / CNRS. *Le tramway, entre incertitudes et tergiversations : le projet victime du jeu des acteurs*. Février 2015.

Faivre d'Arcier, B. *Mesure de la performance des lignes de transport public urbain. Projet APEROL. Amélioration de la Performance Economique des Réseaux par l'Optimisation des Lignes*. 2012, 103 p.

Foot, R. « Automatisation du métro et qualité de service ». *Cahiers du GDR Réseaux*, 1988, 11, p. 36 – 59.

Frébault J. « Tramway ou métro ? Débats techniques et hésitations politiques autour du projet de métro léger à Toulouse dans les années 1970 », In- Gardon S. *Quarante ans de tramways en France*. Lyon : Libel, 2018, 507 p.

Froloff, E, Rizzi, M, Saporito, A. *Bases et pratiques de la régulation*. RATP, 1989, 174 p.

Gauzente, C. « Mesurer la performance des entreprises en l'absence d'indicateurs objectifs : quelle validité ? Analyse de la pertinence de certains indicateurs ». *Finance Contrôle Stratégie – Volume 3, N° 2, juin 2000*, p. 145 – 165.

Gibert, P. *Le contrôle de gestion dans les organisations publiques*. Paris : Editions d'Organisation, 1980, 239 p.

Girard, J. Heurgon, E. Cornet, N. Doras, JL. « Les études sur l'irrégularité des lignes d'autobus ». D.I RATP, 1981, pp 5-12

Godon et Crespolini : *Métrobus : un métro léger pour l'agglomération rouennaise : de l'idée à la mise ne service*. Editions La vie du rail. Paris, 1995, 190 p

Hall R.H, « Effectiveness Theory and Organizational Effectiveness », *The Journal of Applied Behavioral Science*, 1980, vol. 16, p. 536-545.

Héran, F. « Le retour mouvementé du tramway à Strasbourg (1971 – 1994) : vingt ans de débats ». In- Gardon S., *Quarante années de tramways en France*. Lyon : LIBEL, 2018, 507 p.

Heurgon, E. « Modéliser une ligne d'autobus pour mieux comprendre les phénomènes d'irrégularité ». *Revue française d'automatique, d'informatique et de recherche opérationnelle. Recherche opérationnelle*, 1981, tome 15, n° 4, p. 305-316.

IGD et AMF. *Charte des services publics locaux. Indicateurs de performance des services de transport public*. 2008, 66 p

IUTP. *Statistics brief : World report on métro automation*. 2016. 6p

IUTP. *World metro figures: Statistics brief_2018*. 2018. 8p

IUTP. *World metro figures: Statistics brief 2014; Outlook and focus on automated lines*. 2015. 6p

Juge, J. « Bogota, une ville métamorphosée par TransMilenio ». *Transports Urbains*. 2006, numéro 109, p. 3 – 6

Quidrot, M. « Transport publics : tendances mondiales ». *Transports Urbains*, 1991, numéro 71, p 13 – 18

Kathrin, A. *Evaluation of Dynamic Bus Lanes in Zurich*. Master Thesis Civil Engineering. ETH Zurich. 2014. 89 p

Krakovitch, A. *Metropolitain*. SENS. Paris : Débats Pubics, 2019, 183 p.

Keolis Conseil et Projets. *Fonctionnement général du VAL*. 2015. 66 p.

Labbouz, S. *Le choix du tracé d'une ligne de transport en commun en site propre et de la position de sa plateforme en milieu urbain : l'utilisation des outils mathématiques au service de la concertation*. Doctorat : Génie Urbain. Université Paris Est, 2008, 442 p.

Lacaze, JP. *Les méthodes de l'urbanisme*. Que sais-je ? Paris : PUF, 2010, 126 p.

Laisney, F., Grillet-Aubert, A. *Tramways, espaces publics et mobilité*. Rapport de recherches, Paris, IPRAUS, 2006, 167 p.

Le Gal, Y. *Voirie urbaine : un patrimoine à réhabiliter ? : Enseignements de Nantes*. PREDIT. Paris. 2002. 86 p.

Le Moigne, JL. *La théorie du système général*. PUF. Paris, 1977, 258 p.

Lucas, F. Nerot, A. « Indicateurs de qualité de service des lignes du réseau d'autobus de la RATP ». *TEC* numéro 34/35, 1979

Marchand, L. *Qu'est-ce que la mobilité ?* Métropolis, 1977, 24-25, p 51 – 54

Marchand. L. « Un concept fécond : la consommation d'espace-temps ». *Les cahiers scientifiques de la revue Transport*. 1984, numéro 10 p 55 – 63

Macheras, J. « La capitale des autos ». *Transports Urbains*. 1988, numéro 65. p. 3

Marconis, R. « Evolution des transports urbains de Toulouse, acteurs et enjeux ». *Transports Urbains*. Numéro 60, 1987, p. 9-14.

Marielle, E. « Mesure des temps de parcours et des temps de battement des lignes d'autobus de la RATP ». *Transport Public* numéro 797, 1982 pp 8-14

Marion A., Asquin A., Everaere C., Vinot D., Wissler M., *Diagnostic de la performance d'entreprise, Concepts et Méthodes*, Dunod, 2012, 304 p.

Maupu, JL., « Comment choisir un système de transport collectif en site propre (TCSP) de surface ». *Transports Urbains*, 2003, numéro 105, p. 11-19

Maupu, JL. *La ville creuse pour un urbanisme durable*. L'harmattan, 2006, 178 p

Merlin, P. *L'urbanisme*. Que sais-je ? Paris : PUF, 2010, 126 p

Merlin, P. *Les transports en région parisienne*. La documentation française. Paris : 1997, 202 p

Michel Y. « Le métro de Marseille ». *Transports Urbains* 1980, n°45, pages 23-32

Midgley, P & Bigey, M. « L'autobus en site propre ». *Transports Urbains*. 1976, numéro 34, p. 35 - 44

Munch, E. « L'harmonisation des horaires de travail : en finir avec l'heure de pointe ? » *Métropolitiques*, 2014, URL : <http://www.metropolitiques.eu/L-harmonisation-deshoraires-de.html>.

Mumford, L. *La cité à travers l'histoire*. Seuil. Paris, 1964, 781 p

Nau, O. « L'insertion des tramways en milieu urbain, entre desserte, vitesse et régularité ». In-Gardon S., *Quarante années de tramways en France*. Lyon : LIBEL, 2018, 507 p.

NEROT, A. « Le comptage des voyageurs par tapis contact à la RATP ». *Transport Public*. 1982, numéro 792, pp 39-45

Notat NN. «une question centrale», *Acteurs de l'Économie*, dossier spécial Performance, octobre 2007, p. 72.

Pérez, M. Guérin, F. Développement des réseaux, développement du cadencement ? *Le Rail*. 2002, numéro 96, p26 - 29

Poupard, X. *Méthodes d'exploitation : Etablissement des tableaux de marches, gestion des conducteurs*. SCET, 1982, 164 p.

Réseau le mag « Au cœur des grande métropole, le Mass Transit » Réseau le mag; le magazine de SNCF réseau. numéro 5, 2018. p3

Rives.M : « Le semi-métro de Hanovre ». *Transports urbains*. 1976, numéro 36, p. 23 - 28

Robert, J. *Histoire des transports dans les villes de France*. Paris : Fabre, 1974, 529 p.

Robert, J. *Notre Métro*, éditions OMNES & Cie, Paris 9ième, 1967. 304 p.

Robert. J. « L'évolution du tramway ». *Transport Urbains*, 1975, numéro 31, p. 11 - 16

Scherrer.P : *Nouveaux métros en Allemagne Fédérale*. Traduit par R. Falligan – Devergne. Association Lyon Métro. 1970

SIEMENS. *Le projet NeoVal : Une innovation dans les systèmes de transport urbains de voyageurs*. 2006. 17 p.

Silvardière, J. « L'automobile au service des citoyens ». *Transports Urbains*. 1980, numéro 43. p. 5- 17

Spinetta, J-C. *L'avenir du Transport ferroviaire : Rapport au premier ministre*. 2018, 127 p.

Soulas, C., « Transports guidés urbains et innovation technologique : la recherche de solutions nouvelles ». *Transports Urbains*, 1989, numéro 66, p. 5 – 16

Soulas, C., « Les transports guidés sur pneu dits « systèmes intermédiaires » dans le contexte de l'innovation en transport collectif urbain ». *Transports Urbains*, 2003, numéro 105, p 3-10

STIF. *Désaturation de la ligne 13 du métro par le prolongement de la ligne 14 – Bilan de la concertation et orientation pour le dossier d'enquête publique*. 2010.118 p

STIF. *Guide technique des systèmes de priorité bus aux carrefours à feux*. 2011. 166 p

STIF, Rand Europe, Stratec SA. *Enquêtes qualitatives et quantitatives visant à évaluer les projets de fiabilisation des radiales ferrées en Ile-de-France – Phase 1*. 2004. 50 p

STIF – RATP – DAT. *Etude de désaturation de la ligne 13 - Rapport principal*. 2007. 170 p

STRMTG. Service Technique des Remontées Mécaniques et des Transports Guidés. www.strmtg.developpement-durable.gouv.fr (consulté en août 2018)

Sueur, JP. Rapport d'information Villes du futur, futur des villes Quel avenir pour les villes du monde ? Tome 1 : Enjeux. Numéro 594. 2011, 321 p

TCRP. *Transit Capacity and Quality of Service Manual*. Washington. D.C., TRB, 2003

Trans'Lille. <http://www.translille.com/>. (Consulté en août 2018)

Transportation Research Board ; *HCM 2000 : Highway Capacity Manual*. Washington, D.C, 2000, 1207 p. Première édition en 1950. Nouvelles publications en 1965, 1985, 2000, 2010 et 2016.

Tricoire, J. *De Bienvenüe à Météor. Un siècle de métro en 14 lignes*. Paris : La Vie du Rail, 1999. 351 p.

UTP. *Le BHNS Bus à haut niveau de service*. Département Clientèle, Exploitation et Recherche. Paris, 2006, 2 p.

Viegas, J. and B. Lu. "Widening the scope for bus priority with intermittent bus lanes". *Transportation Planning and Technology*, 2001. 24(2), p 87-110

Viennet, R. *Curitiba, la ville qui a inventé le bus à haut niveau de service*. Mobilicite.com. 2014. Disponible sur <http://www.mobilicites.com/011-2577-Curitiba-la-ville-qui-a-invente-le-bus-a-haut-niveau-de-service.html>

Vukan R, Vuchic. *Urban Transit systems and technology*. Wiley, New York : 2007, 624 p.

Waldmann R. : *La grande traboule*, Lyon : Editions lyonnaises d'art et d'histoire, 1991, 243 p.

Wartel, A. « Essor et potentialités des BRT – BHNS ». *Transports Urbains*, 2006, numéro 109, p. 7 – 9

Wawestone. *World's best driverless métro lignes 2017 : Etude du marché du métro automatique et benchmark de la performance des réseaux*. 2017; 103 p

Weston, J. G. *Train service model – technical guide*. London Underground operational research note 89/18, 1989

Xie. X. *Étude et modélisation des couloirs de bus dynamiqués*. Thèse de doctorat. Génie Civil. École Nationale des Travaux Publics de l'État. 2013. 197 p.

Zalkind, S. « Préface ». In- Gardon S. (dir.), *Quarante ans de tramways en France*. Lyon : Libel, 2018, 507 p.

Zembri, P. « La conception des transports collectifs en site propre (TCSP) en France : des tracés problématiques ? » *Revue Géographique de l'Est*, vol. 52 / 1-2 | 2012, mis en ligne le 04 février 2013, URL : <http://rge.revues.org/360>

Liste des figures

Figure 1 : Classification des TCSP de surface en fonction des caractéristiques de guidage	18
Figure 2 : La vision systémique du BHNS.....	26
Figure 3 : Comparaison entre BRT et BNHS	27
Figure 4 : Comparaison entre lignes conventionnelles et lignes structurantes.....	28
Figure 5 : Diagramme du TVR	30
Figure 6 : Système CIVIS	31
Figure 7 : Enchaînements des techniques de transports utilisées.....	40
Figure 8 : Vue d'un essieu de voiture VAL 208	48
Figure 9 : Description des voies VAL.....	48
Figure 10 : Caractéristiques principales du véhicule de type 208.....	49
Figure 11 : Description des organes de roulement des véhicules de type 208.....	50
Figure 12 : Description de l'automatisme VAL	51
Figure 13 : Niveaux d'automatisation des transports guidés.....	53
Figure 14 : Nombre de km de lignes de métros automatiques réalisés et projetés	54
Figure 15 : Evolution du parc automobile français de 1900 à 2011	56
Figure 16 : Place de l'Etoile à Paris vers 1930.....	57
Figure 17 : Variation de la vitesse moyenne des usagers en fonction de la répartition modale	58
Figure 18 : Classification AMT	62
Figure 19 : Classification de Vukan R Vuchic (2007).....	63
Figure 20 : <i>Inévitablement quelqu'un doit céder sa place</i>	64
Figure 21 : Exemple d'aménagement bilatéral.....	66
Figure 22 : Exemple d'aménagement unilatéral	66
Figure 23 : Exemple d'aménagement axial.....	67
Figure 24 : Processus de fonctionnement de l'IBL	70
Figure 25 : Processus de fonctionnement du BLIP classique	71
Figure 26 : Processus de fonctionnement du BLIP libéral	71
Figure 27 : Classification des systèmes de transport public en fonction de leur débit	74
Figure 28 : Formule pour le calcul de la consommation d'espace en stationnement.....	76
Figure 29 : Formule pour le calcul de la consommation d'espace en circulation.....	76
Figure 30 : Formule de la consommation d'espace totale.....	76
Figure 31 : Consommation d'espace selon les modes de déplacement en heure de pointe : le cas de Bourges..	78
Figure 32 : Représentation du diagramme fondamental du trafic routier en liant concentration et débit.....	81
Figure 33 : <i>Représentation du diagramme fondamental du trafic routier</i>	82
Figure 34 : Représentation graphique de la définition de la systémique.....	100
Figure 35 : Les composantes de la modélisation d'un système de transport collectif.....	101
Figure 36 : Schéma d'un système de transport : Vue de la régulation.....	102
Figure 37 : Evolution du fonctionnement d'un système de transport au cours d'une période donnée	104
Figure 38 : Proposition d'une schématisation d'un système de transport collectif	105
Figure 39 : Triangle de la performance.....	109
Figure 40 : Relation entre efficacité productive et efficacité commerciale	112
Figure 41 : Répartition des V/K (moyenne en noir, minimum en rouge et maximum en jaune) en fonction de la taille de l'agglomération.....	113
Figure 42 : Schématisation de la performance économique d'un système de transport.....	117
Figure 43 : Schéma des définitions de Poupard, X. 1982.....	119
Figure 44 : Schéma des définitions UTP 1988.....	120
Figure 45 : Prévision à l'aide d'un modèle de simulation ou recueil de données de comptage donne les informations suivantes.....	122
Figure 46 : La détermination de temps de parcours théorique.....	123
Figure 47 : Exemple de graphique à pente variable	129
Figure 48 : Exemple de graphique à pente constante	130
Figure 49 : Tableau de marche d'une ligne d'autobus du réseau de Toulouse en 1982.....	131
Figure 50 : Tableau de marche d'une ligne de tramway en 2015.....	131
Figure 51 : Exemple de description d'une course théorique pour un métro automatique type VAL.....	132
Figure 52 : Exemple de tableau de marche pour un métro automatique type VAL.....	132
Figure 53 : Représentation 3D de la charge cumulée par tranche horaire et par interstation	142
Figure 54 : Capacité cumulée par tranche horaire et par interstation	143

Figure 55 : Nuage de points de temps de parcours : relevé des temps de parcours sur un système tramway (2014).....	146
Figure 56 : Temporalité de la vitesse commerciale et de l'irrégularité sur le réseau STIB en 2006 (semaine entre 6h00 et 23h00 par tranche de 30 minutes)	147
Figure 57 : Table de dimensionnement du temps de battement.....	150
Figure 58 : Représentation de la distribution de la variable « temps de parcours ».....	151
Figure 59 : Positionnement des parts avance / retard en relation avec la distribution	152
Figure 60 : Représentation de la fiabilité de l'horaire.....	153
Figure 61 : Schématisation de l'analyse de la fréquentation	157
Figure 62 : Diagramme de charge manuel (valeur moyenne pour un départ théorique)	159
Figure 63 : Représentation graphique de la charge cumulée par interstation pour l'ensemble des départs théoriques pour une direction.....	160
Figure 64 : Arrivées des voyageurs et des trains à Villepreux-les-Clayes.....	164
Figure 65 : Arrivées des voyageurs à Laplace	164
Figure 66 : Schématisation des états de glissement et de déséquilibre.....	167
Figure 67 : Itinéraire de la ligne 4 du BHNS de Nantes	177
Figure 68 : Itinéraire de la ligne 1 du tramway de Montpellier	179
Figure 69 : Itinéraire de la ligne A du métro de Toulouse	181
Figure 70 : Schématisation d'une exploitation optimale	184
Figure 71 : Exemple de mesures de terrain DIALEXIS.....	186
Figure 72 : Vitesse commerciale (axe des coordonnées) en fonction de la vitesse maximale et de l'espacement	187
Figure 73 : Exemple de donnée EAS	192
Figure 74 : Modification de l'organisation de la donnée, de l'infrastructure à la course	192
Figure 75 : Equivalence des terminologies EAS et DIALEXIS	196
Figure 76 : Schématisation spatiale et temporelle de l'analyse microscopique des conditions d'exploitation	199
Figure 77 : Exemple de feux R17 avec SAC.....	202
Figure 78 : Matériel Citaro G 4 portes de la ligne 4.....	203
Figure 79 : Distribution du temps de parcours de Porte de Vertou vers Foch	205
Figure 80 : Distribution du temps de parcours de Foch vers Porte de Vertou	205
Figure 81 : Nuage de points des temps de parcours de Porte de Vertou vers Foch.....	206
Figure 82 : Nuage de points des temps de parcours Foch vers Porte de Vertou	206
Figure 83 : Parts relatives des composantes (%) de la ligne 4.....	212
Figure 84 : Niveau de variabilité des composantes (%) de la ligne 4.....	213
Figure 85 : Les coefficients de variation des temps de parcours.....	215
Figure 86 : Matrice de la vitesse commerciale de Porte de Vertou vers Foch Cathédrale	216
Figure 87 : Matrice de la vitesse commerciale de Foch Cathédrale vers Porte de Vertou	217
Figure 88 : Matrice de coefficient de variation de Porte de Vertou vers Foch Cathédrale.....	218
Figure 89 : Matrice de coefficient de variation de Foch Cathédrale vers Porte de Vertou.....	218
Figure 90 : Schématisation de l'interstation Beaulieu vers Ile de Nantes.....	219
Figure 91 : R17 avec SAC station Beaulieu	221
Figure 92 : Schématisation de l'interstation Cité internationale vers Duchesse Anne.....	222
Figure 93 : Schématisation de l'interstation Duchesse Anne vers Foch	224
Figure 94 : Traversée axe fort (ligne 1 de tramway)	226
Figure 95 : Voie de circulation mutualisée avec feux tricolores	226
Figure 96 : Schématisation de l'interstation Foch vers Duchesse Anne	227
Figure 97 : Schématisation de l'interstation Beaulieu vers Grèneraie.....	229
Figure 98 : Relève conducteur à la station Grènerais.....	231
Figure 99 : Schématisation de l'interstation Joliverie vers Château Verni.....	232
Figure 100 : Marquage sur voirie	234
Figure 101 : Exemples de signalisation ferroviaire et de SLT	236
Figure 102 : le matériel CITDIS TGA 401 circulant sur le ligne 1	238
Figure 103 : Distribution du temps de parcours de Mosson vers Odysseum	240
Figure 104 : Distribution du temps de parcours de Odysseum vers Mosson	240
Figure 105 : Nuage de points des temps de parcours de Mosson vers Odysseum	241
Figure 106 : Nuage de points des temps de parcours d'Odysseum vers Mosson	241
Figure 107 : Parts relatives des composantes (%) de la ligne O1	248
Figure 108 : Niveau de variabilité des composantes (%) de la ligne O1	248

<i>Figure 109 : Les coefficients de variation des temps de parcours</i>	251
Figure 110 : Matrice de la vitesse commerciale de Mosson vers Odysseum	252
Figure 111 : Matrice de la vitesse commerciale d'Odysseum vers Mosson	253
Figure 112 : Matrice de coefficient de variation de Mosson vers Odysseum.....	254
Figure 113 : Matrice de coefficient de variation d'Odysseum vers Mosson.....	254
Figure 114 : Schématisation de l'interstation Louis Blanc vers Corum (nouveau réseau).....	255
Figure 115 : Schématisation de l'interstation Gare St-Roch vers Du Guesclin.....	258
Figure 116 : Tramway de la ligne 1 positionné au point de limite de priorité (PLP)	260
Figure 117 : Shématisation de l'interstation Place de l'Europe vers Rives du Lez	261
Figure 118 : Tramway de la ligne 1 en station Place de l'Europe en direction d'Odysseu	263
Figure 119 : Tramway de la ligne 1 au pied du feu 124	263
Figure 120 : Schématisation de l'interstation Port Marianne vers Moularès.....	264
<i>Figure 121 : Tramway de la ligne 1 au pied du signal de manœuvre quelques mètres avant la station Rive du Lez</i>	266
Figure 122 : VAL 208 Toulouse.....	269
Figure 123 : Distribution des temps de parcours de Balma Gramont vers Basso Cambo.....	271
Figure 124 : Distribution des temps de parcours de Basso Cambo vers Balma Gramont.....	271
Figure 125 : Nuage de points des temps de parcours de Balma Gramont vers Basso Cambo	272
Figure 126 : Nuage de points des temps de parcours Basso Cambo vers Balma Gramont.....	272
Figure 127 : Parts relatives des composantes (%) de la ligne A	277
Figure 128 : Niveau de variabilité des composantes (%) de la ligne A	277
<i>Figure 129 : Les coefficients de variation des temps de parcours</i>	279
Figure 130 : Matrice de la vitesse commerciale de Balma Gramont vers Basso Cambo	280
Figure 131 : Matrice de la vitesse commerciale de Basso Cambo vers Balma Gramont	281
Figure 132 : Matrice de coefficient de variation de Balma Gramont vers Basso Cambo	282
Figure 133 : Matrice de coefficient de variation de Basso Cambo vers Balma Gramont.....	282
Figure 134: Inducteurs de la performance opérationnelle.....	293

Liste des tableaux

Tableau 1 : Analyse comparative entre le tramway des années 1950 et le tramway « moderne ».....	36
Tableau 2 : Avantages / inconvénients des trois implantations majeures	68
Tableau 3 : Rapport entre le coût et le débit en voyageur pour différents types d'infrastructure	74
Tableau 4 : Consommation d'espace par personne pour un déplacement	77
Tableau 5 : Les conceptions de la performance et les dimensions à mesurer	108
Tableau 6 : Exemples d'indicateurs de performance pour le transport public	111
Tableau 7 : Capacités théoriques et réelles des différents types de véhicules.....	136
Tableau 8 : Détermination des fréquences sur la ligne (en minutes).....	136
Tableau 9: Description des densités voyageurs (métro de Tokyo).....	138
Tableau 10 : Représentation matricielle du comptage pouvant intégrer soit des montées soit des descentes ou les deux	158
Tableau 11: Caractéristiques des gares sélectionnées	162
Tableau 12 : Résultat des comportements vis-à-vis de l'horaire en fonction de la fréquence et de la régularité.	163
Tableau 13 : Temps passé en gare et sur les quais en fonction du type de voyageurs (visant l'horaire ou aléatoire).....	165
Tableau 14 : Caractéristiques de la ligne 4.....	178
Tableau 15 : Caractéristiques de la ligne 1	180
Tableau 16 : Caractéristiques de la ligne A	182
Tableau 17 : Nombre d'interstations par classe de distance sur la ligne 4.....	200
Tableau 18 : Répartition des distances sur la ligne 4	201
Tableau 19 : Synthèse des résultats de l'analyse topographique ligne 4.....	202
Tableau 20 : Synoptique du mobile de la ligne 4.....	203
<i>Tableau 21 : Valeurs des composantes du temps de parcours pour l'ensemble de la journée</i>	<i>208</i>
<i>Tableau 22 : Valeurs des composantes du temps de parcours pour l'ensemble de la journée</i>	<i>208</i>
Tableau 23 : Valeurs des composantes du temps de parcours entre 07h00 et 09H00.....	209
Tableau 24 : Valeurs des composantes du temps de parcours entre 07h00 et 09H00.....	209
Tableau 25 : Valeurs des composantes du temps de parcours entre 16h30 et 19H00.....	211
Tableau 26 : Valeurs des composantes du temps de parcours entre 16h30 et 19H00.....	211
Tableau 27 : Impact des composantes du temps de parcours pour l'ensemble de la journée	214
Tableau 28 : Impact des composantes du temps de parcours pour l'ensemble de la journée	214
Tableau 29 : Valeurs des composantes du temps de parcours pour l'ensemble de la journée	220
Tableau 30 : Impact des composantes du temps de parcours pour l'ensemble de la journée	220
Tableau 31 : Valeurs des composantes du temps de parcours pour l'ensemble de la journée	222
Tableau 32 : Impact des composantes du temps de parcours pour l'ensemble de la journée	223
Tableau 33 : Valeurs des composantes du temps de parcours pour l'ensemble de la journée	225
Tableau 34 : Impact des composantes du temps de parcours pour l'ensemble de la journée	225
Tableau 35 : Valeurs des composantes du temps de parcours pour l'ensemble de la journée	228
Tableau 36 : Impact des composantes du temps de parcours pour l'ensemble de la journée	228
Tableau 37 : Valeurs des composantes du temps de parcours pour l'ensemble de la journée	229
Tableau 38 : Impact des composantes du temps de parcours pour l'ensemble de la journée	230
Tableau 39 : Valeurs des composantes du temps de parcours pour l'ensemble de la journée	233
Tableau 40 : Impact des composantes du temps de parcours pour l'ensemble de la journée	233
Tableau 41 : Nombre d'interstations par classe de distance sur la ligne 1.....	235
Tableau 42 : Répartition des distances sur la ligne 1 en valeur relative	235
Tableau 43 : Synthèse des résultats de l'analyse topographique de la ligne 1	237
Tableau 44 : Synoptique du véhicule-type de la ligne 1.....	238
Tableau 45 : Valeurs des composantes du temps de parcours pour l'ensemble de la journée	243
Tableau 46 : Valeurs des composantes du temps de parcours pour l'ensemble de la journée	243
Tableau 47 : Valeurs des composantes du temps de parcours entre 07h00 et 09H00.....	245
Tableau 48 : Valeurs des composantes du temps de parcours entre 07h00 et 09H00.....	245
Tableau 49 : Valeurs des composantes du temps de parcours entre 16h30 et 19H00.....	246
Tableau 50 : Valeurs des composantes du temps de parcours entre 16h30 et 19H00.....	246
Tableau 51 : Impact des composantes du temps de parcours pour l'ensemble de la journée dans le sens Mosson - Odysseum	250
Tableau 52 : Impact des composantes du temps de parcours pour l'ensemble de la journée dans le sens Odysseum - Mosson	250

Tableau 53 : Valeurs des composantes du temps de parcours pour l'ensemble de la journée	256
Tableau 54 : Impact des composantes du temps de parcours pour l'ensemble de la journée	256
Tableau 55 : Tramway de la ligne 1 réalisant son « échange passagers » en station Corum.....	257
Tableau 56 : Valeurs des composantes du temps de parcours pour l'ensemble de la journée	259
Tableau 57 : Impact des composantes du temps de parcours pour l'ensemble de la journée	259
Tableau 58 : Valeurs des composantes du temps de parcours pour l'ensemble de la journée	262
Tableau 59 : Impact des composantes du temps de parcours pour l'ensemble de la journée	262
Tableau 60 : Valeurs des composantes du temps de parcours pour l'ensemble de la journée	265
Tableau 61 : Impact des composantes du temps de parcours pour l'ensemble de la journée	265
Tableau 62 : Nombre d'interstations par classe de distance sur la ligne A du VAL de Toulouse	267
Tableau 63 : Répartition des distances ligne A, en valeur relative	268
Tableau 64 : Synthèse des résultats de l'analyse topographique ligne A	268
Tableau 65 : Résultats de l'analyse des caractéristiques véhicules ligne A.....	269
Tableau 66 : Valeurs des composantes du temps de parcours pour l'ensemble de la journée dans le sens Balma – Basso Cambo	274
Tableau 67 : Valeurs des composantes du temps de parcours pour l'ensemble de la journée dans le sens Basso Cambo - Balma	274
Tableau 68 : Valeurs des composantes du temps de parcours entre 07h00 et 09H00 dans le sens Balma – Basso Cambo.....	275
Tableau 69 : Valeurs des composantes du temps de parcours entre 07h00 et 09H00 dans le sens Basso Cambo - Balma	275
Tableau 70 : Valeurs des composantes du temps de parcours entre 16h30 et 19H00 dans le sens Balma – Basso Cambo.....	276
Tableau 71 : Valeurs des composantes du temps de parcours entre 16h30 et 19H00 dans le sens Basso-Cambo - Balma	276
Tableau 72 : Impact des composantes du temps de parcours pour l'ensemble de la journée, sens Balma – Basso Cambo.....	278
Tableau 73 : Impact des composantes du temps de parcours pour l'ensemble de la journée, dans le sens Basso Cambo - Balma	279
Tableau 74 : Valeurs des composantes du temps de parcours pour l'ensemble de la journée - Bellefontaine vers Basso Cambo	283
Tableau 75 : Valeurs des composantes du temps de parcours pour l'ensemble de la journée – Argoulets vers Balma Gramont.....	283

Annexes

Annexe : Relations entre les vitesses et les efficacités

Vitesse de révolution : Rapport de la longueur d'une rotation à sa durée (chez les praticiens le terme vitesse d'exploitation est considéré comme synonyme).

Vitesse commerciale : Rapport de la longueur d'une course à son temps de parcours. Cette vitesse n'intègre pas la notion de temps de battement ou temps de retournement contrairement à la notion de vitesse de rotation (le temps de battement peut comporter une dimension sociale).

La relation fondamentale qui lie les paramètres relatifs au nombre de véhicule sur la ligne (**N**), à la durée de révolution (**R**) ainsi qu'à l'intervalle (**I**) est $N = \frac{R}{I}$

Désormais, nous proposons un rapprochement entre les deux types d'efficacité et les deux types de vitesse.

- Rapport entre vitesse de révolution et efficacité productive

Pour expliquer ce premier rapport, nous prenons comme exemple deux situations. Dans le cas de la situation 1, le système de transport offre un intervalle de temps entre deux passages de véhicules de 5 minutes. Le temps pour la réalisation d'une rotation est de 100 minutes. Pour tenir cet intervalle par rapport au temps de rotation, il est nécessaire de mettre en ligne 20 mobiles. Dans la situation 2, le système de transport offre un intervalle de temps entre deux passages de véhicules de 5 minutes. Le temps pour la réalisation d'une rotation est de 95 minutes. Pour tenir cet intervalle par rapport au temps de rotation, il est nécessaire de mettre en ligne 19 mobiles

Situation 1	Situation 2
Avec $N = R/I$	Avec $N = R/I$
N : 20	N : 19
R : 100	R : 95
I : 5	I : 5

Lorsque la vitesse de révolution augmente, le temps pour l'exécution de celle-ci diminue. Par conséquent, il est possible de maintenir une offre avec moins de ressources.

La démonstration ci-dessus illustre deux aspects. Le premier confirme qu'à intervalle constant, le nombre de ressources diminue lorsque le temps de révolution diminue. Le deuxième permet de faire le constat qu'une économie d'une unité de ressource n'est possible que lorsque le gain de temps sur une rotation est supérieur ou égale à la durée d'un intervalle.

Par conséquent, une augmentation de la vitesse de rotation permet d'améliorer l'efficacité productive.

- **Rapport entre vitesse commerciale et efficacité commerciale**

Lorsque la vitesse commerciale augmente, l'attractivité du système de transport augmente. Cela signifie que la fréquentation serait plus importante.

Comme le rappelle B. Faivre d'Arcier (2012), la vitesse commerciale reste un élément clé de l'attractivité des TC comparativement aux autres modes de transport. Cette relation bien connue et mainte fois démontrée par les praticiens est également intégrée aux modèles d'affectation des trafics. Pour un trajet donné, une augmentation de la vitesse commerciale augmente la fréquentation estimée.

Par conséquent, une augmentation de la vitesse commerciale permet d'améliorer l'efficacité commerciale. Pour un nombre de km-véhicules identique, la fréquentation augmente ce qui améliore le ratio du V/K.

Annexe : Présentation du système DIALEXIS

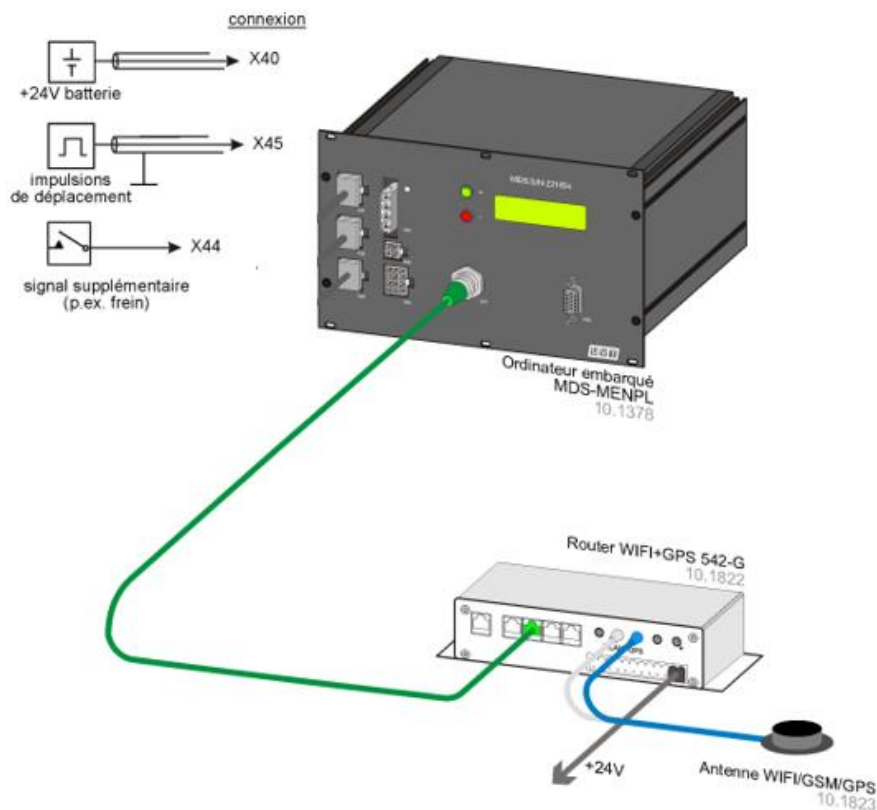
Le système DIALEXIS est un système intégré et autonome. Dans sa version avec transmission des données via le protocole 3G, il est composé de deux boîtiers et une antenne :

- Le MDS (Enregistreur de données)
- Le Routeur 3G
- L'antenne GSM (peut rester à l'intérieur du véhicule)

L'ensemble des impulsions électriques du véhicule sont horodatées et enregistrées dans le MDS. Ensuite, ces données sont transmises automatiquement par 3G. Les données sont ensuite traitées, stockées dans une base de données avant d'être analysées.

Ci-dessous une représentation générale du système.

Schéma général du matériel embarqué



Source UVT

Comme expliqué au point précédent, le système DIALEXIS doit recevoir différentes impulsions électriques du véhicule. Celles-ci correspondent à la description ci-après :

1_Alimentation

* 24 Volt (18...28,5 V)

* MDS alimentée en 24V depuis un convertisseur statique ou la batterie du véhicule.

2_Signal de porte (un signal d'ensemble - somme des portes)

* porte fermée = 0V

* porte ouverte = 24V (18...28,5V)

3_Emetteur d'impulsions

* signal carré (1 à 4 impulsions par mètre)

* tension > 12V (y compris les perturbations)

* niveau bas du signal < 1V (y compris les perturbations)

4_Signal de frein

* frein hors fonction = 0V

* frein actionné = 24V (18...28,5V)

* frein correspond au contact de frein sur le manipulateur.

Une fois la sol, les données sont traitées par le logiciel DIALEXIS.

Schématisation des couches de la solution DIALEXIS



Source UVT

Annexe : BHNS ligne 4 : Représentation graphique des différentes distributions des composantes du temps de parcours

Nature de la distribution statistique du temps de roulage

Nous constatons que la distribution du temps de roulage est de tendance symétrique. Pour la direction de Porte de Vertou vers Foch (figure 01), les valeurs sont comprises entre 12 minutes et 11 secondes et 16 minutes 58 secondes.

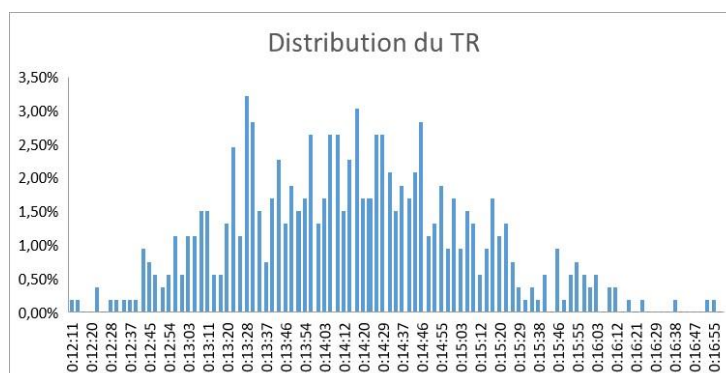


Figure 01 : Distribution du temps de roulage de Porte de Vertou vers Foch

Source : Auteur

Pour la direction de Foch vers Porte de Vertou (figure 02), les valeurs sont comprises entre 11 minutes et 55 secondes et 16 minutes 11 secondes.

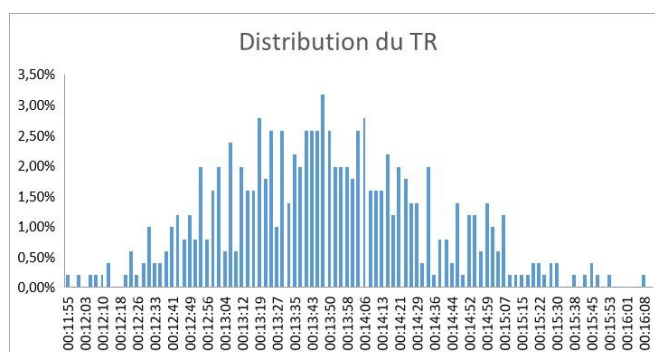


Figure 02 : Distribution du temps de roulage de Foch vers Porte de Vertou

Source : Auteur

Nature de la distribution statistique du temps d'échange passagers

Nous constatons que la distribution du temps d'échange des passagers est de tendance symétrique (figures 03 et 04).

Pour la direction de Porte de Vertou vers Foch, les valeurs sont comprises entre 57 secondes et 7 minutes 19 secondes. Pour la direction de Foch vers Porte de Vertou, les valeurs sont comprises entre 7 secondes et 7 minutes et 59 secondes.

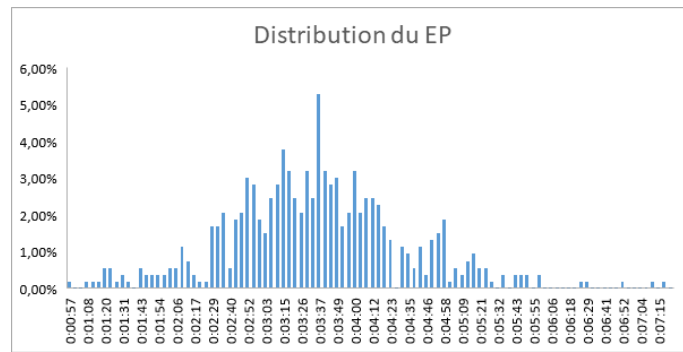


Figure 03 : Distribution du temps d'échange passagers de Porte de Vertou vers Foch

Source : Auteur

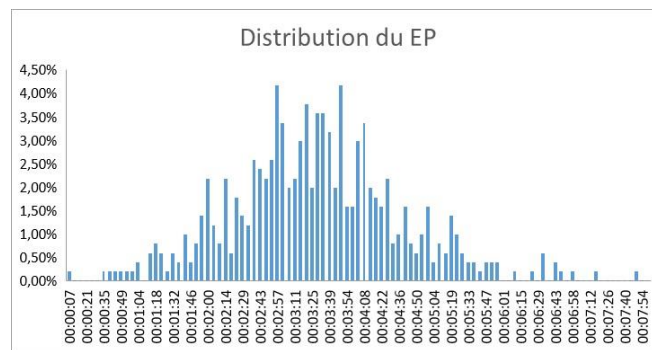


Figure 04 : Distribution du temps d'échange passagers de Foch vers Porte de Vertou

Source : Auteur

Nature de la distribution statistique du temps d'attente en station (figures 05 et 06)

Nous constatons que la distribution du temps d'attente en station est de tendance asymétrique. Pour la direction de Porte de Vertou vers Foch, les valeurs sont comprises entre 10 secondes et 1 minutes 56 secondes. Pour la direction de Foch vers Porte de Vertou, les valeurs sont comprises entre 8 secondes et 2 minutes et 3 secondes.

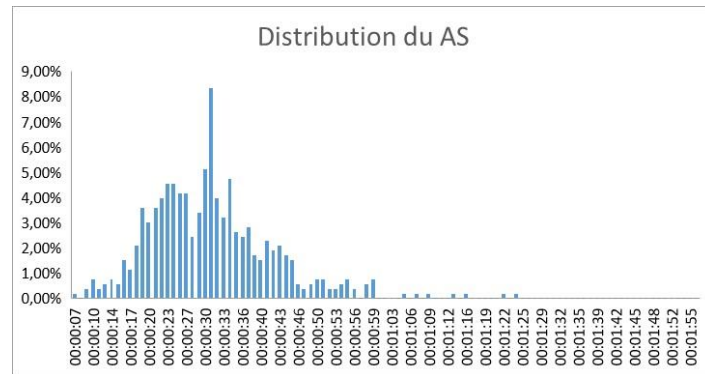


Figure 05 : Distribution du temps d'attente en station de Porte de Vertou vers Foch

Source : Auteur

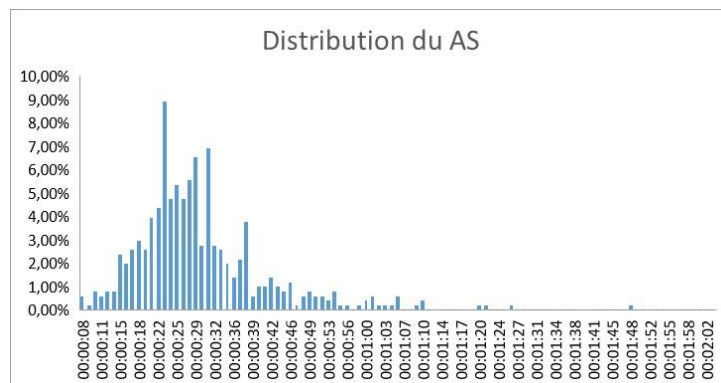


Figure 06 : Distribution du temps d'attente en station de Foch vers Porte de Vertou

Source : Auteur

Nature de la distribution statistique du temps d'attente aux feux (figures 07 et 08)

Nous constatons que la distribution du temps d'attente aux feux est de tendance asymétrique. Pour la direction de Porte de Vertou vers Foch, les valeurs sont comprises entre 8 secondes et 03 minutes 43 secondes. Pour la direction de Foch vers Porte de Vertou, les valeurs sont comprises entre 12 secondes et 2 minutes et 34 secondes.

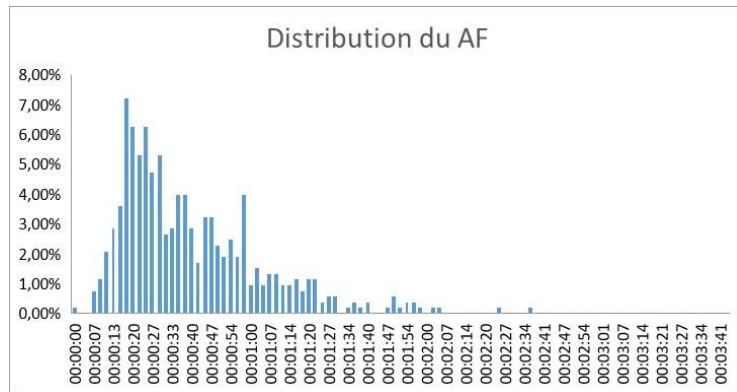


Figure 07 : Distribution du temps d'attente aux feux de Porte de Vertou vers Foch

Source : Auteur

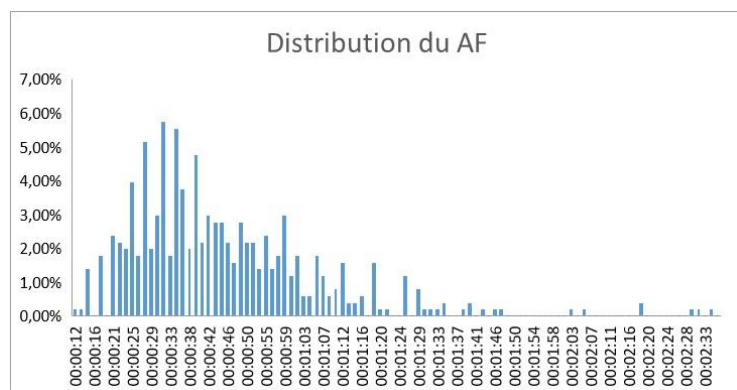


Figure 08 : Distribution du temps d'attente aux feux de Foch vers Porte de Vertou

Source : Auteur

Nature de la distribution statistique du temps d'attente aux points singuliers (figures 09 et 10)

Nous constatons que la distribution du temps d'attente aux points singuliers est de tendance asymétrique.

Pour la direction de Porte de Vertou vers Foch, les valeurs sont toutes égales à zéro. Pour la direction de Foch vers Porte de Vertou, les valeurs sont comprises entre 0 secondes et 2 minutes et 02 secondes.

Distribution du temps d'attente en ligne de Porte de Vertou vers Foch

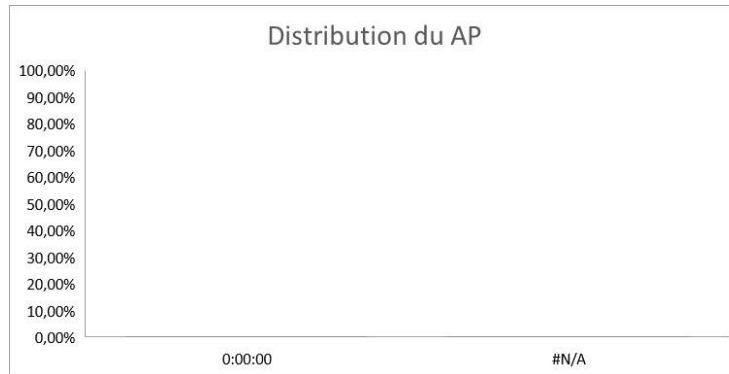


Figure 09 : Distribution du temps d'attente en ligne de Porte de Vertou vers Foch

Source : Auteur

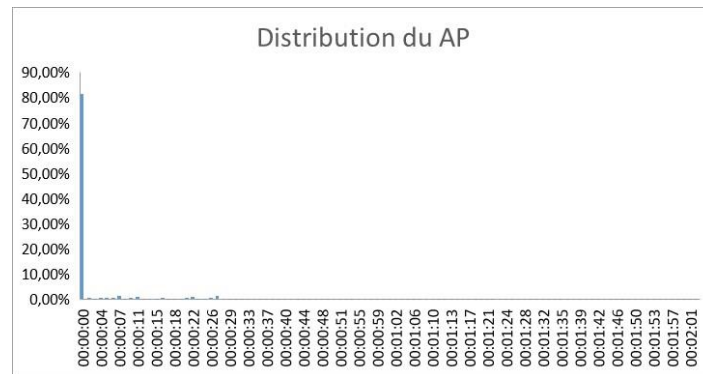


Figure 10 : Distribution du temps d'attente en ligne de Foch vers Porte de Vertou

Source : Auteur

Nature de la distribution statistique du temps d'attente en ligne (figures 11 et 12)

Nous constatons que la distribution du temps d'attente en ligne est de tendance asymétrique. Pour la direction de Porte de Vertou vers Foch, les valeurs sont comprises entre 0 secondes et 01 minutes 47 secondes. Pour la direction de Foch vers Porte de Vertou, les valeurs sont comprises entre 0 et 24 secondes.

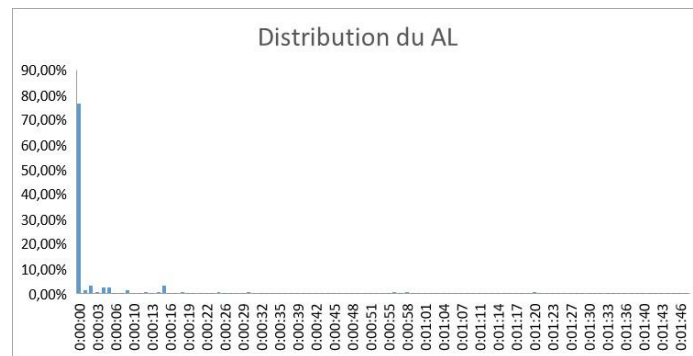


Figure 11 : Distribution du temps d'attente en ligne de Porte de Vertou vers Foch

Source : Auteur

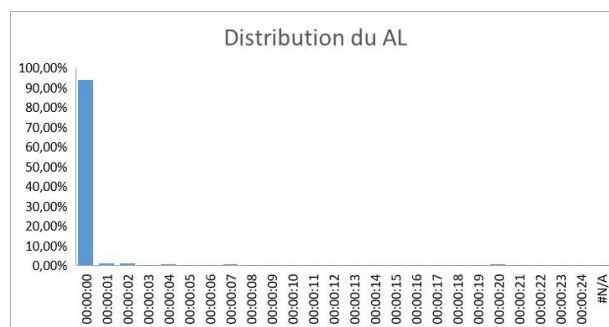


Figure 12 : Distribution du temps d'attente en ligne de Foch vers Porte de Vertou

Source : Auteur

Annexe : Tramway ligne 1 : Représentation graphique des différentes distributions des composantes du temps de parcours

Nature de la distribution statistique du temps de roulage (figures 1 et 2)

Nous constatons que la distribution du temps de roulage est de tendance symétrique. Pour la direction de Mosson vers Odysseum, les valeurs sont comprises entre 35 minutes et 1 secondes et 45 minutes 46 secondes. Pour la direction d'Odysseum vers Mosson, les valeurs sont comprises entre 35 minutes et 15 secondes et 50 minutes 25 secondes.

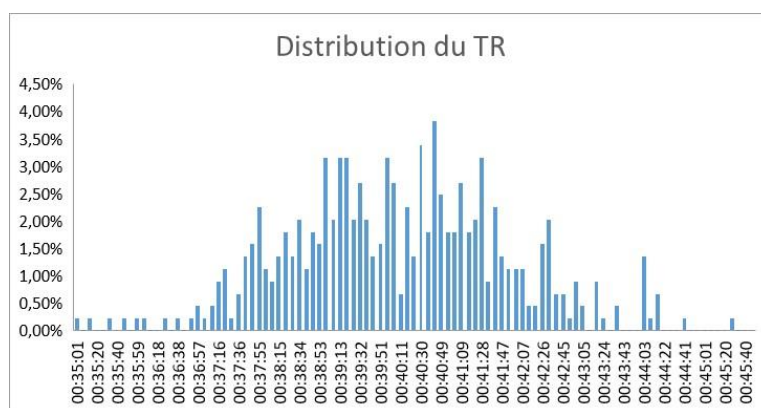


Figure 135 : Distribution du temps de roulage de Mosson vers Odysseum

Source : Auteur

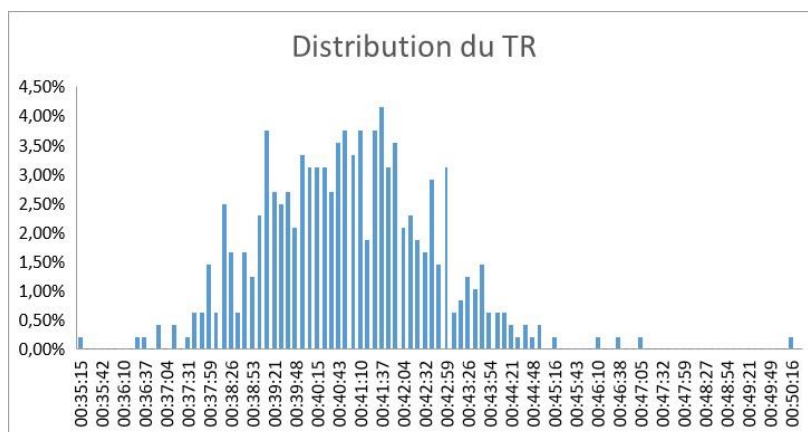


Figure 136 : Distribution du temps de roulage d'Odysseum vers Mosson

Source : Auteur

Nature de la distribution statistique du temps d'échange passagers (figures 3 et 4)

Nous constatons que la distribution du temps d'échange des passagers est de tendance symétrique. Pour la direction de Mosson vers Odysseum, les valeurs sont comprises entre 3 minutes 58 secondes et 13 minutes 19 secondes. Pour la direction d'Odysseum vers Mosson, les valeurs sont comprises entre 4 minutes 21 secondes et 12 minutes 58 secondes.

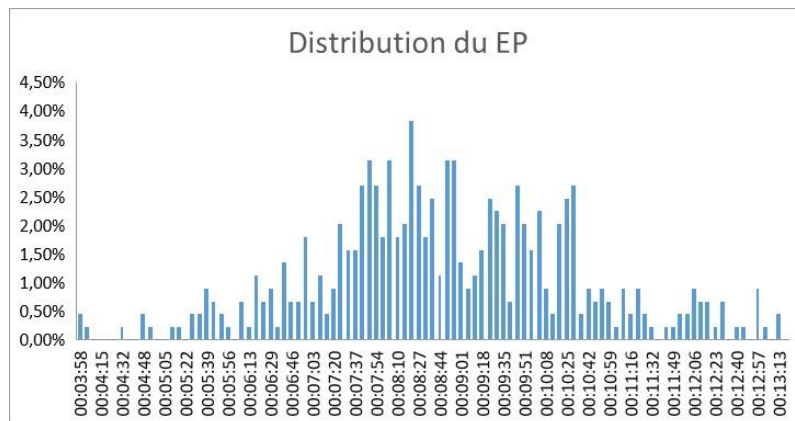


Figure 137 : Distribution du temps d'échange passagers de Mosson vers Odysseum

Source : Auteur

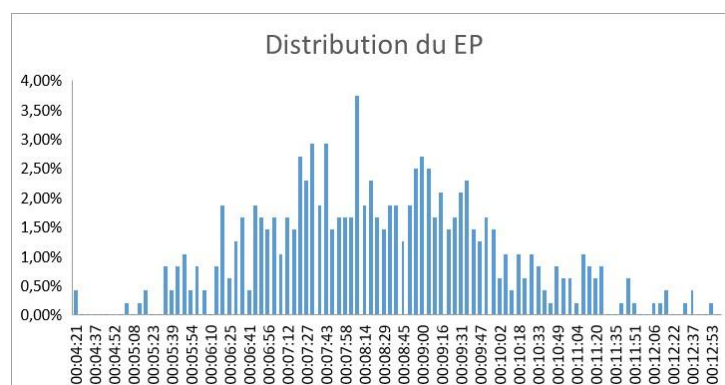


Figure 138 : Distribution du temps d'échange passagers d'Odysseum vers Mosson

Source : Auteur

Nature de la distribution statistique du temps d'attente en station (figures 5 et 6)

Nous constatons que la distribution du temps d'attente en station est de tendance asymétrique. Pour la direction de Mosson vers Odysseum, les valeurs sont comprises entre 1 minutes 59 secondes et 6 minutes 42 secondes. Pour la direction d'Odysseum vers Mosson, les valeurs sont comprises entre 1 minutes 50 secondes et 4 minutes 20 secondes.

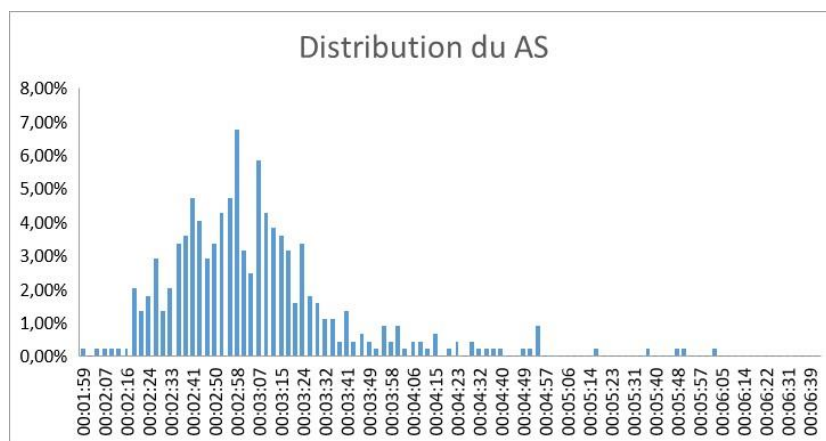


Figure 139 : Distribution du temps d'attente en station de Mosson vers Odysseum

Source : Auteur

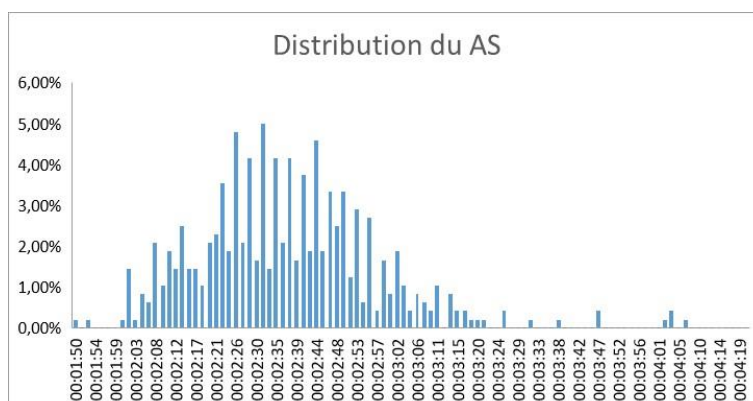


Figure 140 : Distribution du temps d'attente en station d'Odysseum vers Mosson

Source : Auteur

Nature de la distribution statistique du temps d'attente aux feux (figures 7 et 8)

Nous constatons que la distribution du temps d'attente aux feux est de tendance asymétrique. Pour la direction de Mosson vers Odysseum, les valeurs sont comprises entre 46 secondes et 6 minutes 33 secondes. Pour la direction d'Odysseum vers Mosson, les valeurs sont comprises entre 56 secondes et 4 minutes 49 secondes.

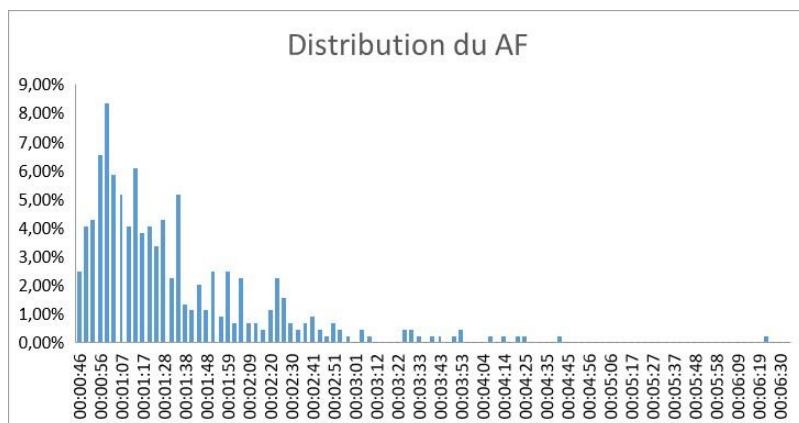


Figure 141 : Distribution du temps d'attente aux feux de Mosson vers Odysseum

Source : Auteur

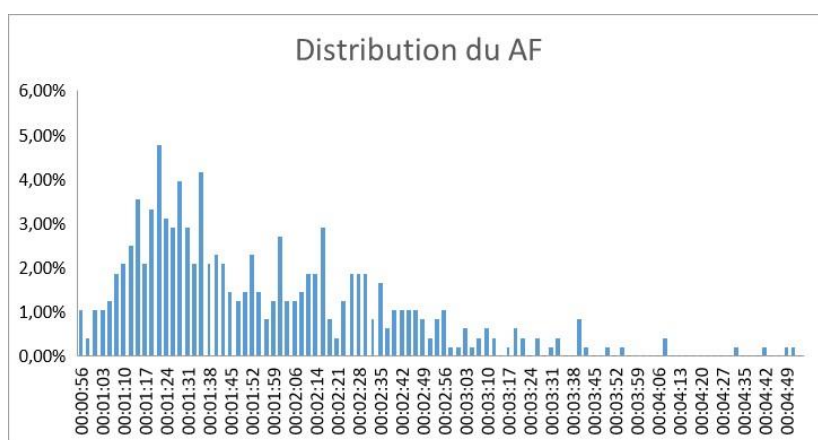


Figure 142 : Distribution du temps d'attente aux feux d'Odysseum vers Mosson

Source : Auteur

Nature de la distribution statistique du temps d'attente aux points singuliers (figures 9 et 10)

Nous constatons que la distribution du temps d'attente aux points singuliers est de tendance asymétrique.

Pour la direction de Mosson vers Odysseum, les valeurs sont comprises entre zéro et 1 minutes 55 secondes. Pour la direction d'Odysseum vers Mosson, les valeurs sont comprises entre zéro et 4 minutes 21 secondes. La série statistique de la direction de Mosson vers Odysseum comprend beaucoup plus de valeurs à zéro que la direction opposée.

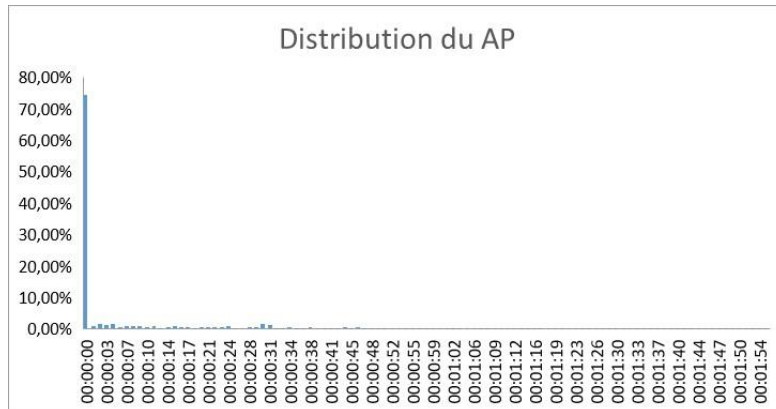


Figure 143 : Distribution du temps d'attente aux points de Mosson vers Odysseum

Source : Auteur

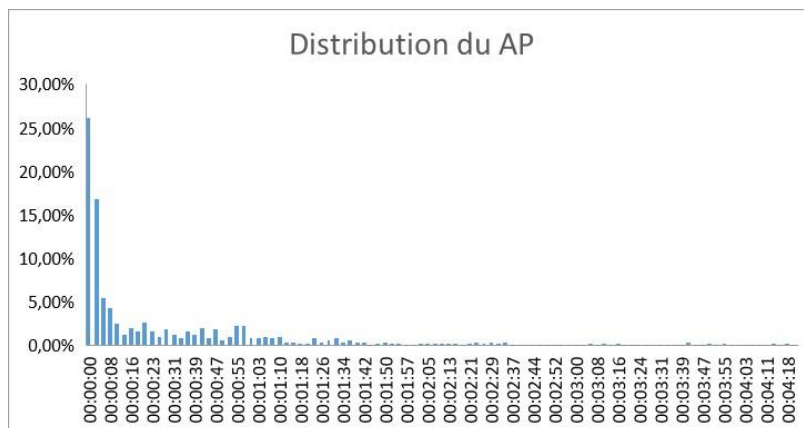


Figure 144 : Distribution du temps d'attente aux points d'Odysseum vers Mosson

Source : Auteur

Nature de la distribution statistique du temps d'attente en ligne (figures 11 et 12)

Nous constatons que la distribution du temps d'attente en ligne est de tendance asymétrique. Pour la direction de Mosson vers Odysseum, les valeurs sont comprises entre zéro et 2 minutes 49 secondes. Pour la direction d'Odysseum vers Mosson, les valeurs sont comprises entre zéro et 1 minutes 8 secondes.

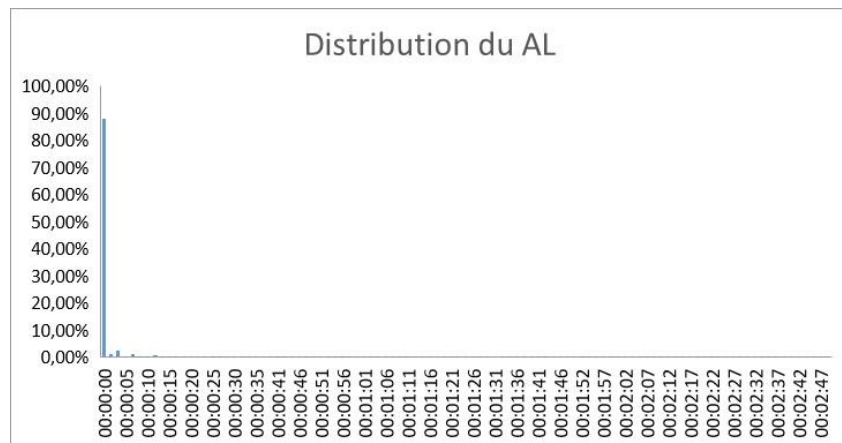


Figure 145 : Distribution du temps d'attente en ligne de Mosson vers Odysseum

Source : Auteur

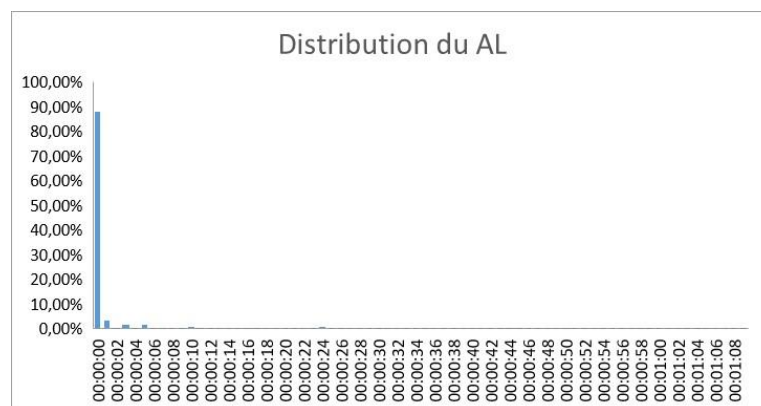


Figure 146 : Distribution du temps d'attente en ligne d'Odysseum vers Mosson

Source : Auteur

Annexe : VAL ligne A : Représentation graphique des différentes distributions des composantes du temps de parcours

Nature de la distribution statistique du temps de roulage (figures 13 et 14)

Nous constatons que la distribution du temps de roulage est de tendance symétrique. Pour la direction de Balma Gramont vers Basso Cambo, les valeurs sont comprises entre 14 minutes 24 secondes et 16 minutes et 49 secondes.

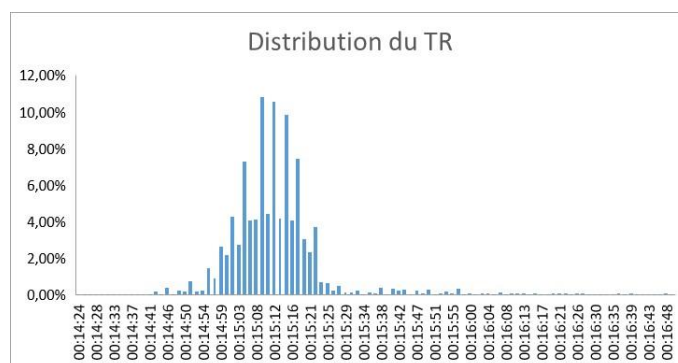


Figure 147: Distribution du temps de roulage Balma Gramont vers Basso Cambo

Source : Auteur

Pour la direction entre Basso Cambo et Balma Gramont, les valeurs sont comprises entre 14 minutes 34 secondes et 18 minutes et 2 secondes.

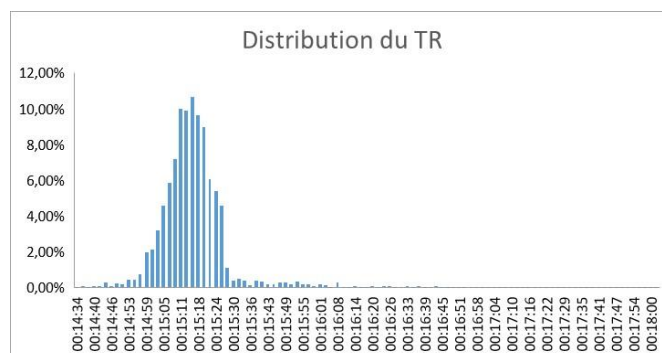


Figure 148 : Distribution du temps de roulage de Basso Cambo vers Balma Gramont

Source : Auteur

Nature de la distribution statistique du l'échange passagers (figures 15 et 16)

Nous constatons que la distribution de l'échange passagers est de tendance symétrique. Pour la direction de Balma Gramont vers Basso Combo, les valeurs sont comprises entre 4 minutes 13 secondes et 9 minutes et 29 secondes.

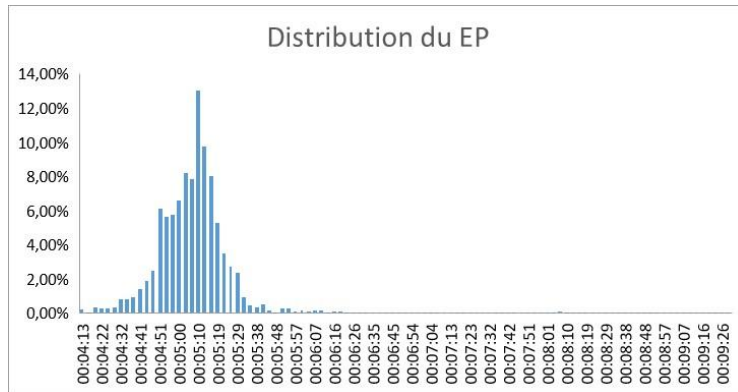


Figure 149 : Distribution de l'échange passagers de Balma Gramont vers Basso Combo

Source : Auteur

Pour la direction entre Basso Combo et Balma Gramont, les valeurs sont comprises entre 4 minutes 6 secondes et 8 minutes et 9 secondes.

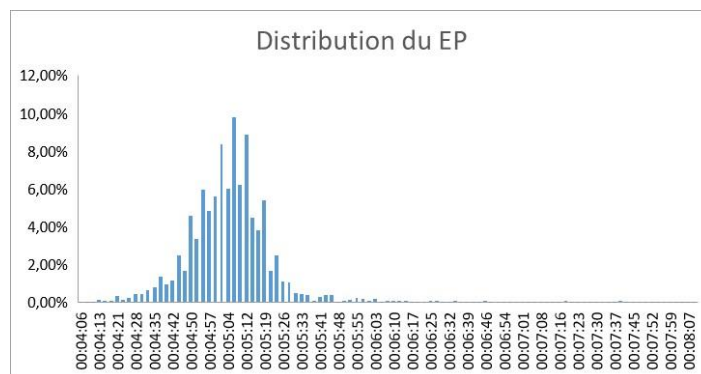


Figure 150 : Distribution de l'échange passagers de Basso Combo vers Balma Gramont

Source : Auteur

Nature de la distribution statistique de l'attente en station (figures 17 et 18)

Nous constatons que la distribution du temps d'attente en station est de tendance asymétrique. Pour la direction de Balma Gramont vers Basso Cambo, les valeurs sont comprises entre 2 minutes 5 secondes et 4 minutes et 9 secondes.

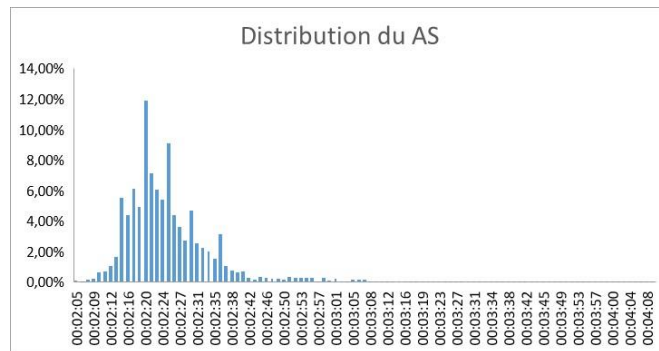


Figure 151 : Distribution de l'attente en station de Balma Gramont vs Basso Cambo

Source : Auteur

Pour la direction entre Basso Cambo et Balma Gramont, les valeurs sont comprises entre 2 minutes 6 secondes et 3 minutes et 17 secondes.

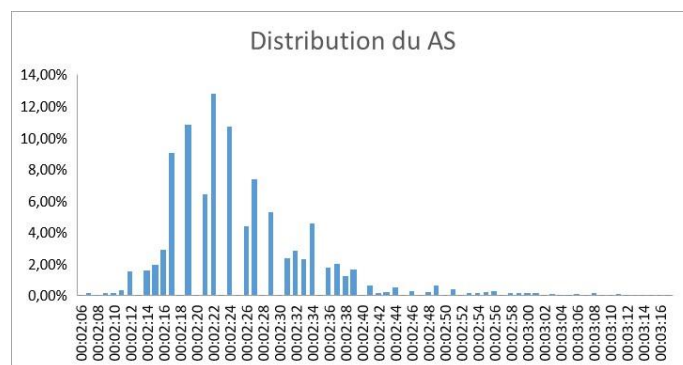
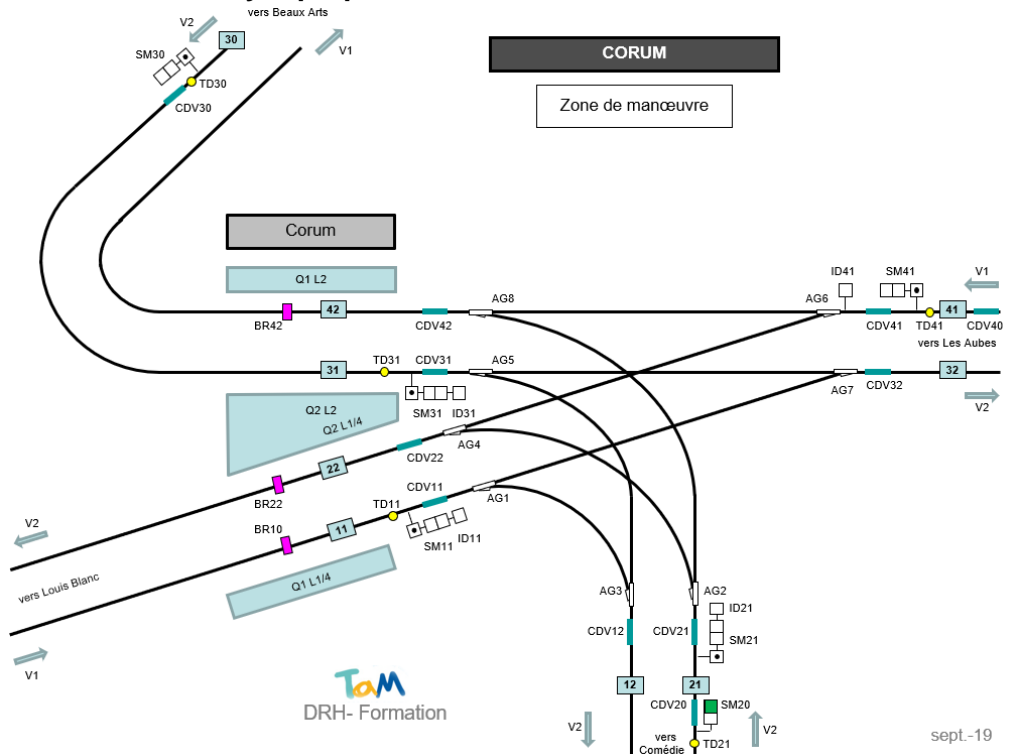


Figure 152 : Distribution de l'attente en station de Basso Cambo vers Balma Gramont

Source : Auteur

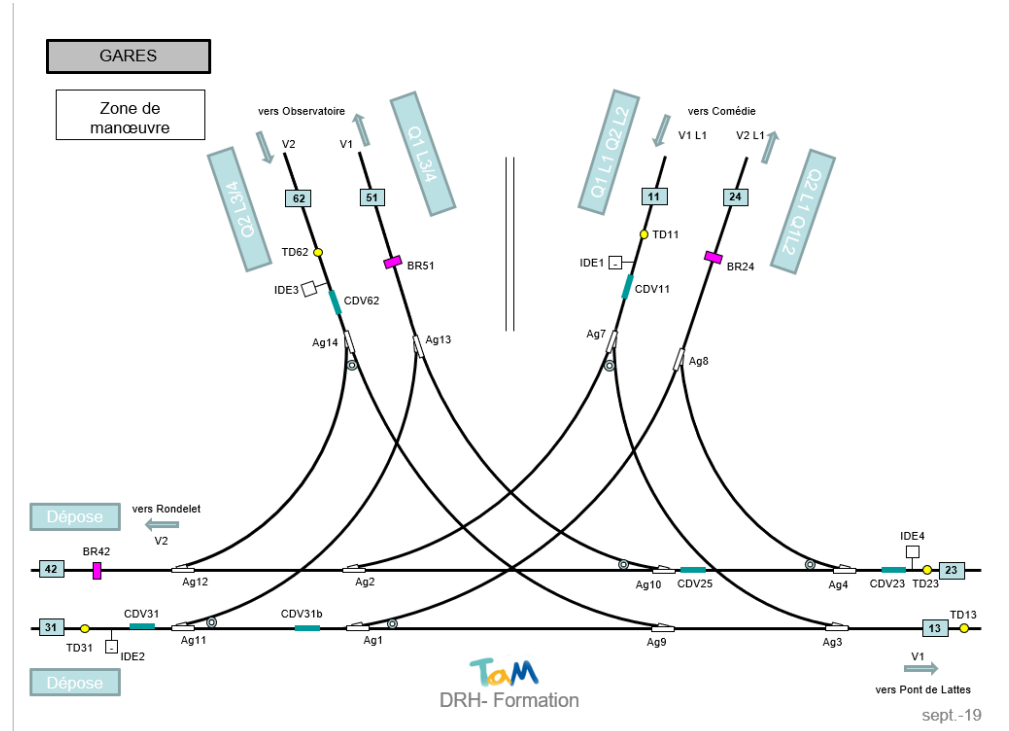
Annexe : Plans des voies de Corum et Gare St-Roch du réseau de tramways de Montpellier

Synoptique des voies à la station Corum



Source : TaM

Synoptique des voies à la station Gare St-Roch



Source : TaM